

# 航空工程建设

AERO-INDUSTRY ENGINEERING CONSTRUCTION

2020年第6期 总第152期



主管单位 中国航空工业集团有限公司  
业务指导 中国航空工业建设协会  
编印单位 中国航空规划设计研究总院有限公司

内部资料 免费交流  
准印证号：京内资准字9920-L0337号

## 南通新机场临空经济区及家纺商贸城系列规划

**项目名称：**南通新机场临空经济区及家纺商贸城系列规划

**设计单位：**中航建投综合规划研究院

以上海第三机场落户南通及我国国土空间规划体制改革为契机，我司综合规划研究院全面参与了南通市新机场规划设计及镇级国土空间规划相关工作，先后承接中国南通国际家纺商贸城国土空间总体规划（2020—2035年）、南通新机场临空经济区总体规划研究（2020—2035年）、中国南通国际家纺商贸城控制性详细规划及重点片区城市设计、南通市通州区二甲镇国土空间总体规划等相关项目。

在临空经济区总体规划工作过程中，工作团队积极协调机场选址及初步设计相关的众多部门及设计机构，在切实推动南通新机场落地工作的同时，统筹谋划南通市机场片区未来发展。规划重点研究解决了上海三所机场未来协同发展问题、发挥新机场赋能价值问题及谋划落地可行的空间方案问题，以“长三角北翼门户空港、国际化产业开放高地、临空型活力枢纽新城”为总体目标，构建了港产城融合发展的规划策略及方案。

在南通家纺商贸城系列规划工作过程中，工作团队贯彻生态文明建设时期的新发展理念，以处理好城市生产生活和生态环境保护的关系为出发点，科学合理地规划南通家纺城的生产空间、生活空间、生态空间。项目通过着重研究家纺城与临空片区的协同发展问题、家纺产业提升发展问题及家纺城片区统筹提质问题，落实国土空间相关指标，构建了连贯安全的生态空间、具有水网特色的农业空间以及集约高效的城镇空间。



## 建设工程企业资质管理制度改革方案出炉

住建部日前印发《建设工程企业资质管理制度改革方案》（以下简称《方案》），《方案》提出，持续优化营商环境，大力精简企业资质类别，归并等级设置，简化资质标准，优化审批方式，进一步放宽建筑市场准入限制，降低制度性交易成本，破除制约企业发展的不合理束缚，持续激发市场主体活力，促进就业创业，加快推动建筑业转型升级，实现高质量发展。

《方案》要求，对部分专业划分过细、业务范围相近、市场需求较小的企业资质类别予以合并，对层级过多的资质等级进行归并。改革后，工程勘察资质分为综合资质和专业资质，工程设计资质分为综合资质、行业资质、专业和事务所资质，施工资质分为综合资质、施工总承包资质、专业承包资质和专业作业资质，工程监理资质分为综合资质和专业资质。资质等级原则上压减为甲、乙两级（部分资质只设甲级或不分等级），资质等级压减后，中小企业承揽业务范围将进一步放宽，有利于促进中小企业发展。

《方案》提出，放宽准入限制，激发企业活力。住房和城乡建设部会同国务院有关主管部门制定统一的企业资质标准，大幅精简审批条件，放宽对企业资金、主要人员、工程业绩和技术装备等的考核要求。适当放宽部分资质承揽业务规模上限，多个资质合并的，新资质承揽业务范围相应扩大至整合前各资质许可范围内的业务，尽量减少政府对建筑市场微观活动的直接干预，充分发挥市场在资源配置中的决定性作用。

《方案》强调，加强事中事后监管，保障工程质量安全。坚持放管结合，加大资质审批后的动态监管力度，创新监管方式和手段，全面推行“双随机、一公开”监管方式和“互联网+监管”模式，强化工程建设各方主体责任落实，加大对转包、违法分包、资质挂靠等违法违规行为查处力度，强化事后责任追究，对负有工程质量安全事故责任的企业、人员依法严厉追究法律责任。

《方案》同时要求，健全信用体系，发挥市场机制作用。进一步完善建筑市场信用体系，强化信用信息在工程建设各环节的应用，完善“黑名单”制度，加大对失信行为的惩戒力度。加快推行工程担保和保险制度，进一步发挥市场机制作用，规范工程建设各方主体行为，有效控制工程风险。

（信息来源：《中国勘察设计》）

## 第十四届航空航天月桂奖揭晓

11月18日，由航空工业集团主办，航天科技集团、航天科工集团、中国商飞、中国航发、电子科技集团等联合主办的第十四届航空航天月桂奖颁奖典礼在北京航空航天大学晨兴音乐厅成功举办。

本届航空航天月桂奖得到了工信部、国资委、国家国防科工局、民航局等国家机关、军委科技委及各军兵种的关心和指导，以及各大军工集团、民航企业、航空院校的大力支持。12位获奖人和团队分别获得了“大国工匠”“飞行精英”“英雄无畏”“技术先锋”“领导卓越”“携手合作”“终身奉献”等七项大奖。

获得本届航空航天月桂奖的个人和单位有：航空工业哈飞数控铣工秦世俊与航天科工二院数控铣工曹彦生分别被授予大国工匠奖；中国东方航空公司上海飞行部被授予飞行精英奖；航空工业宏光李军空降空投试跳团队获得英雄无畏奖；长征五号系列火箭总设计师李东和航空工业直升机设计研究所总设计师邓景辉获得技术先锋奖；西北工业大学校长汪劲松与北斗三号卫星总指挥迟军摘得领导卓越奖；中国商飞与中国航空工业捧获携手合作奖；中国工程院院士、中国飞机设计大师陈一坚和中国工程院院士、航空发动机专家尹泽勇被授予了终身奉献奖。

据介绍，值此全国上下深入学习宣传贯彻党的十九届五中全会精神之际，第十四届航空航天月桂奖颁奖典礼的举行，既是对近两年来航空航天领域所取得成绩的回顾与表彰，更是全面贯彻落实五中全会精神，践行新发展理念，推动创新发展实践，彰显科技自立自强作为国家发展的战略支撑，加快建设航空航天强国的生动实践。

航空航天月桂奖创立于2005年，秉承“弘扬行业精神、讴歌骨干精英、探索新知前沿”的“月桂精神”，旨在表彰航空航天人在国家科技发展进步和国防建设过程中所取得的突出成绩和所展现的崇高精神。迄今，航空航天月桂奖成功举办了14届，共有98位个人、29个团队获奖，已成为航空航天领域具有较高社会影响力的行业大奖，得到了业内外人士的普遍认可和广泛赞誉。

（来源：《中国日报》）

## 重庆保税港区空港公园全过程工程咨询项目

建设地点：重庆市

设计单位：中航建投综合规划研究院

重庆保税港区空港公园全过程工程咨询项目工作核心是水土保持生态建设，是我公司以景观为主导专业的创新咨询服务形式的探索和尝试。

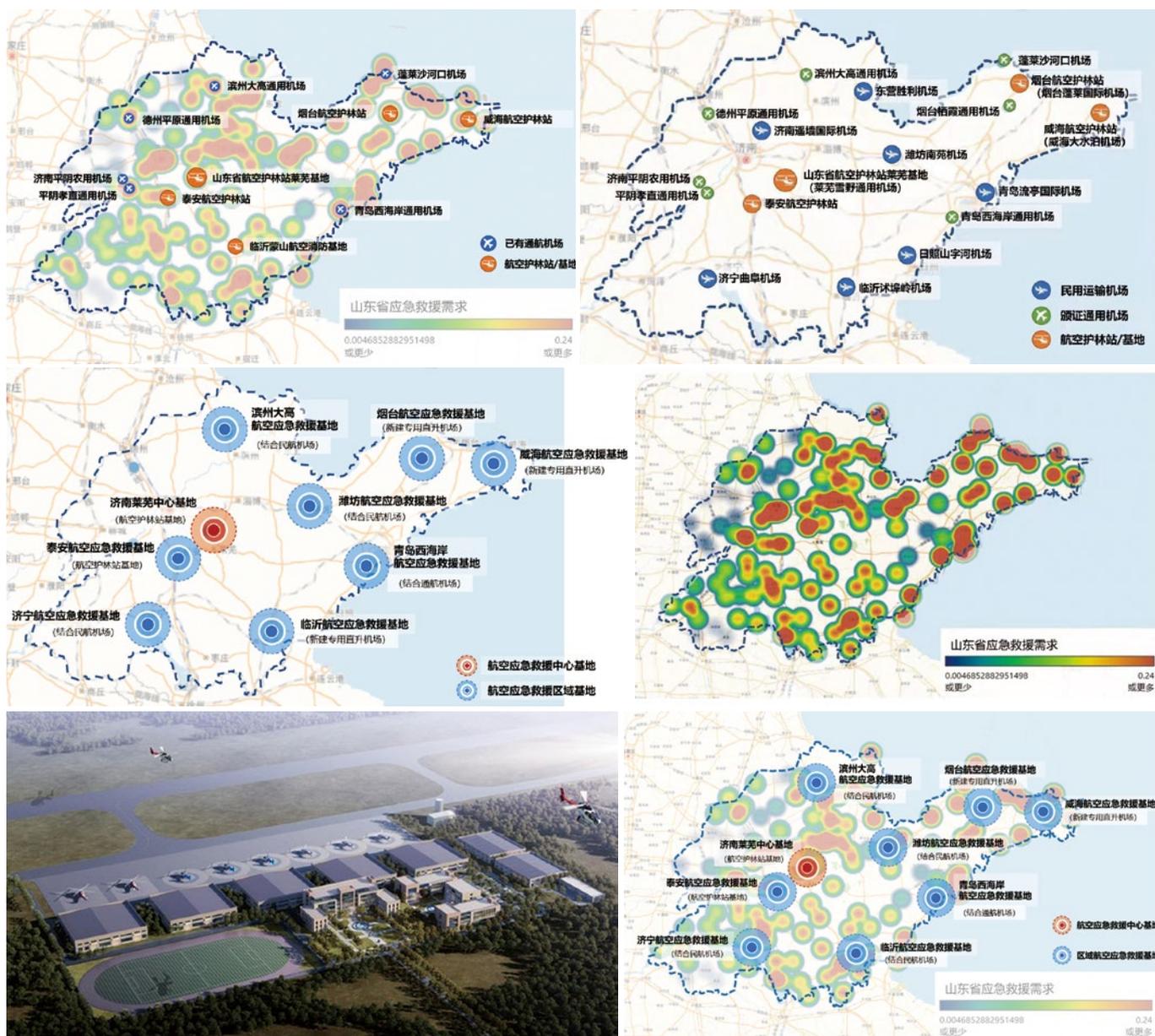
项目位于重庆市江北新区保税港区，规划涵盖港区公园绿地（G1），防护绿地（G2）及广场绿地（G3），总用地面积279ha。空港公园全过程咨询服务内容由可行性研究报告编制、勘察、设计、造价及监理五部分内容构成。项目投资人委托我司牵头组织全过程工程咨询服务团

队，根据工程咨询人的授权范围和内容，履行管理职责，对本项目全过程工程咨询进行全面的协调和管理，并为项目各阶段咨询和全过程提供管理服务和整体解决方案。

项目所在地为滨水峡谷绿带，场地地形高差变化，存在大量边坡和堆砌建筑垃圾，植被毁坏情况严重。设计围绕溪流保护及绿道系统建立展开，遵循因地制宜原则，融入城市双修，景观廊道，海绵城市等设计理念。合理设置景观园路、广场和设施，将空港公园打造为依托河流水系的“四类型、十二景点”（城市休闲、景观展示、科普教育、康体健身4种类型），进一步完善保税港区公园自然生态系统，实现公园系统，水系保护，滨水风貌的融合。

全过程咨询是设计企业核心竞争力和价值的延伸。本项目通过实践，积极探索以市场需求为导向、满足委托方多样化需求的新型咨询服务模式。





## 山东省应急救援航空体系建设总体规划项目

建设地点：山东省

设计单位：中航建投综合规划研究院

航空应急救援作为一个新兴的应急救援手段，具有快速、高效、受地理空间限制少等优势，具有不可替代的重要作用。目前，航空应急救援已经得到了国家各级政府及有关部门越来越高的重视，山东省应急管理厅于2019年7月组建专门的规划编制组开展山东省应急救援航空体系建设规划的编制，以促进应急救援在山东省内的全面开展与长远发展。

《山东省应急救援航空体系建设总体规划》基于对航

空应急救援发展趋势的理解，全面分析了山东省航空应急救援发展现状、发展基础以及全省救援需求，提出了山东省航空应急救援的总体发展思路、发展目标、发展内容、投资概算以及政策保障等内容，对全省应急救援体系的组织领导体系、基础设施网络体系、技术装备体系、救援管理体系、人才队伍体系及社会动员体系等系列规划内容做出了系统性规划。

项目已通过山东省应急管理厅组织的各轮评审，专家级领导肯定了项目编制的内容，认为规划编制布局与保障措施功能定位合理，前瞻性强，技术先进使用，具有可操作性，完善了山东省应急救援体系，对山东省应急救援航空体系建设发展提供了科学合理的建设依据，对应急救援航空体系建设具有积极的推动作用。

## 顺丰白潭湖航空培训中心项目

建设地点：湖北省黄冈市

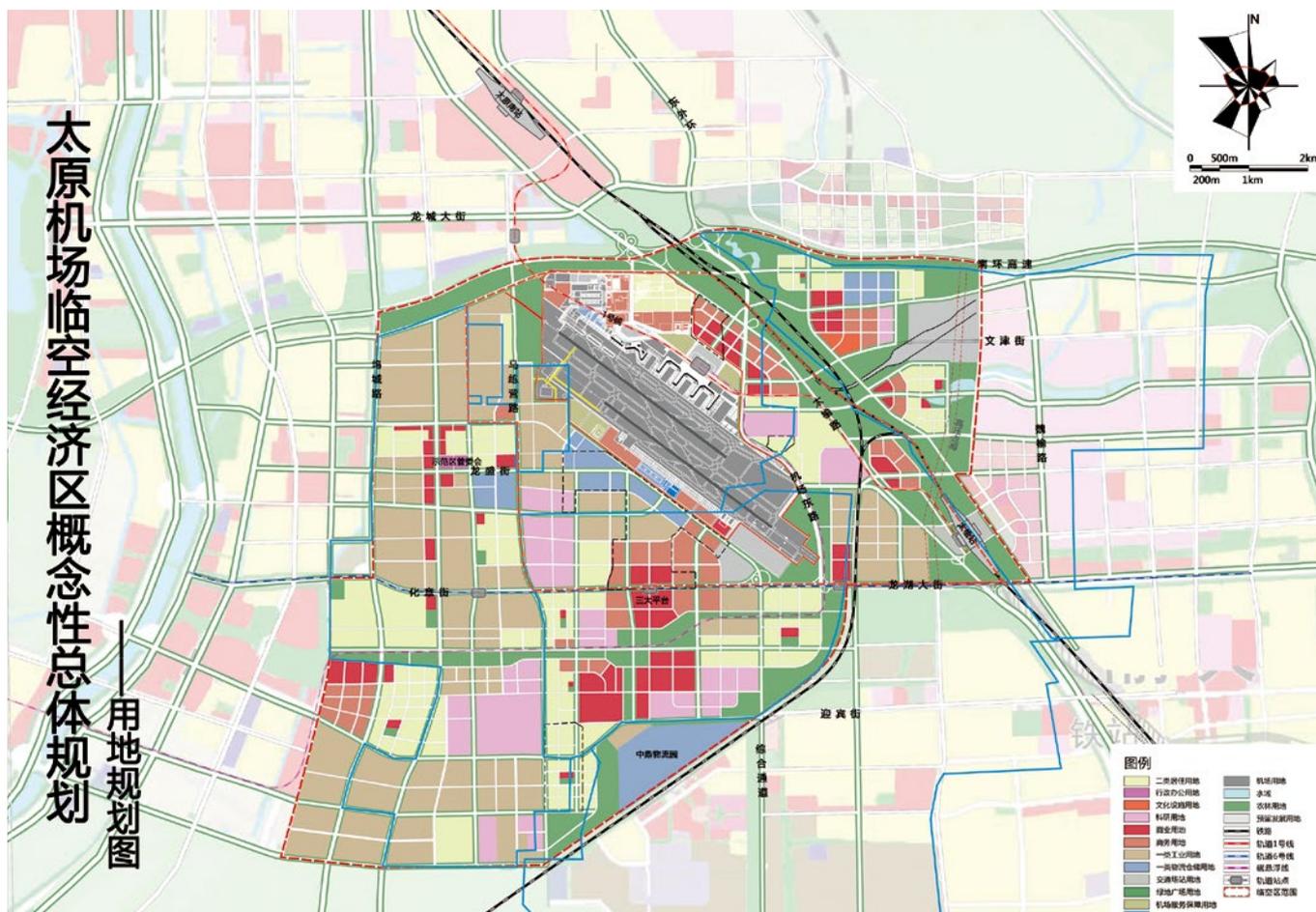
设计单位：中航建投综合规划研究院

顺丰白潭湖航空培训中心项目位于湖北省黄冈市白潭湖新区，距离湖北鄂州机场车程距离20min，规划用地270.84亩，预计总投资8.2亿元。为保障亚洲唯一国际货运机场——鄂州机场2021年顺利开航，顺丰白潭湖航空培训中心应运而生，为机场运行提供人才和生活配套保障，打造集航空培训、行业交流、科研创新、生活休闲于一体的人力智力输出高地，成为我国航母级货运企业的人才摇篮。

项目的策划工作深度覆盖可行性研究、概念规划，通过产业研究、市场分析、产品策划、规模测算、空间布局、工艺要求、财务分析等全过程咨询，输出精准的项目设计任务书，直接指导工程设计。在产业层面，对民航人才培养、飞行、机务等航空培训模式，航空培训市场供需进行体系化梳理，预测产业规模为建设方案提供数据支撑；在空间层面，通过研究对标案例、深挖使用方需求，设计合理的开发强度、交通流线，通过工艺整合和户型创新，设计经济、实用且美观的培训中心和生活配套产品。

中航建投综合规划研究院与民航工程设计研究院集合多个专业的技术人员，在3个月的时间里鼎力合作，共同完成项目策划工作，为民航工程设计研究院“顺丰航空基地宿舍楼设计项目”顺利中标奠定了良好的商务基础。





## 太原临空经济区概念性总体规划项目

建设地点：山西省太原市

设计单位：中航建投综合规划研究院

建设“资源型经济转型发展示范区”、打造“能源革命排头兵”和构建“内陆地区对外开放新高地”是山西省目前发展的三大战略目标。而依托于武宿机场建设的太原临空经济区是山西省对外开放的高地的门户、是山西省转型发展的新引擎。太原临空经济区将以太原武宿机场三期改扩建为发展契机，整合机场周边的经开区、大学城、科创城等优势资源，借力国家、山西省给予的转型发展政策和临空经济的内生动力，打造引领太原经济快速发展的新磁极。

太原临空经济区总规划面积115km<sup>2</sup>，其中包含了由山西航空产业集团运营管控的以航空运输为核心的空港核心区及由山西通航集团运营建设的山西通用航空产业园两大功能组团，是山西省综合改革示范区与山西航空产业集团、山西通航集团等多部门单位共同推进引领的发展改革试验区。



太原临空经济区规划为山西省综合改革示范区、山西航产集团这两个机场红线内外的管理单位建立了沟通平台，为唐槐产业园、科技创新城、大学城以及山西通航产业园等实体园区的顶层统筹提供了管理基础，也是航空工业建投山西平台公司与山西地方政府深度合作的重要平台。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《木结构现场检测技术标准》的公告

现批准《木结构现场检测技术标准》为行业标准，编号为JGJ/T488-2020，自2020年11月1日起实施。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑出版传媒有限公司出版发行。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《建筑结构风振控制技术标准》的公告

现批准《建筑结构风振控制技术标准》为行业标准，编号为JGJ/T487-2020，自2020年11月1日起实施。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑出版传媒有限公司出版发行。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《高强度钢结构设计标准》的公告

现批准《高强度钢结构设计标准》为行业标准，编号为JGJ/T483-2020，自2020年10月1日起实施。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑出版传媒有限公司出版发行。

## 住房和城乡建设部关于发布国家标准《特种气体系统工程技术标准》的公告

现批准《特种气体系统工程技术标准》为国家标准，编号为GB50646-2020，自2020年10月1日起实施。其中，第3.1.5（1、2）、3.1.6、3.2.5、3.2.6、3.2.7、3.3.7、3.3.8、4.2.1（2、5、6）、4.3.1、4.4.4、4.4.7、5.2.1（1、2、3、4、5）、5.2.3（1、2、3）、5.2.6、5.4.5、6.1.3、6.1.4、6.2.6、7.2.1、7.2.9、9.1.3、9.2.5、9.2.6（1）、9.3.2、9.3.15、9.3.17、10.6.2（7）、10.7.2条（款）为强制性条文，必须严格执行。原国家标准《特种气体系统工程技术规范》（GB50646-2011）同时废止。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《乡镇集贸市场规划设计标准》的公告

现批准《乡镇集贸市场规划设计标准》为行业标准，编号为CJJ/T87-2020，自2020年10月1日起实施。原行业标准《乡镇集贸市场规划设计标准》（CJJ/T87-2000）同时废止。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑出版传媒有限公司出版发行。

## 住房和城乡建设部关于发布国家标准《城镇燃气设计规范》局部修订的公告

现批准《城镇燃气设计规范》（GB50028-2006）局部修订的条文，自2020年6月1日起实施。经此次修改的原条文同时废止。

现批准《城镇燃气设计规范》（GB50028-2006）局部修订的条文，自2020年6月1日起实施。经此次修改的原条文同时废止。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《建筑给水金属管道工程技术标准》的公告

现批准《建筑给水金属管道工程技术标准》为行业标准，编号为CJJ/T154-2020，自2020年10月1日起实施。原《建筑给水金属管道工程技术规程》（CJJ/T154-2011）同时废止。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑出版传媒有限公司出版发行。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《蒸压加气混凝土制品应用技术标准》的公告

现批准《蒸压加气混凝土制品应用技术标准》为行业标准，编号为JGJ/T17-2020，自2020年10月1日起实施。原行业标准《蒸压加气混凝土建筑应用技术规程》（JGJ/T17-2008）同时废止。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑出版传媒有限公司出版发行。

（来源“国家工程建设标准化信息网”）



主管单位 中国航空工业集团公司  
业务指导 中国航空工业建设协会  
编印单位 中国航空规划设计研究总院有限公司

#### 顾问委员会

主任 李平  
副主任 廉大为  
委员 (按姓氏笔画排序)  
王伟 刘晋忠 李世民  
陈远明 张忠良 杨锐  
周训文 周凯 贺沂  
张继超 常洪亮 梁相文

#### 编辑委员会

主任 沈金龙  
副主任 米敬明 刘国新  
委员 (按姓氏笔画排序)  
卜国磊 王玉平 王锋  
王笃礼 刘景灏 李纲  
肖武 张卫才 张立峰  
陈阳 陈丹瑚 金来建  
黄春晖 贺宏斌 葛家琪  
傅绍辉 谢启良 谢哲明

总编 沈金龙  
主编 陈海风  
执行主编 王蕊  
责任编辑 范蕊  
出版 《航空工程建设》编辑部  
地址 北京德外大街12号  
邮编 100120  
E-mail hkgejs@avic-apc.com  
印刷单位 北京华美昌信印刷设计有限公司  
发送对象 公司内部及本系统内部  
印刷日期 2020年12月  
印数 1500册  
电话 (010)62038235  
传真 (010)62038297  
封面 南通新机场临空经济区及家纺商贸城系列规划

# CONTENTS

## 目录 2020年第6期 总第152期

### 航空能力建设

02 干式自动喷漆生产线的设计应用 虞思琦 余璐

### 研究与探讨

06 地铁规划建设过程若干文物防振保护技术研究

马伯涛 葛家琪 张曼生 田学帅

13 成都淮州新城国际会展中心复杂钢结构设计

樊钦鑫 谢军 贾雨萌 刘宇轩

22 援毛里塔尼亚生物安全实验室及配套工程给排水设计要点分析

陈达 李力军

27 仓库型特殊应用喷头在自喷系统设计中的应用体会 张舰艇

30 某综合医院暖通空调系统设计

安玉双 孟凡兵 常文权 刘鑫

35 广东某垃圾发电厂职业病危害现状分析 张明婷 肖政

41 后工业时代基于人文关怀的工业建筑设计策略探讨 吴方晓

47 两通高阻恒温阀在散热器供暖系统中的应用分析

申剑 张欣然

53 一种航空发动机进气温度畸变发生模拟系统设计研究

徐月 王娜

57 薄壁结构法兰螺栓连接密封特性研究 刘海月 张戈

61 总目录

# 干式自动喷漆生产线的设计应用

■ 虞思琦 余璐 [工艺]

**摘要:** 根据桨叶零件喷漆工艺特点, 本文提出了干式自动喷漆室的设计方案, 并对比常见的湿式喷漆设备, 阐明干式喷漆室设计要点, 对航空类零件喷漆工段的优化设计具有一定的参考价值。

**关键词:** 喷漆生产线; 工业用干式; 喷漆室; 自动化生产

## 1 问题的提出

随着航空工业的发展, 对于零件喷漆过程中产生的漆雾等有害物质的收集、后续处理以及达标排放, 在工业生产过程中日趋完善。同时, 针对不同零件、不同的工艺特点开发出了与之配套的喷漆室以满足相应的生产要求。但目前仍存在一些现象: 工厂在生产过程中, 临时安排一个封闭式车间或开放式工段作为零件喷涂的作业场所进行人工作业。在人工喷漆过程中, 厂房由于缺乏相应的送排风装置, 使得空气气流组织无法形成, 故而无法对有害漆雾进行有效的收集。这种粗放的作业生产模式不仅影响到工人的健康, 也无法保证产品的外观质量。

## 2 工艺流程和设计思路

为解决上述问题, 提高生产效率, 保证绿色工业生产, 不少工厂采用干式喷漆与自动化生产

相结合的方式。工业用干式自动喷漆室的设计首先根据喷涂零件的特点、加工零件数量, 依照生产工艺要求, 同时考虑不同工序时零件对环境温湿度、洁净程度等要求, 并针对现有厂房大小、进出物流等情况进行设计。

### 2.1 零件特点、工艺流程

某直升机桨叶类零件长约6m, 重约50kg, 由上蒙皮、下蒙皮、泡沫芯、接头、支座等部分组成。主体结构由零组件组合模压固化而成, 然后经过一系列胶接装配、检测调整、喷漆等工序最终达到交付状态。

该桨叶类零件生产对零件表面质量要求较高, 尤其对于包装发运交付前的喷漆工序, 外形公差不得超过 $\pm 0.2\text{mm}$ , 且工艺流程较为复杂, 在喷漆过程中需要反复经过清洗、打磨、刮腻子、烘干等加工工序, 其喷漆生产工艺流程如下:

喷漆前零件安装、固定→零件表面打磨清理→喷漆→干燥→打磨→腻子清洗→刮腻子→打磨→喷漆(自动/手动)→烘干→零件检验。

根据上述直升机桨叶类零件喷漆工艺流程, 一个零件完成喷漆作业需进行打磨工序5次, 刮腻子工序2次, 自动喷漆工序3次, 手动喷漆工序

作者简介: 虞思琦, 女, 助理工程师, 2018年毕业于西北工业大学材料加工专业, 现就职于航空工业规划飞机工程事业部。

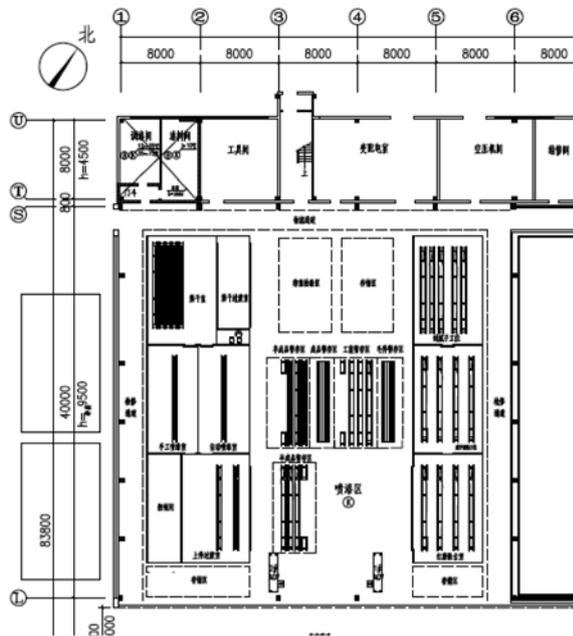


图1 喷漆区工艺布置图(1~6轴、L~U轴为喷漆区)

1次,漆膜烘干3次,故将喷漆工段大致分为6个室体:分别是打磨除尘室、刮腻子室、腻子清洗室、喷漆过滤室、喷漆室、烘干室。考虑到现有厂房喷漆工段面积设计喷漆房,该套设备主要包括室体、送排风系统、过滤系统、活性炭吸附装置(根据废气浓度可选)、安全消防系统和电控系统等部分组成。

## 2.2 厂房喷漆工段设计

根据该桨叶零件尺寸,考虑工作台尺寸、工人操作范围以及AGV小车等放置空间,设计单个室体长度方向约为11m,宽度方向约7m。

根据零件工艺流程,设计喷漆工段干式自动喷漆生产线轴线长40m,轴线宽40m。考虑喷漆房高度及设备送排风过滤系统高度,将生产线净高定为9.5m,喷漆工段南侧和北侧各设置5m和3m的物流通道,用于零件运输,如图1所示。

考虑零件喷漆前工装与毛件的安装,零件喷漆作业过程中半成品的周转,以及结束后成品的检验要求,在自动喷漆生产线中间设置工装暂存区、毛件暂存区、半成品暂存区、成品暂存区、检验区以满足整个喷漆流程。

## 3 干式喷漆室生产线设计

### 3.1 设计概述

干式自动喷漆生产线设计为固定式房

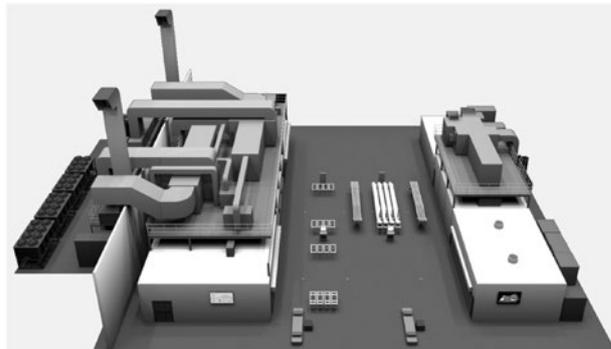


图2 系统组成三维图

体结构,共6套,每套设备的外形尺寸为11000mm×7000mm×2600mm。其中喷漆室靠墙体一侧设置无泵水幕喷漆净化设备2台,靠通道一侧设置对开式手动推拉门,并设置地面轨道,并设置5t防爆蓄电池电动平板运输车1台。室体内靠通道一侧墙面上设置进风装置,设备启动后在无泵水幕漆雾净化设备和送风系统的作用下,房体内的气流沿水平方向朝漆雾净化设备方向流动,经过净化处理后达到排放标准,高空排放。室内两侧设置排水地沟,上铺镀锌格栅,便于室内漆渣清理。

### 3.2 房体结构

室体采用拼装方式,主体材料为75mm厚岩棉复合板,其内、外面层为0.6mm厚彩色热镀锌喷塑钢板,中间岩棉为不燃的材料,内外板与保温材料整体压制而成一体。打磨室采用卷帘门,门体宽度8.5m,每隔半米采用铝制抗风条加强,大门设有观察窗,方便工人实时进行生产观察。喷漆房、刮腻子室、烘干房大门采用隔热不燃板材。房体底部设置2.5m深通风地沟,以供工件喷漆干燥风量。每套室体顶部设置35组防爆金属卤化灯,照度大于800lx,满足防护性涂装作业照明要求。

### 3.3 送排风系统

喷漆过渡室:设置1个温湿度传感器,监测

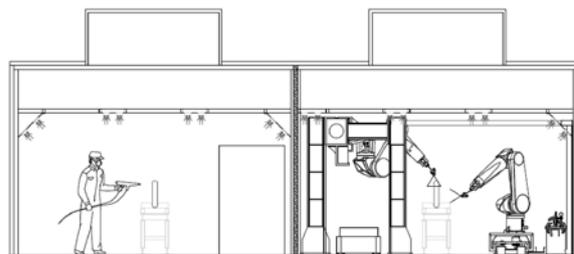


图3 手动喷漆房和自动喷漆房示意图

室内温度保证在 $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 范围内，工作湿度：40%~60%。室内配送排系统，新风取自空调，通风量为 $5000\text{m}^3/\text{h}$ ，控制室内温度 $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ ，湿度：40%~60%。当上件过渡室工作而自动喷漆工位不工作时（即空调主送排风风机不工作时）上件过渡室送排风机独立工作，相当于整个空调的通风量为 $5000\text{m}^3/\text{h}$ ，此时送风阀关闭，上件过渡室的温湿度传感器进行控制；当上件过渡室和自动喷漆工位都工作时（即空调主送排风风机工作）上件过渡室送排风机同时工作，相当于上件过渡室从空调的 $55000\text{m}^3/\text{h}$ 通风量中分出 $5000\text{m}^3/\text{h}$ 的风量，此时送风阀打开，此时温湿度完全取决与自动喷漆工位的温湿度传感器，上件过渡室的温湿度传感器不参与控制。

喷漆室：送风系统主要是在喷漆过程中，为喷漆室内部提供横向气流，最大限度地收集、捕捉漆雾以及有机溶剂气体。喷漆房从厂房内取风，风道口设置于房体靠通道一侧的墙壁处，每个房体设置2台轴流风机进行送风，每台风机风量为 $28000\text{m}^3/\text{h}$ ，房体内截面风速为 $0.15\text{m}/\text{s}$ ，采用上送下排形式。房体内顶部设置过滤棉，设压差传感器，可保证工作时室内微负压 $-10\text{Pa} \sim -40\text{Pa}$ 。

烘干室：室体设3个温度传感器(热电偶)，保证室内温度 $20^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ ，温度均匀性 $\leq \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。同时配2套电加热循环风机组，每套通风量 $14000\text{m}^3/\text{h}$ ，每套风机功率 $7.5\text{kW}$ ，每套电加热功率 $80\text{kW}$ ，电加热器设置超温检测热电偶。烘干室循环风机在电加热器启动前打开，在电加热器关闭后延时10分钟关闭，保证烘干室的使用安全。烘干房配1套功率 $1.5\text{kW}$ 的排气风机，排气量 $1400\text{m}^3/\text{h}$ ，排出的气体含少量零件挥发漆雾，排风送入活性炭吸附箱中，新风的补充通过循环风机上的新风阀进入气流循环系统，完成烘干室空气的流动循环。

打磨除尘室：室内设1个温度传感器，监测并控制室内温度 $15^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ （打磨除尘室车间内取风，打磨除尘室内温度与车间内温度相同）。同时配2套滤芯除尘器，每套通风量 $28000\text{m}^3/\text{h}$ ，并控制反吹清灰，过滤后的空气排回车间内。

刮腻子室：室内设3个温度传感器，保证室内温度 $20^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ ，温度均匀性 $\leq \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。同时配2套电加热循环风机组，每套通风量 $14000\text{m}^3/\text{h}$ ，每套风机功率 $7.5\text{kW}$ ，每套电加热功率 $80\text{kW}$ ，电加

热器设置超温检测热电偶，循环风机在电加热器启动前打开，在电加热器关闭后延时关闭。

腻子清洗室：设1个温湿度传感器，监测室内温度 $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ ，工作湿度：30%~70%。配1套送排风空调，通风量 $28000\text{m}^3/\text{h}$ ，控制室内温度 $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ ，湿度：30%~70%，空调新风从车间外取风和循环后向外排风，为防止冬季结霜冻死风阀需在风阀上加装电伴热。为防止风阀出现故障，设置进风压差传感器和排风压差传感器。

### 3.4 漆雾处理系统

在喷漆过程中，由高压喷射的油漆绝大部分停留在工件表面，其他未达到工件表面的漆雾悬浮在空气中，以及喷漆过程产生的挥发性有机化合物形成喷漆废气导致环境污染。根据漆料成分的不同，喷漆过程产生的废气组成也就不同。喷漆工艺中常见的几种VOCs包括苯类（甲苯、二甲苯等）、酯类（乙酸乙酯、乙酸丁酯等）和酮类（丙酮等）等。这些有机废气将对环境以及现场操作人员健康造成严重的影响，因此必须对厂房内喷漆工段的废气进行净化处理。

与湿式喷漆以水作为漆雾处理介质不同的是，干式喷漆常采用活性炭处理漆雾。活性炭由于具有密集的微孔结构、极大的内表面积、良好的吸附性能、稳定的化学性质，因此能够适用于喷漆废气VOCs (Volatile Organic Compounds) 的吸附净化中。在该型桨叶类零件喷漆生产线案例中，采用活性炭吸附+催化燃烧系统进行废气的处理。催化燃烧系统可用于吸附装置的再生，延长活性炭的使用寿命，提高经济效益。其作为一种高效的VOCs废气处理方式，可在较低的温度下（ $200 \sim 400^{\circ}\text{C}$ ）生成无污染的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ ，且非常适合处理废气风量小、VOCs浓度低（低于 $300\text{mg}/\text{m}^3$ ）的航空类零件喷漆环境。

自动喷漆工位和手动喷漆工位的VOCs气体分别通过4个活性炭吸附床，由于烘干房排除的VOC气体较少，所以烘干房排出的气体都排入自动喷漆工位的4个活性炭吸附床中。VOCs气体与活性炭吸附剂发生充分的反应，待达到一定的吸附浓度后，活性炭吸附态转入到脱附态，与高温空气或热空气接触后，气体中的VOC浓度开始不断降低直至低于催化燃烧所需的最小浓度，此时，此活性炭吸附床脱附结束，气体排放，吸附剂再生。

### 3.5 控制系统

为实现整体厂房智能管控，提高工业自动化

水平, 根据本项目喷漆工段工艺流程, 该工段加工零件主要为某型桨叶, 零件种类较为单一, 结构相对简单, 可实现喷漆自动化。由于该工艺流程较为复杂, 生产流线互相穿插, 且每道工序完成后需要人工进行零件表面质量检查, 因此生产线物流采用人工与智能管控结合的方式。

根据上述要求, 本项目干式喷漆生产线采用的控制系统包含计算机、PLC (Programmable Logic Controller, 简称PLC)、检测元件、AGV (Automated Guided Vehicle, 简称AGV) 控制、空调机组控制系统等。可实现:

(1) 在毛件存放区, 工装及毛料实现数据绑定, 全程数字定位及物料的可追踪管理, 实现高效数据交互、毛件和工装实时定位。

(2) 生产线电气控制系统具备显示界面, 可显示毛件工艺参数、各房间温度和湿度等状态信息, 可显示空调系统和废气处理系统状态。

(3) 暂存区状态及各房间内工件信息可显示在各个操作终端上 (人机交互界面)。

(4) 电气控制系统与产线管控实现信息交互, 可靠快速, 安全逻辑规范有效, 应急措施处理得当。

(5) 电气控制逻辑优化, 根据管控系统指令, 实现控制逻辑及算法的最优组合, 实现合理的加工生产工艺过程。

### 3.6 运输装置

本项目干式喷漆生产线采用AGV小车进行物流运输。运输车尺寸为4000mm (长) × 700mm (宽) × 300mm (最低高度), 升降平台行程为500mm, 承载能力为1000kg。AGV小车物流线如图4所示。

## 4 主要优势与技术创新

与国内常规水帘喷漆室、移动喷漆室等产品对比, 本项目根据实际生产需要, 综合考虑多种因素, 从以下几个方面进行了技术创新:

(1) 针对桨叶零件工序复杂、生产负荷不均

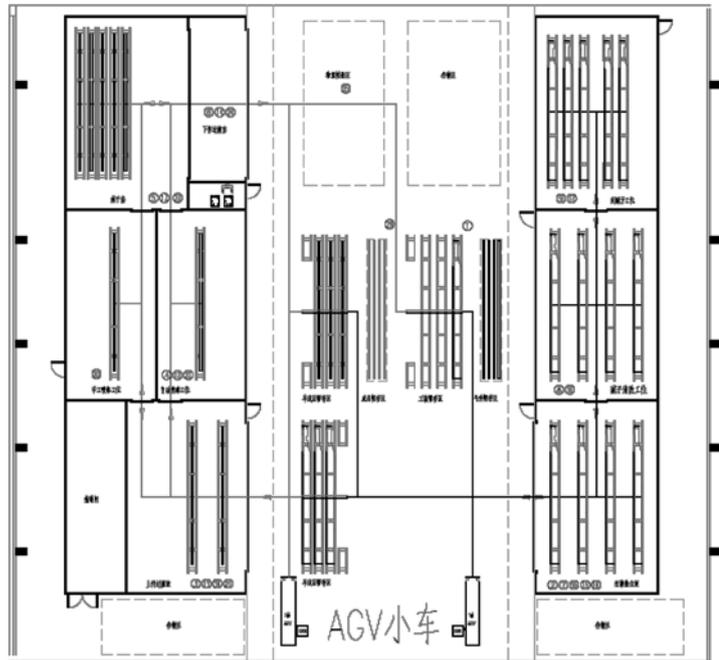


图4 AGV物流运输示意图

匀等特点, 采用手工喷漆和机器人自动喷漆相结合的方式, 该生产线可实时根据现场生产情况调产生生产节拍, 适应实际生产工况。

(2) 本项目喷漆生产线采用AGV物流运输方式, 人工与智能管控结合, 在零件运输过程中进行流平工序, 充分利用厂房面积, 同时通过控制零件传送速度, 调整零件的流平时间。

(3) 本项目喷漆生产线中喷漆、流平、烘干以及冷却工序均采用封闭式房体, 可有效控制导管类零件喷漆作业过程中有害气体的扩散, 改善工人操作环境。

(4) 喷漆生产线采用干式喷漆室, 喷漆过程产生的有机物废气通过活性炭进行吸附过滤, 采用活性炭吸附处理废气可避免工业废水产生, 减少环境污染。

# 地铁规划建设过程若干文物防振保护技术研究

■ 马伯涛 葛家琪 张曼生 田学帅 [结构]

**摘要:** 地铁在规划建设运营过程中,经常遇到穿越古建筑、文物遗址等振动敏感地区的情况。如何有效控制地铁对古建筑、文物遗址的振动影响,成为一个研究的热点问题。本文以某城市地铁为例,从地铁的规划、建设、运营等全过程研究对古建筑、文物遗址的影响,并提出相应的文物遗址保护措施。在地铁规划选线阶段采用数值模拟方法研究了列车运行时的文物遗址速度响应,根据各类文物保护标准,针对地铁规划阶段需要确定的参数(如埋深、距文物遗址水平距离等参数)进行研究;在地铁设计阶段,结合多阶段场地振动与传递实测、地质勘察、土建与列车设计等资料开展详细的文物振动影响评估;在地铁建设及运营阶段建立了实时振动监测系统,监控地铁运行对沿线文物的振动影响。研究表明,通过在地铁规划、建设、运营等全过程进行控制,并采取相应的预防性保护措施,可以有效控制地铁对古建筑、文物遗址的振动影响,实现振动指标参数在相关规范标准控制值之内,为后续地铁线路设计以及文物防振提供借鉴和参考。

**关键词:** 地铁规划;文物遗址;数值模拟;振动评估

## 0 引言

截至2019年底,我国已有40余座城市开通地铁(含轻轨),总里程超过4500km;城市地铁以快捷、准时等优点受到人们青睐,但是地铁运行引起的振动可能干扰沿线一些科研单位精密仪器的正常使用,影响沿线人们正常生活<sup>[1~3]</sup>,长期车辆振动还可能对邻近古建筑和文物遗址产生很大影响<sup>[4]</sup>。中国古建筑、文物遗址等众多,研究地铁振动对古建筑、文物遗址的影响是目前亟待解决的问题。

本文结合某城市地铁项目的规划、建设、运营等全过程,探讨地铁各阶段的分析方法和相关措施。在地铁规划选线阶段,本文采用数值模拟方法研究了列车运行时的文物遗址速度响应,根据各类文物保护标准,针对地铁规划阶段需要确定的参数(如埋深、距文物遗址水平距离等参数)进行研究;在地铁设计阶段,结合多阶段场

地振动与传递实测、地质勘察、土建与列车设计等资料开展详细的文物振动影响评估;在地铁建设及运营阶段建立了实时振动监测系统,监控振动对沿线文物的振动影响。总体技术路径和成果将为后续地铁线路设计提供借鉴和参考。

## 1 地铁规划选线阶段相关问题研究

综合国内外相关文献等研究成果,振动评估的手段大多数以现场实测为主。根据已有标准,不同振动控制标准对建筑物内振动情况做出评价。

针对拟建建筑物或构筑物,相关学者采用列车—轨道—路基模型和轨道路基—地基土—结构整体模型的方法开展了部分研究,不足之处在于缺少实践性和实用性。本文借鉴拟建建筑振动评价方式,参考某城市拟建地铁项目沿线的文物考古资料,提出文物遗址振动的预测方法,为地铁规划选线提供科学量化的参考。

### 1.1 振动控制标准

参考国内外研究成果和我项目团队实测与前期研究成果<sup>[5~6]</sup>,确定基于文物遗址振动控制指标

作者简介:马伯涛,男,研究员,2009年毕业于哈尔滨工业大学结构工程专业,现就职于航空工业规划结构工程创新研究院。

如表1所述。需要说明的是，为降低成都地铁2号线对成都博物馆的振动影响，采取了如表2所述的减隔振技术措施。在成都地铁2号线正式运营后，对成都博物馆工程场地进行现场振动实测，建筑基础部位、建筑场地周边地铁所致振动实测结果均小于 $0.1\text{mm/s}$ 。实测结果表明，在地铁规划、设计、运营全过程进行控制，在采取充分措施的前提下，可以实现将场地振动速度控制在 $0.15\text{mm/s}$ 范围内的目标。

表1 基于遗址的振动控制指标

保护等级	控制标准PPV
全国重点文物保护单位	0.15
省级文物保护单位	0.27
市、县级文物保护单位	0.45

表2 成都博物馆及地铁2号线减振措施

项目	措施
车型	6节编组B型车
道床	钢弹簧浮置板
轨道与建筑距离	水平：约20m；竖向：0m
阻振措施	双排桩+钢筋砼墙，隔振沟
建筑减隔振	建筑基础隔振
建筑其他措施	重型建筑底板

## 1.2 振动影响评价方法

振动在复杂介质中的传播比较复杂，尤其是土体等。不仅与振源有关，地址条件等其他诸多因素也会产生较大的影响<sup>[7]</sup>。同时，在数值模拟中很难真实模拟土介质<sup>[8]</sup>。故在地铁规划选线阶段，常常采取选取相似路段进行现场试验实测的方式，研究地铁交通振动的传播规律；其次通过建立整体有限元模型，对地铁所致文物振动响应进行数值模拟，针对多种工况下古建筑、文物遗址振动响应进行数值预测，从而为地铁规划选线设计等全过程提供参考。

## 1.3 类比实测研究

某城市地铁线路需要穿越大量古建筑、文物遗址等国家文物保护单位，因此在地铁修建前应对文物振动情况进行预测。课题组选取了与本工程具有相似状况的西安地铁2号线路段进行了场地振动试验实测。

该城市地铁拟采用的车辆与西安采用的地铁车辆相似，均为6节编组，设计车速为 $60\sim 80\text{km/h}$ 。地铁埋深（隧道顶距地面深度）为 $10\sim 15\text{m}$ 。西安

的地铁已经正式运营，其地铁振动在土体中的传播规律和传递函数可为某城市地铁所致土体振动提供借鉴。

测量采用了INV3018-C型采集仪及941B型振动传感器。采样频率为 $256\text{Hz}$ ，采样时间取为 $900\text{s}$ ，西安地铁2号线路段共测10测点、29个测次，测量地铁通过时测点的振动响应。

图1为西安地铁2号线路段现场测试照片，图2为西安地铁2号线测点布置图，表3为测试内容。



图1 西安地铁2号线路段现场试验图

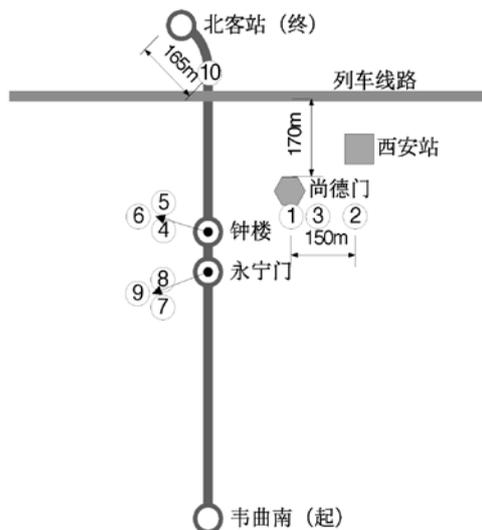


图2 西安地铁2号线测点布置

本文列出尚德门城楼第一次测量的典型的竖向振动速度时程与频谱曲线，如图3与图4所示（测点1，测次1）。由图4可以看出，尚德门城楼竖向振动频谱主要集中在 $0\sim 15\text{Hz}$ 。

波在介质传播过程中，穿透能力随着波长的增加而增加，因此，低频振动比高频振动的传

表3 西安地铁二号线实测内容

测点	测试地点	测试次数	时间/s
1	尚德门城楼	5	900
2	尚德门城楼东侧城墙开洞处跨中	1	900
3	尚德门城楼下方绿地地砖上	1	900
4	钟楼下方绿地地砖上	4	900
5	钟楼地铁站内地砖上	1	900
6	钟楼地铁站临近地下通道地砖上	1	900
7	永宁门城楼	5	900
8	永宁门城楼下方绿地围砖上	5	900
9	永宁门地铁站内地砖上	1	900
10	北客站附近绿地内	5	900

播能力更强，能量耗散越小。振动传至1号测点时，高频成分大部分已被过滤，测点处的振动成分主要由低频的地面交通振动构成。实测结果显示，各测点通常状态下三方向振动速度均小于0.05mm/s。城墙开洞处水平振动速度小于0.1mm/s，竖向振动速度小于0.5mm/s。

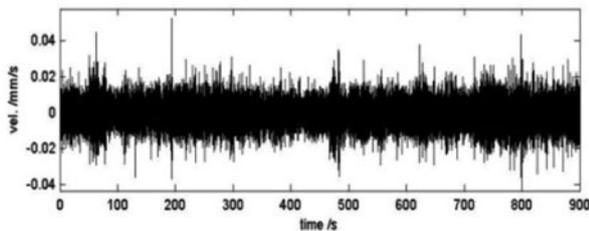


图3 尚德门城楼第1次测量，竖向速度时程

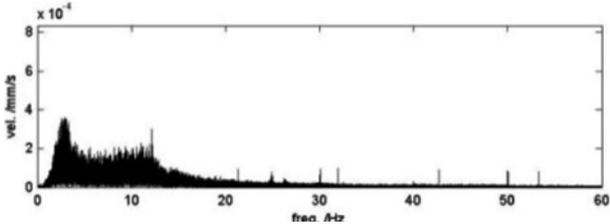


图4 尚德门城楼第1次测量，竖向速度频谱



图5 有限元模型图

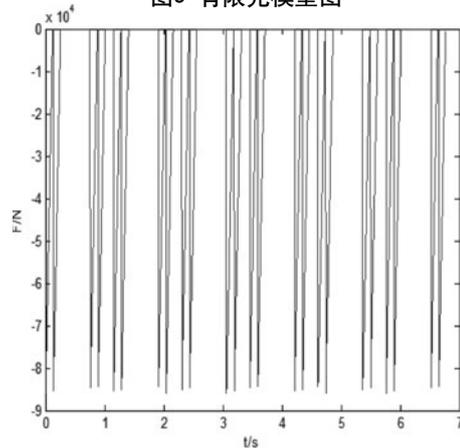


图6 车速60km/h荷载时程

#### 1.4 有限元预测分析

本文以某城市拟建地铁1号线为例，结合A遗址附近的地质资料，建立隧道~土体整体有限元模型，对隧道及周围土体进行研究，取隧道半径3m，两隧道净距4m，在MIDAS/GTS里建立模型并划分单元网格。为研究不同隧道埋深、不同车速等因素对振动的影响，在模型中列车的速度分别取40km/h~120km/h，洞顶埋深分别取5m~25m，考虑单线双线、有无浮置板进行工况组合。

表4 土体参数

层号	层厚/m	压缩模量/MPa	泊松比	容重/kg/m <sup>3</sup>	饱和容重/kg/m <sup>3</sup>	粘聚力/kPa	内摩擦角/°
1	0.8	9.6	0.30	1720	1837	30.0	20.8
2	4.4	10.0	0.30	1690	1866	24.4	21.4
3	1.7	13.6	0.30	1760	1890	41.1	19.9
4	1.7	12.8	0.30	1710	1892	30.0	17.9
5	5.2	14.3	0.30	1790	1932	39.6	21.1
6	21.2	11.9	0.35	1760	1931	26.6	22.6

表5 结构材料参数

名称	混凝土标号	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/m	宽度/m
衬砌	C55	34.5	0.30	0.15	—
混凝土板	C55	34.5	0.30	0.30	3.8

列车荷载通过移动荷载列作用于浮置板上, 列车不同车速以不同的荷载持续时间实现。图5和图6分别为三维整体有限元模型图和车速60km/h荷载时程曲线图, 表4和表5分别为各层土体参数和结构材料参数。

表6与表7给出了各工况计算结果。分析可得, 在不同位置处列车所致地表振动与距离隧道远近和车速相关。当车速相同时, 远端(距离隧道顶水平100m处)与近端(隧道正上方)的振动相差0.09mm/s; 当水平距离相同时, 车速为60km/h、80km/h、100km/h与120km/h时地表振动相差0.03mm/s; 由表7和表8, 当车速与水平距离相同时, 设置浮置板可减小振动速度0.03mm/s, 单线运行可减小振动0.025mm。

西安地铁2号线全线设置浮置板, 且实测数据为地铁单线运行, 根据上述工况振动计算结果与设置浮置板单线运行振动速度减小量, 图3所示工况振动峰值速度为0.05mm/s, 与实测数据吻合较好。

本预测参考国内外的研究资料等振动环境影响评价, 结合某城市拟建地铁工程实际情况和环境特征, 并通过有限元计算分析, 对地铁通过时地表及地下振动速度值进行预测。表6为地铁双线通过时不设浮置板情况地面振动速度预测情况,

表6 地面振动速度预测

车速 /km/h	洞顶埋 深/m	水平距离 地面振动速度 (mm/s)				
		0m	10m	30m	50m	100m
60	5	0.14	0.13	0.10	0.09	0.05
	10	0.12	0.12	0.09	0.07	0.05
	15	0.12	0.11	0.08	0.07	0.05
	20	0.12	0.11	0.08	0.07	0.04
	25	0.11	0.10	0.07	0.06	0.04
80	5	0.15	0.14	0.11	0.10	0.05
	10	0.14	0.13	0.11	0.08	0.05
	15	0.13	0.12	0.10	0.08	0.05
	20	0.13	0.12	0.10	0.07	0.05
	25	0.12	0.11	0.10	0.07	0.05
100	5	0.17	0.16	0.13	0.10	0.05
	10	0.16	0.15	0.12	0.10	0.05
	15	0.15	0.14	0.12	0.09	0.05
	20	0.14	0.13	0.11	0.08	0.05
	25	0.13	0.12	0.10	0.08	0.05
120	5	0.20	0.18	0.14	0.11	0.05
	10	0.18	0.18	0.14	0.10	0.05
	15	0.16	0.15	0.12	0.09	0.05
	20	0.15	0.14	0.12	0.09	0.05
	25	0.14	0.13	0.10	0.08	0.05

表7 车速60km/h设浮置板地面振动速度预测

运行 情况	水平距离 地面振动速度 (mm/s)				
	0m	10m	30m	50m	100m
双线	0.09	0.08	0.05	0.04	0.04
单线	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03

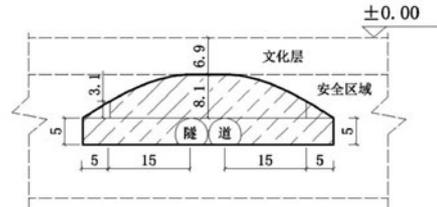


图7 车速80km/h, 隧道与文物避让距离图

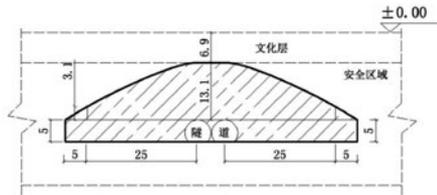


图8 车速100km/h, 隧道与文物避让距离图

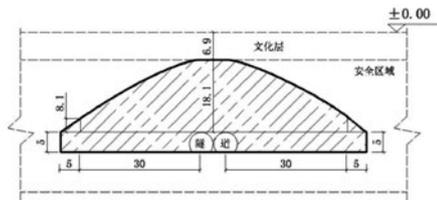


图9 车速120km/h, 隧道与文物避让距离图

表7为洞顶埋深20m车速60km/h设浮置板时双向与单线运行情况地面振动速度预测情况, 由表6与表7可得到相应工况下单线运行与设置浮置板时振动速度减小量。按照相关振动控制指标限值, 车速分别为80km/h、100km/h和120km/h时, 隧道与遗址文物空间关系如图7~图9所示, 方便地铁规划选线。

## 2 地铁实施阶段相关问题研究

地铁设计阶段, 应以具体文物安全为核心开展工作, 结合周边既有工程和地质勘察、考古勘探情况开展详细的地铁线路和土建设计。以地铁沿线的某地上国保建筑为例, 开展“地铁振源—振动传播过程—受振体”全过程振动分析与设计研究。

### 2.1 振动实测分析

振动测试重点用于模型校准, 而用于模型校准最重要的首先是场地及结构的频谱, 其次是本

表8 国保建筑的动力特性

识别结果	1阶	2阶
自振频率 (Hz)	3.61	4.91
阻尼比	0.0472	0.0404
振型	出平面 (东西向)	平面内 (南北向)
	一阶平动	一阶平动

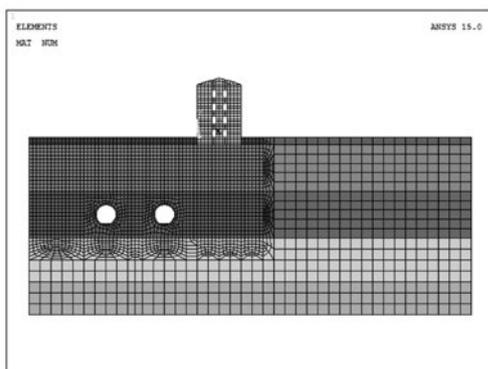
底振动和振动传递测试。拟研究对象为3层（局部4层）砖砌体结构国保建筑。建筑基础轮廓距地铁净距约9m，轨面埋深约23.2m，管片内径5.5m。在地铁工程设计前期，针对此区域场地本底振动、振动传递、国保建筑的动力特性进行详细实测。测得结构动力特性如表8所述。

## 2.2 模型校准研究

采用ANSYS软件建模。单元模型中，节点数为130236个，单元总数为125555个，包括15432个shell181壳单元（模拟上部砌体结构和地铁隧道结构），110123个solid185实体单元（模拟土层）。建立的三维模型如图10所示；采用的地勘资料如图11所示，实际建模时将土层简化等效成平层。调参后，与现场实测的频谱进行对比，修正模型，使之差异控制在工程可接受的程度。



(a) 三维视角



(b) 正视图

图10 有限元模型

## 2.3 仿真分析研究

根据现行《古建筑防工业振动技术规范》(GB/T50452-2008)制定的振动控制标准规范中振动速度响应相关规定，取结构顶点水平速度限值0.2mm/s。同时考虑此国保建筑中有居民的情况，加速度振级控制在70dB（白天）、67dB（晚上）。基于上述控制指标，设定多种工况如表9开展分析，得到主要结果如表10所述。结果可知，工况四可以实现此国保建筑的振动控制目标。

表9 分析工况

工况	车速 (km/h)	措施
一	80	无
二	80	钢弹簧浮置板道床
三	50	无
四	50	钢弹簧浮置板道床；加厚隧道壁至350mm

表10 国保建筑的振动响应

工况	结构顶点振动速度 (mm/s)		加速度振级 (dB)	
	数值	超标	数值	超标
1	0.608	是	79.99	是
2	0.389	是	76.06	是
3	0.350	是	69.72	是
4	0.156	否	66.32	否

## 2.4 减振措施设计

由模拟分析可知，针对本案例的空间关系，采取区间设置钢弹簧浮置板道床、区间降速等措施，可以实现临近国保建筑的振动控制指标。

但是，由于地铁致结构振动是一个涉及车辆工程、岩土工程、结构工程等复杂的工程问题，影响因素很多，本案例同步采取了一些构造保障措施，如：加强管片注浆以增强隧道刚度和振动参与质量，其中，同步注浆扩散区域的厚度约150~500mm，长度与管片同步；二次注浆扩散半径约500~1000mm，环向6个，纵向间距1.5m。

为进一步保障文物安全和地铁正常运营，初步设定了应急预案，如：隧道与建筑之间的屏障阻振应急措施方案，地上国保文物的保护修缮方案等，加强轨道交通频率范围内的长期振动敏感

部位防控和二次噪声防控。同时,在地铁沿线敏感区间,设置了实时振动监测装置,组网建立了全线振动监测平台,实现实时报警。

## 2.5 振动监测与平台建设

长期监测系统采用基于云智慧测试技术建立的分布式在线监测系统(云平台),这是一种集项目管理、设备管理、在线监测等功能于一体,能提供简单、方便、高效的在线监测服务的监测平台。借助平台,通过网页输入云平台网址即可远程查看采集仪所采集的实时波形、远程配置采集仪的采集参数、远程下载采集数据等。大量采集数据采用云存储的方式,不仅对统计指标数据,甚至是全部原始数据都可以永久保存,以便日后进行各种深入的分析处理。

该项目采用东方所INV3062C1采集设备和941B型竖向、水平向超低频拾振器,包含单独形式和集成形式。连接线与信号线均与设备相匹配,且抗干扰能力强。

该建筑项目长期监测共布置3个测点,均位于该建筑南边山墙,1号点位置约在楼内地面标高处,监测三方向加速度;2号点在二层楼板顶部,监测三方向加速度;3号点位于屋檐下方,监测水平双向速度和竖向加速度。

表11中各指标峰值取值为去掉实测峰值中大于有效值3倍峰值之后的取值。各测点速度峰值、加速度峰值、振动计权加速度见表11。表中可以看出:各测点实测值的速度峰值、加速度峰值和振动计权加速度(dB)均未超限。

## 3 结论

本文以某城市地铁规划、建设、运营的全过程为背景,介绍了在地铁全过程中如何有效控制地铁对古建筑、文物遗址的振动影响,主要有如下结论:

(1)在地铁规划选线阶段,可以通过振动控制相关标准、振动影响评价、类比实测研究、有限元预测分析等方法,提出了地铁规划阶段的影响范围,便于地铁选线,进而有效控制地铁在选线规划阶段中对古建筑遗址的影响。

(2)在地铁建设阶段,以具体文物为研究对象开展研究工作,侧重文物安全,应开展振动实测分析、模型校准研究、仿真分析研究、减振措施设计等方法。通过精细化分析并与实测校验

表11 各测点详细数据

测点位置	时间	速度峰值 (mm/s)	加速度峰值 (mm/s <sup>2</sup> )	振动计权 加速度(dB)
测点 1-X	列车开通前	0.019	5.6	35
	列车运行时	0.016	3.5	35
	列车停运时	0.017	2.8	35
测点 1-Y	列车开通前	0.018	4.1	32
	列车运行时	0.013	3.1	32
	列车停运时	0.013	3.2	32
测点 1-Z	列车开通前	0.033	3.9	33
	列车运行时	0.029	5.3	33
	列车停运时	0.024	3.8	33
测点 2-X	列车开通前	0.059	8.4	32
	列车运行时	0.026	5.7	32
	列车停运时	0.021	11.6	32
测点 2-Y	列车开通前	0.073	12.5	32
	列车运行时	0.041	7.9	32
	列车停运时	0.041	5.5	32
测点 3-X	列车开通前	0.060	1.3	37
	列车运行时	0.046	1.9	37
	列车停运时	0.011	1.49	37
测点 3-Y	列车开通前	0.19	7.9	20
	列车运行时	0.12	4.7	21
	列车停运时	0.037	3.9	39
测点 3-Z	列车开通前	0.042	10.17	21
	列车运行时	0.040	8.5	20
	列车停运时	0.032	4.8	38

证合理性,实现在地铁建设阶段的振动控制。

(3)在地铁运营阶段,对古建筑遗址采用分布式在线监测系统(云平台)试点,对地铁运营导致的古建筑遗址振动情况进行实时监测、存储和预警。平台的建设目前只是探索阶段,还有很多方面有待改进。

本文研究了某城市地铁的规划、建设、运营等全过程中对古建筑遗址的影响和控制措施。研究思路和分析结果为地铁的规划建设运营、文物振动影响预测提供参考。

#### 参考文献

- [1] 刘卫丰,刘维宁,聂志理,等.地铁列车运行引起的振动对精密仪器影响的预测研究[J].振动与冲击,2013,32(8):18-23. (LIU Wei-feng, LIU Wei-ning, NIE Li-zhi, et al. Prediction of effects of vibration induced by running metro trains on sensitive instruments [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(8): 18-23. (in Chinese))
- [2] 马蒙,刘维宁.我国文物建筑受列车微振动影响研究现状及关键问题分析[J].噪声与振动控制,2019,39(4):1-6. (MA Meng, LIU Wei-ning. Overview and Key Problem Analysis of the Vibration Influences on Historic Buildings induced by Moving [J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(4):1-6. (in Chinese))
- [3] 周云,王柏生.行驶列车引起的周边建筑物振动分析[J].振动与冲击,2006,25(1):36-41. (ZHOU Yun, WANG Bai-sheng. Dynamic Analysis of Building Vibration Induced by Train along Railways [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(1): 36-41. (in Chinese))
- [4] 潘复兰.古建筑防工业振动的研究[J].文物保护与考古科学,2008,20(z1):104-108. (PAN Fu-lan. Study on protection of historic building against man-made vibration [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2008, 20(z1): 104-108. (in Chinese))
- [5] 葛家琪,王仕俊,孙新阳,等.基于文物振动安全的地铁与文物空间关系研究[J].文物保护与考古科学,2015,27(1). (Study on spatial relationship between metro and relics based on the traffic induced vibration of relics security [J]. Sciences of Conservation and Archaeology. 2015, 27(1). (in Chinese))
- [6] CN-GB/T 50452-2008.古建筑防工业振动技术规范[S].2008. (CN-GB/T 50452-2008. Technical specifications for protection of historic buildings against man-made vibration[S]. 2008. (in Chinese))
- [7] 陈爱侠,董小林,杨莉,等.城市地铁项目建设对古建筑的影响[J].建筑科学与工程学报,2007,24(1):80-83+88. (CHEN Ai-lin, DONG Xiao-lin, YANG Li, et al. Influence of urban subway project construction on heritage buildings [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(1): 80-83, 88. (in Chinese))
- [8] 楼梦麟,李守继.地铁引起建筑物振动评价研究[J].振动与冲击,2007,26(8):68-71. (LOU Meng-lin, LI Shou-ji. Evaluation of buildings' vibration induced by underground trains [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(8): 68-71. (in Chinese))

# 成都淮州新城国际会展中心 复杂钢结构设计

■ 樊钦鑫 谢军 贾雨萌 刘宇轩 [结构]

**摘要:** 成都淮州新城国际会展中心建筑面积约4.5万 $m^2$ 。该项目为体型特别复杂的结构,平面底座呈圆形,采用框架+中心支撑结构,大跨及悬挑屋面采用空间扭曲交叉网格、单层网壳结构。本文首先介绍了结构体系网格构成及地基基础设计,重点从建筑、结构、幕墙参数一体化、解决竖向刚度突变、大跨度悬挑舒适度、防倒塌分析4个方面进行介绍,然后对结构进行了整体静力、整体稳定、抗震性能化、BRB专项设计等方面分析,并针对超限类型采取相应抗震措施。结果表明,整体结构安全可靠,希望能为类似工程提供参考。

**关键词:** 复杂的结构;交叉网格;单层网壳;参数一体化;抗震性能化

## 1 项目概况

淮州新城国际会展中心位于成都市金堂县,建筑面积约4.5万 $m^2$ ,建筑高度最高35m,场地高差较大,东西两侧高差10m,建筑西侧、北侧、南侧出入口位于二层,东侧出入口位于一层。项目属于一类高层,耐火等级地上一级。

建筑功能主要是展厅、办公会议、航空博物馆等,无地下室,地上一共四层,首层层高10m,带一部分夹层5m,二层层高6m,三层层高5.5m,四层层高4~13.5m,屋面为轻质铝板和玻璃幕墙屋面。

建筑设计以“太阳神鸟”为设计理念,建筑采用圆环形体量,契合太阳神鸟的基本轮廓。圆环形的建筑体量通过对体量结构线的缩放处理手法,使屋面与立面倾斜并富于动势,同时,呈现出轻盈的出挑形态。底部通过玻璃体量的托起,强调空中悬浮的状态。建筑的顶面运用参数化的方式,将太阳神鸟图案与建筑表皮铝板开窗干扰叠加,形成逐渐退晕的参数化窗口,勾勒出太阳

神鸟的轮廓。处于建筑航线上的建筑第五立面,完全体现了成都的文明象征“太阳神鸟”,表达地域文化与建筑相融合的文化理念。

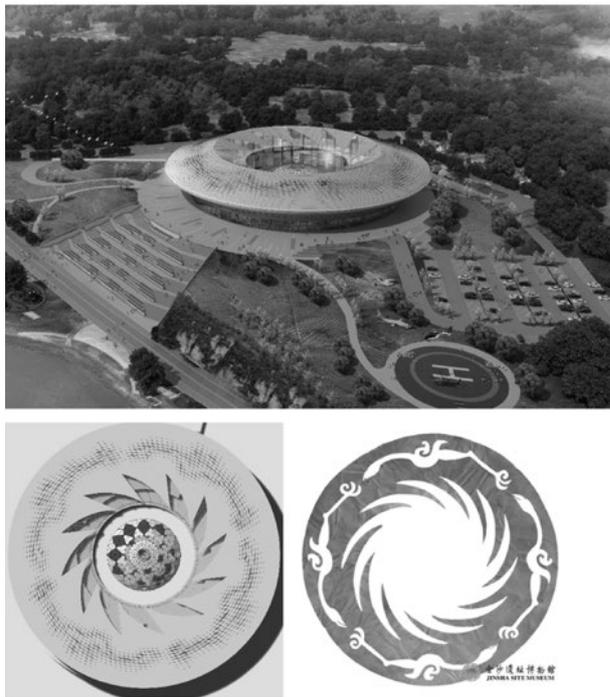


图1 建筑效果图

作者简介:樊钦鑫,男,研究员,2009年毕业于哈尔滨工业大学结构工程专业,现就职于中航建设建筑设计研究院。

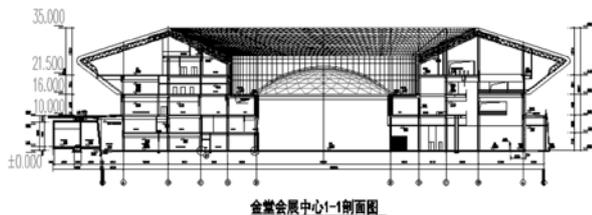


图2 典型建筑剖面图

## 2 结构综述

### 2.1 设计参数

主体结构设计使用年限为50年，安全等级为二级，建筑抗震设防类别为标准设防类；基本雪压值： $0.1\text{kN}/\text{m}^2$ ；规范基本风压值： $0.3\text{KN}/\text{m}^2$ （50年）， $0.35\text{KN}/\text{m}^2$ （100年），地面粗糙度：B类；本地区抗震设防烈度为7度，设计基本地震加速度值为 $0.1g$ ，设计地震分组为第三组，场地类别为II类，多遇地震 $T_g=0.35s$ ，罕遇地震 $T_g=0.4s$ 。

表1 钢框架-中心支撑与框架-剪力墙混凝土结构对比

性能指标		混凝土结构	全钢结构
结构体系		框架-剪力墙	钢框架+中心支撑结构
构件材料	核心筒	钢筋混凝土	局部中心支撑
		核心筒	
	柱	混凝土柱	圆钢管或箱型柱
	梁	混凝土梁	钢梁
	截面	梁跨度 $10\sim 16\text{m}$ ，悬挑 $5\sim 7\text{m}$ ，钢结构与混凝土对比，梁高降低约 $200\sim 300\text{mm}$ ，框架柱截面相对小 $100\sim 200\text{mm}$ ；方便建筑使用；	
抗震性能	塑性变形能力弱，延性差	塑性变形能力强，延性好	
基础		结构自重较大，基础造价高	结构自重小，基础造价可有效降低
施工	施工工艺	需要支模、浇灌及养护；梁柱节点施工复杂；施工难	梁柱构件可在工厂预制加工，梁柱节点施工相对简单；
	进度	土建周期长	土建周期节省5个月
绿建要求		一星标准	三星标准
防火、防腐		无涂装要求；后期不需维护。	需要涂装处理；定期维护。

### 2.2 结构选型

钢框架+中心支撑与框架-剪力墙混凝土结构对比，见表1。

钢框架+中心支撑与钢框架结构对比，见表2。

表2 钢框架-中心支撑与钢框架结构对比

楼层	钢框架结构	钢框架-中心支撑
周期	T1= 1.773(X向); T2=1.751(Y向); T3=1.584(RZ);	T1= 1.4233(X向); T2=1.3507(Y向); T3=1.0496(RZ);
周期比	0.9(超限)	0.75
位移比	1.26(超限)	1.22(超限)
刚度比	0.63(超限)	1.05
受剪承载力比	0.96	0.96
指标	框架-中心支撑体系明显优于框架结构	

结构体系考虑经济性、利用率、施工技术及周期、结构整体控制指标等因素，采取钢框架+中心支撑体系（钢管柱+中心支撑+型钢楼面梁+钢筋桁架楼承板）。

### 2.3 结构体系

采用全钢框架+中心支撑结构，底座采用常规梁、柱、支撑体系，圆环内主体、外壳采用空间钢结构体系。在环向屋脊的位置设置12根等分框架柱伸至屋面支承整个圆环，圆环边界设置等分框架与底座框架柱连接，形成整体空间结构。

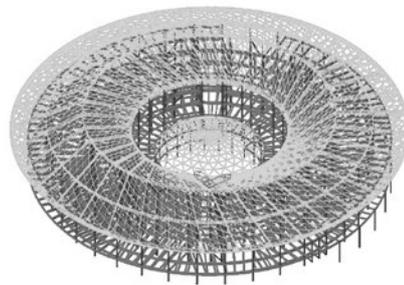


图3 结构整体模型

主要构件截面：典型框架柱截面箱型 $600\times 35/25$ 、箱型 $500\times 25$ ，圆管 $\Phi 600\times 25$ ；典型框架梁截面 $H 800\times 300\times 14\times 22$ 、 $H 700\times 300\times 13\times 20$ 、 $H 600\times 300\times 12\times 17$ ，箱

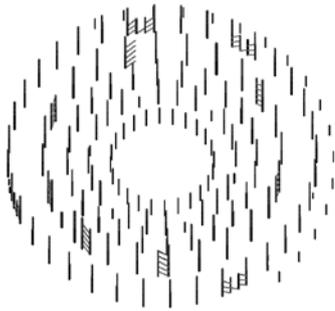


图4 外围柱支撑布置图

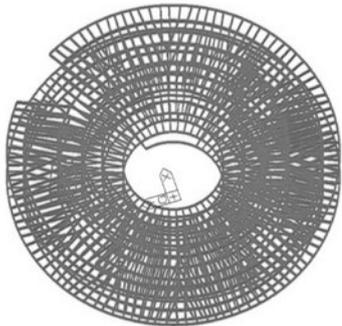


图5 楼面梁布置图

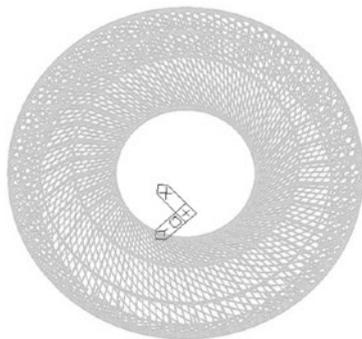


图6 屋面桁架布置图

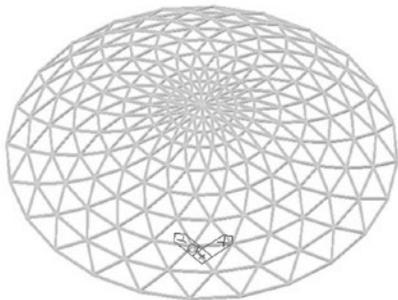


图7 单层网壳布置图

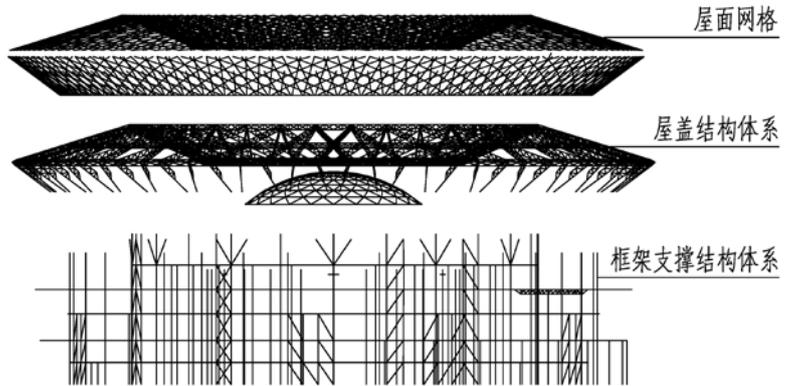


图8 整体结构体系构成图



图9 典型悬挑空间体系剖面图

型 $800 \times 300 \times 25 \times 25$ ；屋面桁架弦杆采用圆钢管 $\Phi 351 \times 12/16$ 、 $\Phi 299 \times 12$ ，交叉网格采用矩形管 $300/200 \times 120 \times 8$ ，典型钢筋桁架楼承板厚度 $120\text{mm}$ ；在楼电梯间及外围隔墙内设置支撑支撑，为了不影响建筑内部空间效果，支撑宽度控制在 $200\text{mm}$ 以内；钢材材质为Q390B、Q345B。

#### 2.4 地基基础设计

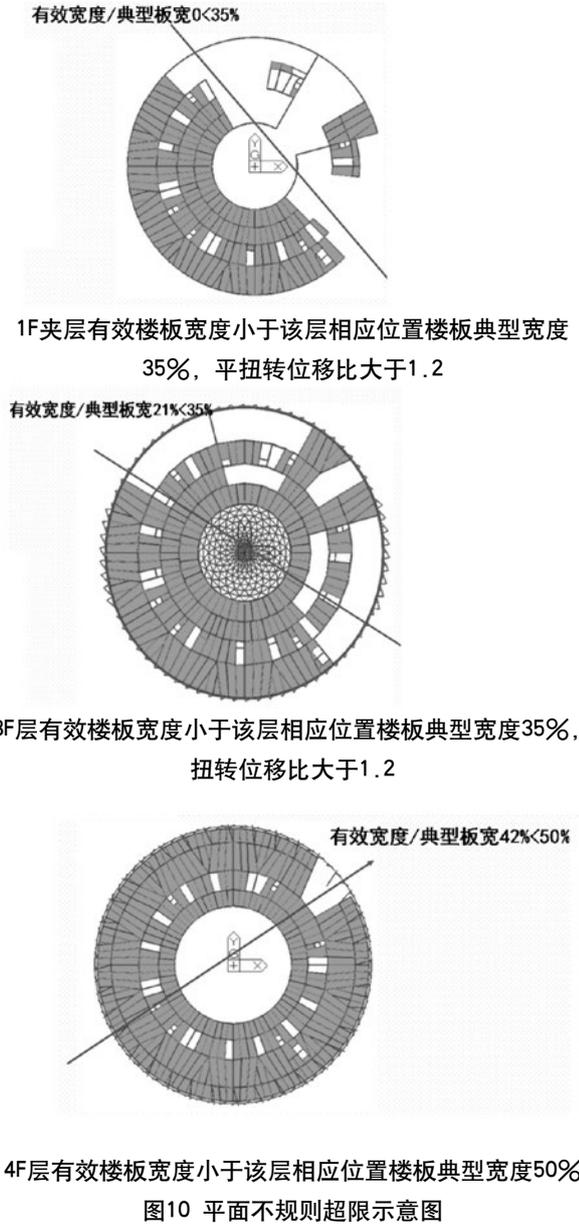
项目区内地形地貌较属于金堂西部浅丘平坝区，该区域由沿江两岸的冲积平原和龙泉山脉边缘的浅丘区组成。地形较起伏，相对高差较大，最大高差 $26.82\text{m}$ 。场地未见影响场地稳定性的崩塌、滑坡等不良地质现象，该场地内相对稳定，为建筑抗震一般地段，适宜建筑。

本工程地基基础设计等级为甲级，基础形式：基础采用的独立柱基、条形基础，基础持力层为③2层中风化砂岩，承载力特征值 $f_{ak}$ 为 $800\text{kpa}$ ；或局部基础持力层为④1层中风化砾岩，承载力特征值 $f_{ak}$ 为 $1200\text{kpa}$ ；当遇到局部薄层强风化岩层③1，采用C15素混凝土进行局部换填设计基底标高，每边宽出基础 $200\text{mm}$ ，处理深度 $<2000\text{mm}$ 。土质较好，基础沉降较小，满足规范要求。

#### 2.5 结构超限情况

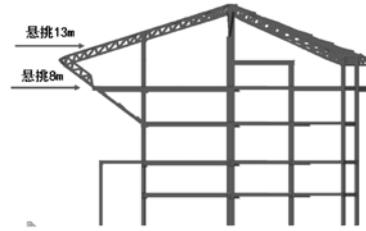
根据住建部《超限高层建筑工程抗震设防专

项审查技术要点》<sup>[1]</sup>（建质[2015]67号）、《四川省抗震设防超限高层建筑工程界定标准》<sup>[2]</sup>DB51/T5058-2014规定,经初步判断,本建筑需抗震设防专项审查内容及主要超限情况如下:



根据《四川省抗震设防超限高层建筑工程界定标准》DB51/T5058-2014要求,本项目存在一项不规则的特别不规则超限项:

- (1) 楼板局部不连续(1F夹层、3F层有效楼板宽度小于该层相应位置楼板典型宽度35%);
- (2) 扭转不规则位移比 $> 1.2$ ;
- (3) 屋面及4F楼层整体外挑尺寸 $a=13/8\text{m} > 6\text{m}$ ,



外挑尺寸大于6m

图11 竖向不规则超限示意图

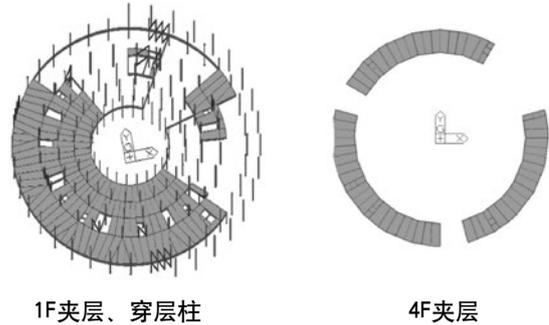


图12 局部不规则

属于抗震设防超限高层建筑工程<sup>[3]</sup>。

### 3 整体设计难点分析

#### 3.1 建筑、结构、幕墙参数一体化设计

建筑师往往比较注重建筑的形体、空间、功能及细节等等;结构师更加关注建筑的结构合理性、施工可行性、经济性等等。为努力探寻建筑结构合理的构成,实现建筑结构完美统一,要求建筑师与结构师密切的配合。

建筑形体的要求是建筑表皮与结构体系完美结合形体产生的,为了达到建筑要求的视觉效果,结合建筑外幕墙形体菱形分格,结构屋面也采用36道径向平面桁架+4道空间环桁架+菱形单层网壳的结构体系<sup>[4]</sup>,与外幕墙分格一一对应,这种网格的划分既增强了网格布置的规则性,改善了边界区域的杆件受力性能,又方便施工焊接及安装,大大提高了屋面围护结构施工精度。利用参数化软件,实现了建筑、结构、幕墙参数一体化设计。

成都“市花”是芙蓉花,为契合建筑创意,中间网壳选择花型网格,通过屋面幕墙(粉色代表玻璃幕墙、绿色代表铝板幕墙)玻璃与铝板材料的变化,实现芙蓉花造型,能够完美展现“技术与创新统一,结构成就建筑之美”的结构体系设计理念。

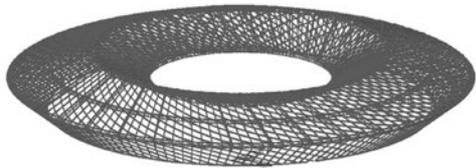
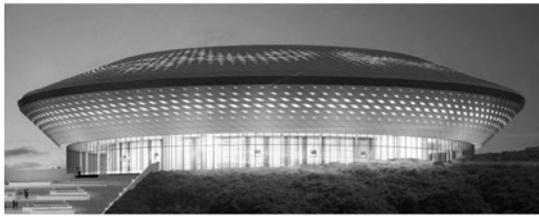


图13 幕墙侧面效果图

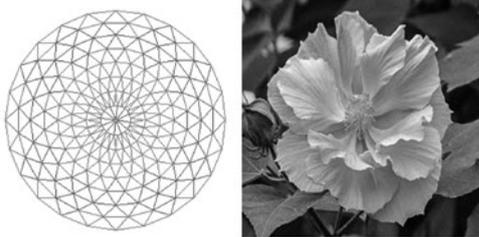


图14 幕墙区域效果图

### 解决竖向刚度突变

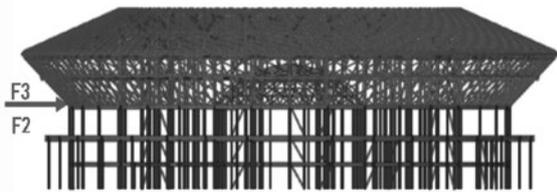
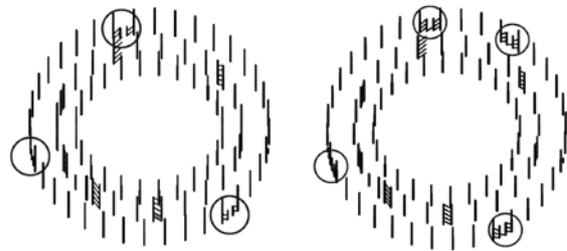


图15 结构抗侧体系立面图

### 3.2 解决竖向刚度突变

由于16m以上外网格在楼层间的存在（见图15），造成F2/F3层间刚度比接近0.9，竖向刚度接近突变；同时对于钢框架-支撑结构为二重抗侧力体系，F2层斜撑承担的剪力占总剪力15%，斜撑抗侧力作用较小，不符合双重抗侧力体系的结构设计第一道防线概念。对F2层进行如下优化（见图16）：在外围框架柱间增加支撑一个区域，斜支撑延伸至F2层（10m~16m），其余支撑未变化<sup>[5]</sup>。

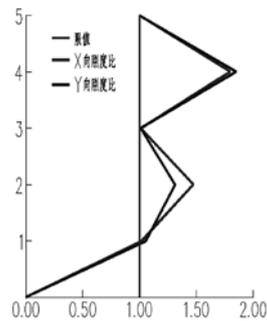
优化后的F2/F3层间刚度比接近 $1.0 > 0.9$ （见图17），F2层斜支撑承担的楼层剪力占楼层总剪力达到25%以上，保证钢框架-支撑结构为双重抗侧力体系（参见表3）。



优化前

优化后

图16 优化前后支撑对比



优化前

优化后

图17 优化前后层间刚度比对比

表3 地震作用下斜撑占结构总剪力百分比

层号	优化后 (X向)	优化前 (X向)	优化后 (Y向)	优化前 (Y向)
F4	43.80%	50.88%	44.46%	48.32%
F3	38.33%	45.20%	39.38%	54.09%
F2	26.16%	15.48%	29.37%	19.36%
F1.5	31.60%	35.17%	36.17%	31.95%
F1	32.14%	29.28%	35.33%	27.10%

虽然满足规范侧向刚度限值要求，出于安全角度，结构概念设计认为F2层为薄弱部位层，对其地震作用标准值剪力乘以1.25的增大系数，并将16m以下的柱钢材强度等级提高到Q390<sup>[6]</sup>。

### 3.3 大跨度悬挑舒适度

21.5m楼层外围悬挑最大8m（见图18），外网格斜撑作用不明显，竖向刚度较小，建筑使用功能为展厅人流相对密集，对楼层行走舒适感要求较高。目前对楼盖振动舒适度控制主要有两个指标：楼盖竖向振动频率和竖向振动加速度。此部分楼盖自身的第一阶竖向频率为2.5Hz，不满足竖向振动频率大于3Hz要求，需要采用峰值加速度来衡量舒适度。

采用Midas Gen进行动力时程分析，考虑单



图18 结构典型剖面图

人重量为75kg，人员密度约为1人/14m<sup>2</sup>，结合建筑功能采用了3种荷载模式进行分析：

- (1) 竖向位移最大点处单点连续步行；
- (2) 竖向位移最大点处单点连续步行；
- (3) 竖向位移最大点区域按照人群密度进行人群行走下连续步行（图19）。

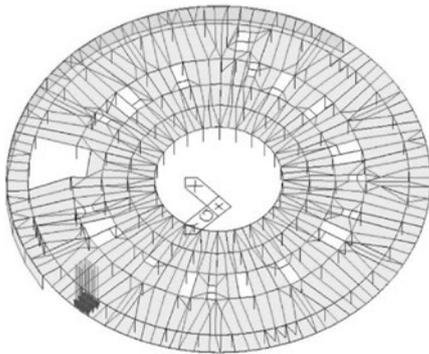


图19 荷载模式

图20可见，楼层各工况下最大竖向加速度为0.17m/s<sup>2</sup>，不大于《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2010)中规定的0.190m/s<sup>2</sup>的限值，满足舒适度控制要求<sup>[7]</sup>。

### 3.4 防倒塌分析及加强措施

F3层（16m~21.5m之间）的屋盖网壳作为三层顶外环悬挑梁的支撑结构，承受着三层顶和屋盖传递的荷载作用，主要杆件受压，是结构稳定性分析的薄弱环节，故对此部分结构补充防倒塌计算。通过删除三层（16m~21.5m之间）的网壳结构(见图21)，不考虑其有利作用，进而验算此状态下三层顶外环悬挑梁和上部屋盖的承载力和变形。

采用拆除构件法进行抗连续倒塌设计：取消支承网格，采用弹性方法（见下表1）进行剩余结构构件强度和结构整体大变形抗倒塌分析。

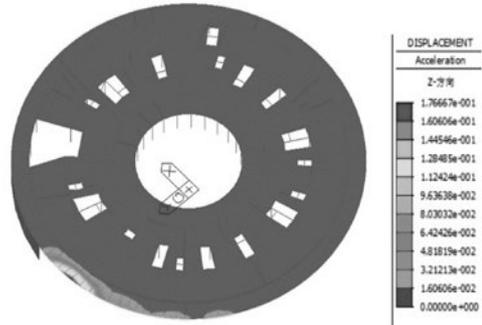


图20 楼板最大竖向加速度点

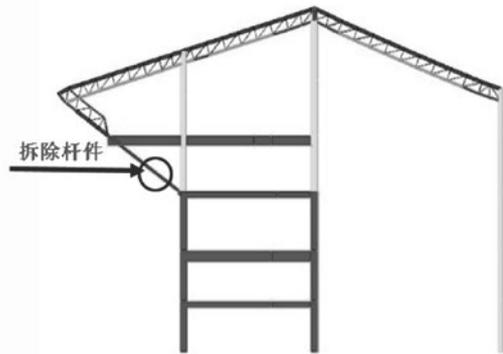


图21 结构拆除杆件示意图

表4 抗倒塌分析原则

内容	设计方法
强度	2D (恒载) + 1.0 L (活载) < 1.25 f <sub>yk</sub>
正常使用	D (恒载) + 0.5 L (活载) < L / 125

结果表明：悬挑钢梁杆件应力最大430Mpa，均小于1.25倍材料标准值，结构挠跨比考虑20mm的起拱，66-20=46<64mm，满足预设控制指标。三层顶的悬挑梁仍具有足够的承载能力和变形能力，即可以认为在二层网格失效的情况下，结构也不会引起大范围连续倒塌，整体结构具有较高的抵抗连续倒塌的能力<sup>[8]</sup>。

为增加悬挑梁的安全度，提高抗倒塌能力，减小悬挑跨度和框架柱面外计算长度，在框架柱端部采取加腋构造措施(见图22)，可以降低悬挑梁端部弯矩约10%，降低框架柱平面外弯矩和位移10%。

## 4 主要分析结果

### 4.1 整体静力设计

按照规范要求，考虑各种荷载工况组合下



图22 柱端部采取加腋加强措施

结构承载力极限状态和正常使用状态下的性能。其中，荷载工况包括恒荷载、活荷载、风荷载以及温度荷载（钢结构屋面考虑+30℃，梁柱考虑+20℃，降温考虑-20℃，要求施工合拢温度在10℃~20℃）。

钢结构抗震等级为四级，钢构件采用Q345B/Q390B；所有荷载工况组合下，控制关键杆件应力比小于0.85（大悬挑相关构件、与支座连接构件、网壳），其余杆件小于0.9。构件应力分布图（见图23、24）。

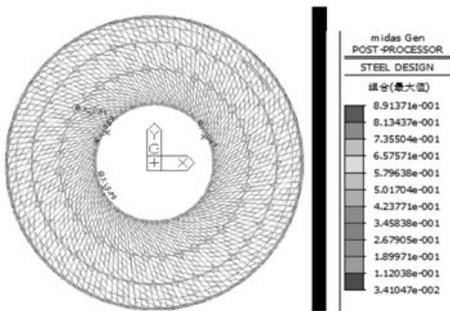


图23 屋面组合应力包络图

承载力计算，屋面控制荷载组合为【1.2D+1.4[L]+0.84T-+0.84】，最大应力比为0.89；单层网壳控制荷载组合为【1.2D+0.98[L]+1.4T++0.84-Y】，最大应力比为0.53，满足设计要求。

正常使用情况下，屋面在【D+L】工况下，Z方向的最大位移值为48mm，其短跨方向跨度为11.5m，相对支座的位移值为25mm，挠度为1/484，满足1/250的设计要求。单层网壳在【D+L】工况下，Z方向的最大位移值为9mm，其短跨方向长度为40000mm，挠度为1/4444，满足1/400的设计要求。在T+、T-控制工况下，屋面

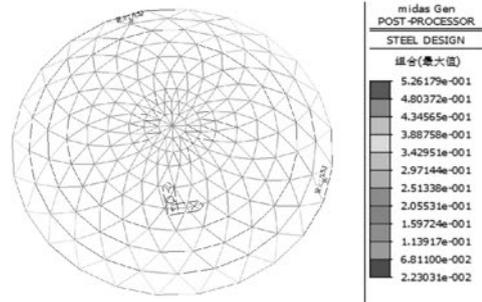


图24 单层网壳杆件组合应力包络图

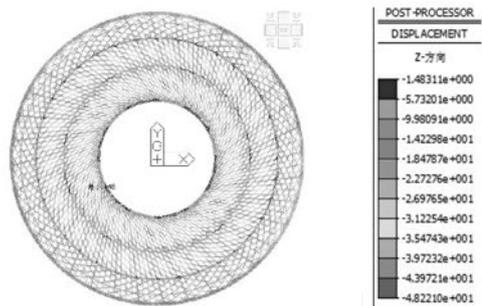


图25 屋面DZ变形—【D+L】工况

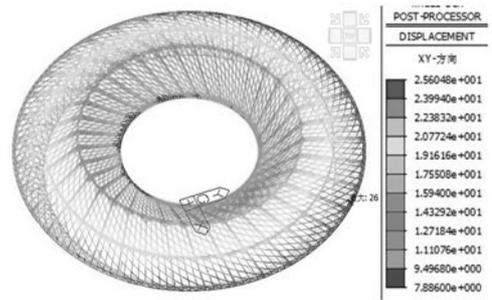


图26 屋面DX、DXY变形—【升温】工况

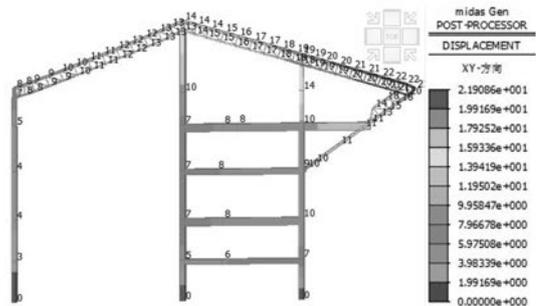


图27 单榀桁架DXY变形—【升温】工况

外围的XY方向的最大位移值为26mm，其相对位移值为10mm，短跨方向长度为16000mm，挠度为1/1600，满足1/250的设计要求。在T+工况下，单榀桁架XY方向的最大位移值为22mm，相对位

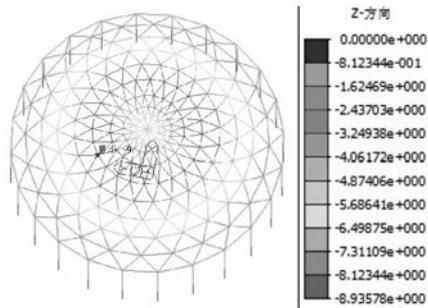


图28 单层网壳DZ变形—【D+L】工况

移为8mm,其短跨方向长度为16000mm,挠度为1/2000,满足1/400的设计要求(见图25~28)。

桁架、单层网壳构件长细比:压杆120,拉杆150。其余构件的长细比、宽厚比、径厚比等满足《建筑抗震设计规范》的相关要求。

#### 4.2 整体稳定设计

单层网壳的跨度为40m,失高7.4m,失跨比 $1/5.4 < 1/5$ ;屋面网格体系,因平面径向桁架+环向空间桁架结构,整体性较好,没有出现整体稳定问题,现采用两榀主桁架之间的网格进行局部整体稳定分析,网格尺寸 $13 \times 16\text{m}$ ;为考察单层网壳和屋面局部网格体系是否有整体失稳的可能,选取了第一阶屈曲模态(图29、30)作为初始缺陷分布模态,初始缺陷取跨度的1/300。按照考虑几何和材料非线性影响进行整体稳定分析,结构失稳的临界点荷载值分别为结构正常使用状态承载力的12.6和4.2倍(图31),满足规范要求<sup>[9]</sup>。

#### 4.3 整体结构抗震性能化介绍

本工程属于典型的复杂规则性超限:包括平面扭转不规则、楼板不连续、外挑尺寸突变竖向不规则、局部夹层及穿层柱不规则。针对多重复杂的结构情况,采用抗震性能化设计方法进行抗震设计。综合考虑抗震设防类别、设防烈度、场地条件、结构超限程度等因素制定了整体控制指标及主要构件的性能指标C。

采用YJK和Midas Gen计算软件对结构进行整体分析,在小震作用下,结构所有构件处于弹性,并满足承载力和刚度验算要求。在中震作用下,结构主要抗侧力及关键受力构件(包括框架柱、与支撑连接框架梁柱、屋面与框架柱连接桁架相关构件、主要节点)满足性能指标对应的承载力验算要求。在大震作用下,结构部分构件已经进入塑性,重点通过对结构整体指标(弹塑性层间位移角、基底剪力)和构件性能(塑性发展的区域、损伤程度)两个方面来找出结构薄弱

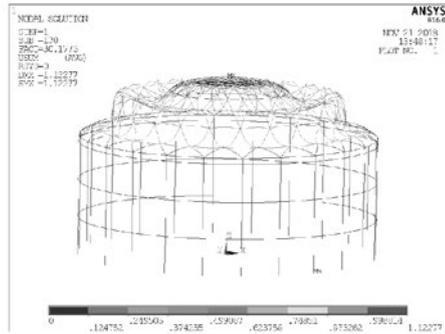


图29 单层网壳模态1(屈曲荷载系数30.2)

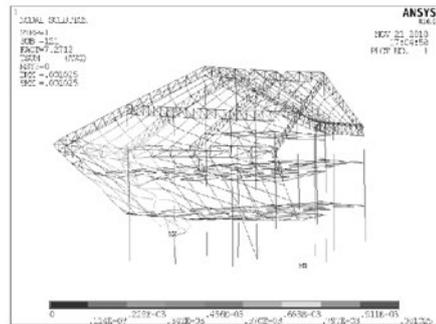


图30 网格结构模态1(屈曲荷载系数7.3)

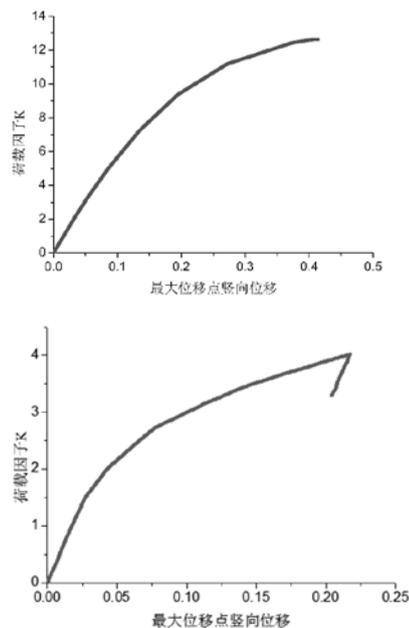


图31 荷载位移曲线

部位,并采取加强措施。综合整体与构件性能指标认为结构满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设防目标。

#### 4.4 屈曲约束支撑设计

钢框架+中心支撑全钢结构,支撑作为抗震第

一道防线非常重要,中心支撑采用BRB屈曲约束支撑,在小震下处于弹性工作状态,BRB为结构提供附加刚度;设防、罕遇地震作用工况下(图32),BRB为结构提供刚度和参与结构耗散地震能量,减小其他构件损伤,大震下BRB耗能附加阻尼比1%左右,提高结构安全度。

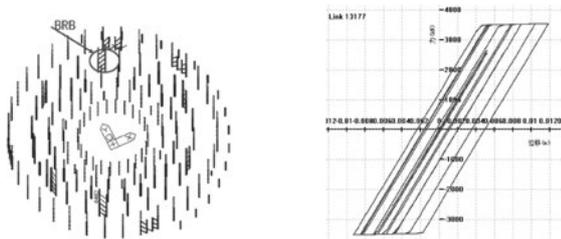


图32 屈曲约束支撑模型及大震下滞回曲线

## 5 针对超限主要加强措施

### 5.1 针对平面扭转不规则、局部楼板不连续采取措施

(1) 为控制结构扭转周期比,减小结构扭转不规则,在环向布置中心支撑,形成强支撑体系。

(2) 对开大洞楼层(5m/16m)楼板构造上厚度不小于120mm,配双向双层钢筋网,配筋率不小于0.25%,并满足中震弹性的性能化目标。

### 5.2 针对悬挑体型收进不规则采取措施

(1) 避免刚度及承载力突变,F3层(斜角网格层)减小斜角网格构件截面,采用两端铰接处理,最大化降低斜角网格对整体刚度的影响。

(2) 提高F2层(斜角网格下一楼层)楼层侧向刚度,在外围增加8道环向支撑,满足侧向刚度比要求,楼层地震剪力按照薄弱层乘以1.25的增大系数。提高F2层(斜角网格下一楼层)框架柱承载能力,钢材强度等级由Q345提高到Q390。

(3) 验算大悬挑结构的竖向舒适度,并采取减震措施,针对大悬挑采用拆分法进行防倒塌设计,并在框架柱采取加腋构造措施。

### 5.3 其他措施

(1) 结构体系上:采用抗震性能较好的钢框架-中心支撑结构,结构具有良好屈服与耗能机制。计算分析上:考虑恒载、活载、风载、温度、地震荷载组合作用下结构的承载力和变形、整体稳定设计满足要求。

(2) 对于F1、F2层的穿层柱,小震下除满足应力比在0.8以内,控制轴压比在0.4以内(实现强柱弱梁),并补充通高模型计算承载力,并

满足中震弹性的性能化目标。

## 6 结论

(1) 结构体系考虑经济性、利用率、施工技术及周期、结构整体控制指标等因素,采取钢框架+中心支撑体系(钢管柱+中心支撑+型钢楼面梁+钢筋桁架楼承板)。

(2) 整体设计难点重点从建筑、结构、幕墙参数一体化、解决竖向刚度突变、大跨度悬挑舒适度、防倒塌分析4个方面进行介绍,并采取相对应解决措施。

(3) 屋面在恒载、活载(雪荷)、风载、温度、共同作用满足结构承载力极限状态和正常使用状态下的性能,并针对超限类型采取相应抗震措施。结果表明,整体结构安全可靠,希望能为类似工程提供参考。

致谢:衷心感谢中国建筑西南设计研究院有限公司结构专家冯远、吴小宾、刘宜丰、肖克艰、毕琼、伍庶对本工程结构设计提出的宝贵建议和意见。

### 参考文献

- [1] 超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点[R].20150521
- [2] 四川抗震设防超限高层建筑工程界定标准[R].2014
- [3] GB50011-2010建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010
- [4] GB 50017:2017钢结构设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2017
- [5] 樊钦鑫,李冬,徐瑞,金来建,杨超杰,徐志坚,谢军,付锦龙.内蒙古自治区美术馆复杂钢结构设计[J].建筑结构.2018.48(23):85-92
- [6] 卢玲,梁金桐,朱立刚.韩国首尔龙山“云朵”结构设计及优化[J].建筑结构.2012.42(10):8-12
- [7] 张良平,马臣杰,杨鸿,尚文红,许璇,焦禾昊,郑竹.深圳当代艺术馆与城市规划展览馆结构设计综述[J].建筑结构.2011.41(4):20-23
- [8] 肖自强,马升东,史义博,张兴,李亮,张建明,刘彬,张震.印象海南岛仿生剧场结构设计[J].建筑结构.2013.2(3):40-44
- [9] 林瑶明,方小丹,梁剑.东莞香馆悬挑结构设计[J].建筑结构.2012.42(3):28-32

# 援毛里塔尼亚生物安全实验室及配套工程给排水设计要点分析

■ 陈达 李力军 [给排水]

**摘要:** 本文以中国援助毛里塔尼亚生物安全实验室及配套工程为例,介绍了其工艺需求和给水、排水系统,重点分析了生物安全实验室的给排水设计要点及援建项目的特殊技术措施,以安全为核心,充分考虑受援国当地实际情况,因地制宜合理设置给排水系统,确保实验人员和实验室周围环境的安全。

**关键词:** 生物安全实验室; 给水防污染; 废水处理

## 0 引言

2020年一场公共卫生危机席卷全球,生物安全形式呈现国际化、危害极端化、发展复杂化的特点。高度关注国内生物安全问题的同时,在“一带一路”的倡议下,中方明确提出将支持非洲健全公共卫生体系和政策,帮助非洲国家提升公共卫生、监管、流行病学和防控体系。本次援建的生物安全实验室隶属于毛里塔尼亚国家公共卫生研究院,该研究院是毛方目前唯一从事公共卫生服务、疾病预防控制和农产品安全检测、研究以及教学工作的研究院。此次新建的各类实验室,尤其是生物安全实验室,可有效改善该国疾控水平,提高突发疫情监控、传染病研究和统计能力。

## 1 项目概况

毛里塔尼亚位于非洲西北部,西濒大西洋,北接西撒哈拉,全国3/4的面积为沙漠。本项目位

于该国首都努瓦克肖特,气候干旱多风沙,盐蚀较严重,年均降雨量不足100mm。本次项目占地面积约12220m<sup>2</sup>,其中设有生物安全实验室的办公实验楼总建筑面积约为7900m<sup>2</sup>,该建筑物的主要功能包括:11类实验室、办公、会议、教室、餐厅、仓库及设备用房等。地上3层(局部2层),无地下室,建筑高度16.5m。

办公实验楼分南北两个功能区,北侧区域为两层的行政办公、教学和餐厨区;南侧区域首层为公共服务和设备用房,2层、3层均为实验室,包括普通实验室共41间,无菌实验室2间,二级生物安全实验室(BSL-2)4间,三级生物安全实验室(BSL-3)1间,千级净化实验室1间等。办公实验楼建筑效果图如图1所示。

## 2 系统设置

毛方公共卫生研究院的任务职责涵盖了疾控中心、结核病所、血防站、农产品质量安全监督检查检测机构等相关功能,综合性较强。11类实验室中的病毒实验、医学细菌实验需要在BSL-2、BSL-3或千级净化实验室内完成;结核病实验需要在PCR实验区完成。实验室内均设置洗手池及

作者简介:陈达,男,工程师,2017年毕业于哈尔滨工业大学市政工程专业,现就职于中航建设建筑设计研究院。



图1 办公实验楼建筑效果图

洗眼装置,部分实验室需要供应纯水。生物安全实验室产生的废水含有致病微生物,必须进行消毒灭菌处理。BSL-3实验室工艺布置图如图2所示。

### 2.1 给水系统

本项目用地北侧4km处有自来水厂及供水水塔,水塔供水压力3bar,可满足本项目用水要求。城市供水满足当地饮用水卫生标准。

#### (1) 生活供水

由于当地市政供水停水频繁,为保证供水安全并结合毛方供水部门要求,本项目将2天的最高日生活用水全部贮存在不锈钢生活水箱内,生活水箱出水经紫外线消毒后,再由变频供水设备加压供给建筑物内各用水点。

#### (2) 实验室供水

为了防止实验室在供水时可能对其他区域造成回流污染,实验室给水与生活用水分别供给,并采取了防倒流污染的措施。接各层实验室的给水管上分别设置倒流防止器;BSL-3实验室防护区给水单独供应,并设置有空气间隙的水箱,容积按一天用水量计算,在接入BSL-3实验室防护区的给水管上设置倒流防止器。生物安全实验室防护区的给水管道上安装的倒流防止器和断流水箱均设置在辅助区内。

### 2.2 污废水系统

项目所在地目前无市政雨、污水管网,由于当地降雨量很少,建筑物屋面雨水大多采用外排形式,雨水直接排放到室外地面,靠地面渗透自然排放。污水一般通过化粪池和渗井方式排放,但近年来该地区地下水位上涨明显,渗水井基本无渗水作用,故本工程设置化粪池收集处理污水,不设置渗水井。

排水系统采用实验室废水与生活污水分流排放的方式。

#### (1) 生活污水

院区室内生活污水通过管道收集排入室外化粪池处理,化粪池污水由车辆定期抽吸外运。

#### (2) 实验废水

BSL-3生物实验室防护区内产生的少量废水由专用密闭容器收集,经过实验室内的双扉高压灭菌器高温高压消毒灭活处理,然后再倒入辅助区洗消间的水池中,与其他实验室废水共同收集排入室外接触消毒池,接触消毒时间 $>1\text{h}$ ,余氯量 $>3\text{mg/L}$ ,接触消毒时间和余氯量按照《医院污水处理设计规范》(CECS07:2004)中的二级标准确定<sup>[5]</sup>。考虑当地污水处理的运行管理水平、现有医院消毒处理方式和当地消毒剂的供应情况,采用购买商品次氯酸钠作为消毒剂。经处理的实验室废水达到排放标

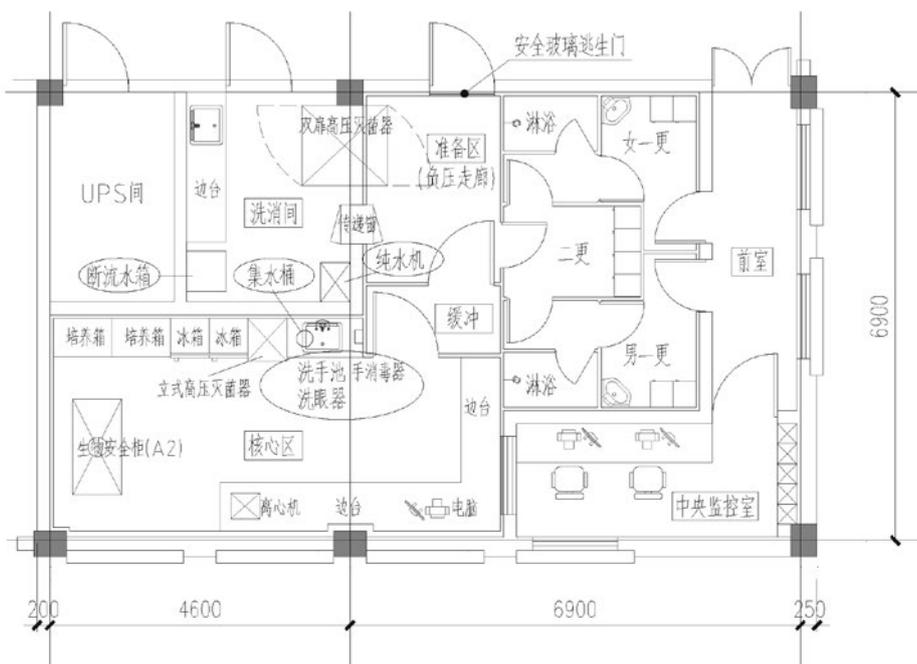


图2 BSL-3实验室工艺布置图

准后由车辆定期抽吸外运。

各实验室含有浓酸或浓碱的实验废液、含有苯酚等的有机试剂，分别倒入专用的废液贮存容器中，集中收集、贮存，存放在一层废液储存间内，由专业公司定期回收处理。

### 2.3 消防系统

本项目办公实验楼为体积大于20000m<sup>3</sup>的多层民用建筑，参照中国规范并结合当地消防设施设置情况，办公实验楼设置了室内外消火栓系统及建筑灭火器。

## 3 设计要点分析

生物安全实验室以生物安全为核心，要确保实验人员和实验室周围环境的安全。实验室的给水系统应确保不发生回流污染，排水也应确保不污染内外部环境。所以，给排水设施的设计应严格遵循国内相关规范，主要设计依据为《生物安全实验室建筑技术规范》（GB50346-2011）、《实验室生物安全通用要求》（GB19489-2008）、《病原微生物实验室生物安全通用准则》（WS233-2017）。但本项目为援建项目，还需结合当地实际情况，尤其是当地后期维护管理

能力，尽量采用操作简单、维护方便的措施。

### 3.1 实验室给水防污染措施

根据《生物安全实验室建筑技术规范》GB50346-2011第6.2.2款规定，ABSL-3和四级生物安全实验室宜设置断流水箱<sup>[1]</sup>。但新版《建筑给水排水设计标准》（GB50015-2019）第3.3.9款规定，三级及三级以上的生物安全实验室应设置有空隙间隙的水箱<sup>[4]</sup>，所以BSL-3实验室也应该设置断流水箱。断流水箱和给水管道上的倒流防止器的双重设防，可有效防止防护区域内外以及防护区域内部交叉感染。实验室给水系统防污染措施详见图3。

### 3.2 BSL-3实验室排水措施

《生物安全实验室建筑技术规范》GB50346-2011第6.3款详细规定了三级和四级生物安全实验室排水系统设计要求：BSL-3实验室排水管道系统要采取严格的污水收集和灭活处理，防护区应根据压差要求设置存水弯和地漏的水封深度，通气管口应设置高效过滤器，防止污染物回流污染且保护外部环境<sup>[1]</sup>。但根据实际BSL-3实验室运行经验，实验室内用水量很小，废水的主要来源是洗手装置和应急洗眼器。根据《实验室生物安全通用要求》GB19489-2008第6.3.4.1款规定，如果

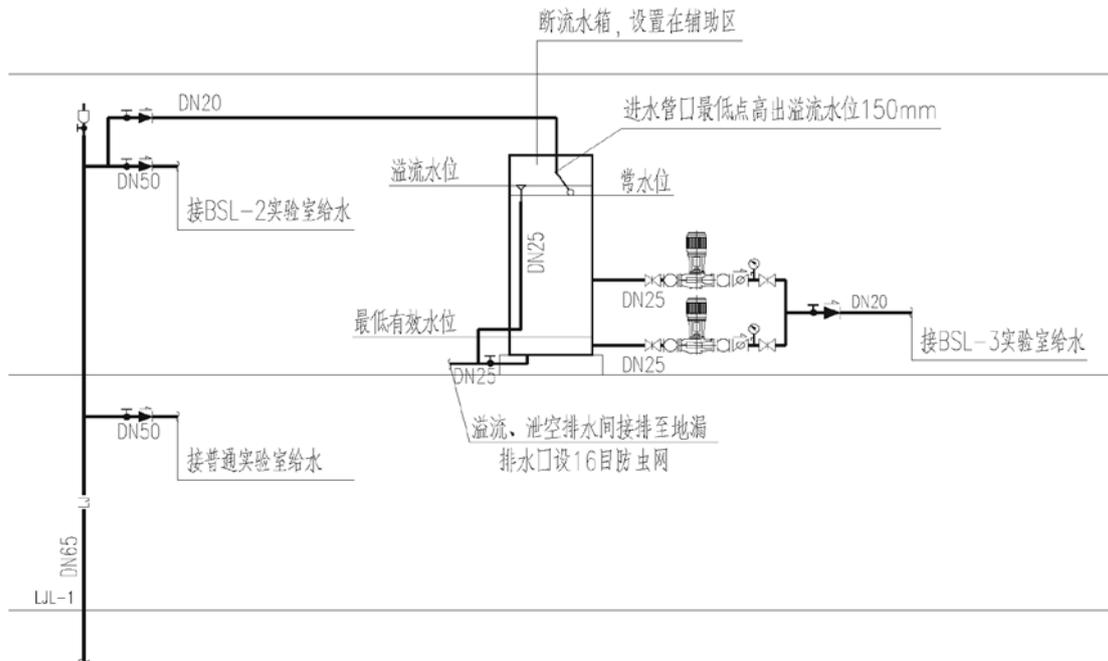


图3 实验室给水系统防污染措施示意图

实验室不具备供水条件时,则应设非手动消毒灭菌装置<sup>[2]</sup>,即可采用免接触无排水的手消毒器替代洗手盆,从源头上减少废水的产生。而应急洗眼器平时基本不用,为其设置独立的废水收集及活毒处理系统非常不经济,它的排水可以收集到专用密闭容器内,经实验室内的双扉高压灭菌器消毒灭活处理后排入辅助区废水管网,既满足灭活要求,又能节省设备投资及后期运行维护费用。

三级生物安全实验室可在防护区内有排水功能要求的地面设置地漏,其他地方不宜设地漏。有排水功能要求的地面如淋浴间、动物房、解剖间等<sup>[1]</sup>,对于未设置以上设施的BSL-3实验室防护区内不建议设置地漏。

综上所述,本项目采用自动手消毒器,洗眼器排水接至集水桶,BSL-3实验室内未设置地漏。

自动手消毒器见图4,应急洗眼器排水集水桶见图5。

### 3.3 工艺设备给排水设施

在生物实验室内需要接给排水的工艺设备主要是高压灭菌器和纯水机。高压灭菌器用于对病原微生物操作过程中产生的生物危险废物和废液进行灭菌处理,通常使用立式压力灭菌器和双扉压力蒸汽灭菌器。立式压力灭菌器容积较小,放置在实验室核心工作间内就地消毒灭菌,双扉压力蒸汽灭菌器设置在BSL-3实验室防护区和非防护区之间<sup>[7]</sup>。

高压灭菌器采用电加热,内置蒸汽发生器,需要供给蒸馏水或纯化水。立式或台式灭菌器一般都是移动式,可直接将用水加到内部净水箱中,少量排水可接到集水桶内,所以可不设置固定给排水管网;而大型双扉压力蒸汽灭菌器内部的水环式真空泵和内置蒸汽发生器均需供水,水环真空泵所需循环水补水采用自来水,蒸汽发生器需要供应纯化水,同时会有带压高温凝结水排出,需考虑耐高温排水管道,且这部分排水应单



图4 自动手消毒器



图5 应急洗眼器排水集水桶

独排放至室外,而不能与地面下水系统连接,以防止破坏地漏水封造成反流<sup>[6]</sup>。高压灭菌器实物图如6所示。



(a) 立式压力灭菌器

(b) 双扉压力蒸汽灭菌器

图6 高压灭菌器实物图

由于本项目实验室类型较多,使用纯水的实验室较分散,故各实验室根据用水的不同水质要求分散设置纯水机制备纯水,这样既降低了用水成本,又减轻后续运营成本。三级、四级生物安全实验室用纯水水质可参考医药行业及生物制品行业水质标准,其水质对电阻率(通常大于 $1.0\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ )要求并不高,但对去除细菌及热原(细菌微生物小于 $100\text{cfu}/\text{mL}$ )的要求比较严格<sup>[7]</sup>。实验用纯水水质标准如表1所示,其中三级水一般用在玻璃器皿清洗等日常试验中,实验清洗用水、消毒灭菌器等用水一般为二级水<sup>[8]</sup>,在局部有高纯水要求的使用点,如水和食物质量检测实验室,需要一级高纯水。

表1 纯水水质标准<sup>[8]</sup>

项目	三级	二级	一级
电阻率 ( $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ )	>0.05	>1.0	>18.0
TOC ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	<200	<50	<10
致热原 ( $\text{EU}\cdot\text{mL}^{-1}$ )	NA	NA	<0.03
粒径 $>0.2\mu\text{m}$ 微粒 (个 $\cdot\text{mL}^{-1}$ )	NA	NA	<1
$\text{SiO}_2$ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	<1000	<100	<10
细菌 ( $\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ )	<1000	<100	<1

### 3.4 援外项目特殊技术措施

援外项目通常执行中国的规范、标准,但同时还应考虑受援国当地的经济状况、气候特征、习惯做法等。对于生物安全实验室,涉及安全问题,更应考虑当地的运行管理水平,不能盲目追

求高标准。本项目结合当地实际情况在给排水系统设置上采取了如下特殊措施:

(1) 当地市政供水非常不稳定, 停水频繁, 水务部门要求全部用水贮存在蓄水池中, 水池容积要满足不小于2天的生活用水量。虽然储存较长时间用水对水质不利, 但考虑当地实际情况必须按毛方政府部门要求设置。若水箱储水容积较大, 在投资条件允许的情况下, 建议设置水箱自洁消毒器。

(2) 毛方北部为撒哈拉沙漠, 当地风沙较大, 在盥洗时经常挟带大量沙子进入排水管道引起阻塞, 所以设计时需要加大排水管道, 公共卫生间洗手盆排水横管全部设计为DN100。

(3) 考虑当地使用习惯和后期维护成本, 卫生器具一律采用手动式, 不建议采用感应式, 感应式配件一旦发生损坏, 当地无维修更换能力。对于规范要求的必须采用非手动开关的实验室洗手盆龙头, 设计选用肘式开关水龙头。

(4) 项目所在地临近大西洋, 当地空气含盐量很高, 设备材质选择时充分考虑防腐要求, 给排水管道选用耐腐蚀的塑料管材, 并考虑日后维护更换方便, 尽量选择当地能采购到的产品。

(5) 由于当地无市政污水管网, 污水一般经化粪池处理后由渗井排放。但项目所在地地下水位很高, 半米以下就有盐水渗出, 无法采用渗井排放, 故需要由化粪池收集并储存污水, 由车辆定期抽吸外运。为了延长清运周期, 减少运输成本, 必须加大化粪池容积, 设计按一周清运一次考虑。

(6) 为了防止含有致病微生物的实验废水污染非实验区的生活污水, 本项目实验室废水与生活污水分流排放。生活污水直接排至化粪池, 实验室废水单独收集排入室外接触消毒池。由于本项目废水产生量较少, 且实验室类型为病毒实验室、细菌实验室等, 无产生重金属的化学实验室; 较高危险等级的生物实验废水已在实验室内经灭活处理; 各实验室实验废液集中收集、贮存, 不直接排放。通过对当地医疗机构和原卫生院的实地考察, 考虑投资和运行费用、操作管理水平、消毒剂的实际供应情况等因素, 本项目仅在室外设置接触消毒池进行化学消毒处理, 并尽量延长废水在消毒池中的接触时间。为了方便后期员工对消毒剂投加量的把控和废水水质的检测, 本项目配置了在线余氯仪并带传输接口, 可

自动或手动检测余氯量。

(7) 毛方原为法国殖民地, 当地消防用具规格、形式均为法国制式。建筑内一般仅设置消防水喉和灭火器, 未见设置自动喷水灭火系统的场所。故本项目结合当地实际情况, 室外消火栓、消防车取水口等采用当地消防部门要求的规格、型号。

## 4 小结

对于集办公、实验室于一体的综合楼, 实验室种类多, 生物实验室安全等级不同, 给排水系统应采取有效措施确保供水不产生回流污染、排水不污染内外部环境。同时还要采取有力措施, 包括培训实验人员良好的实验习惯、控制实验条件, 减少重复实验、选用可替代的免用水设备等, 尽量从源头上减少污染物的产生量。

对于援外项目, 在遵守中国规范的同时, 还需要考虑受援国当地实际状况, 包括气候特征、经济发展水平、维护管理能力、使用习惯等多方面因素, 需视情合理确定系统方案, 避免全部照搬中国建设标准, 充分体现规范适用、因地制宜原则。给排水设计除保证生物安全可靠外, 在设备选型、管材选择上要充分考虑其耐久性、适用性等因素。

## 参考文献

- [1] GB 50346—2011 生物安全实验室建筑技术规范 [S].
- [2] GB 19489—2008 实验室生物安全通用要求 [S].
- [3] WS 233—2017 病原微生物实验室生物安全通用准则 [S].
- [4] GB 50015—2019 建筑给水排水设计标准 [S].
- [5] CECS07: 2004 医院污水处理设计规范 [S].
- [6] GB 50457—2019 医药工业洁净厂房设计标准 [S].
- [7] 曹国庆等. 生物安全实验室设计与建设 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [8] 王楹, 张颖. 实验室纯水系统设计经验 [J]. 中国给水排水, 2013, 29 (18): 97~98.

# 仓库型特殊应用喷头在自喷系统设计中的应用体会

■ 张舰艇 [给排水]

**摘要:** 《自动喷水灭火系统设计规范》GB 50084-2017(以下简称“自喷规范”)自2018年1月1日起实施。新的自喷规范增加了多种喷头,笔者结合工程实例,着重介绍仓库型特殊应用喷头在设计选型中的应用体会,以期与设计行业的同仁提供参考。

**关键词:** 自喷规范;仓库型特殊应用喷头;设计选型

## 0 前言

新版自喷规范修订了很多内容,如:增加了净空高度为12m~18m的民用建筑采用湿式系统的设计参数;增加了一项新技术——防护冷却系统;并完善了仓库场所采用自动喷水灭火系统的设计要求等。本文主要针对用于仓库场所的、本次规范新增的一种喷头:仓库型特殊应用喷头。通过具体的工程实例,探讨该种喷头在实际设计中的选型、设计以及计算。

## 1 工程概述及基本参数的取值

本工程为某航空公司大型维修机库项目。航材库位于机库附楼内,共两层,一层层高

6m,二层层高5m;局部通高(用于将航材吊装至二层),通高区净空高度10.76m,总面积约2500m<sup>2</sup>,其剖面图见图1。其中,一、二层局部放置单、双排货架,储物高度不超过3.5m;其他区域为堆垛货物,高度不超过4m;通高区临时堆放航材,储物高度不超过4m。要求工作状态时严禁误喷,因此,航材库需采用预作用自动喷水灭火系统。

根据自喷规范,仓库的火灾危险等级为仓库危险级Ⅱ级,一、二层堆垛区的喷水强度为16L/min·m<sup>2</sup>,作用面积200m<sup>2</sup>,持续喷水时间2h。

但在对通高区自喷系统设计时,遇到了困难。首先,通高区净高超过了9m,按照自喷规范,只能选用早期抑制快速响应喷头或仓库型特殊应用喷头。工作状态时严禁误喷,就无法采用早期抑制快速响应喷头,而只能选用仓库型特殊应用喷头。然后,结合规范4.2.8条仓库型特殊应

作者简介:张舰艇,男,高级工程师,2008年毕业于北京工业大学市政工程专业,现就职于中航建投民航工程设计研究院。

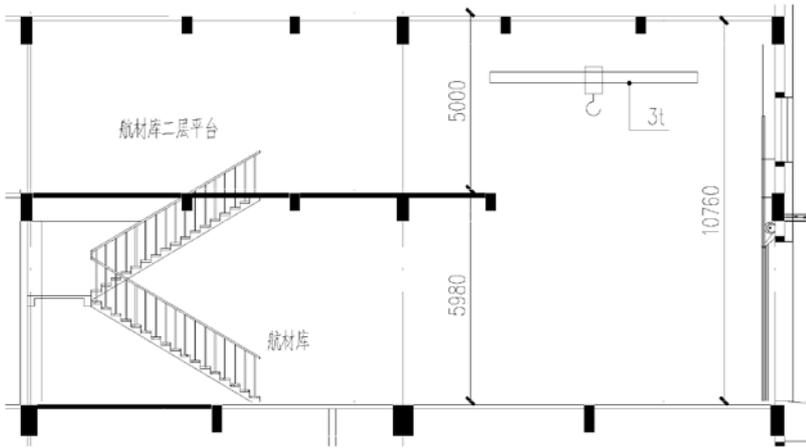


图1 航材库剖面图

用喷头的适用场所之一为：最大净空高度不超过12m，且最大储物高度不超过10.5m，储物类别为仓库危险级Ⅰ、Ⅱ或箱装不发泡塑料的仓库及类似场所。本航材库是满足此条要求的，可以选用仓库型特殊应用喷头。

按道理讲，再根据5.0.6条，对仓库型特殊应用喷头直接进行设计参数的取值就可以了。但遗憾的是，5.0.6条只是针对仓库型特殊应用喷头用于湿式系统的设计参数，且5.0.11条预作用系统的设计要求中，并没有提及仓库型特殊应用喷头应用于预作用系统时的设计参数应该如何取值。

于是笔者联系了自喷规范的主要起草人，给出的答复是：目前，自喷规范确实没有仓库型特殊应用喷头应用于预作用系统的试验数据，建议其基本参数的取值，仍参照5.0.11条第2款的要求，即与湿式系统的基本设计参数相同。但需提高该种喷头的动作温度至141℃（而非常规的68℃），以使喷头动作时，开放的喷头较少，但可确保较大的喷水强度，以提高火灾初期的灭火效率。

根据自喷规范5.0.6条，最大净空高度不超过12m，最大储物高度不超过10.5m的情况下，仓库型特殊应用喷头的设计参数如下：喷头的流量系数 $K=363$ ，喷头设置方式：下垂型，喷头的最低工作压力为0.2MPa，作用面积内开放的喷头数为12支，喷头的最大间距3m，喷头的最小间距2.4m，持续喷水时间1h，确定了喷头的设计参数，就可以对喷头进行布置了。由于本航材库中，通高区的喷头位于预作用系统的最不利端，本文以下部分将着重对此区域内的自喷系统进行设计、计算。

## 2 喷头的布置及水力计算

本航材库无吊顶，喷头需布置在梁间，根据规范7.1.6条第2款，喷头的布置应符合规范7.2.1条。本设计中，喷头的布置间距为 $2400\text{mm} \times 2400\text{mm}$ ，符合7.2.1条的规定，且无需在梁底面的下方增设洒水喷头，其布置方式见图2。

因本航材库的火灾危险等级为仓库危险级Ⅱ级，且采用的喷头流量系数 $K=363$ ，且喷头的最低工作

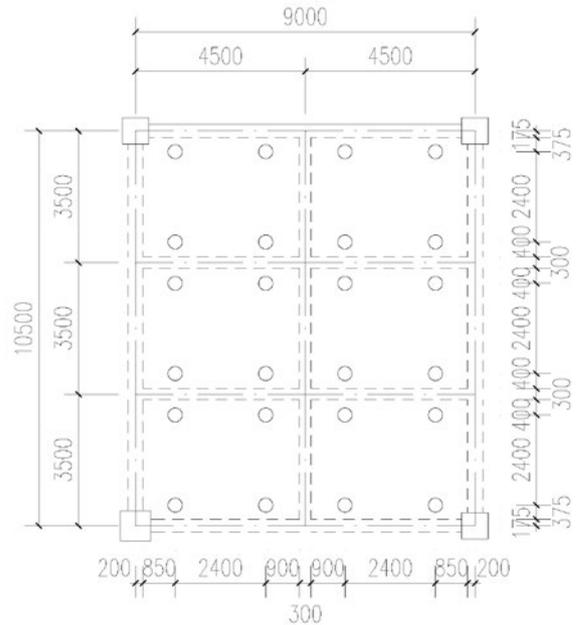


图2 航材库通高区的喷头布置

压力为0.2MPa，因此，喷头的配水支管、配水管的管径均需经水力计算确定。根据规范9.1.1条，最不利点单只喷头的流量为：

$$= K\sqrt{10P} = 363 \cdot \sqrt{10 \cdot 0.2} \\ \approx 513.4\text{L}/\text{min} \approx 8.6\text{L}/\text{s}$$

再根据9.2.1条，初算确定的配水支管、配水管控制的喷头数量，见表1。

表1 配水支管、配水管控制的喷头数量

公称管径 (mm)	控制的喷头数 (只)	公称管径 (mm)	控制的喷头数 (只)
DN50	1	DN100	5
DN65	2	DN125	7
DN80	3	DN150	10

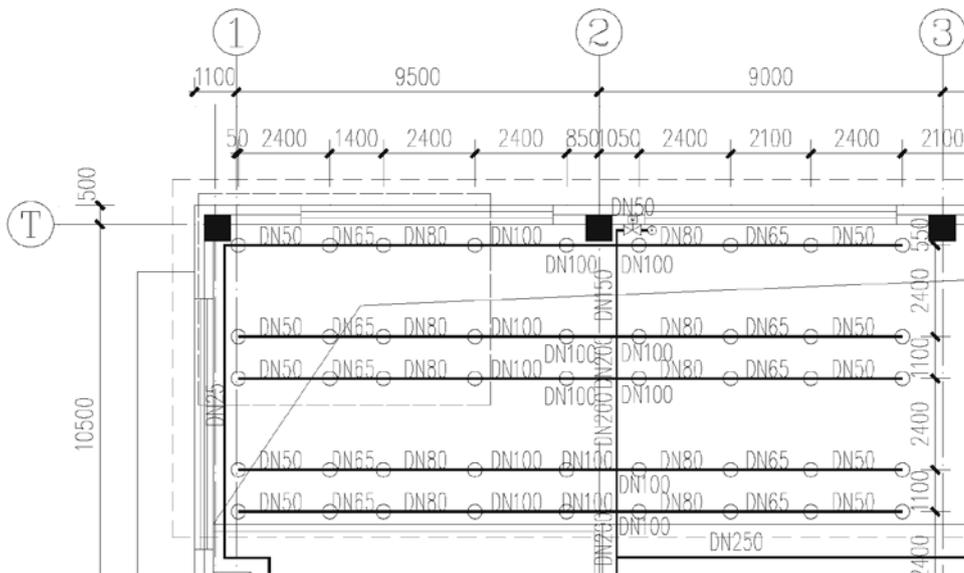


图3 通高区自喷系统的局部布置图

则航材库通高区自喷系统的局部布置图如图3所示。

最后，取图2中最不点处的12只喷头，对其进行水力计算，计算后的设计流量为112.7L/s。其中，配水干管管径虽然采用DN200时，流速为3.66m/s，在经济流速的范围内，但因该区域离消防泵房距离较远，约255m，沿程损失过大（约为25mH<sub>2</sub>O），因此将配水干管管径放大为DN250，其沿程损失约7.7m mH<sub>2</sub>O。自喷泵的扬程

$$H=1.2 \times (25+8+2)+20+(10.78-0.55+6.0-0.5)=77.7\text{m}。$$

实际选用的自喷泵的扬程取80m。

### 3 末端放气阀的计算

根据自喷规范8.0.11条规定，仅由火灾自动报警系统联动开启预作用装置的预作用系统，其配水管道充水时间不宜大于2min。本项目预作用系统的管道容积约为12.7m<sup>3</sup>，放气量至少为381m<sup>3</sup>/h。根据国标图01SS105/35，选用一个DN50的CARX复合式排气阀（排气量220~740m<sup>3</sup>/h）。

### 4 结语

虽然仓库型特殊应用喷头作为自喷规范的一

种新型喷头，满足了高堆垛或高货架仓库自动喷水灭火系统的使用要求，但其应用于预作用系统时，仍缺乏有效的试验数据及其设计基本参数。建议在下一版自喷规范中，明确当系统采用预作用系统时，仓库型特殊应用喷头开放的喷头数及喷头的动作温度。

由于新规范实施不久，经笔者调查，市场上仍没有符合国内CCCF认证标准的仓库型特殊应用喷头。这也得到了规范编制人员的证实：目前，仓库型特殊应用喷头作为一种新的消防产品，其产品的认证时间晚于自喷规范的实施时间。希望其能尽快获得相关的认证，以保证工程设计的顺利实施。

### 参考文献

- [1] 《自动喷水灭火系统设计规范》GB 50084—2017

# 某综合医院暖通空调系统设计

■ 安玉双 孟凡兵 常文权 刘鑫 [暖通]

**摘要:** 本文通过阐述某综合医院结合医院负荷特点进行合理的冷、热源配置,冷源以适度集中与灵活分散相结合,介绍了医院各分区空调通风系统设计方法。

**关键词:** 综合医院;冷热源;净化空调;通风

## 1 工程概况

综合三甲位于严寒地区,项目占地面积约16.2万 $\text{m}^2$ 。项目总建筑面积26.1万 $\text{m}^2$ ,其中地上建筑面积21.1万 $\text{m}^2$ ,地下停车库建筑面积5万 $\text{m}^2$ 。门诊量按3487人次/日,住院病房总床位数2000张,总停车数量2000辆。

综合医院主要包括医疗区、后勤保障区、教学科研行政办公区三大功能区。其中,医疗区由医疗综合楼、感染病房楼,医疗综合楼包括门诊、医技、病房三大功能。通过医疗主街将三大功能紧密联系;医疗区感染病房楼在院区东北角独立设置。锅炉房、换热站、洗衣房、液氧站、污水处理站等后勤保障用房根据其相应要求在地上独立设置,其他后勤保障用房及设备用房设在地下1层地下室。教学科研行政办公楼包括会议教学区、信息中心、宿舍区、行政办公区四大功能区。

作者简介:安玉双,女,高级工程师,2003年毕业于石家庄铁道大学建筑环境与设备工程专业,现就职于中航建设建筑设计研究院。

## 2 医院冷热源

### 2.1 冷源

本项目为新建项目,考虑到后期预留用地及未来发展,冷热源规划先于医院设计,对冷热源预留一定的冗余量,这样有利于医院建设的统筹安排,有利于节地、节才、节能、节约人力成本。

本建筑空调、供暖负荷如表1所示,其中空调计算总冷负荷为22671KW,各个单体空调、供暖负荷如表2所示。由于医院空调冷负荷具有明显的时间段和季节特点,如夜间负荷、过渡季节内区冷负荷、医疗设备用房冷负荷、净化空调冷负荷等。这些特点决定了冷源配置要保证在不同时间段冷机运行效率在高效区运行。

因此,除手术部外,集中主冷源选用5台离心式冷水机组,单台冷机额定制冷量为4776KW,电压为10KV。为满足较小末端负荷运行或过渡季节使用时,其中一台采用变频离心式冷水机组。变频离心式冷水机组输出冷量调节范围为20~100%,通过变频技术解决了35~50%范围内容量调节

表1 空调、供暖总负荷及指标表

总建筑面积 (m <sup>2</sup> )	空调冷负荷 (KW)	空调热负荷 (KW)	供暖热负荷 (KW)		过渡季节 空调负荷 (KW)	冬季蒸汽 加湿量 (t/h)
260000	空调计算 冷负荷 6/13° C	空调计算 热负荷 60/45° C	散热器 供暖系统 75/50° C	地板辐射 供暖系统 50/40° C	空调计算 热负荷 60/45° C	
总负荷 (kw)	22671	23900	16438	1023	5525	1.25
单位建筑面积冷 指标 (w/m <sup>2</sup> )	87	--	--	--	--	--
单位建筑面积热 指标 (w/m <sup>2</sup> )	--	92	63	4.9		--

表2 各楼栋空调、供暖负荷表

各楼栋名称	供回水温度	A、B楼	C楼	D楼	E楼	F楼	H楼	感染 病房	锅炉 房	污水处 理站	高压 氧舱	液氧 站
低区散热器负荷 (kw)	75/50° C	5251	927	927	933	933	922	374	112	21	59	30
高区散热器负荷 (kw)	75/50° C	—	579	579	816	816	553	—	—	—	—	—
低区地板采暖负荷 (kw)	50/40° C	990	—	—	—	—	33	—	—	—	—	—
空调热负荷 (kw)	60/45° C	8887	2503	2549	2934	2959	2387	588	—	—	84	—
空调冷负荷 (kw)	6/13° C	8483	2161	2202	2534	2556	2105	534	—	—	77	—

的喘振和低效问题。该机组最小开机负荷约为1260KW，保证最小使用区域不小于6%。冷冻水供回水温度为6/13° C，根据当地湿球温度选取冷却水进出水温度30/35° C。

集中主冷源空调水系统采用一级泵变流量闭式循环系统，水泵设置变频控制器。总供回水管之间设最小安全流量电动旁通调节阀。当冷机运行时，保证机组允许的最小流量。水泵与冷水机组对应设置，可自由匹配。5台离心式冷水机组设置5台水泵。系统流量根据末端负荷变化，变流量运行，最大限度减少输送能耗，提高制冷系统综合能效比。

手术部（净化空调冷负荷）由于常年存在室内散热负荷，因此需要全年供冷，从初投资、冷源保障性、设备利用率方面考虑，本项目手术室冷源结合集中主冷源统一考虑。

在夏季由主冷源提供，春秋季节根据医院供冷区域及负荷大小可以采用集中主冷源或者手术部专用冷源，冬季由单独设置的3台带自由冷却的螺杆式冷水机组提供，冬季节能运行。其单台制冷量为1443KW，空调冷水供回水温度为6/13° C。供冷系统原理如图1所示。

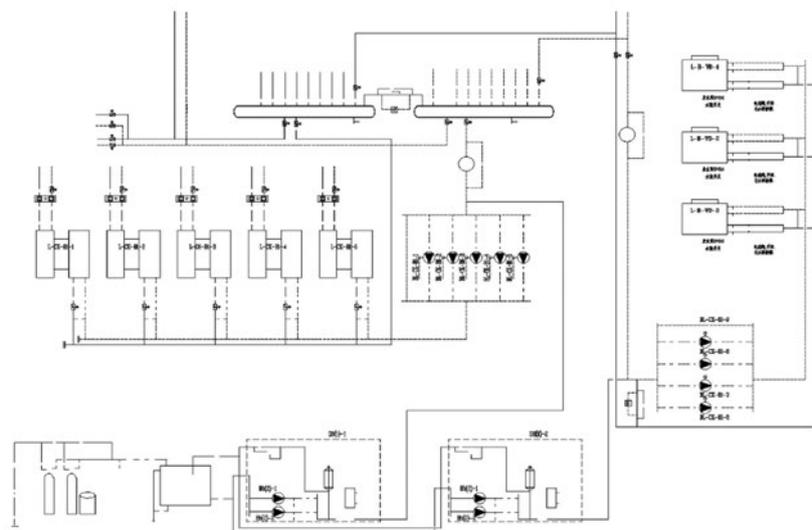


图1 供冷系统原理图

大型医疗设备用房（CT、DR、乳腺钼靶、数字胃肠及发热量大的医技房间等）、直线加速器、回旋加速器、SPEC-CT、PET-CT按照功能分区单独设置变频多联机空调系统。

MRI根据工艺要求设置双压缩机机房专用空调。自带独立冷、热源，满足全年温湿度控制需要。室外机（风冷冷凝器）设置在屋面通风良好处。

## 2.2 热源

考虑过渡季节热负荷、空调加湿及洗衣房等用蒸汽需求，本建筑自建锅炉房。冬季由市政热网提供空调和供暖热媒，过渡季节由自建锅炉房提供热媒，空调热媒温度为60/45℃，散热器供暖热水供水温度75/50℃，地板采暖热水供水温度50/40℃。

## 3 医院空调系统

### 3.1 净化空调系统

本项目手术部、药物配置间、烧伤病房、血液层流病房、负压隔离病房、中心供应灭菌后和无菌品库、核医学热室、介入中心的DSA、生殖中心胚胎实验室、按照工艺要求设置相应级别的净化空调系统。所有设净化空调系统的房间均设排风以保证要求的压力梯度。手术部、生殖中心、血液层流病房的净化空调机组均设置在屋面机房内。

#### 3.1.1 手术部空调

手术部设置在医技楼3层和4层，共39间手术室，包括Ⅰ级洁净手术室、Ⅰ级洁净负压手术室、Ⅱ级洁净手术室、11间Ⅲ级洁净手术室、Ⅲ级洁净感染手术室等。

Ⅰ、Ⅱ级洁净手术室与正负压手术室、负压手术室每间采用独立净化空调系统；Ⅲ级洁净手术室每3间合用一套净化空调系统，原理图如图2所示。

Ⅰ级手术室送风量按手术区工作面高度截面平均风速 $v=0.30\text{m/s}$ 确定，Ⅰ级正负压转换手术室根据工作区平均风速确定，Ⅱ、Ⅲ级手术室设计送风量分别为 $30\text{h}^{-1}$ 、 $21\text{h}^{-1}$ ，无菌敷料、器械设计送风量为 $13\text{h}^{-1}$ ，洁净区走廊设计送风量为 $10\text{h}^{-1}$ 。

新风量：Ⅰ级手术室 $1000\text{m}^3/\text{h}$ ，Ⅱ、Ⅲ级手术室 $800\text{m}^3/\text{h}$ ，Ⅳ级手术室 $600\text{m}^3/\text{h}$ ，ICU、无菌敷料、器械和洁净走廊、清洁走廊均按换气次数3次/时。

净化空调系统新风口、回风口、送风口、排风口均设置相应空气过滤器。

#### 3.1.2 病房楼净化空调

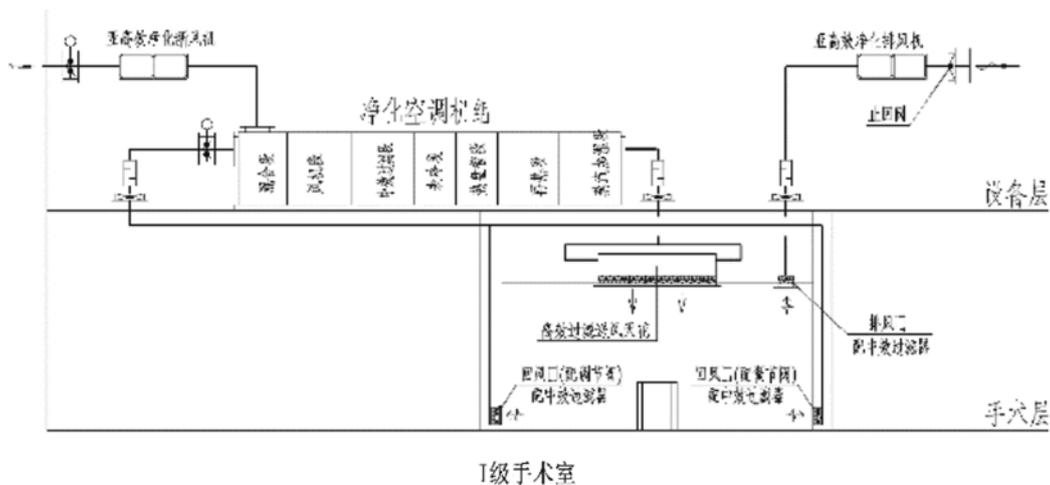
a. F#病房楼一层设有万级营养型药物配置间和细胞毒性药物配置间各一间，按空气洁净度4级，气流流型为单向流，送风量按照平均风速确定。送风量按照平均风速 $0.3\text{m/s}$ 计算。

b. F#病房楼中的烧伤病房按照工艺要求按照千级设计，送风量按照截面风速确定，专用送风单元集中上送，单层竖向百叶下回。

c. F#病房楼15层设有血液层流病房，按照Ⅰ级洁净用房设计，送风量按照平均风速确定，采用上送下回的气流组织方式。在病床在内的患者活动区域上方设置垂直单向流，送风口面积应 $\geq 6\text{m}^2$ ，两侧下回风。

#### 3.1.3 感染病房楼净化空调

a. 2层、3层负压隔离病房分别设置净化空调系统，自带独立冷热源。送风量为 $\geq 12$ 次/小时，



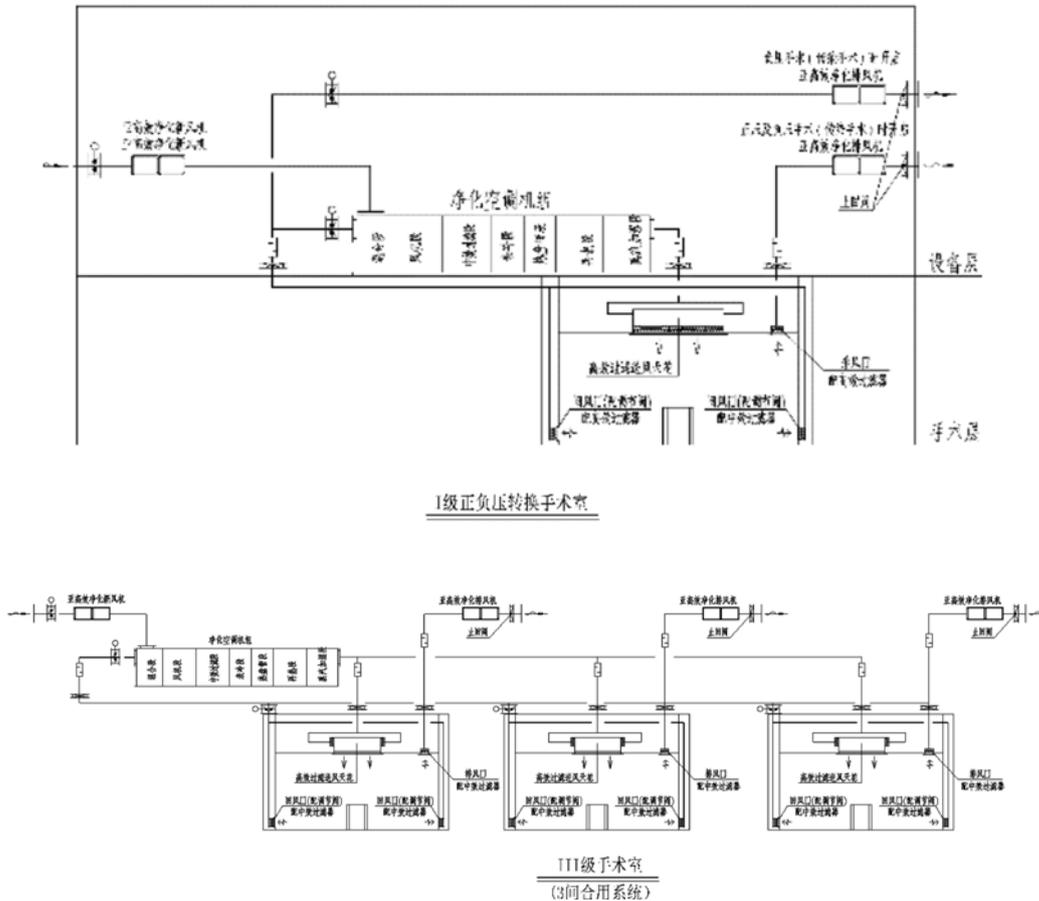


图2 手术部净化系统原理图

并且要求排风机与送风机连锁，排风机优于送风机开启，后于送风机关闭。排风口高出屋面 $\geq 2\text{m}$ ，排风口处安装防护网和防雨罩。排风高效过滤器采用经预先检漏的专用排风高效过滤装置。

b. 每间负压隔离病房的送排风管上设置电动密闭调节阀，并且负压隔离病房设置压差传感器。

### 3.1.4 门诊医技区净化空调

a. 地下室中心供应灭菌后和无菌品库按III级洁净辅助用房设计，送风量为12次/小时。气流组织为高效送风口均匀上送，单层竖向百叶均匀下回。

b. 核医学热室按照万级进行净化设计，送风量为20次/小时，采用上送下回的气流组织方式。

c. 医技区介入中心设有1间百级DSA和2间万级DSA；百级DSA送风量根据工作区平均风速确定，气流组织为手术室专用送风单元集中上送，单层竖向百叶下回；万级DSA送风量为30次/小时，气流组织为手术室专用送风单元集中上送，单层竖向百叶下回。

d. 医技区生殖中心设有1间千级胚胎实验室、3间万级手术室；千级胚胎实验室按照洁净厂房设

计规范（空气洁净度3级）设计，气流流型为单向流，送风量按照平均风速确定。3间万级手术室按照III级手术室设计，合用一套净化空调系统，送风量为21次/小时，气流组织为手术室专用送风单元集中上送，单层竖向百叶下回。

e. 门诊手术室按IV级洁净手术室，手术室设一个净化空调系统，送风量为15次/小时，气流组织为手术室专用送风单元集中上送，单层竖向百叶下回。

### 3.2 舒适性空调

一层门诊大厅、医技普通透析区、教学科研楼多功能厅设计低速单风道全空气系统，并设置 $\text{CO}_2$ 检测装置，控制系统新风量。气流组织为上送上回。在过渡季时，加大新风量运行，最大新风比不低于70%。

门诊、医技、教学科研楼、病房楼、感染病房楼等设计风机盘管加新风系统，新风系统按防火分区设置。新风口均单独设置。风机盘管暗装在吊顶内，气流组织为上送上回。其中，教学科研楼新风机组采用板翅式全热回收系统，门诊、医技区域

表3 医院主要科室通风换气次数

科室名称	房间正负压	排风次数 (次/h)	送风次数 (次/h)
普放科	零压	4	4
功能检查	零压	3	3
超声科	零压	3	3
检验中心	负压	6	5
遗传实验室	负压	6	5
病理科	负压	6	5
输血科	零压	3	3
介入中心	零压	3	3
急诊急救	正压	3	4
康复中心	零压	3	3

和病房楼、感染病房楼采用直流新风系统，避免交叉污染。

感染病房楼设置机械通风系统，医院内清洁区、半污染区、污染区的机械送排风系统按照区域独立设置，送风系统采用新风机组。

## 4 医院通风系统

### 4.1 总则

本工程通风系统主要包括一般普通通风（设备房间通风、医院主要科室通风）、事故通风及灾后排风系统。

### 4.2 普通通风

地下汽车库设置机械通风系统，与消防排烟系统合用，排风量按照规范设计，送风量为排风量的80%，风量变化通过调节台数运行。

地下厨房预留了平时排风及补风、排烟及排烟补风、排油烟及补风、燃气事故排风风机，待厨房设备招标后，应结合厨房布置进行二次深化设计。

病区的换药室、处置室、配餐室、污物室、污洗室、公共卫生间、变配电间、动力站房、空压机房、负压吸引机房、水泵间、垃圾间、电梯机房等房间均设计独立的排风系统，排除室内余热和污浊空气。垃圾站对环境有污染的排风设置活性炭吸附装置。排风量按不同房间取不同换气次数计算。

中心供应按照清洁区与生活区、污染区、无菌区分别设置通风系统，保证有序压差梯度和定向气流。定向气流经灭菌区流向去污区。

医技各科室通风换气次数如表3所示。

### 4.3 事故通风

本工程地下厨房操作间、煤气表间、锅炉房、制冷机房、液氧站的氧气瓶间、医技MRI、中心供应中的低温灭菌锅室、医用气瓶间设置事故排风系统，并与浓度报警连锁，达到安全浓度值时自动关闭。排风量不小于12次/时，并且室内、外设置两处便于开启的开关。

### 4.4 灾后排风系统

本工程变配电室、病案库、信息机房、双活数据机房、汇聚机房、服务器主机房、直线加速器、SPECT-CT、PET-CT、CT、DR、乳腺钼靶、DSA等区域设置火灾后排风系统。火灾时关闭，火灾后启动排除消防气体。排风量不小5次/h，设置下排风，火灾时由消防中心控制关闭四壁上的所有风阀、防火阀件，同时连锁关闭进、排风机。灾后将与排风机相关的电动风阀开启，进行灾后排风，灾后排风机开关应设就近在气体灭火区域之外。

## 5 医院供暖系统

本工程位于严寒地区，在冬季各区域以散热器供暖系统为主，局部大厅、公共区域采用低温地板辐射供暖系统，辅以空调热风供暖。

## 6 结语

本项目建筑功能复杂，医疗工艺需求多样，对暖通空调设计起关键性影响。医疗工艺以感染控制和医疗技术环境需求，不仅决定了建筑功能的平面布局，又决定了暖通空调设计的诸多特殊要求。因此暖通专业要与建筑专业紧密配合，了解医疗工艺，才能设计出符合医疗工艺要求的医院。

### 参考文献

- [1]《综合医院建筑设计规范》。
- [2]《医院洁净手术部建筑技术规范》。
- [3]《传染病医院建筑设计规范》。

# 广东某垃圾发电厂 职业病危害现状分析

■ 张明婷 肖政 [环评]

**摘要:** 本文通过对广东某垃圾发电厂职业卫生现状调查和分析,确定其职业病防护重点,提出针对性防护管控措施。通过职业卫生现场调查法,对电厂的相关情况进行收集,采用工作场所职业病危害因素检测法对存在的职业病危害因素进行检测。结果检测结果显示,垃圾吊岗和化水值班岗分别在巡检垃圾池和炉水加药间氨水计量罐时氨的短间接接触浓度不符合职业接触限值要求,分别为 $37.4\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $36.2\text{mg}/\text{m}^3$ ;锅炉值班岗、专职巡检员的噪声暴露强度超过了职业接触限值,分别为 $85.5\text{dB(A)}$ 和 $96.1\text{dB(A)}$ ,其他各岗位接触的职业病危害因素浓度或强度符合相关要求。通过分析,得出该垃圾发电厂应对化学物质、噪声、高温和有限空间作业予以重视的结论,日常运营过程中应确保各类防护设施完好,加强职业卫生管理,改善劳动人员作业环境。

**关键词:** 垃圾发电; 职业病危害; 分析; 管控措施

近几年,生活垃圾发电已成为垃圾无害化处理的重要途径之一<sup>[1]</sup>。但生活垃圾成分复杂,焚烧发电过程中存在的职业病危害因素种类繁多,对人员健康影响较大<sup>[2,3]</sup>,该类企业的职业卫生管控显得尤为重要。本次研究主要通过对广东某垃圾发电厂的职业卫生现状和职业病危害程度进行调查和分析,确定其职业病防护重点,为企业职业卫生管理提供针对性建议,从而保护作业人员职业健康。

## 1 对象与方法

### 1.1 对象

本次以广东某垃圾发电厂为研究对象。该厂设置了1台日处理生活垃圾500t的焚烧炉和1台9MW的汽轮发电机组用于垃圾焚烧发电,配套1套烟气净化系统用于焚烧尾气处理。

### 1.2 方法

采用职业卫生现场调查法对垃圾发电厂的原辅材料、生产工艺、职业病危害因素分布情况、职业病防护设施、个人防护用品、应急救援设施、职业卫生管理等进行调查,并对工作场所中存在的职业病危害因素进行了个体和定点检测。

## 2 结果

### 2.1 现场职业卫生学调查

#### 2.1.1 企业基本情况

该企业日处理城市生活垃圾500t,日产电量 $20 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。全厂职工定员78人,外委人员20人。其中,一线人员共54人(含外包人员4人)。全能值班岗、卸料平台岗、地磅岗、飞灰固化岗实行单班制,其他岗位实行四班三运转,每班工作8h。检测期间各装置运行正常,生产处于满负荷状态。

作者简介:张明婷,女,高级工程师,2011年毕业于首都师范大学微生物学专业,现就职于航空工业规划环保与安全咨询设计研究院。

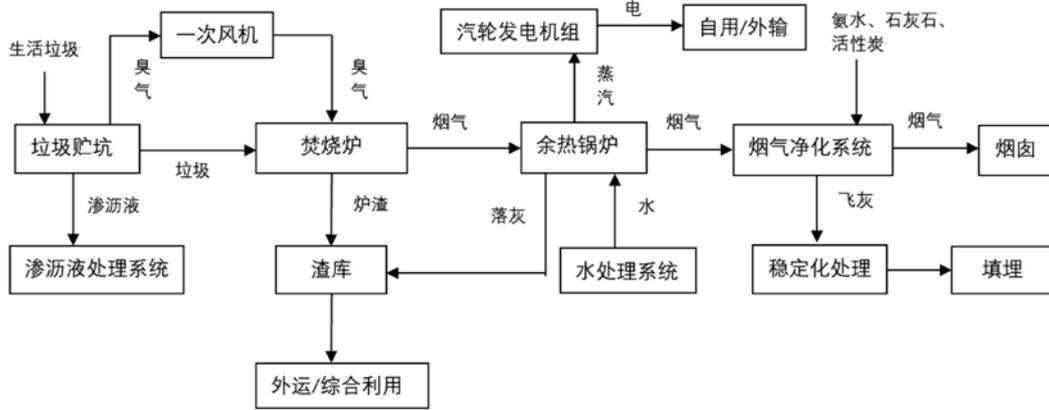


图 该垃圾焚烧发电厂生产工艺流程图

表1 垃圾发电厂生产过程中存在的职业病危害因素分布情况表

评价单元	岗位名称	存在环节	职业病危害因素种类
垃圾接收及储运系统	垃圾吊岗	垃圾池巡检、垃圾吊控制室远程控制	硫化氢、氨、一氧化碳、甲硫醇、噪声、生物有害因素
	卸料平台岗	卸料平台巡检	其他粉尘、硫化氢、氨、一氧化碳、甲硫醇、噪声、生物有害因素
燃烧系统	锅炉值班岗	焚烧炉等	其他粉尘、硫化氢、氨、一氧化碳、甲硫醇、二氧化硫、二氧化氮、甲醛、氯乙烯、氯化氢、氟化氢、氰化氢、二 英、呋喃、As、Cd、Hg、Cr、Ni、Zn、Pb、柴油、噪声、高温
烟气净化系统		辅助燃烧系统柴油储存及加注过程	柴油
飞灰及炉渣处理系统		脱硝	氨
公用工程		飞灰及炉渣处理设备	其他粉尘、矽尘
热力系统		空压机	噪声、高温
热力系统	汽机值班岗	余热锅炉、汽轮机组、蒸汽管道等	噪声、高温
烟气净化系统	专职巡检岗	脱硝、脱硫、除灰等设备	其他粉尘、活性炭粉尘、石灰石粉尘、氨、噪声、高温
电气系统	电气值班岗	发电机、电气设备等	噪声、高温
化学水处理系统	化水值班岗	锅炉补给水	氨、噪声、高温
给排水系统	污水值班岗	污水处理	硫化氢、氨、甲硫醇、一氧化碳、氢氧化钠、噪声
		渗滤液pH调节	硫酸
		渗滤液池清理格栅	硫化氢、氨、甲硫醇、一氧化碳、As、Cd、Hg、Cr、Ni、Zn、Pb等
飞灰及炉渣处理系统	飞灰固化岗	飞灰固化	其他粉尘、As、Cd、Hg、Cr、Ni、Zn、Pb、高温
公用工程	高压焊工岗	电焊过程	电焊烟尘、一氧化碳、氮氧化物、臭氧、锰及其化合物、噪声、电焊弧光

注：现场检测显示生产过程中产生的飞灰游离二氧化硅含量为8.08%，低于10%，按其他粉尘进行评价。炉渣中游离二氧化硅含量为30.07%，本次按10%≤游离SiO2含量≤50%的矽尘进行评价。

表2 各岗位粉尘浓度检测结果

评价单元	工种	检测项目	C-TWA (mg/m <sup>3</sup> )	超限倍数 计算值	判定
垃圾接收和储运系统	卸料平台岗	其他粉尘(总尘)	0.13	0.6	符合
燃烧系统	锅炉值班岗	矽尘(总尘)	0.4*	0.30	符合
		矽尘(呼尘)	0.17	0.19	符合
烟气净化系统	专职巡检岗	活性炭粉尘(总尘)	0.2	0.18	符合
飞灰及炉渣处理系统	飞灰固化岗	其他粉尘(总尘)	0.2*	0.13	符合
给排水系统	污水值班岗	其他粉尘(总尘)	0.015	0.09	符合
公用工程	高压焊工岗	电焊烟尘(总尘)	0.018	0.08	符合

注：锅炉值班岗同时接触矽尘、其他粉尘（飞灰粉尘），为最大程度保护劳动者，从严按照矽尘标准进行评价。专职巡检岗同时接触活性炭粉尘以及其他粉尘（飞灰粉尘），为最大程度保护劳动者，从严按照活性炭粉尘标准进行评价。  
\*C-TWA均为完整工作班个体采样结果，其余岗位粉尘C-TWA均为计算结果。

表3 化学物质时间加权平均浓度和短时间接触浓度检测结果

评价单元	工种	化学物质种类	C-TWA (mg/m <sup>3</sup> )	C-STEL (mg/m <sup>3</sup> )		
垃圾接收及储运系统	垃圾吊岗	一氧化碳	0.43	1.4		
	卸料平台岗		0.4	1.7		
燃烧系统	锅炉值班岗		0.04	1.5		
电气系统	电气值班岗		0.12	4.9		
烟气净化系统	专职巡检岗		0.08	1.6		
给排水系统	污水值班岗		0.25	2.0		
燃烧系统	锅炉值班岗	二氧化氮	0.001	0.02		
			电气系统	电气值班岗	0.013	0.5
			烟气净化系统	专职巡检岗	<0.02	<0.02
燃烧系统	锅炉值班岗	二氧化硫	0.001	0.2		
			烟气净化系统	专职巡检岗	0.015	0.2
垃圾接收及储运系统	垃圾吊岗	氨	4.89	37.4		
			卸料平台岗	0.24	13.4	
燃烧系统	锅炉值班岗		1.13	6.4		
化学水处理系统	化水值班岗		0.99	36.2		
给排水系统	污水值班岗		1.82	14.9		
燃烧系统	锅炉值班岗	非甲烷总烃*	0.09	3.6		
			电气系统	电气值班岗	0.08	3.5
燃烧系统	锅炉值班岗	砷及其无机化合物	<0.000049	<0.000049		
燃烧系统	锅炉值班岗	镉及其化合物	<0.002	<0.002		
燃烧系统	锅炉值班岗	汞-金属汞	<0.0013	0.002		
燃烧系统	锅炉值班岗	锌及其无机化合物	0.0004	0.01		
公用工程	高压焊工岗	二氧化氮	0.002	0.04		
		一氧化碳	0.04	0.7		

注：<表示低于最低检出浓度。\*非甲烷总烃按正己烷接触限值进行评价。

## 2.1.2 主要工艺流程

该垃圾焚烧发电厂使用生活垃圾为燃料，经过焚烧炉燃烧后进行发电。工艺流程如图所示。

## 2.1.3 职业病危害因素识别和确定

通过对生产工艺分析和现场调查结果总结，确定该企业生产过程中存在的职业病危害因素及分布情况见表1。

## 2.2 职业病危害因素检测结果

### 2.2.1 生产性粉尘检测结果

经现场检测和数据分析，该企业卸料平台岗、锅炉值班岗、专职巡检岗、飞灰固化岗、污水值班岗、高压焊工岗等接触的粉尘浓度和超限倍数计算值均符合职业接触限值<sup>[4]</sup>的要求，检测结果具体如表2所示。

### 2.2.2 化学物质检测结果

本项目除垃圾吊岗、化水值班岗在垃圾池和炉水加药间巡检时氨短时间接触浓度超出职业接触限值<sup>[4]</sup>的要求外，其他各岗位员工接触的化学物质浓度均达标。检测结果如表3、表4和表5所示。

### 2.2.3 生产性噪声测量结果

该企业锅炉值班岗、专职巡检员的噪声暴露强度分别为85.5dB(A)和96.1dB(A)，超过了职业接触限值<sup>[5]</sup>要求，其余岗位噪声暴露强度均达标。测量结果如表6所示。

### 2.2.4 高温测量结果

该企业所在地位于广东湛江，当地室外通风设计温度大于30℃，工人的

表4 化学物质时间加权平均浓度和超限倍数检测结果

评价单元	工种	化学物质种类	C-TWA (mg/m <sup>3</sup> )	超限倍 数 计算值
燃烧系统	锅炉值班岗	铬及其 化合物	0.0007	0.3
燃烧系统	锅炉值班岗	镍及其无机化合物	<0.013	—
燃烧系统	锅炉值班岗	铅及其无机化合物	0.0006	0.3
燃烧系统	锅炉值班岗	氯乙烯	<0.11	—
公用工程	高压焊工岗	锰及其无机化合物	0.0004	0.05

注：<表示低于最低检出浓度。—表示未进行超限倍数计算。

表5 化学物质最高浓度检测结果

评价单元	工种	化学物质种类	最高浓度 (mg/m <sup>3</sup> )
给排水系统	污水值班岗	氢氧化钠	0.2
垃圾接收及储运 系统	垃圾吊岗	硫化氢	<0.3
	卸料平台岗		<0.3
燃烧系统	锅炉值班岗		<0.3
给排水系统	污水值班岗		0.8
燃烧系统	锅炉值班岗	甲醛	0.04
		氟化氢	0.02
		氰化氢	0.1
		氯化氢	0.62
公用工程	高压焊工岗	臭氧	0.11

注：<表示低于最低检出浓度。

表6 各岗位生产性噪声测量结果

评价单元	工种	等效声级 (LEX·W) dB(A)
给排水系统	污水值班岗	78.5
垃圾接收及储运系统	垃圾吊岗	81.4
热力系统	汽机值班岗	78.8
化学水处理系统	化水值班岗	82.0
电气系统	电气值班岗	84.2
燃烧系统	锅炉值班岗	85.5
烟气净化系统	专职巡检员	96.1

注：以上检测结果均为个体采样结果。

表7 各岗位高温测量结果

评价单元	工种	时间加权平均WBGT 指数(℃)
热力系统	汽机值班岗	30.7
燃烧系统	锅炉值班岗	31.6
电气系统	电气值班岗	30.3
给排水系统	污水值班岗	30.5

体力劳动强度分级为Ⅱ级，每班持续接触高温时间小于25%，根据《工作场所所有害因素职业接触限值第2部分：物理因素》的相关要求，本次评价WBGT指数接触限值为33℃。测量结果显示，各工种接触的时间加权平均WBGT指数均高于25℃，属于高温作业，均低于职业接触限值。测量结果如表7所示。

### 2.2.5 电焊弧光测量结果

该企业高压焊工岗在佩戴焊接面罩和焊接手套的情况下，接触的电焊弧光辐照度的测量结果低于最低检出强度，符合职业接触限值<sup>[5]</sup>要求。

## 2.3 职业病危害防护设施

该企业采用密闭化、自动化生产工艺，人员以远程控制和现场巡检相结合的方式开展工作。

### 2.3.1 防尘毒设施

该企业生活垃圾通过专门垃圾储运车运输。垃圾卸料采用自动卸料方式。卸料平台设自动门，平时处于关闭状态，倾倒垃圾时，自动开启。卸料平台侧墙设置4台轴流风机进行机械排风，将垃圾倾倒时产生的臭气排至室外。垃圾池为密闭式贮池，上方设置一次风机，将垃圾长时间储存产生的大量硫化氢、氨等气体抽至焚烧炉内燃烧，同时使垃圾池处于负压状态，防止臭气逸散。垃圾池同时另设了用于停炉时贮池臭气除臭处理的活性炭装置，除臭效率80%。垃圾池22m层设吊车操作室，操作室与垃圾池之间采用玻璃墙进行完全隔离。操作室进风采用全新风装置提供。人员在操作室内通过遥控操作垃圾吊车进行上料。焚烧炉和余热锅炉均在负压状态下运行，防止燃烧时产生的化学物质和粉尘逸散。焚烧炉配一套烟气净化系统，采用炉内SNCR（原料为25%氨水）脱硝系统脱除烟气中的氮氧化物，采用半干式（旋转喷雾）脱酸吸收塔脱除烟气中的酸性气体，采用活性炭和袋式除尘器（除尘效

率99.95%)脱除烟气中的重金属、二噁英、粉尘等。烟气中的飞灰采用气力输送方式进入密闭贮仓,通过自动加注凝固剂进行湿式固化。烟气净化和炉水加药所用氨水采用罐车和管道输送、密闭储罐储存,储罐露天布置。炉水加药间设置了2台轴流风机用于机械排风。石灰由槽车运输进厂,直接打入石灰石仓内,不需人员操作。活性炭仓顶和石灰石仓顶各设脉冲袋式除尘器1台。炉渣采用带冷却水池的湿式除渣机作业,减少炉渣在推入渣池过程中产生的二次扬尘。污水处理设施为全密闭生产装置。负6.3m渗沥液沟设置离心管道式排风机以及柜式离心送风机,进风采用全新风,并保持沟内处于微负压状态。柴油储存和加注采用全密闭、自动化生产工艺。焊接作业在通风良好的工作地点进行作业。

### 2.3.2 防生物因素措施

垃圾池中生活垃圾成分复杂,容易导致多种微生物滋生。企业在垃圾卸料平台处设喷药系统,定期向池内喷洒化学药剂进行消毒杀菌。

### 2.3.3 噪声防护措施

该企业汽轮机外增设隔声罩壳,内设吸声材料;汽轮机单独布置在汽机房;汽机房入口设置门斗进行隔声。余热锅炉排汽管上装设消音器。空压机安装减振基础,设置于空压机房内。大型风机、发电机等设备基座内设隔振元件,风机的进出口均设置软接头隔振。二次风机和炉墙冷却风机进口管道处设消音器。垃圾池料槽与给料装置的接料盘间为软连接。

### 2.3.4 防暑降温措施

该企业焚烧炉料槽采用水夹套结构,夹套内充满冷却水,可以降温。空压机选用水冷型设备。蒸汽管道包裹了隔热材料。汽机间和余热锅炉间运转层下部设置进风百叶,设备产生的热量通过屋顶轴流风机进行通风散热。处于汽机间和余热锅炉间等高温区而操作比较频繁的阀门,采用气动,减少工人的接触时间。各控制室、值班室等人员经常停留处均设置空调降温。

### 2.3.5 防电焊弧光措施

该企业电焊弧光主要通过焊接面罩、焊工手套等个人防护用品来进行防护。

## 2.4 个人使用的职业病防护用品配备情况

企业为接触职业病危害因素的作业人员配备了符合要求的长管呼吸器、防尘毒口罩、防毒面具、防化学品眼镜、防酸碱手套、防噪声耳塞、焊接面

罩和手套等。作业人员在作业时可得到有效防护。

## 2.5 应急救援措施

企业制定了应急救援预案和有限空间操作规程,配备了正压式空气呼吸器、长管呼吸器、固定式喷淋洗眼器、便携式洗眼器、固定式和便携式四合一气体浓度检测报警仪(可探测硫化氢、一氧化碳、可燃气体、氧气)、氨浓度检测报警仪、围堰及卸险沟、风向标、急救药箱等。

## 3 讨论

### 3.1 化学有害因素

现场检测结果显示,垃圾吊岗和化水值班岗在巡检垃圾池和炉水加药间氨水计量罐时接触的氨浓度分别为 $37.4\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $36.2\text{mg}/\text{m}^3$ ,超过了职业接触限值要求,垃圾吊操作室内臭气浓度较高(氨浓度为 $6.2\sim 7.7\text{mg}/\text{m}^3$ ),工作环境不够舒适。根据超标原因调查,企业应针对超标地点进行针对性整改,如定期检查和确保炉水加药间设备密闭性,加强垃圾池和炉水加药间通风,或更换大风量风机,或增加通风设施,确保现场氨浓度处于职业接触限值以下,要求作业人员佩戴个人防护用品情况下进行作业;提高垃圾吊操作室与垃圾池之间隔墙的密封性能,防止臭气进入操作室;同时整改操作室新风系统,将新风口延伸至新鲜空气处,提高垃圾吊操作室舒适性。

其次,垃圾储存和燃烧过程中存在大量的高毒物质和致癌物质<sup>[6,7]</sup>,包括了硫化氢、氨、一氧化碳、二噁英、氟化氢、氰化氢等,还有重金属化合物<sup>[8-11]</sup>(As、Cd、Hg、Cr、Pb等),对人体危害较大。上述物质浓度均符合职业接触限值要求,但企业应保证现场设备密闭性和职业病防护设施的有效性,尽量降低人员接触水平,保证人员职业健康。

渗沥液收集池、渗沥液沟(位于地下)清理和维护等涉及有限空间作业,人员可能会短时间内接触高浓度硫化氢、氨等,发生急性中毒可能较大。脱硝和锅炉补给水处理系统需使用氨水,如氨水发生泄漏可能会造成灼伤和急性中毒;渗滤液处理会使用到硫酸,使用不当时可能会引起酸灼伤。企业应定期检查和维护应急救援设施,定期进行应急救援培训和有限空间作业培训,提高作业人员的职业卫生意识,确保作业人员职业健康。

另外,垃圾中存在多种微生物<sup>[12,13]</sup>,包括大量致病微生物。企业在日常管理中应注重灭菌防护措施

施,对员工进行相关培训,强化个人卫生习惯,禁止作业员工在值班室内饮食,为员工设置清洁区放置个人物品。

### 3.2 噪声

该企业存在一次风机、二次风机、空压机、焚烧炉液压泵站、引风机、烟气净化系统等大量高噪声设备,锅炉值班岗、专职巡检员巡检上述设备用时较长,导致其噪声暴露强度超标。企业为作业人员配备了符合要求的防噪声耳塞,可确保人员佩戴耳塞后噪声暴露强度达标。条件允许情况下,建议企业进行全面的减振降噪防护设施改造,从根本上降低人员噪声暴露。

### 3.3 高温

本次研究对象位于广东省,夏季温度高,湿度大。现场测量结果显示,汽机值班岗、锅炉值班岗、电气值班岗、污水值班岗时间加权平均WBGT指数为30.3~31.6℃。上述人员如夏季长时间在汽轮机、焚烧炉、余热锅炉、发电机、加温池等高温设备旁作业,发生中暑的可能性较大。企业应予以关注。

## 4 结论

本次研究通过现场调查、职业病危害因素检测及分析,发现该垃圾发电厂应重点关注化学物质、噪声、高温和有限空间作业。该企业除注重防毒、减振降噪、防高温等措施的管理外,还应确保作业人员进行有效个体防护,建立健全各项职业病防护管理措施和应急救援管理措施,保障现场作业人员职业健康。

### 参考文献

- [1] 郑世伟,鲍建镇,张茂,等.我国城市生活垃圾焚烧发电市场现状及前景[J].再生资源与循环经济,2017,10(4):19-22.
- [2] 王静,谢学军.北京市某生活垃圾发电项目职业病危害因素调查[J].职业与健康,2018,34(4):433-437.
- [3] 孙伟,耿敬东,谢峰.某垃圾焚烧发电厂职业病危害控制效果评价分析[J].职业卫生与应急救援,2017,35(1):73-75.
- [4] 中华人民共和国卫生部.GBZ2.1-2007工作场所有害因素职业接触限值第1部分:化学有害因素[S].北京:人民卫生出版社,2007.

- [5] 中华人民共和国卫生部.GBZ2.2-2007工作场所有害因素职业接触限值第2部分:物理因素[S].北京:人民卫生出版社,2007.
- [6] 王玉婧,章骅,吕凡,等.生活垃圾转运站恶臭污染控制现状与问题思考[J].环境卫生工程,2019,27(1):1-13.
- [7] 韩樑钧.生活垃圾焚烧过程中二英的防治技术[J].轻工科技,2018,34(11):95-96.
- [8] 李仙粉,任福民,汝宜红,等.北京市生活垃圾中重金属元素污染特性调查[J].中国环境监测,2003,19(3):42-45.
- [9] 安晓雯,杨凤林,仇春华,等.大连市城市垃圾填埋场垃圾重金属污染物分析[J].中央民族大学学报(自然科学版),2007,16(3):206-209.
- [10] 李晓勇,胡雨燕,夏苏湘,等.上海市生活垃圾重金属污染特征分析[J].环境卫生工程,2013,21(5):22-24.
- [11] Kim H-T, Lee T. A simultaneous stabilization and solidification of the top five most toxic heavy metals (Hg, Pb, As, Cr, and Cd) [J]. Chemosphere. 2017, 178: 479-485.
- [12] 梁英梅,张立秋,王跃超,等.垃圾填埋场空气微生物污染及评价[J].生态环境学报,2010,19(5):1073-1077.
- [13] 伍碧雯,陈思东,杨翌,等.广州市生活垃圾的污染情况调查[J].中国公共卫生,2000,16(2):121-122.

# 后工业时代基于人文关怀的工业建筑设计策略探讨

■ 吴方晓 [建筑]

**摘要:** 基于工业发展的时代特色,本文着眼于“人”作为后工业时代产业提升的核心驱动力这一关键属性,从建筑的功能布局、流线设计、空间营造、内外交互4个层面对如何将人文关怀融入工业建筑,以面对未来工业发展展开探讨。

**关键词:** 后工业时代;工业建筑;人文关怀

后工业社会,最早由美国哈佛大学教授丹尼尔·贝尔(Daniel Bell)提出。他把人类历史划分为3个阶段:前工业社会、工业社会和后工业社会。前工业社会以传统主义为轴心,意图是同自然界竞争,土地是资源;工业社会以经济增长为轴心,意图是同经过加工的自然界竞争,机器是资源;而后工业社会以理论知识为中轴,意图是人與人之间知识的竞争<sup>[1]</sup>。

丹尼尔·贝尔的后工业社会理论包括5个方面的内容:

- (1) 后工业社会的经济主要是服务性经济;
- (2) 专业和技术人员在后工业社会占主导地位;
- (3) 理论知识是后工业社会的中轴,成为社会革新和制订政策的主要资源,生产知识的大学、研究部门、研究中心是社会的核心机构;

(4) 后工业社会通过技术预测和技术评估来规划和控制技术的发展;

- (5) 后工业社会运用新的智力技术来进行决策。

以上5个方面内容无不围绕理论知识、科学技术,在后工业时代的驱动下科技精英将成为社会的统治人物。工业的生产效率不再只单纯依靠“生产”,而是源自科技更迭的“研发”,受到专业教育、拥有技术专长的技术人才成为工业发展的核心

驱动力。

近年来,世界经济正经历一场史无前例的变革。经济学界逐渐形成一种共识,认为世界经济的工业化阶段基本完成,逐渐向后工业化阶段过渡。承载工业社会资源主体的工业建筑也应面对社会需求的转变而做出调整,形成新的发展趋势。在这样的需求背景下,工业建筑不再只是“机器”的房子,更增加了以“人”为本的特性。如何能为科技工作者提供舒适便捷的研发环境,激发高技产品的诞生,成为了新时代工业建筑的刚性需求之一。

“人文关怀”成为工业建筑设计过程中不可缺失的指导思想。

## 1 多向功能复合化,增加人性化功能的配置

在功能布局上,在满足基本的生产工艺需求的前提下,考虑厂内人员产品研发、组织生产的工作便捷性,打破生产空间和管理研发空间的边界,进行空间重组,形成有机的研发—管理—生产体系。如,座落于瑞士Baden北部的ABB动力塔,其实际上是ABB公司的工程中心。ABB的研发与生产都集中在这座高43m的高层厂房中,为800个人提供了舒适的工作场所。厂房中办公与生产相结合,员工不再独立于生产环境之外。培训、产品开发、装配、质检以及管理、员工餐厅等多种功能全部涵盖在同

作者简介:吴方晓,女,工程师,2015年毕业于哈尔滨工业大学建筑学专业,现就职于航空工业规划飞机工程事业部。

一建筑之中。通过中庭将员工的办公区、研发区和生产区建立联系，同时形成有趣的中庭空间，为建筑内部采光通风提供有利条件。（图1）

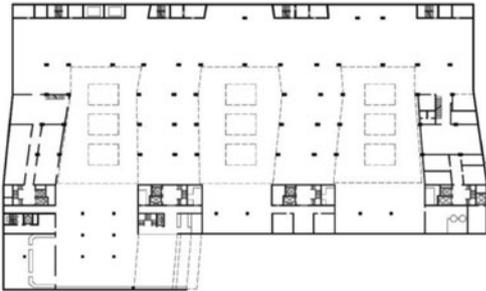
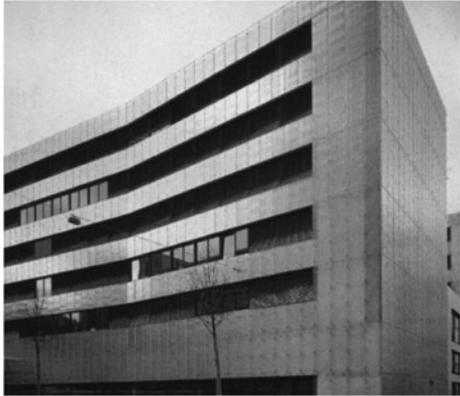


图1 ABB动力塔<sup>[2]</sup>

此外，在功能配置上，除考虑生产需求的必要配置，还应将厂内工作人员的个人需求纳入其中，以打造更为自主、轻松的工作环境，让工作人

员不仅提高工作效率，还能在工作中发挥自主性和创新性。笔者参与中国移动苏州研发中心的方案设计时（图2），在功能平面的组织布局中，将人文关怀贯穿始终。通过功能集群模块化形成生产核、研发核和服务核，从而实现灵活高效地划分平面。其中，服务核的设置除常规的交通核和卫生间外，另结合研发人员的需求，将打印室、茶水间、母婴室、健身室、更衣室、休息室等功能灵活纳入其中，以期在机械设备围绕的环境中给人以温暖的关怀。正因该设计以为业主营造实用高效、同时温暖贴心的人性化工作与生活场所为核心策略，方案得到业主的大力认可（图3）。



图2 夜景效果图（投标方案）

## 2 多重流线设计，丰富人员对工业建筑的多方面复合利用

在流线设计上，在常规保证生产流线的同

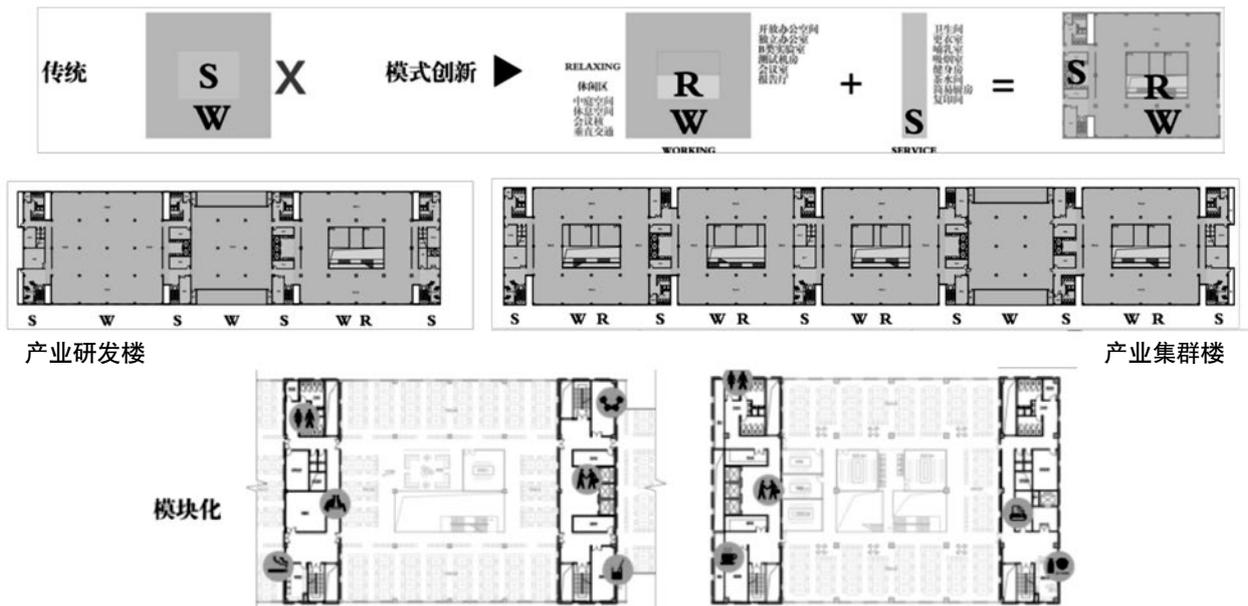


图3 功能配置分析图（作者自绘）

时，也应深度考虑研发、管理人员与生产车间的连接关系，以便于研发者、管理者对产品和生产线最直接、便捷、高效地把控。德国宝马莱比锡工厂（图4）作为集团技术、环保和可持续发展都走在世界前列的汽车工厂，以流线的有机组织作为设计的轴心依据：通过在占地面积4万m<sup>2</sup>的中央大楼核心区域天花板上设置贯穿的空中走廊，使车身可以穿梭其中，主要办公区和生产车间流线上相互交织，增强工厂整体感，甚至在员工食堂和会议室也能实时看到订单不同阶段的车身输送过程。各生产区域之间的高效互联、车身输送过程的一览无余，都让宝马的工程师们可以在任何地方实时跟踪订单状态，进而及时发现和调整生产进度（图4、图5）。



图4 德国宝马莱比锡工厂实景照片<sup>[3]</sup>

为了更好的打开市场、服务于客户，在工业建筑中亦可将参观流线纳入其中，从而让客户全面地了解产品，使工业建筑更具综合性。德累斯顿大众透明工厂就充分考虑客户的需求，设置了专门的客户参观、体验流程，并使其融入厂区的综合流线

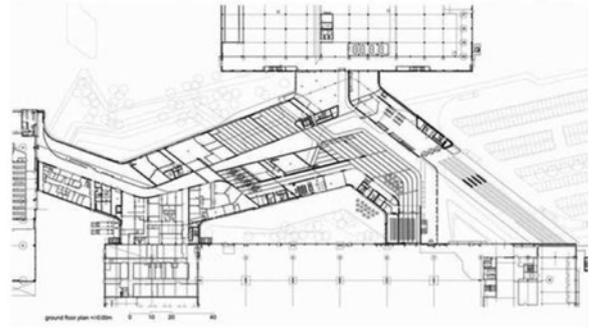


图5 德国宝马莱比锡工厂首层平面图<sup>[3]</sup>

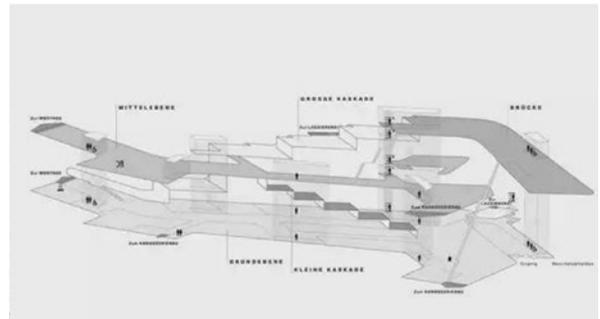


图6 德国宝马莱比锡工厂流线分析<sup>[3]</sup>



鸟瞰大众透明工厂



工厂内客户正在参观生产线

图7 德累斯顿大众透明工厂<sup>[4]</sup>

之中，为产品宣传和客户拓展提供了强有力的支持。现如今，它已不仅仅是一座工厂，更是企业名片和城市客厅（图7）。

### 3 充分考虑“人”的感受，创造富于情感的生产空间

在室内空间的营造上，新一代工业建筑不止于满足工艺生产需求，更注重考虑“人”作为使用者的使用体验。福斯特建筑事务所在韩国大田的韩泰轮胎研发中心里（图8），运用了“同一屋顶”的空间语汇。建筑平面整体呈二维的鱼骨式，设计者将包括需隔离的实验室以及需要大净高的实验室



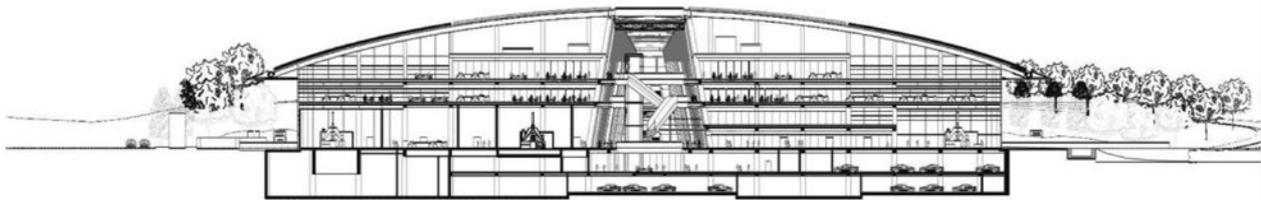
研发中心的“脊椎”空间

的核心研发空间，组织在“脊椎”两侧的指状空间中。巨大的近椭圆形屋面笼罩整个建筑群，给使用者心理上营造“同一屋檐下”的社区感，更在椭圆形与鱼骨行的集合差异部分形成各种过渡型的灰空间。最具特点的是对“脊椎”本身的处理：明亮的空间内被创造多种形状各异的、近体尺度的交流空间；从平面布局到家具界面的形状，都鼓励员工们舒展自己的身体姿态。其疗愈优先的设计与实验室空间内的效率优先设计形成了鲜明的对比，逆合成互补的空间节奏。

在一汽大众汽车公司轿车二厂项目中也处处体现了对人的关怀与满足（图9）。在总装和焊装车间将通常的带型窗设计成3m的落地窗，沿厂房四周环形布置，在工业厂房中达到了最大限度的通透，强化了与自然的交流；为了避免大片玻璃和金属墙板产生的眩光，整个墙面倾斜设置，墙面与屋顶倾斜而有规律的天窗，使整个建筑自然地产生了一种向前的动感。此外，涂装车间将门厅、展示厅、接待室、更衣室、淋浴及有对外业务的办公室布置在底层生活间，其余的车间办公室、休息室与卫生间则分散布置在接近工作岗位的地方，并且尽量充分利用车间内“无用”的空间，缩短了车间工作人员往返生活间的距离。底层展示厅办公室等采用大片通透的玻璃隔断进行分割，形成开放格局，使空间相互渗透，给使用者开阔的视野。

### 4 注重使用者的精神需求，创造交互融合的室内外互动空间

生态自然的环境能够促进人的思维能力、增加劳动积极性、提高工作效率。新兴的工业建筑应摒弃烟雾弥漫的传统形象，注重厂区外部环境的塑造。与此同时，自然宜人的外部环境与室内空间有机交融，不仅可以满足工作者的精神需求，提供更



剖面图

图8 韩泰轮胎研发中心<sup>[5]</sup>

图9 一汽大众汽车公司轿车二厂<sup>[6]</sup>

多人性的空间，还使工作者能够在工作期间释放压力，对员工的工作效率产生积极的促进（图10）。

当代高科技园区核心在于人才的竞争力，因此产业园区规划和建筑的空间环境应当为科研人才创造出可以激发灵感的、高效舒适的办公环境。

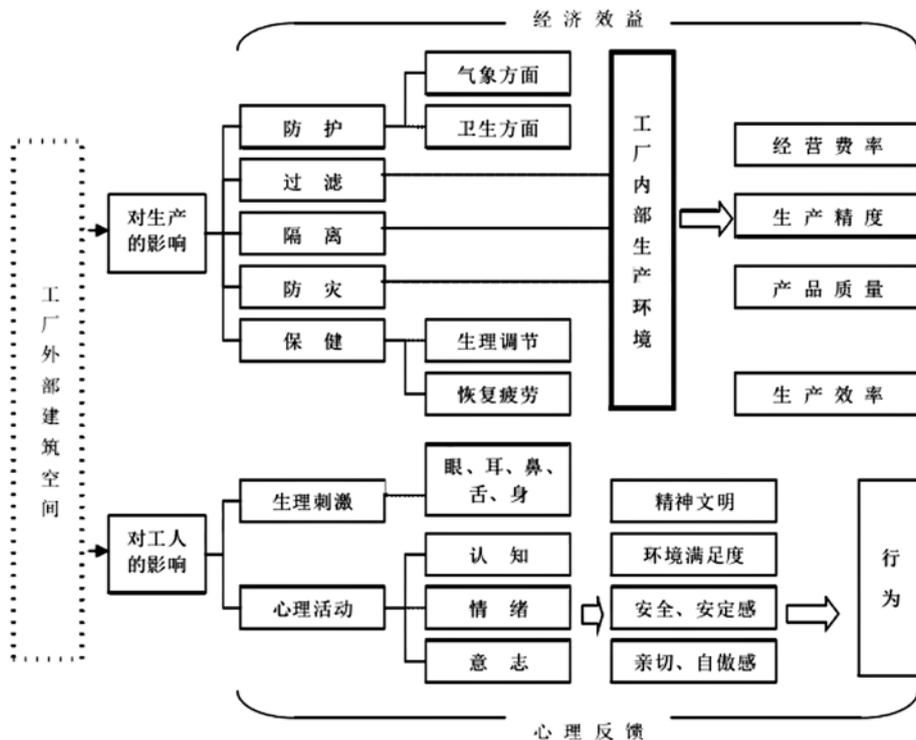
东莞TP-LINK产业园选址于风景秀丽的月塘湖

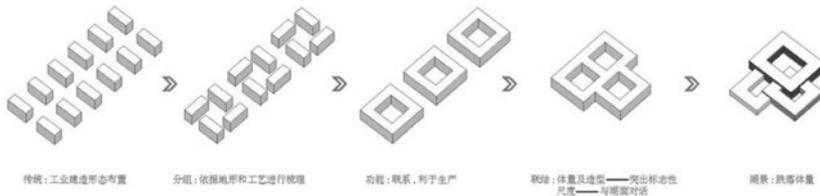
旁（图11），以3个环形建筑组成一栋厂房，建筑体量围合成宜人的院落空间与湖面呼应，中间植入十字形的步行轴线，并以之为单元。通过不断单元复制的方式，实现整个工业园规划结构的有机生长，打造出环环相扣的花园式产业园布局。虽然依旧是体量巨大的工业建筑，但园区整体环境氛围平稳、舒缓，员工在工作中穿梭于自然院落与厂房之间，被这怡然的氛围感染，可为产品注入更多的灵感。

GH+A事务所于2012年参与了位于圣地亚哥的车罗齐食品生产与研究中心的厂房改造（图12）。建筑师在设计中将意粉、谷物工厂与其间的办公楼共同围合出一个开放广场作为“社交中心”，形成建筑综合体中重要的公共场所，以鼓励员工交流。不同于以往加工车间作为工业建筑核心的通式，该“社交中心”成为了食品工厂内核心的部分，绿树环绕的庭院提高了环境品质，员工在这里可以进行充分的交流互动。这一创意体现了全新的生产理念。

## 5 结语

人将成为后工业时代里产业提升的核心驱动力。工业建筑的人性化设计必将高于对生产工艺本

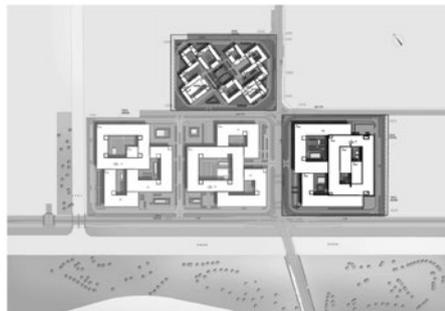
图10 外部空间的作用<sup>[7]</sup>



体量生成



厂房首层组合平面图



总平面图

图11 东莞TP-LINK产业园<sup>[8]</sup>

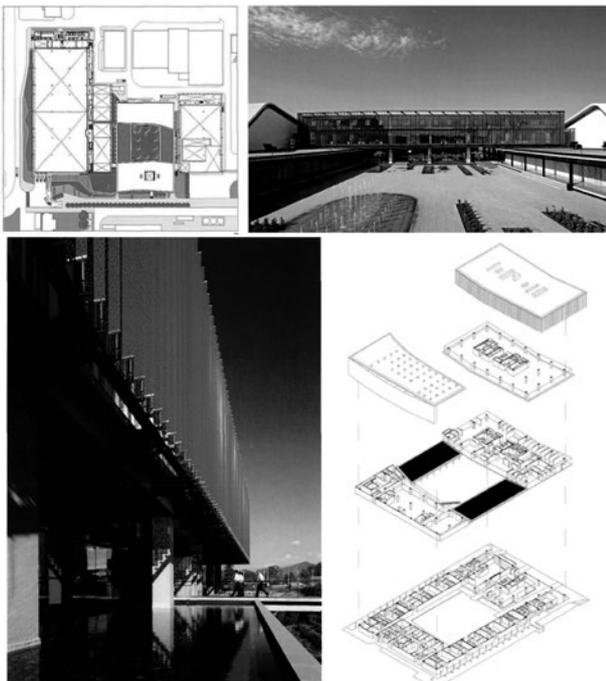


图12 卡罗齐食品生产与研究中心<sup>[9]</sup>

身的关注。当设计主旨回归到对使用者需求的关注时，工业建筑将不再只是一座装机器的盒子，而是趋向于综合建筑的特性：兼顾生产效率、人文关怀、使用观感等多方面因素，并转变为更多元、包容的综合性集成。本文呈现出的思辨虽基于笔者自身有限工作经验，但相信如何为后工业时代下的工业建筑破题，是值得每一个建筑师在工作实践中思考的。笔者也相信工业建筑的发展将在未来显现出巨大潜力和机遇。

参考文献

[1] [美]丹尼尔·贝尔著，高铨等译.后工业社会的来临.江西人民出版社.2018  
[2] [德]于尔根·亚当，卡塔琳娜·豪斯曼，弗兰克·于特纳著，苏

艳娇译.工业建筑设计手册.大连理工大学出版社.2006: 110~111  
[3] [https://www.sohu.com/a/319797485\\_100051959](https://www.sohu.com/a/319797485_100051959)  
[4] 百度图片搜索 [www.baidu.com](http://www.baidu.com)  
[5] 福斯特建筑事务所，张宇译，城市建筑.黑龙江科学技术出版社. 2017-07-05  
[6] 许成德. 杨溪村. 赵雪晴. 任雯, 建筑学报. 中国建筑学会. 2005-12-20  
[7] 刘永德著.现代工厂建筑空间.北京:中国建筑工业出版社.1989:53~100  
[8] 王浪, 产业互联—东莞TP LINK产业园. 世界建筑. 清华大学. 2018-02-18  
[9] 张茜, 卡罗齐食品生产与研究中心, 圣贝尔·纳多, 圣地亚哥, 智利. 世界建筑. 清华大学. 2015-06-

# 两通高阻恒温阀 在散热器供暖系统中的应用分析

■ 申剑 张欣然 [暖通]

**摘要:** 根据节能减排发展要求,散热器供暖须有室温自动控制功能。双管系统加两通高阻恒温阀系统因其优越的调节性能,越来越被广大暖通设计师采用,而散热器供暖系统在暖通专业中比重不高,总体设计难度也不大,往往使很多设计师对其重视度不够,尤其是采用双管加两通高阻恒温阀时,错误地认为高阻型恒温阀天然能够保证系统平衡而不进行水力计算。本文根据算例进行分析,以提醒广大暖通设计师。

**关键词:** 两通高阻恒温阀;水力平衡;恒温阀Kv值

## 1 提出问题

为提高散热器供热量的精确调节,提高供暖质量,减少供热浪费,新建或改扩建的民用、公共建筑的供暖系统,大多采用双管系统,每个散热器前设置两通高阻恒温阀。随着《工业建筑节能设计统一标准》GB51245的发布,根据

“5.2.8对于需要分室自动控制室温的散热器供暖系统,散热器前应安装恒温控制阀”,工业建筑也在逐步扩大双管供暖系统的设计,但是很多设计者认为两通高阻恒温阀具有高阻力的特性,只要安装它,就可以解决水力平衡问题而无需再进行水力平衡计算,实际情况到底如何,下面将以某算例进行具体分析。

## 2 算例分析

### 2.1 水平双管系统

为了简化计算,本文以一个有20根立管的

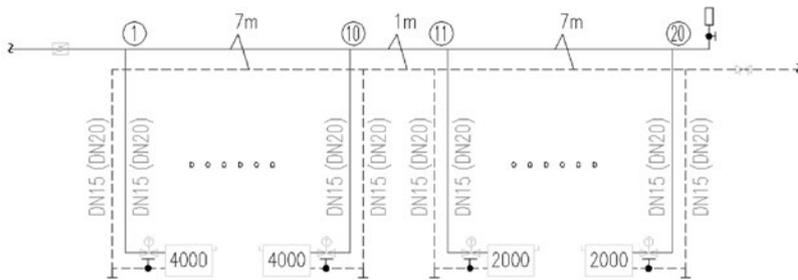


图1 某双管供暖系统立管示意图

单层双管供暖环路为算例,采用上供上回同程系统,前10组散热器负荷为4kW/组,后10组散热器负荷为2kW/组,具体立管图见图1。

选用恒温阀参数参考标准图17K408<sup>[1]</sup>,具体参数见表1。

根据软件计算(软件默认管路比摩阻取值范围为40~100Pa/m),各立管默认管径为DN15,此时系统阻力见表2。

根据表2可以看出,如果不进行水力计算,只是简单粗暴地直接安装高阻力恒温阀,不仅无法解决系统的水力平衡问题,反而会加剧水力失调,哪怕是在加装恒温阀前进行了水力平衡达到15%,而在加恒温阀后,水力失调度也会加剧到39.38%,其原因是恒温阀的阻力是根据阀门Kv值

作者简介:申剑,男,高级工程师,2000年毕业于天津大学供热通风与空调工程专业,现就职于航空工业规划技术发展中心。

表1 恒温阀参数参考标准图

型号	预设定kv最大流量 (m <sup>3</sup> /h P=100kPa)								无预设功能阀门KV <sub>s</sub>
	1	2	3	4	5	6	7	N	
RA-N15	0.04	0.08	0.14	0.21	0.31	0.37	0.47	0.53	0.52
RA-N20	0.09	0.14	0.21	0.32	0.43	0.52	0.61	0.73	0.71

表2 立支管管径为DN15时系统阻力及不平衡率

系统本身未进行水力平衡时			
	各环路阻力 (不含恒温 阀) Pa	*工况含恒温阀 后各环路阻力 (*Pa)	**工况含恒温 阀后各环路阻 力(**)Pa
	12651.06	19640.59	21637.25
不平衡率	27.13%	44.16%	15.19%
*工况: 采用无预设阻力型恒温阀			
**工况: 采用带预设阻力型阀门, 1~10立管设定值为 N, 11~20立管设定值为4			
系统本身进行水力平衡时 (仅调整干管管径)			
编号	各环路阻力 (不含恒温 阀) Pa	*工况含恒温阀 后各环路阻力 (*Pa)	**工况含恒温 阀后各环路阻 力(**)Pa
	10256.68	17246.21	20033.54
不平衡率	15.11%	39.38%	9.95%
I工况: 采用无预设阻力型恒温阀			
**工况: 采用带预设阻力型阀门, 1~10立管设定值为7, 11~20立管设定值为4			

表3 立支管管径为DN20时系统阻力及不平衡率

系统本身未进行水力平衡时			
编号	各环路阻力 (不含恒温 阀) Pa	*工况含恒温阀 后各环路阻力 (*Pa)	**工况含恒温 阀后各环路阻 力(**)Pa
	11280.95	15030.15	15175.02
不平衡率	21.49%	34.84%	11.23%
*工况: 采用无预设阻力型恒温阀			
**工况: 采用带预设阻力型阀门, 1~10立管设定值为 N, 11~20立管设定值为4			
系统本身进行水力平衡时 (仅调整干管管径)			
编号	各环路阻力 (不含恒温 阀) Pa	*工况含恒温阀 后各环路阻力 (*Pa)	**工况含恒温 阀后各环路阻 力(**)Pa
	10262.03	14011.22	14524.5
不平衡率	13.69%	30.10%	13.77%
*工况: 采用无预设阻力型恒温阀			
**工况: 采用带预设阻力型阀门, 1~10立管设定值为 N, 11~20立管设定值为4			

和流量确定的:  $\Delta P=(Q/Kv)^2$ 。

通常阻力较大的环路流量也较大, 所以, 如果所有支路选择相同的阀门kv值, 原来阻力比较大的环路阻力就会变得更大, 加剧不平衡率。而如果根据系统的阻力和每个支管的流量, 经过计算选择恒温阀合理的Kv值, 就可以解决水力失调问题, 如果在选择恒温阀之前, 先进行系统的水力初平衡, 还可以降低系统的总阻力。

由于多年的使用习惯, 东北地区很多项目, 甲方要求散热器立管不得小于DN20, 当立管管径为DN20时, 系统阻力见表3。

由表3可以看出, 加大立支管管径仅能降低系

统总阻力, 对于系统的平衡作用不大, 而都采用DN20的恒温阀将会增加初投资。

如果根据每个立管的流量选择不同管径, 有利于系统的平衡, 将本算例中1~10立管采用DN20、11~20立管采用DN15时, 系统阻力见表4。

根据以上计算, 可以看出两通高阻恒温阀的高阻力特性十分明显, 所以系统立管管径、恒温阀预设值的选择, 应根据外管网情况、与其他环路的平衡情况等因素综合考虑。

## 2.2 垂直双管系统

以一个6层垂直双管供暖系统为算例, 采用上供下回系统, 每组散热器负荷为2kW/组, 具体立

表4 1~10立管采用DN20、11~20立管

系统本身未进行水力平衡时			
编号	各环路阻力 (不含恒温 阀) Pa	*工况含恒温 阀后各环路阻力 (*Pa)	**工况含恒温 阀后各环路阻 力(**Pa)
	11280.95	15030.15	15839.81
不平衡率	18.28%	27.04%	12.89%
*工况：采用无预设阻力型恒温阀			
**工况：采用带预设阻力型阀门，1~10立管设定值为N，11~20立管设定值为5			
系统本身进行水力平衡时（仅调整干管管径）			
编号	各环路阻力 (不含恒温 阀) Pa	*工况含恒温 阀后各环路阻力 (*Pa)	**工况含恒温 阀后各环路阻 力(**Pa)
	10630.43	14379.63	14177.01
不平衡率	13.28%	23.74%	10.63%
*工况：采用无预设阻力型恒温阀			
**工况：采用带预设阻力型阀门，1~10立管设定值为N，11~20立管设定值为6			

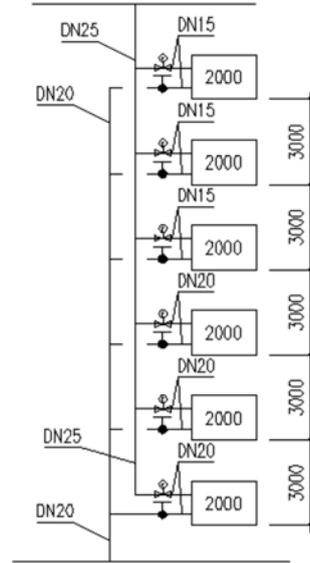


图3 立管图2

管图见图2。

垂直双管系统中，由于水冷却产生的重力作用压力是引起垂直失调的重要原因之一。本算例按供回水温度80/55℃计算，重力作用压力按  $\rho gh \times 2/3$  计算<sup>[2]</sup>，水力计算结果见表5。

根据表5可以看出，本系统的平衡完全是靠增

表5 各环路阻力及不平衡率

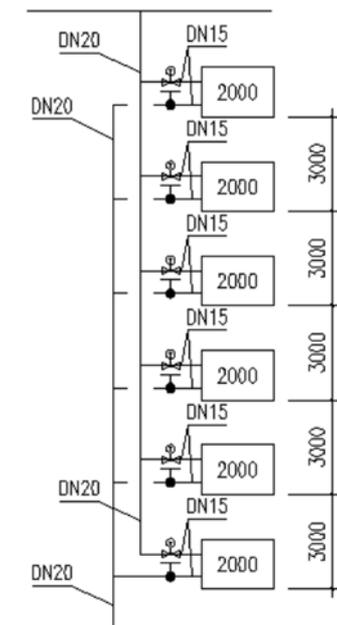


图2 立管图1

系统不进行水力平衡时								
编号	散热器 负荷W	各环路阻力 (不含恒 温阀、 重力) Pa	重力作 用力Pa	含重力各环 路阻力(I)Pa	*工况恒 温阀自 身阻力 Pa	含恒温 阀后各环 路阻力 (I)Pa	**工况恒 温阀自 身阻力 Pa	含恒温 阀后各环 路阻力 (II)Pa
1	2000	1054.48	1274	-219.52	1747.38	1527.87	10714.11	10494.59
2	2000	1295.4	1019.2	276.2	1747.38	2023.58	10714.11	10990.31
3	2000	1416.02	764.4	651.62	1747.38	2399	10714.11	11365.73
4	2000	1416.02	509.6	906.42	1747.38	2653.8	10714.11	11620.53
5	2000	1295.4	254.8	1040.6	1747.38	2787.98	10714.11	11754.71
6	2000	1054.48	0	1054.48	1747.38	2801.87	10714.11	11768.59
不平衡率		25.53%		120.82%		45.47%		10.83%
*工况：采用无预设阻力型恒温阀								
**工况：采用带预设阻力型阀门，设定值为4								

表6 各环路阻力及不平衡率

系统进行水力平衡时								
编号	散热器负荷 W	各环路阻力 (不含恒温 阀、重力) Pa	重力作用力 Pa	含重力各环 路阻力(I)Pa	*工况恒温阀 自身阻力Pa	含恒温阀后 各环路阻力 (I)Pa	**工况恒温 阀自身阻力 Pa	含恒温阀后 各环路阻力 (II)Pa
1	2000	1054.48	1274	-219.52	1747.38	1527.87	2138.94	1919.42
2	2000	1122.43	1019.2	103.23	1747.38	1850.61	1682.07	1785.29
3	2000	1130.46	764.4	366.06	1747.38	2113.45	1682.07	2048.13
4	2000	703.19	509.6	193.59	937.3	1130.89	1747.38	1940.97
5	2000	552.39	254.8	297.59	937.3	1234.89	1747.38	2044.97
6	2000	303.16	0	303.16	937.3	1240.46	1747.38	2050.54
不平衡率		73.18%		159.97%		46.49%		12.94%
*工况：采用无预设阻力型恒温阀								
**工况：采用带预设阻力型阀门，顶层设定值为7，四、五层设定值为N，一~三层设定值为6								

加恒温阀阻力实现的，结果会导致系统阻力增加较大，根据张锡虎老师的建议<sup>[3]</sup>“应将高环路多得到的自然作用压力，用以克服低环路的相对不利因素，及回水立管的管径要小于供水立管的管径，使回水立管的阻力大于供水立管的阻力”，现将系统改为图3所示，其水力计算结果见表6。

根据表6可以看出，经过人为调整，系统的总阻力约为2KPa就可以实现系统平衡。

由以上计算可以看出，只有经过计算，确定合适的管径和恒温阀Kv值（设定值），才能解决供暖系统的水力平衡问题。

### 3 结论

(1) 不经过水力计算，随意设置恒温阀将加大供暖系统的水力失调，只有选择合适的恒温阀Kv值，才有利于系统平衡。

(2) 进行系统水力平衡计算，同时选择合适的恒温阀Kv值，有利于降低系统总阻力。

(3) 恒温阀Kv值是合理选择阀门的重要参数，而每个厂家产品的Kv值是不同的，所以应在设计中明确每个恒温阀需求的Kv值（或预设档位），并保证现场安装正确。

(4) 恒温阀Kv值的确定是因人而异的，根据表4可以看出，同样的系统，不同的配管设计，会导致恒温阀Kv值选择的不同，未经过水力平衡的系统，11~20立管预设阀门档位为5，而经过水力平衡的系统，11~20立管预设阀门档位为6。

(5) 本文仅对采用两通高阻恒温阀的双管系统水力平衡进行了阐述，而工业建筑的散热器供暖系统是否都应该采用双管加高阻力恒温阀的设计，还需要根据厂区外网情况确定。如老旧厂区的供暖改造或新老建筑共用管网等情况，当厂区外网资用压头本身不富裕时，或许采用单管跨越加两通低阻恒温阀或单管系统加三通低阻恒温阀是更好的选择。

### 参考文献

- [1] 《散热器选用与管道安装》17K408.中国计划出版社, 2017
- [2] 陆耀庆.实用供热空调设计手册[M].2版.北京: 中国建筑工业出版社, 2008
- [3] 张锡虎.工程设计问答(3),暖通空调, 2010, 40(3)

# 一种航空发动机进气温度畸变发生模拟系统设计研究

■ 徐月 王娜 [动力]

**摘要:** 本文根据某型航空发动机温度畸变模拟参数的需求,进行了温度畸变模拟发生装置及配套系统设计。设计结果表明,该系统可以达到所需要的温度畸变模拟区域、温升、温升率等关键参数需求。

**关键词:** 航空发动机;进气温度畸变;装置设计

## 1 研究背景

随着各方对高性能航空器的需求日益增加,对航空发动机的性能的要求也相应提高。相比较传统需求,现代航空发动机所处的工作环境更加恶劣极端,给发动机的稳定裕度设计带来很大难度。这其中又以进气环境的剧烈畸变对压气机的影响最为严重,一旦引起压气机喘振,造成燃烧室熄火,将带来不可估量的损失。因此进口畸变试验是航空发动机定型稳定性评估过程中的重要步骤。

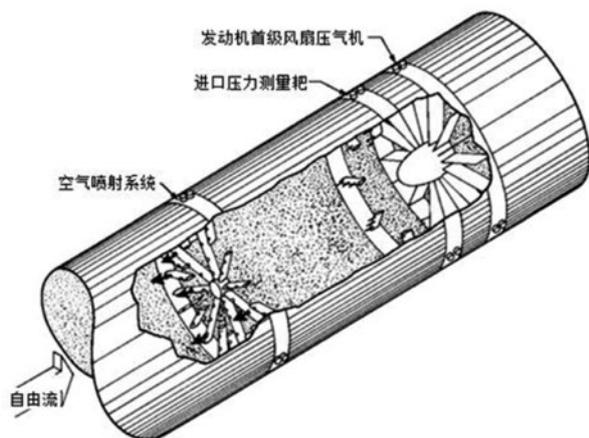
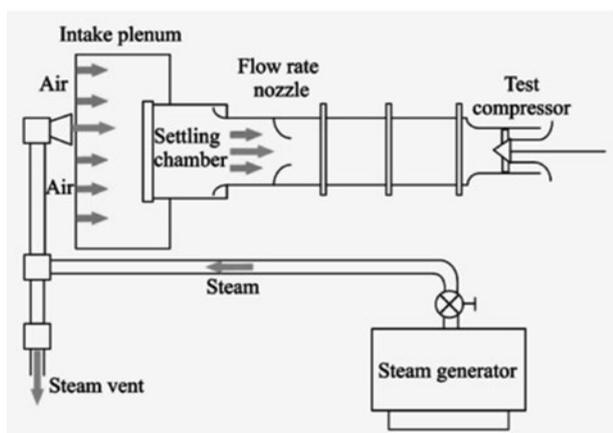
航空发动机进气畸变指进气道入口压力、温度、气流角度在时间和空间分布上的不均匀现象,分为压力畸变、温度畸变、以及由于压力和温度同时变化,在进气道入口产生旋流的旋流畸变。本文主要针对进气温度畸变展开研究。在真实工作环境下,航空发动机进气温度畸变的来源有二:一种来自外部,如武器发射或多机并飞时,武器和邻机排出的高温燃气在发动机进气道局部产生突然的温度畸变,特点为温升大温升率高,但热流流量和畸变区域较小;或者如舰载机弹射起飞时,甲板弹射高温蒸汽被吸入进气道,产生温度畸变,特点为热流含水量较高。另一种来自自身,如短距起降或发动机反推时,航空发动机自身的高温燃气对进气环境

产生影响,表现为流量较大,影响区域较大,产生的热流喷泉流动极为复杂。针对上述特点,航空发动机进气温度畸变发生模拟装置应该满足需求为:航空发动机进气道入口平均温升、高温区范围、平均温升率、高温区持续时间等关键性能参数。同时为减小压力畸变的影响,温度畸变模拟发生装置应尽可能造成较小的总压损失。

目前,温度畸变模拟发生装置设计主要分为热流导入式和嵌入燃烧式两类。热流导入式主要通过加热燃烧换热产生高温工质,通过管路导入进气通道截面,如阿诺德工程研究中心AJDG温度畸变模拟器,是将经由空气电加热系统加热得到的高温空气喷入发动机进气道<sup>[1][3]-[5]</sup>,如图1所示;美国海军研究生院蒸汽温度畸变模拟器,将大功率锅炉加热产生大量高温蒸汽,经气量分配装置喷入压气机进口<sup>[6][4]</sup>,如图2所示。这一类装置优点为设计制造使用简单、成本相对较低、使用安全。同时,该类装置存在以下问题:温升会受到管路传输导热的限制,现有设计最高温升为150K;温升速率会受到加热装置和锅炉能力的,现有设计最高为500K/s,难以达到航空发动机真实模拟的要求。

此外,还有吞入火药气体地面试验研究装置<sup>[5][7]</sup>,该装置通过在压气机进口加装小型火药发生器,模拟武器废气对发动机的影响。但此类装置废气成分复杂,会同时引入压力畸变,且高温高压瞬时冲击也

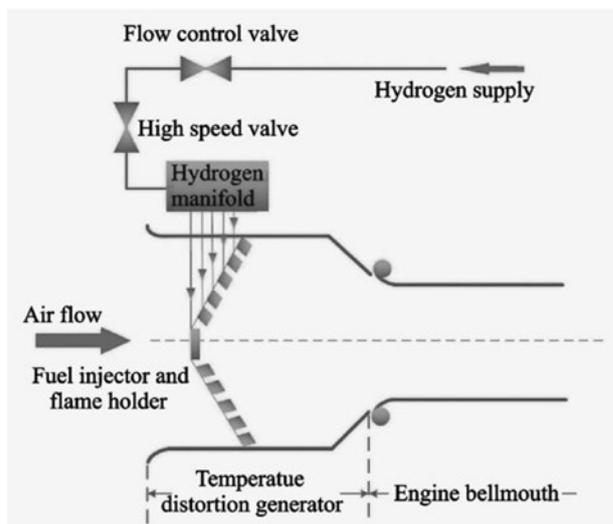
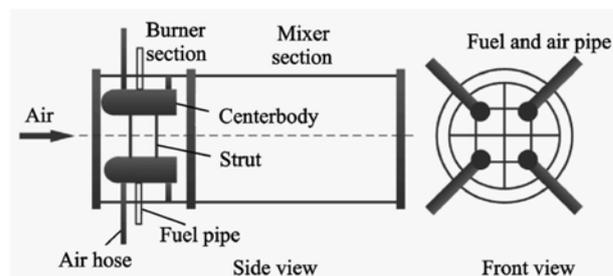
作者简介:徐月,女,助理工程师,2018年毕业于北京航空航天大学航空宇航推进理论与工程专业,现就职于中航工程集成设备有限公司。

图1 阿诺德工程研究中心AJDG温度畸变模拟器<sup>[1][3]-[5]</sup>图2 美国海军研究生院蒸汽温度畸变模拟器<sup>[4][6]</sup>

对集气腔结构提出较高要求,故该方案多应用于航空发动机定型测试,难以对温度畸变的具体影响机理进行研究。

另一种为嵌入燃烧式,通过在进气道前内置燃烧器,直接对来流进行燃烧加温。如NASA全尺寸总压畸变发生器,采用氢气火焰稳定器作为控制单元<sup>[6][8]</sup>,如图3所示;弗吉尼亚理工温度畸变模拟装置,在进气截面内均布四个燃烧室面内均布4个燃烧室,使用丙烷作为燃料,对四个对4个等分区内的温升进行控制<sup>[6][9]</sup>,如图4所示。与热流导入式相比,嵌入燃烧式对畸变区域控制更加灵活,碳氢燃料能量密度更大,可以实现对任意温升和温升率的模拟要求。但在于结构复杂、设计加工难度较大,同时需要对每一路进行单独控制,导致系统更为复杂,试验成本较高。

针对常见情况,设计温度畸变发生模拟装置和配套系统的方案,旨在对一种温度畸变发生模拟系统的设计进行研究。常见进口温度畸变参数选取

图3 NASA全尺寸总压畸变发生器<sup>[6][8]</sup>图4 弗吉尼亚理工温度畸变模拟器<sup>[7][9]</sup>

如下:

- (1)在主机进口截面小于25%区域内达到温升100K;
- (2)温升率不小于2900K/s;
- (3)热气流量不大于主机进气流量的5%。

## 2 温度畸变模拟发生系统设计

### 2.1 加温方案选取

温度畸变发生器现有常用设计有两种方案,分别为热流导入式和嵌入燃烧式。第一种通过在流道外部加热、燃烧、换热产生高温工质,利用管路导入进气通道截面。工质为高温空气、燃烧废气或水蒸气。第二种通过在进气道内嵌入多个燃烧器,形成局部高温区。

在第一种方案中,对于引入的热流有如下换热要求:

$$m_{in}C_p(T_{in} - T_{hot}) = m_{hot}C_p(T_{hot} - T_0) = m_{hot}C_p\Delta T$$

其中,  $m_{in}$  为单位时间内导入的热流质量流量,  $T_{in}$  为导入的热流平均温度,  $T_{hot}$  为需求的高温区域的平均温度,  $m_{hot}$  为需求的高温区域的热流质

量流量,  $T_0$ 为来自主机的自由流温度,  $\Delta T$ 即为设计要求的高温区域平均温升,  $C_p$ 为空气的定压比热容, 则有:

$$T_{in} = T_{hot} + \frac{m_{hot}}{m_{in}} \Delta T$$

对于本试验器设计要求, 引入热气流与主机流量比值范围不超过5%, 要求畸变的高温区域面积范围不小于25%, 畸变区域平均温升值不低于100K。计算可得引入的热流范围最低应为900K~1400K。调研当前空气加热设备加温能力, 加热器出口最高温度为800℃, 因此采用高温空气或水蒸气将热流导入的方法不可行。而若采用燃烧室出口高温空气作为热流, 则会同时引起局部区域的压力畸变, 燃烧室出口高温高压环境也对管路及阀门产生的热负荷也较大。综上, 选择在进气流道内嵌入燃烧器产生局部高温区。

以常规设计发动机为例, 进气道内流速范围约为32m/s~102.5m/s。为保证整个流量范围内良好的点火特性和稳焰特性, 所选择燃料应具备较宽的贫油可燃边界和较大的火焰传播速度, 防止火焰吹熄, 造成温度畸变发生器失效。

表1 常温常压下氢气与丙烷燃烧特性比较

燃料	贫油熄火边界 (当量比)	火焰传播速度 (m/s)
H <sub>2</sub>	0.1	2.6
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.3	0.5

如表1所示, 相比较碳氢类燃料, 氢气的点火特性和稳焰特性较好, 且热值更高, 在本系统的工作范围内稳定性更好, 更容易进行火焰稳定器的结构设计, 故选择氢燃烧器作为温度畸变发生器的加温方案。

## 2.2 火焰稳定器方案

进气道内气流速度较高, 为保持燃烧稳定进行和较高的点火性能, 需采用火焰稳定器。常见的火焰稳定器有旋流器、钝体火焰稳定器, 射流火焰稳定器等。相比较其他两种, 钝体火焰稳定器结构简单, 流动损失较小, 故选取较简单的V型槽式稳定器作为高温点火单元。

V型火焰稳定器核心参数为堵塞比。堵塞比的选取影响了火焰稳定器前后压力损失和点火性能。计算公式如下:

$$M_a = \frac{V}{c}$$

$$c = \sqrt{KRT_0}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{M_a^2}{1 + \frac{K-1}{K+1}(M_a^2 - 1)}}$$

如上式所示, 在当地条件下,  $K=1.4$ , 对于空气而言,  $R$ 为287J/(kgK), 以进气道马赫数最大状态0.29为例, 则无量纲速度最大为0.318。考虑总压恢复系数与堵塞比的经验关系式为:

$$\sigma = 1 - 3 \frac{K}{K+1} \lambda^2 \varepsilon$$

考虑一般设计要求  $\sigma$  应不小于98%, 计算可得堵塞比  $\varepsilon$  应不大于0.1。根据设计经验, V型钝体火焰稳定器最佳堵塞比随来流马赫数关系如图5所示。当来流马赫数为0.29时, 最佳堵塞比约为0.35。故综合考虑选择堵塞比为0.12进行初始设计。

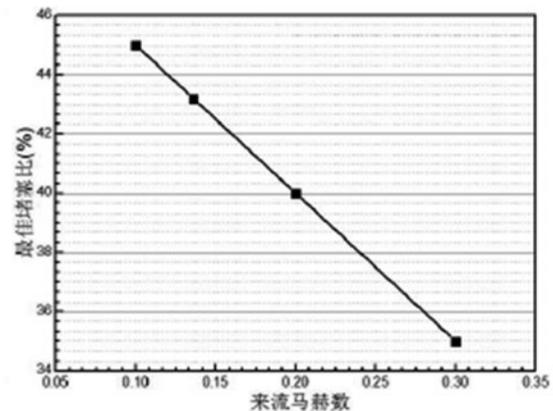


图5 钝体最佳堵塞比与来流马赫数关系

火焰稳定器火焰稳定综合系数如下式所示。

$$K_{ST} = \frac{PTW}{\frac{v}{1-\varepsilon}}$$

其中,  $P$ 和 $T$ 分别对应稳定器边缘静压和边缘总温,  $W$ 为钝体槽宽。  $K_{ST}$ 通常取值范围为5~9, 为保证火焰稳定燃烧, 其系数不小于7。计算可得, 钝体的槽宽 $W$ 初步选取为27mm。依据经验, 稳定器顶角在30°时获得综合最佳的燃烧稳定性和流阻特性。火焰稳定器顶角半径为6mm~15mm, 计算选取为6mm。综上, 初步设计

V型火焰稳定器结构如图6所示。

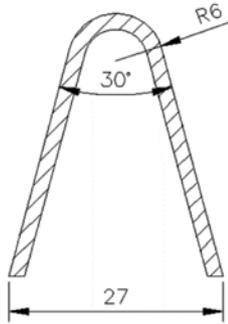


图6 V型火焰稳定器横截面结构示意图

为保证畸变区域加热的均匀性，考虑使用长短两排稳定器共同加热。为保证畸变区域位置可调，使用沿周向排布的径向稳定器。根据经验公式由V型钝体稳定器槽宽确定两排的径向稳定器根数如下：

$$N_{rt} = \frac{\pi d_{out}^2 \epsilon}{2W(1.4d_{out} - 1.5d_{in} - 4W)}$$

$$N_{tp} = 2N_{rt}$$

式中， $N_{rt}$ 为内环稳定器根数， $N_{tp}$ 为外环稳定器根数，计算可得 $N_{rt}=8.46$ ，故选取内环径向稳定器根数为8根，则外环稳定器根数为16根，沿周向均布。其中每一组由2根长短径向稳定器组合成一个控制单元根长短径向稳定器组合成1个控制单元，用于控制 $45^\circ$  圆心角畸变区域范围内的温升。

为保证温度分布尽可能均匀，在每个V型槽内安装长短两种设计的喷氢杆，通过杆上的燃料孔将氢气喷出，在V型钝体后的回流区内点火，形成稳定的加温火焰。为减少喷氢杆结构对钝体的影响，选择喷氢杆内径4mm。经文献调研和经验设计得出，氢气射流沿着主流方向时有着较好的温升效果，即喷氢杆置于V型钝体火焰稳定器之前。

### 2.3 燃料分配方案

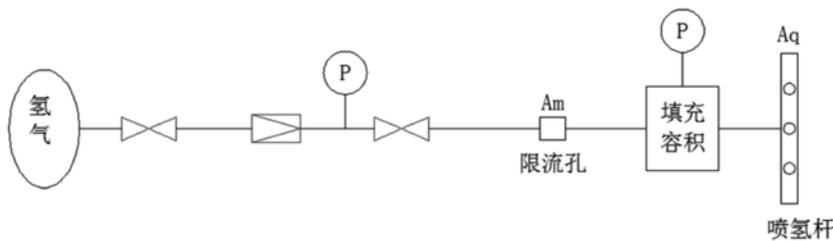


图7 供氢系统原理图

试验系统的温升和温升率要求由供氢系统的压力和填充容积实现，设计供氢系统原理图如图7所示。

供气系统由氢气源，限流孔，填充容积和喷氢孔组成，其中，氢气源压力为 $P_H$ ，氢气管路内氢气压力为 $P_t$ ，限流孔起到限流作用，横截面积为 $A_m$ ，喷氢孔横截面积为 $A_q$ ，填充容积 $V_H$ 由气腔容积和管路容积等效而成。由于氢气源压力足够大可以保证限流孔和喷氢孔处流动均为临界状态，则温升时间可以等效为填充容积内氢气压力从 $P_{t0}$ 到接近稳定的 $P_{t\infty}$ 所需的时间。

限流孔处截止阀打开的一瞬间，临界流量填充孔后容积形成压力，同时一部分经由喷氢孔喷出，考虑质量守恒，则有：

$$\left( K \frac{P_H A_m}{\sqrt{T_H}} - K \frac{P_t A_q}{\sqrt{T_H}} \right) dt = \frac{dP_t V_H}{R_H T_H}$$

考虑无限长时刻后的稳定状态，则有：

$$K \frac{P_H A_m}{\sqrt{T_H}} = K \frac{P_{t\infty} A_q}{\sqrt{T_H}}$$

$$P_{t\infty} = \frac{A_m}{A_q} P_H$$

代入上式，则有：

$$K \frac{P_H A_m}{\sqrt{T_H}} \left( 1 - \frac{P_t}{P_{t\infty}} \right) dt = \frac{dP_t V_H}{R_H T_H}$$

两侧积分，则有：

$$\int_0^\tau K \frac{P_H A_m}{\sqrt{T_H}} \left( 1 - \frac{P_t}{P_{t\infty}} \right) dt = \int_0^{P_{t\infty}} \frac{V_H}{R_H T_H} dP_t$$

即：

$$\frac{P_t}{P_{t\infty}} = 1 - e^{-\frac{KA_q P_H \sqrt{T_H}}{V_H} t} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$$

其中， $\tau$  则称为系统温升的特征时间常数，

则有：

$$\tau = \frac{V_H}{KA_q R_H \sqrt{T_H}}$$

其中， $R_H = 4124.36 \text{ J}/(\text{kgK})$ 。当系统达到稳定时，即限流孔后压力为 $P_{t\infty}$ 时，所需时间为无穷大。但若考虑在管

路内压力 $\frac{P_t}{P_{t\infty}}=0.9$ 时满足条件,则有 $t=2\tau$ ;  $\frac{P_t}{P_{t\infty}}=0.95$ 时满足条件,则有 $t=3\tau$ 。

由上述计算可以得出,在确定喷氢孔面积的情况下,温升值受氢气源减压阀后压力和限流孔面积的影响。由于温升率与气源减压阀后压力无关,只与填充容积有关。故依据一个加热单元,即全部流量的12.5%可确定限流孔前压力、限流孔尺寸、喷氢孔尺寸和填充容积。

考虑温升要求,则对应平均温升下限应为 $100/0.95=105\text{K}$ ,上限为 $130/0.95=137\text{K}$ ,即:

$$105 \leq K \frac{P_H A_m}{\sqrt{T_H}} \cdot \frac{H_u}{m c_p} \leq 137$$

其中,氢气温度 $T_H$ 可认为与周围环境温度相同,选择为 $300\text{K}$ 。为保证在全部流量范围条件下均满足全部温升条件,则有:

$$0.25 \leq P_H A_m \leq 1.00$$

已知氢气瓶满瓶压力 $15\text{MPa}$ ,临界压比 $v_{cr} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ ,计算得 $0.53$ ,则为保持限流孔和喷氢孔处的临界流动,在出口最大约为 $89\text{kPa}$ 的情况下,有 $P_{t\infty} \geq 0.168\text{MPa}$ , $P_H \geq 0.317\text{MPa}$ 。

考虑平孔流量系数为 $0.9$ ,所选择的限流孔直径为 $1\text{mm}$ ,则有限流孔面积为 $7.85 \times 10^{-7}\text{m}^2$ ,氢气压力调节范围为 $0.4\text{MPa} \sim 1.5\text{MPa}$ 。

又有 $\frac{A_m}{A_q}$ 取值应不大于 $0.53$ 且在最小气源压力下应保证喷氢孔处为临界流动,则有 $1.482 \times 10^{-6}\text{m}^2 \leq A_q \leq 1.869 \times 10^{-6}\text{m}^2$ 。考虑每个加热单元分布6个喷氢孔,则每个喷氢孔直径 $0.6\text{mm}$ 。

由温升率要求计算填充容积的体积。在确定喷氢孔尺寸的情况下,温升时间只与填充容积有关。根据设计要求,则有:

$$2900 \leq \frac{\Delta T}{3\tau} \leq 4000$$

代入整个工况条件,则有:

$$780.56 \leq \frac{V_H}{A_q} \leq 1507.18$$

可得 $1.32 \times 10^{-3}\text{m}^3 \leq V_H \leq 2.56 \times 10^{-3}\text{m}^3$ 。即可变容积应在 $1320\text{cm}^3 \sim 2560\text{cm}^3$ 的变化范围之内。

对于每个加热单元有一长一短两个喷氢杆。

考虑喷氢长杆布置4个燃料孔,短杆布置2个燃料孔。依据等环面积原则布置燃料孔位置,则有燃料孔位置如图8所示。

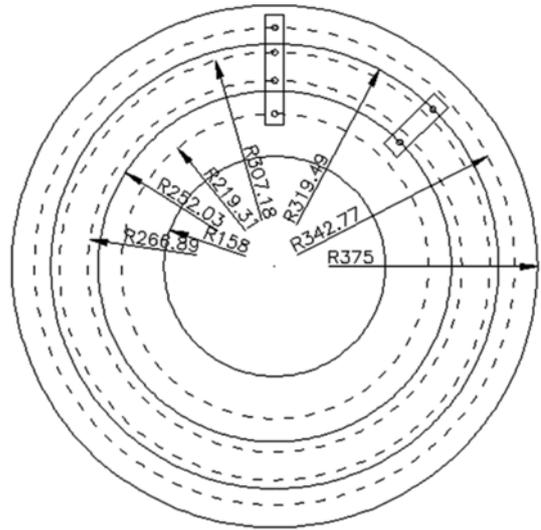


图8 加热单元喷氢孔位置示意图

考虑温度畸变系统的最大流量状态和最大加温需求状态,如将50%进口区域内的空气升温 $130\text{K}$ 。则由下式计算可知,单位时间所需热量约为:

$$\dot{Q} = m C_p \Delta T$$

$C_p$ 为空气定压比热容取 $1.0\text{kJ}/(\text{kgK})$ ,计算得 $\dot{Q}=4957.42\text{kJ}$ ,考虑氢气热值 $H_u=12100\text{kJ}/\text{kg}$ ,则总路所需氢气流量 $m_{H_2}=\dot{Q}/H_u$ ,约为 $0.4\text{kg}/\text{s}$ 。

常用氢气瓶满瓶压力 $15\text{MPa}$ ,钢瓶容积 $40\text{L}$ ,则由理想气体方程得出常温下氢气瓶内氢气质量约为 $0.45\text{kg}$ 。若加温时间要求 $3 \sim 4\text{s}$ ,则氢气气源至少应为由4瓶 $15\text{MPa}$ , $40\text{L}$ 氢气瓶并联而成的气瓶组。

气源系统分为氢气气源和氮气气源两部分。氢气用作温度畸变所需的燃料。在设计要求的温升时间要求下,4个气瓶分属四个支路,4个气瓶分属四个支路,根据所需要调节温度畸变面积区域的大小和温升调节各支路开关。氮气路主要用于管道的试压、试漏、测试管道强度,同时用于试验前管路内气体的置换,管路吹扫等工作,以保证氢气与空气的隔绝,系统示意图如图9所示。

## 2.4 总体方案

根据功能,温度畸变发生系统可分为气源系统、燃料分配系统、燃烧器、点火系统、测控系统、仪表气系统、试验间台架设备、监控系统等组

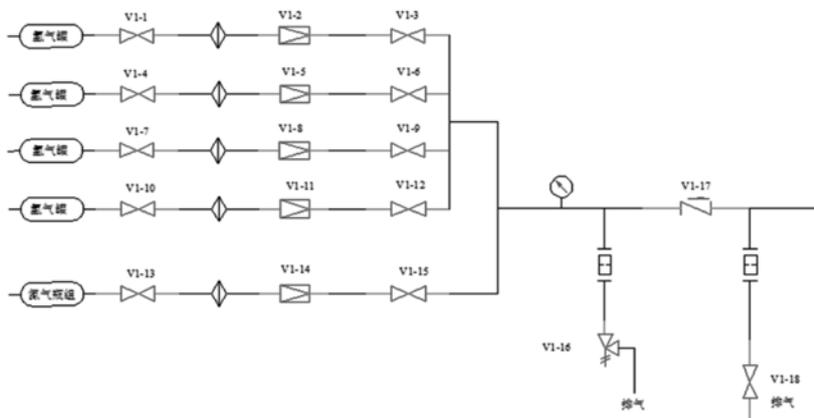


图9 气源系统示意图

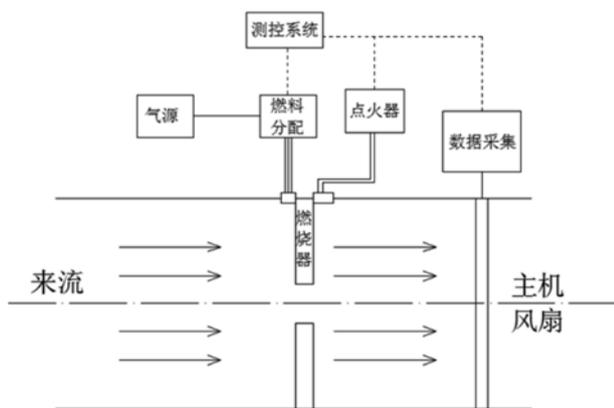


图10 温度畸变总体系统示意图

成。系统原理示意图如图10所示。

其中，气源用于提供燃料用氢气和吹扫保护的氮气，经由燃料分配系统进入喷氢孔。点火器用于提供高能电火花，在进气流道截面上生成稳定燃烧的氢气火焰，形成温度畸变区域。数据采集置于主机进口处，用于监测温度区域的平均温升，计算温升率、测量压力损失等。测控系统用于综合处理数据采集，控制气源通断、调整燃料分配以配合温度畸变参数要求和控制各系统之间的协同关系。试验器应与测控系统分隔，由监控系统观察现场状况，以确保试验人员安全。

### 3 总结

本文根据某型航空发动机温度畸变模拟参数的需求，进行了温度畸变模拟发生装置及配套系统设计。设计结果表明，该系统可以达到所需要的温

度畸变模拟区域、温升、温升率等关键参数需求。，可为使用氢作为燃料的嵌入式温度畸变发生模拟装置及相关系统设计提供设计参考。

### 参考文献

- [1] Lucy B ,Reed J .A Survey of Turbine Engine Temperature Distortion Generator Requirements and Concept Trade Study[C]// AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2013.
- [2] Beale D ,Cramer K ,King P . Development of Improved Methods for Simulating Aircraft Inlet Distortion in Turbine Engine Ground Tests (Invited)[C]// 22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. 2002.
- [3] Overall B ,Harper R .The airjet distortion generator systemA new tool for aircraft turbine engine testing[C]// 13th Propulsion Conference. 1977.
- [4] Hedges CR. Computational fluid dynamic model of steam ingestion into a transonic compressor[D]// Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2009.
- [5] 张永飞, 刘知理, 贾宗芸, et al. 航空发动机吞入火药气体地面试验研究[J]. 内燃机与配件, 2017(7):3-5.
- [6] Biesiadny T.J, Braithwaite W.M, Soeder R.H. Summary of Investigations of Engine Response to Distorted Inlet Conditions[C]// NASA-TM-87317, 1986.
- [7] DiPietro.A.L., Walter F.O. Design and experimental evaluation of a dynamic thermal distortion generator for turbomachinery research[C]// 32nd Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. 1994.

# 薄壁结构法兰螺栓连接密封特性研究

■ 刘海月 张戈[动力]

**摘要:** 薄壁结构法兰安装边处气体泄漏对整机和部件的影响较大,因此,对其法兰安装边处的密封特性展开研究显得尤为重要。本文基于Ansys Workbench软件建立薄壁结构法兰安装边螺栓连接结构有限元简化模型,通过改变安装边的类型、高度、厚度和薄壁圆筒的壁厚等参数,分别计算了结合面处的最大接触压力和最大接触间隙。研究表明,在一定条件下,标准型安装边结构的密封效果最优,而阶梯型结构在某些尺寸下的密封效果优于锥型结构。此外,法兰的高度对结构的密封特性影响较小,并且在一定范围内适当增加法兰的厚度和薄壁圆筒的壁厚能增大结合面处的接触压力,减小其最大接触间隙,进而改善了薄壁结构的密封特性。

**关键词:** 薄壁结构;密封特性;接触间隙;接触压力

## 1 引言

随着航空航天技术的快速发展,密封技术的好坏严重已经影响到了航空发动机的使用寿命和综合性能。由于机匣的内外压差以及温差都比较大,高温燃气很容易从安装边处泄漏,因此对于安装边结构的密封特性研究显得十分重要<sup>[1-2]</sup>。

航空发动机安装边为典型的螺栓法兰连接结构,国内外学者在安装边泄漏方面做了一定的研究。文献<sup>[3-5]</sup>研究表明安装边结合面处的接触压力减小能够直接导致气体泄漏,且当接触压力减小到0时,认为气体已经开始从法兰连接处泄漏。文献<sup>[6]</sup>通过对蒸汽管道法兰泄漏的原因进行分析,提出了利用弹性螺栓解决螺栓法兰连接结构的气体泄漏问题。文献<sup>[7-8]</sup>实验表明,法兰接触面的平整度、表面粗糙度以及粗糙度的分布影响安装边螺栓连接结构的密封特性。周伟朋<sup>[9]</sup>等基于接触理论研究了机匣安装边的密封特性,计算了平面和开槽安装边结构的接触间隙和接触应力的分布,得出了安装边结合面处于开槽结构时,适当增加安装边的厚度可以使安装边的刚度增加同时还能增强安装边的密封特

性。周双双<sup>[10]</sup>等基于有限元方法分析了螺栓法兰结构,采用非线性模型,研究了不同的螺栓法兰结构的法兰面上的接触压力的分布,初步分析了接触应力与法兰处气体泄漏的关系。虽然近年来在安装边结合面处的密封方面进行了一定的工作,但是研究的方法停留在经验分析和实验检测阶段,还没有通过理论或者仿真分析安装边结构参数以及预紧力等方面对密封的影响规律。

本文研究对象为薄壁机匣,简化为薄壁圆筒,利用Ansys Workbench进行仿真,建立薄壁圆筒法兰连接有限元模型,研究法兰安装边的类型、高度、厚度和圆筒壁厚等参数对整体关键结构参数对结合面的密封特性的影响规律,并分析其影响机理。

## 2 泄漏率理论

结合面间隙的两侧存着压力差,这会使得内部的流体或者气体扩散到设备的外部,即通常称为“泄漏”。对于气体而言,由于气体的体积会随着压力和温度的变化而变化,对于同样质量的气体,当压力、温度不同时,其体积不同,所以用体积表示气体泄漏率时,必须注明压力和温度,于是体积泄漏率为:

作者简介: 刘海月,女,助理工程师,2019年毕业于沈阳航空航天大学航空工程专业,现就职于中航工程集成设备有限公司。

$$q_v|_{pT} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2-1)$$

式中,  $\Delta V$ ——在时间间隔 $\Delta t$ (s)秒内漏出气体的体积,  $\text{m}^3$ 。

质量泄漏率为:

$$q_m = \rho \cdot q_v|_{pT} \quad (2-2)$$

式中,  $\rho$ ——气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

当气体压力与大气相比不太高, 或温度与大气温度相比不太低时, 可以看成是理想气体, 遵循理想气体状态方程式, 即:

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (2-3)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{M}{RT} \cdot p \quad (2-4)$$

则气体的质量为:

$$m = pV \left( \frac{M}{RT} \right) \quad (2-5)$$

式中,  $R$ ——摩尔气体常数,  $R = 8.314 P_a \cdot \text{m}^3 / \text{mol} \cdot \text{K}$ ;

$M$ ——气体摩尔质量, 在数值上等于该气体的相对分子量,  $\text{g}/\text{mol}$ ;

$p$ ——气体压力,  $\text{Pa}$ ;

$V$ ——气体体积,  $\text{m}^3$ ;

$T$ ——气体温度,  $\text{K}$ ;

$\rho$ ——气体密度,  $\text{g}/\text{m}^3$ 。

由此可见, 当温度一定时, 对应气体质量就有确定的 $pV$ 值, 因此 $pV$ 又称气体量。由于气体量还与温度有关, 表示 $pV$ 值时, 同样必须注明温度。因此, 理想气体的泄漏率可以表示为:

$$q_{pV}|_T = \frac{\Delta(pV)}{\Delta t} \quad (2-6)$$

### 3 有限元仿真计算

#### 3.1 建立法兰安装边有限元简化模型

简化的薄壁机匣为薄壁圆筒结构, 由螺栓将相邻两个机匣连接。本文建立1/12的机匣模型, 设置循环对称, 这样才能实现对整体结构的数值仿真。机匣的简化结构如图1所示, 其尺寸如表1所

示, 有限元模型如图2所示。

表1 模型的几何尺寸

圆筒外径	255mm	圆筒内径	249mm
法兰高度	27mm	圆筒长度	608mm
法兰厚度	4mm	螺栓数量	12个

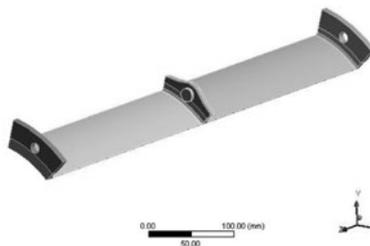


图1 薄壁结构法兰安装边模型图

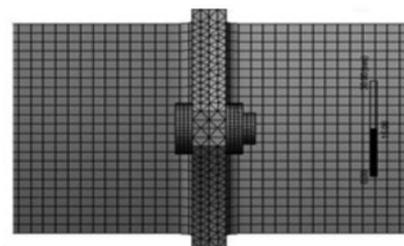


图2 网格划分示意图

材料采用GH4169镍基高温合金材料, 螺栓采用45#钢, 材料属性如表2所示。安装边之间设置为摩擦接触, 摩擦系数为0.15, 这是常用的钢连接摩擦系数。螺栓与安装边之间设置为绑定接触。采用六面体网格划分方式, 网格节点为72994, 单元数15268。网格划分示意图如图2所示。

表2 材料属性

	GH4169	45#钢
弹性模量E(GPa)	1.99E3	200
泊松比 $\nu$	0.3	0.3
密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	8240	7850

#### 3.2 法兰安装边接触面的间隙与压力计算

圆筒内部设置压力为0.5MPa, 螺栓预紧力为10000N, 在薄壁圆筒的一侧端面设置为固定支撑, 而另一侧施加3769N拉力。计算法兰安装边接触面的密封特性, 其中图3和图4为接触间隙和接触压力的分布。本文研究了标准型、阶梯型、止口

型、锥型和环槽型5种法兰安装边类型的结构参数对最大接触间隙和最大接触压力的影响规律。



图3 安装边接触间隙分布



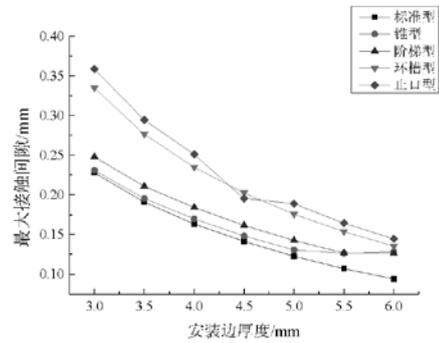
图4 安装边接触压力分布

从图3、图4可以看出，由于螺栓预紧力的作用，使得螺栓孔附近间隙很小，气体泄漏量减小。远离螺栓孔附近接触压力几乎为0，也就是有气体泄漏出现，密封的性能就会逐渐降低，且在靠近机匣的安装边底部的密封效果最差。合理增加法兰边的高度能够增加其密封的效果。法兰安装边的厚度和高度以及机匣壁厚对最大接触间隙和最大接触压力的影响如图5所示。

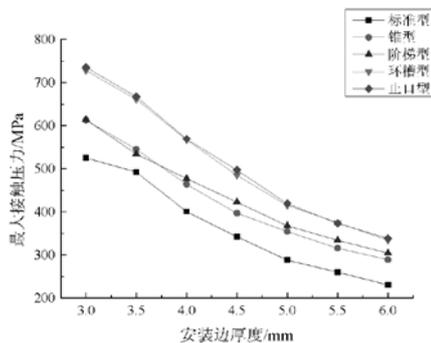
由图5可以得出，无论何种法兰安装边类型，最大接触间隙和最大接触压力随其结构参数的变化都有较明显变化。尤其随着法兰厚度和薄壁圆筒厚度的增加，接触间隙和接触压力都呈现下降的趋势，并且在某种尺寸下，标准型的密封效果优于其他类型，最大接触应力较小，减少应力集中现象明显，而止口型的密封效果较差。安装边厚度小于5mm时，标准型和锥型结构的最大接触间隙较为相近，而在厚度大于5mm时，锥型的最大接触间隙增大，此时增加法兰厚度却不利于结合面的密封。

## 4 结论

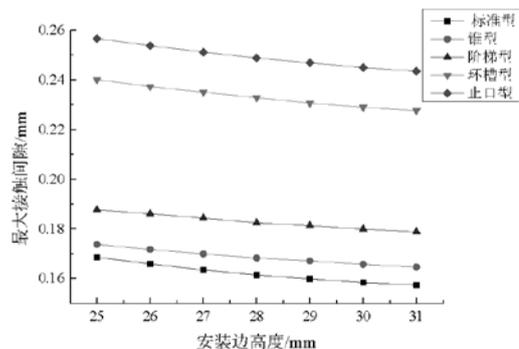
本文通过建立某型机匣安装边螺栓连接结构有限元简化模型，设置周向循环对称，计算了不同



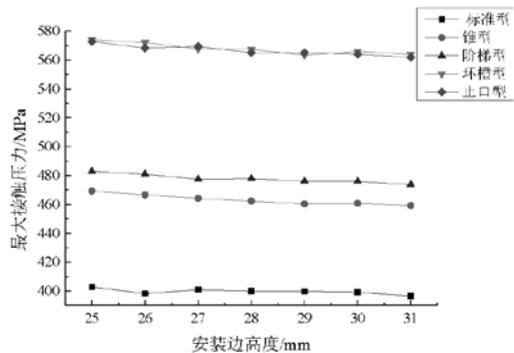
(a) 最大接触间隙随安装边厚度的变化趋势



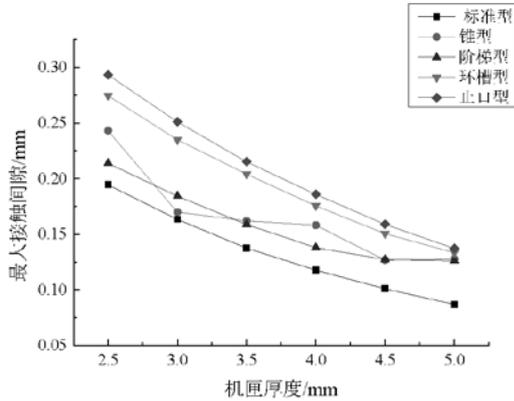
(b) 最大接触压力随安装边厚度的变化趋势



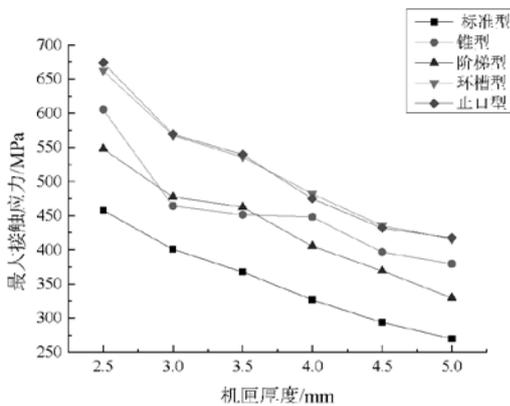
(c) 最大接触间隙随安装边高度的变化趋势



(d) 最大接触压力随安装边高度的变化趋势



(e) 最大接触间隙随机匣厚度的变化趋势



(f) 最大接触压力随机匣厚度的变化趋势

图5 最大接触间隙和最大接触压力随法兰安装边结构参数的变化趋势

法兰安装边结构参数下结合面的最大接触间隙和最大接触应力, 所得的结论如下:

(1) 机匣安装边的螺栓孔附近由于预紧力的作用, 最大接触间隙较小而且接触压力较大, 密封效果较好, 而远离螺栓孔附近的密封效果较差, 可见适当改变安装边的类型和结构参数能够改善结构的密封特性。

(2) 标准型的最大接触间隙相对于较小, 且随着安装边的高度和厚度的增加, 最大接触间隙和最大接触压力都呈现减小的趋势, 而在安装边的厚度大于5mm时, 锥型出现了间隙增加的现象, 密封效果较差。综合看来, 标准型的安装边结构在其参数变化时, 密封效果的改善不大。

(3) 在一定范围内, 增加安装边的高度和厚度以及机匣的厚度, 能够减小结合面的最大接触间隙, 从而改善密封的效果, 但安装边的高度对

密封特性的影响较小, 并且标准型的密封特性优于其他类型, 在某些参数下, 阶梯型的密封效果优于锥型。

### 参考文献

- [1] 施中堂. 发动机密封技术与密封材料研究[J]. 内燃机, 2004, 6(3): 42-47.
- [2] 胡广阳. 航空发动机密封技术应用研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(3): 1-4.
- [3] Abid, M. Determination of Gasketed and Non-gasketed Flanged Pipe Joint's Capacity Subjected to Combined Loading: an Experimental Approach [J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2005, 2(1-2): 35-47.
- [4] Abid M. Determination of Safe Operating Conditions for Gasketed Flange Joint under Combined Internal Pressure and Temperature: A Finite Element Approach [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, 83(6): 433-441.
- [5] Kawamura H, Sawa T, Yoneno M. FEM Stress Analysis and Sealing Performance Improvement of Boxshape Bolted Flanged Joints Using Silicone Sealant under Internal Pressure and Thermal Conduction Conditions [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003, 17(8): 1109-1125.
- [6] 费继增. 蒸汽管道法兰泄漏原因分析及对策[J]. 化工设备与管道, 2010, 47(1): 46-48.
- [7] Nash D, Abid M. Surface Sensitivity Study of Non-gasketed Flange Joint. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineer, Part E [J]. Journal process Mechanical Engineering, 2004, 218(4): 205-212.
- [8] Arghavani J, Derenne M, Marchand L. Effect of Surface Characteristics on Compressive Stress and Leakage Rate in Gasketed Flanged Joints [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(10-11): 13-732.
- [9] 周伟朋, 刘仕运. 基于接触分析方法的机匣安装边密封性研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2014, 31(4): 65-69.
- [10] 周双双, 王志德. 基于ANSYS薄型排渣闸阀泄漏问题分析[J]. 机械工程与自动化, 2013(4): 30-33.

# 《航空工程建设》2020年第1~6期文章索引

## 2020年第1期 总第147期 目录

- |                              |             |     |         |
|------------------------------|-------------|-----|---------|
| 02 航空复合材料生产线通用仿真模块库关键技术研究    | 李 慧         | 张 超 | 崔 晶     |
| 07 航空发动机材料和工艺的安全性评估探讨        |             | 李 翔 | 姜煜霞     |
| 10 航空发动机风扇气动声学消声室设计          | 王云龙         | 李雪罡 | 裴一哲     |
| 15 机场登机桥固定端规划设计研究            |             | 梅宝兴 | 孙 博     |
| 18 RC框架——核心筒结构弹塑性分析模型与典型算例分析 |             |     |         |
|                              | 胡 妤         | 赵作周 | 钱稼茹 韩文龙 |
| 28 泥水平衡顶管法在污水管线施工中的应用研究      | 王 冲         | 陆新生 | 丁 飞 陈 昱 |
| 32 基于案例的工程量清单编制分析与建议         |             |     | 林俊延 宋聪旭 |
| 38 EPC总承包模式下的成本优化研究          |             | 马 兰 | 郑宇浩 房 健 |
| 43 拱顶油罐抗震设计要点分析              |             |     | 张大同 郝 骞 |
| 46 工业炉常见的节能措施                | 李守猛 李 勇 徐昭然 | 黄 环 | 李国华 张德成 |
| 49 建筑企业安全生产信息化管理建设方案         |             |     | 纪松年     |
| 51 建筑施工工地用电安全探讨              |             |     | 郑 奔     |
| 54 航空安全保障信息对大学生旅客航班选择的影响研究   |             |     | 高云蕊 张 姿 |
| 59 通航短途运输业务发展对通用航空产业规划的思考    |             |     | 杨 沫 常秀娟 |

## 2020年第2期 总第148期 目录

- |                                |                         |     |         |
|--------------------------------|-------------------------|-----|---------|
| 02 航空工业某厂表面处理车间智能化建设           |                         | 李 昭 | 庄宏波     |
| 09 喷丸对航空用低合金钢渗铬处理的影响研究         |                         | 李 翔 | 姜煜霞 李雪罡 |
| 14 焊接仿真技术的应用                   |                         | 李雪罡 | 田 恺     |
| 17 内蒙古美术馆大承载力空间相贯铸钢节点试验研究及数值分析 |                         |     |         |
|                                | 郭亚楠 樊钦鑫 付锦龙 谢 军 王 伟 郭小农 |     |         |

26	兰州奥体中心体育场超长混凝土结构温度应力分析	黄超	景辉
29	贵州某综合保障楼地基基础设计	郭骛	杨会杰
33	“四型机场”理念在航空配餐楼中的应用	宋晓东	刘烁 张竞竞
38	通用机场规划设计要点分析与思考		王锋刚
41	江西某50年历史工业厂区给水及消防管网优化改造	赵洁	王锋 刘芳
45	一种基于LabVIEW与PLC的风洞测控系统设计与流场校测	李洋	刘睿 赵云洋
50	表面处理车间火灾自动报警系统设计思考	邓志远	刘静 陆瑶
54	Infoworks ICM在机场雨水排放系统设计中的应用	杨擎柱	贾文 施曼
61	某疫苗车间项目净化空调设计	宋猜	董秀芳

### 2020年第3期 总第149期 目录

02	基于BIM技术的工艺专业三维协同设计平台分析研究	马文茂	张超
06	垃圾焚烧工程给排水设计特点及安装质量控制要点	杨森	陆新生
09	飞机维修机库消防泡沫炮系统设置方案优化		赵洁
12	基于计价软件的项目全过程造价管理数据分析及应用	邵飞	王玉平 钱海静 张珍兰
21	结构试验中的传感器和数据采集技术	张祥义	张曼生 宋毛毛
29	医药工业洁净厂房的照明设计	丁敏	张永林
32	低压配电安全设计探讨	高涵	牛犇
36	可燃、有毒气体探测报警系统在垃圾焚烧发电项目中的应用探讨	杨峰	王世忠
40	垃圾焚烧发电厂管道支吊架设计及现场常见问题	张亢	林晶晶
44	大型国际机场飞行区滑行方案仿真分析		王锋刚
47	多管式烟囱矩形钢筋混凝土外筒设计分析	薛瑜照	汤小军
50	基于案例的锂电池生产厂房造价指标分析	胡亦明	宋聪旭
57	拉萨贡嘎机场某配餐楼暖通空调通风系统设计	马超龙	张海桥
62	某大空间建筑空调系统运行问题与分析		张晓莉

## 2020年第4期 总第150期 目录

02 数控机床智能监控与状态识别方法探究				宋永杰
06 涡扇发动机典型结构强度试验布局研究				杨 阔
09 泉州市博物馆防震研究与实践	覃 杰	马伯涛		宋毛毛
15 地下连续墙施工过程中的质量和安全管控要点		陈 凯		王应严
20 垃圾焚烧项目概算编制的工作体会 ——以土建专业为例			韩 颖	韩爱华
23 某低压补偿柜导线绝缘烧蚀故障的分析				牛 犇
26 谈GB/T 13870.2《电流对人和家畜的效应 第2部分：特殊情况》的修订		牛 犇	丁 杰	陈 彤
29 开洞地下室顶板水平传力性能分析	韦 恒	熊海贝		赵伯友
35 地下室对上部结构的约束作用研究	韦 恒	熊海贝		赵伯友
43 北京某垃圾卫生填埋场渗滤液处理站提标改造工程		李 珂		陆新生
47 民用运输机场飞机灭火剂经济用量分析	李大帅	陈洁如		王 锋
51 航煤储罐双盘浮顶强度及稳定性计算		周 恒		朱 超
54 水痘减毒活疫苗原液生产车间工艺设计分析		张瑞超		张晓彤
57 PCR实验室工艺设计研究	张 萌	王云飞		张 凯
60 西藏话剧团项目太阳能供暖和空调设计	康亚盟	孟凡兵	朱晓山	刘 鑫

## 2020年第5期 总第151期 目录

02 一种电传系统用光纤陀螺仪自检测方式				周 强
06 省级应急救援航空体系建设规划编制探讨		郭 琪	常秀娟	王天璞
12 某172m超大跨度煤棚结构设计分析	王明珠	刘鑫刚	赵亚硕	刘邦宁
18 建设工程竣工结算问题与建议				张珍兰
21 关于低影响开发技术的几点思考				杜慧英
20 机场消防救援应答时间的影响因素分析	李大帅	陈洁如		王 锋
30 某疫苗车间给水排水及消防系统改造设计探讨	吴文熙	王 艳		郑长华

35	适用于数据中心的多台并列直配柴油发电机中性点接地及保护配置	赵亮亮	高凤荣
40	燃油试验厂房电气设计要点		蓝 娟
43	大型航空食品与地面服务厂区规划研究 ——以大兴新机场东航航空食品与地面服务厂区为例	张竞竞	王 浩 赵 硕
46	基于旅客心理的航站楼餐饮设施规划要点		张竞竞
49	数据中心间接蒸发制冷技术及大温差高温冷水技术	赵 磊	范 强
54	覆土立式油罐的设计要点	周 恒	郝 骞
58	噪声高隔声量墙体设计中应注意的问题分析		张卫才

## 2020年第6期 总第152期 目录

02	干式自动喷漆生产线的设计应用	虞思琦	余 璐
06	地铁规划建设过程若干文物防振保护技术研究	马伯涛 葛家琪	张曼生 田学帅
13	成都淮州新城国际会展中心复杂钢结构设计	樊钦鑫 谢 军	贾雨萌 刘宇轩
22	援毛里塔尼亚生物安全实验室及配套工程给排水设计要点分析	陈 达	李力军
27	仓库型特殊应用喷头在自喷系统设计中的应用体会		张舰艇
30	某综合医院暖通空调系统设计	安玉双 孟凡兵	常文权 刘 鑫
35	广东某垃圾发电厂职业病危害现状分析	张明婷	肖 政
41	后工业时代基于人文关怀的工业建筑设计策略探讨		吴方晓
47	两通高阻恒温阀在散热器供暖系统中的应用分析	申 剑	张欣然
53	一种航空发动机进气温度畸变发生模拟系统设计研究	徐 月	王 娜
57	薄壁结构法兰螺栓连接密封特性研究	刘海月	张 戈
61	总目录		

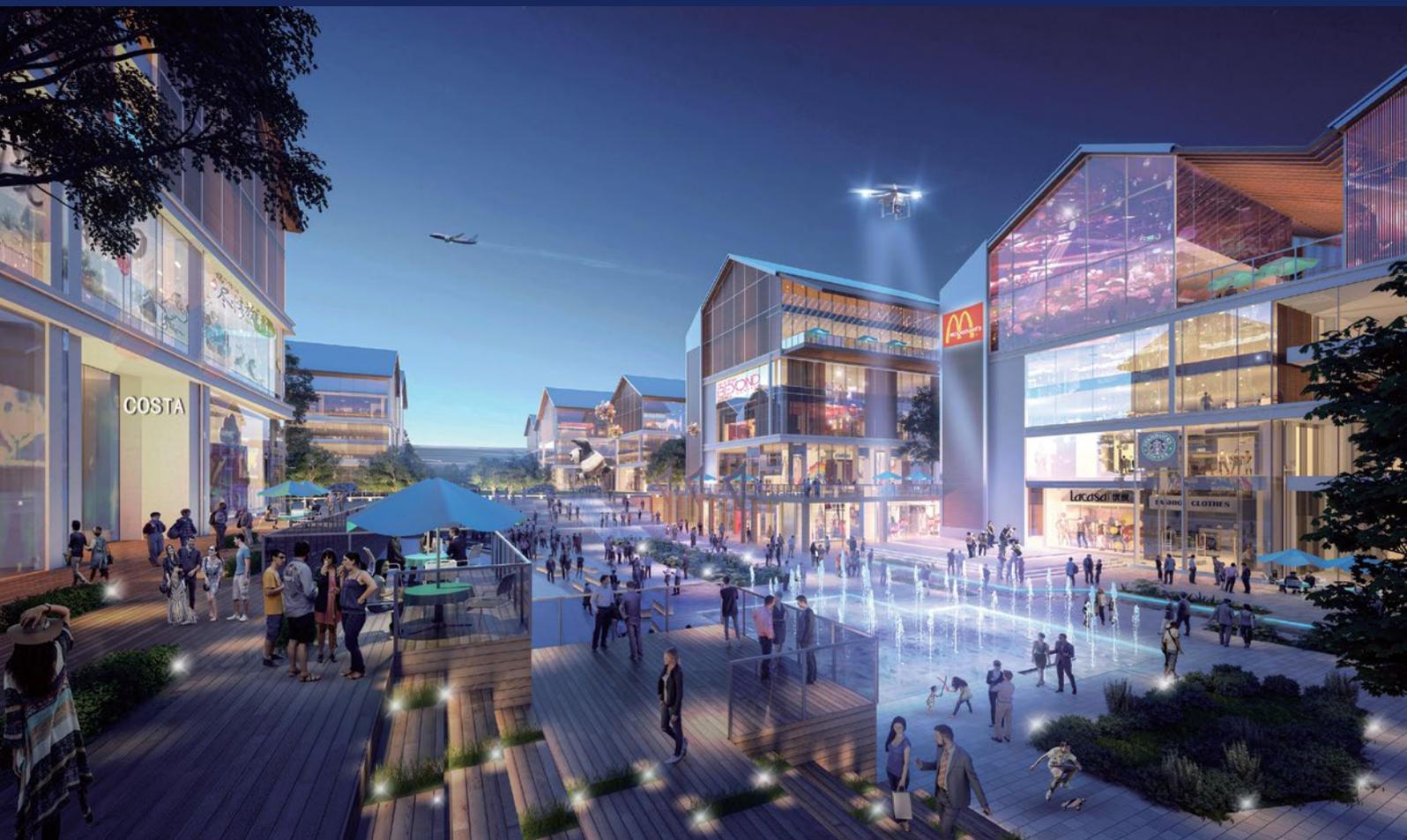
## 综合规划研究院

综合规划研究院（下文简称“综规院”）多年来，专注于高端规划咨询业务，多团队合作、多专业并行的“整合规划”工作模式，“战略导向、产业主线、交通先导、规划引领、空间探索、景观协调、专业配合”的整合规划路线，通过多维规划方案全面实现规划的前瞻性、系统性、科学性和可操作性。业务范围涵盖以产业园区、新城为主的区域发展规划、产业发展战略、政府决策支持研究等前端研究。

近年来，综规院以大航空领域咨询业务能力为引领，积极探索“规划+”模式，在临空、通航、航空航天专业化园区方面，完成国内若干具有影响力的重大项目，包括《武汉城市圈航空港经济综合实验区总体发展规划》、《海南文昌国际航天城起步区控制性详细规划及城市设计》、《中国空间技术研究院怀柔航天产业园区系列规划》、《山东省航空应急救援建设总体规划》、《安徽芜湖航空特色小镇概念规划及创建方案》、《顺丰白潭湖培训中心项目策划咨询》等。

近“十四五”期间，综规院将以“打造航空领域国内领先、国际一流的咨询规划机构”为发展愿景，紧密围绕综规院多年的优势积累，以“航空咨询”为业务核心，充分发挥咨询规划在公司业务链中的牵引和智力支持作用，继续强化顶层战略规划业务，积极争取国家级、区域性行业规划，提升行业影响力和话语权，以顶层规划引领各项咨询规划业务开展。





南通新机场临空经济区及家纺商贸城系列规划