

# 航空工程建设

AERO-INDUSTRY ENGINEERING CONSTRUCTION

2022年第1期 总第159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9921-L0337号

## 中航集成设备有限公司新建生产实验楼

**项目名称：**中航集成设备有限公司新建生产实验楼

**建设单位：**中航工程集成设备有限公司

**设计单位：**航空工业规划总院动力工程设计研究院

本项目为中航工程集成设备有限公司新建生产实验楼建设项目，位于北京市昌平区，总建筑面积2.1万 $m^2$ ，其中地上建筑面积约1.6万 $m^2$ ，地下建筑面积5257 $m^2$ ，主要结构形式为钢结构。园区规划顺应地形，保留3层研发楼。新楼结合地形和保留建筑，采用折线将新老建筑联系，并最大化利用场地空间。

建筑主入口位于建筑物南侧偏东，形成一个入口广场。西侧入口为二层高门洞。建筑形成一个完整西立面，面对城市道路的界面。新建筑通过连廊与保留建筑相连。在功能空间设计上，项目注重与现有研发楼的联系与结合，综合统筹功能，提高了空间舒适度。

造型设计采用干净利落的立面处理手法，模数化的垂直跳窗贯穿形体，虚实对比强化整体造型穿插扭动感，立面与造型意图相统一。灰、白色简洁的石材表达出内敛、典雅的建筑表情。整体设计符合园区气质与环境。整体造型美观大方，简洁现代，彰显出高端航空企业文化。



## 《法律、行政法规、国务院决定设定的行政许可事项清单（2022年版）》公布，涉及住建领域41项

国务院办公厅日前印发《关于全面实行行政许可事项清单管理的通知》，并公布《法律、行政法规、国务院决定设定的行政许可事项清单（2022年版）》。

2022年版清单有41项涉及住房城乡建设领域，如建筑业企业资质认定，设定和实施依据是《中华人民共和国建筑法》《建设工程质量管理条例》《建筑业企业资质管理规定》（住房城乡建设部令第22号公布，住房城乡建设部第45号令修正）。又如建筑工程施工许可，其设定和实施依据是《中华人民共和国建筑法》《建筑工程施工许可管理办法》（住房城乡建设部令第18号公布，住房城乡建设部第52号令修正）。此外还有建筑施工企业主要负责人、项目负责人和专职安全生产管理人员安全生产考核等的设定和实施依据。

《通知》要求，要依法编制行政许可事项清单。公布《法律、行政法规、国务院决定设定的行政许可事项清单（2022年版）》，同时要求2022年底前编制公布省、市、县级行政许可事项清单，将依法设定的行政许可事项全部纳入清单管理。各级行政许可事项清单基本要素应相对统一，各地区行政许可事项清单中上级设定、本地区实施的事项及其基本要素，不得超出上级清单的范围，确保事项同源、统一规范。新设或者调整行政许可应当充分论证、严格审查，并及时动态调整行政许可事项清单，市场准入负面清单等有关清单要与行政许可事项清单保持一致并做好衔接。

《通知》提出，要严格依照清单实施行政许可。对清单内的行政许可事项要逐项制定实施规范，确定子项、办理项，明确许可条件、申请材料、中介服务、审批程序、审批时限、收费等内容，并向社会公布。行政许可实施机关要严格依照清单实施行政许可，不得增加附加条件或限制。清单之外一律不得违法实施行政许可，严肃清查整治各种名义设立的变相许可。在实施行政许可中，推行告知承诺、集成服务、一网通办、跨省通办等便利措施。

《通知》强调，要加强事前事中事后全链条全领域监管。要对清单内事项逐项明确监管主体，对多部门共同承担监管职责的事项，行业主管部门应当会同相关部门实施综合监管。对清单内事项制定并公布全国统一、

简明易行、科学合理的监管规则 and 标准。要依托清单明确监管重点，对直接涉及公共安全、公众健康，以及潜在风险大、社会风险高的重点领域，依法依规重点监管。

（信息来源：《建筑时报》）

## 发改委：水泥、建筑等行业节能降碳改造升级实施指南（2022年版）发布

2月11日，发改委等四部门发布《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022年版）》，并就有关事项通知如下：

### 一、引导改造升级

对于能效在标杆水平特别是基准水平以下的企业，积极推广本实施指南、绿色技术推广目录、工业节能技术推荐目录、“能效之星”装备产品目录等提出的先进技术装备，加强能量系统优化、余热余压利用、污染物减排、固体废物综合利用和公辅设施改造，提高生产工艺和技术装备绿色化水平，提升资源能源利用效率，促进形成强大国内市场。

### 二、加强技术攻关

充分利用高等院校、科研院所、行业协会等单位创新资源，推动节能减污降碳协同增效的绿色共性关键技术、前沿引领技术和相关设施装备攻关。推动能效已经达到或接近标杆水平的骨干企业，采用先进前沿技术装备谋划建设示范项目，引领行业高质量发展。

### 三、促进集聚发展

引导骨干企业发挥资金、人才、技术等优势，通过上优汰劣、产能置换等方式自愿自主开展本领域兼并重组，集中规划建设规模化、一体化的生产基地，提升工艺装备水平和能源利用效率，构建结构合理、竞争有效、规范有序的发展格局，不得以兼并重组为名盲目扩张产能和低水平重复建设。

### 四、加快淘汰落后

严格执行节能、环保、质量、安全技术等相关法律法规和《产业结构调整指导目录》等政策，依法依规淘汰不符合绿色低碳转型发展要求的落后工艺技术和生产装置。对能效在基准水平以下，且难以在规定时限通过改造升级达到基准水平以上的产能，通过市场化方式、法治化手段推动其加快退出。

（信息来源：《建筑时报》）

## 成发短舱、反推专业化制造基地建设 项目

建设地点：四川省成都市

设计单位：航空工业规划总院动力工程设计研究院

建设情况：在建

本项目位于成都市东北侧新都区石板滩街道，地处新都区航空产业园内，同时距离沪蓉高速7km、距离成渝铁路2km，便利的交通为成发发展提供了良好而必要的发展条件。项目主导产业是新都导向的航空动力产业，主要生

产的产品是航空发动机和飞机配套的反推力装置和短舱。

方案以工艺优先为导向，遵循高效、经济、合理的设计导则，依次布置热表厂房、胶接厂房、钣金机加厂房、喷漆厂房，各厂房设单独附楼，便于使用及管理。以物流相对最短、工艺顺流程度最高为原则，按照工艺流程线规划各功能分区。主要附楼外装饰材料选用铝板幕墙与玻璃幕墙相结合，用相反方向的折窗模拟发动机反推气流的喷射过程，局部设置室外庭院打破超长尺度给人的压迫感。厂房部分采用平钢板，加强与附楼的整体性。





## 无锡航亚综合加工厂房项目

建设地点：江苏省无锡市

设计单位：航空工业规划总院动力工程设计研究院

建设情况：设计中

该项目位于江苏省无锡市新吴区，总建筑面积约为2.5万 $m^2$ ，建筑占地面积约为2万 $m^2$ 。

本项目主要承担航空发动机叶片精锻及机械加工等生产任务。建筑由厂房、西附楼东附楼及餐厅4个部分组成。其中，

厂房按使用功能分为精锻区、废水处理区、精锻机加区、精密机加区及特种工艺区。附楼主要使用功能为厂房辅助用房。

方案充分考虑与现有一期的关系，通过附楼部分的弧形屋檐与柱廊形成大面积的灰空间，作为二期入口广场空间的延伸，形成不同的光影变化。附楼采用白色石材幕墙与玻璃幕墙结合，现代简约，具有科技感，符合航亚科技的使命定位。厂房部分采用平钢板与波纹板的结合，与一期项目融合。

## 中国运载火箭技术研究院某总装测试厂房项目

建设地点：天津市

设计单位：航空工业规划总院动力工程设计研究院

建设情况：建设中

本项目建设场址位于天津经济技术开发区西区天津产业园火箭制造区内。本工程为现有某总装测试厂房向北侧扩建，扩建部分占地面积约3.8万m<sup>2</sup>，建筑面积约5.3万m<sup>2</sup>，由主厂房、西

侧设备辅助间、北侧附楼及东侧附楼组成。整个厂房平面布置呈L形，东西向长347.61m，南北向宽181.5m。主厂房与原有某总装测试厂房北侧相接。厂房主要共分为6个区域，分别为3个装配大厅、2个周转大厅及1个测试大厅，中间周转大厅与原有周转大厅相连通。附楼主要使用功能为装配区及厂房辅助用房。方案充分考虑与现有厂房的关系，立面延续现有厂房的风格，采用蓝、白色夹芯板局部玻璃幕墙的形式，与现有厂房形成一个整体，不破坏现有厂房的秩序感。





## 中科翼能试验测试中心和制造基地项目

建设地点：四川省成都市

设计单位：航空工业规划总院动力工程设计研究院

建设情况：设计中

本项目主导产业是简州新城产业导向的高端装备和新能源领域，主要产品为30MW—50MW级燃气轮机。园区规划以工艺流程的便捷高效为出发点，办公、货运交通流线各成体系，

人车分流，互不干扰。主楼通过不同方向的石材营造循环理念，局部的室外庭院，打造绿色的生产空间，符合企业科技、环保的宗旨。沿主路的厂房立面采用“去工业化”的处理手法，建筑在体量上的进退可以柔和企业园区与城市的分界，提升区域空间品质。材质以深浅灰白色石材、灰白色铝板、玻璃幕墙和浅灰色波纹板等外立面材料为主，为简州新城打造现代、大气的工业园区。

## 标准名称: 建筑环境通用规范

标准编号: GB 55016-2021  
发布日期: 2021-09-08  
实施日期: 2022-04-01  
公告号: 中华人民共和国住房和城乡建设部公告2021年第172号  
发布部门: 住房和城乡建设部

## 标准名称: 规划环境影响评价技术导则产业园区

标准编号: HJ 131-2021  
发布日期: 2021-09-08  
实施日期: 2021-12-01  
发布部门: 中华人民共和国生态环境部

## 标准名称: 四川省筒仓式地下停车库工程技术标准

标准编号: DBJ51/T173-2021  
发布日期: 2021-09-01  
实施日期: 2022-01-01  
公告号: 川建标发〔2021〕248号  
发布部门: 四川省住房和城乡建设厅

## 标准名称: GB/T13350-2017绝热用玻璃棉及其制品《第1号修改单》

标准编号: GB/T 13350-2017  
发布日期: 2021-08-20  
实施日期: 2021-08-20  
发布部门: 国家标准化管理委员会,国家市场监督管理总局

## 标准名称: 彩色涂层不锈钢电缆桥架工程技术规程

标准编号: T/CECS 909-2021  
发布日期: 2021-08-31  
实施日期: 2022-01-01  
公告号: 第926号  
发布部门: 中国工程建设标准化协会

## 标准名称: 多联机空调系统改造技术规程

标准编号: T/CECS 910-2021  
发布日期: 2021-08-31  
实施日期: 2022-01-01  
公告号: 第927号  
发布部门: 中国工程建设标准化协会

## 标准名称: 轻质隔墙板技术规程

标准编号: T/CECS 907-2021  
发布日期: 2021-08-31  
实施日期: 2022-01-01  
公告号: 第924号  
发布部门: 中国工程建设标准化协会

## 标准名称: 装配式钢结构建筑工程总承包管理标准

标准编号: T/CECS 912-2021  
发布日期: 2021-08-31  
实施日期: 2022-01-01  
公告号: 第929号  
发布部门: 中国工程建设标准化协会

## 标准名称: 建筑保温砂浆

标准编号: GB/T 20473-2021  
发布日期: 2021-08-20  
实施日期: 2022-03-01  
公告号: 中华人民共和国国家标准公告2021年第11号  
发布部门: 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会

## 标准名称: 健康建筑评价标准

标准编号: T/ASC 02-2021  
发布日期: 2021-09-01  
实施日期: 2021-11-01  
发布部门: 中国建筑学会

(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 2022年2月  
印数 1500册  
电话 (010)62038235  
传真 (010)62038297  
封面 中航集成设备有限公司新建生产实验楼

# CONTENTS

## 目录 2022年第1期 总第159期

### 航空能力建设

- 02 航空发动机脉动总装生产线建模仿真系统  
李慧 宋迎军 魏小红 黄健
- 06 我国民航机务定检维修需求分析  
杨益嘉 梅宝兴 闫慧 郑应平
- 09 国内航线维修布局方法探讨  
杨益嘉 闫慧 崔恻 郑妍
- 14 航天发射场数据中台系统研究  
卢晓涛 贾佳 黄娅 张立乾 冯中华
- 18 某直升机中央件疲劳试验台配套土建设计研究  
郭达维 徐学民 孟芸

### 研究与探讨

- 22 上海某钢筋混凝土单层厂房火灾后鉴定及修复  
潘抒冰 张广英 金来建
- 26 大型综合气候环境实验室的结构设计研究  
裴永忠 王亮 覃杰 张虎 张广英 金来建
- 39 基于污水管线堵塞的过流能力仿真分析  
杨宗玥 施曼
- 43 大型全封闭煤库消防设施设计探讨  
曹雅萌 陆新生
- 46 全光无源网络在安防系统中的应用  
梁静

### 工程设计

- 51 某车间带铍粉尘除尘方案设计  
熊进华
- 55 基于美国标准的某航站楼暖通设计  
李建民 孟凡兵 马超龙
- 61 三亚凤凰机场航站楼冷源及空调系统优化分析  
高阳洋 孟凡兵

# 航空发动机脉动总装生产线 建模仿真系统

■ 李慧 宋迎军 魏小红 黄健 [工艺]

**摘要:** 总装是航空发动机制造过程中最为重要的环节之一。本文针对航空发动机脉动总装生产线,根据其工艺布局和生产工艺特点,研发了航空发动机脉动总装生产线仿真系统,可快速便捷搭建起类似脉动装配生产线仿真模型,以供设计人员进行平衡方案评估、瓶颈研究和排产计划验证等,最后结合某工程给出了实际应用的案例。

**关键词:** 航空发动机;脉动总装生产线;Plant Simulation

## 1 引言

脉动式装配生产线是按节拍移动的一种装配线,运用精益制造思想,对装配过程进行流程再设计、优化和平衡,实现按设定节拍的站式装配作业,达到缩短装配周期、满足客户要求的装配生产形式,是介于固定站式装配与连续移动装配之间的一种装配生产形式<sup>[1]</sup>,其典型特征是产品移动时不进行装配作业,装配作业时产品不移动。总装是航空发动机制造过程中最为重要的环节之一,其装配技术水平和装配质量显著影响航空发动机的工况特性,直接决定发动机的可靠性、寿命及主要性能参数<sup>[2]</sup>。目前,我国航空发动机仍主要采用固定站式装配模式,基于刚性型架进行手工垂直装配<sup>[3]</sup>工人劳动强度大,人员、工装堆积,装配效率较低,脉动装配生产线的采用

能够有效地解决这些问题。

航空发动机脉动总装生产线规划建设过程复杂、投资大,运行过程中具有计划管理约束条件复杂、现场条件多变等特点,因此有必要针对脉动总装线的总体布局设计方案进行定量分析和优化,同时对排产调度方案进行仿真验证,以减少系统运行过程中的冲突次数,保障总装线的正常脉动。魏方剑<sup>[4]</sup>针对飞机脉动生产线,提出了多层级建模理论,并在DELMIA V6平台上构建了飞机脉动生产线的仿真模型,对系统运行状态、产能、资源利用率等进行了分析研究。连宇臣等<sup>[5]</sup>提出了航空发动机脉动式装配生产线建设规划阶段的工艺仿真方案,其中通过Plant Simulation仿真得出了年产量和各工位的资源统计信息。柴猛<sup>[6]</sup>研究了飞机总装脉动线建模仿真和优化方法,并基于Delmia V6平台进行了仿真优化,仿真结果包括系统利用率、系统性能状态以及产量等。

本文针对航空发动机脉动装配生产线特点

作者简介:李慧,女,工程师,2012年毕业于北京航空航天大学航空宇航制造工程专业,现就职于航空工业规划总院智能技术中心。

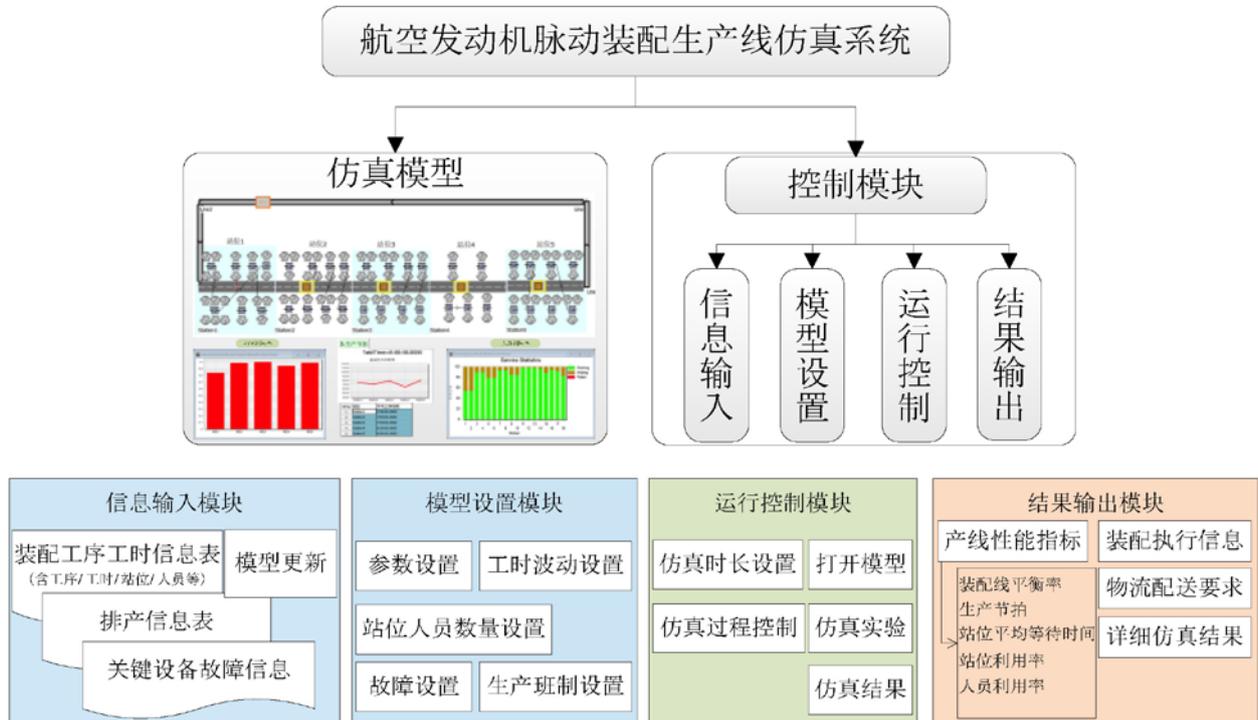


图1 航空发动机脉动装配生产线仿真系统模块组成

和仿真需求，结合实际工程案例，基于Plant simulation平台建立了航空发动机脉动总装生产线仿真系统，可针对类似脉动装配生产线快速构建仿真模型，实现对总装线设计方案的量化分析和优化，同时，实现对脉动总装生产线排产调度方案的仿真验证，最后通过实例应用验证了仿真系统的有效性。

## 2 脉动总装线仿真系统模块组成

航空发动机脉动总装生产线仿真系统结构如图1所示，以脉动总装生产线仿真模型为基础，结合实际生产输入数据，通过运行仿真模型，就可以得到生产线性能指标以及物料配送要求等信息。

### 2.1 仿真模型

航空发动机脉动总装生产线仿真模型采用模块化建模方法，将各站位作为一个单独的模块，某站位模型如图2所示。站位模型中包含机匣吊运脉动系统（以传送带元素表示）、装配工序和相关装配资源（如操作人员）等。参照实际装配中操作人员围绕机匣的装配工序，利用仿真工具中提供的元素模型表示相应工序，这些元素模型间的紧前紧后关系对应实际装配线中的工艺要求，

其属性字段主要有工序名称、时间、优先关系、所需物料/工装等的种类和数量、所需人员情况等。实际使用中，各站位模型可根据信息输入模块中配置的信息进行自动更新。

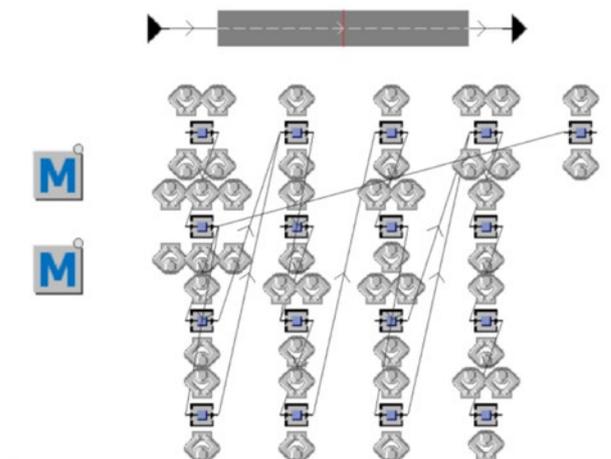


图2 站位X仿真模型

鉴于排产计划仿真验证需要仿真模型在满足工艺要求的情况下按照排产结果运行，即某工序开始执行前需满足排产顺序要求、紧前工序均完成、所需资源均可使用等条件，仿真模型中具体

逻辑流程如图3所示。当产品进入某站位，首先在初始化模块Init中根据排产信息表初始化形成人员信息表，其中人员信息表主要包含人员编号、当前任务、当前状态、下一项任务、下一项任务所在站位以及任务列表等信息；然后由任务决策模块ProcessCtrl遍历人员信息表，获取空闲人员即将执行的工序编号，依次判断该工序是否存在紧前工序、紧前工序是否均已完成、所需人员是否空闲以及所需所有人员的下一任务是否为该工序，如果满足条件，则开始执行该工序，并更新状态信息；如果条件不满足，则从人员信息表中获取下一个空闲人员即将执行的工序并重新按照上述逻辑判断。当人员信息表遍历完成后，等待至有人员状态信息发生变化触发ProcessCtrl模块，重新按照上述流程执行。其中任务决策模块ProcessCtrl的部分程序如下：

```

objtable := self.RootFrame.
WorkerInfoTable
if objtable[2,i]="free"—判断该人员是否空闲
obj := str_to_obj(sprintf(objstation, ".
g_", objtable[3,i])) --工序对象
if obj.Numpred=PreStatCheck(obj) and
WorkerStatCheck(obj, objtable[3,i])--判断该工
序是否无紧前工序或紧前工序均完成，判断该工
序所需所有人员均空闲且下一项任务为该工序
objstation.SResult_N[7, objtable[3,i]]="Pro
cessing"—更新排产信息表状态
objstation.Buffer.cont.move(obj)—开始执行
.....
其中WorkerStatCheck(obj, objtable[3,i])部
分代码如下：
--在排产表中找到完成任务obj的所有人员
str.appendArray(splitString(SResult[4, obj.
no], ",")) --完成任务obj需要的所有人员
r1:=table0.find(str[n])
if objtable[2,r1]="free" --依次判断所有人员
是否空闲
if objtable[3,r1]= obj.no—依次判断所有人员
下一任务是否均为该任务
num:=num+1 --空闲人员数量+1
else
return false --不空闲返回false
exitloop --退出循环
.....

```

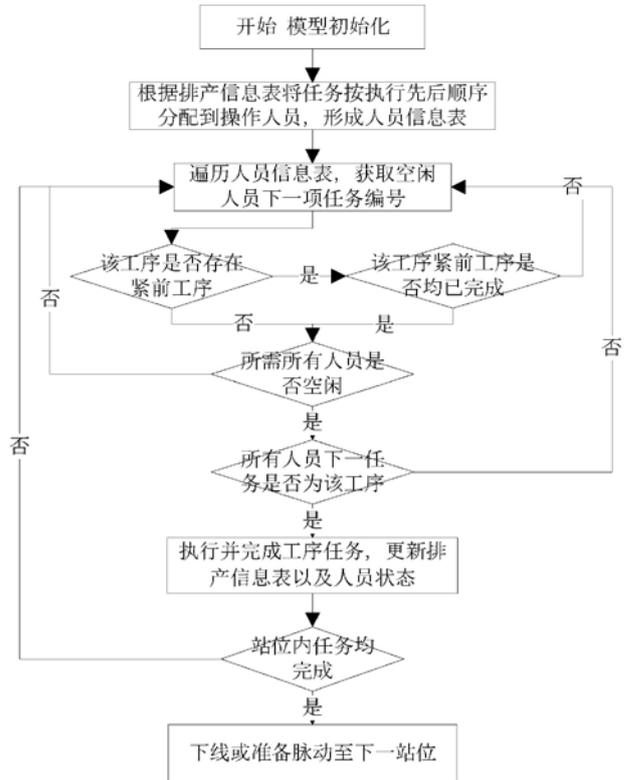


图3 排产驱动仿真逻辑

## 2.2 控制模块

### (1) 信息输入

根据仿真模型及生产计划的要求载入生产线相关数据信息，主要包含工序工时信息、排产信息、关键设备维保故障信息等。其中工序工时信息主要包含工序、工时、所需人员数量以及所属站位等信息。当该仿真模型用于规划设计阶段的脉动线平衡方案评估时，可不输入排产信息；当用于运营阶段对生产线的排产结果进行量化验证时，则必须输入排产信息。

### (2) 模型设置

根据项目实际和仿真运行的需求实现参数的设置，主要包含装配节拍、投入数量、吊运穿梭车数量、工时波动、生产班制以及站位人员数量等的设置。

### (3) 运行控制

主要用于仿真运行的控制，包含仿真日期的设置以及仿真控制、打开时钟控制器、打开模型、实验设置以及仿真结果查看等。

### (4) 结果输出

通过仿真运行预演排产计划的执行情况，记录各站位任务执行开始时间、结束时间以及关

联人员、物料等相关信息，并以表格方式输出。同时，通过仿真可以量化关注的生产性能评价指标，如装配节拍、装配线平衡率、站位利用率、人员利用率等。

### 3 航空发动机脉动装配生产线仿真系统案例

以某航空发动机脉动总装线平衡设计方案为例，利用仿真系统的信息输入模块载入相关信息，即可快速得到更新的仿真模型，根据实际需求进行相应参数设置，运行仿真模型，就可以给出装配流程仿真执行信息表和物流配送要求，并从装配线平衡率、生产节拍、站位利用率、各站位平均等待时间及人员利用率等装配线性能指标方面对生产线平衡方案或排产信息进行定量分析，其中站位平均等待时间如图4所示。从图中可以看出，站位4任务不饱满，等待时间接近1h，站位5为瓶颈站位，几乎不存在等待时间，因此建议该平衡方案在符合工艺约束的前提下，将站位5部分任务调整至站位4，或将站位4部分操作人员调整到站位5，以使各站位任务更加均衡。

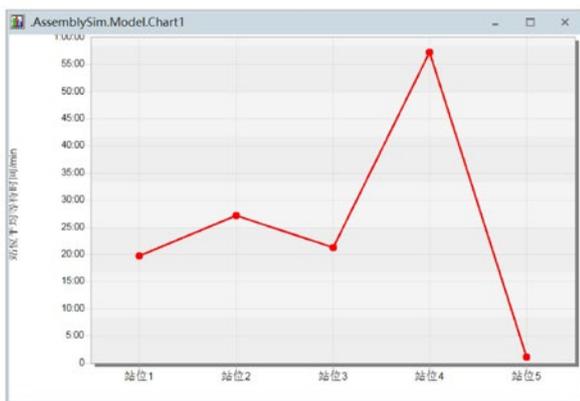


图4 站位利用率

从本项目实例可以看出，对规划中的生产线进行建模，能够直观真实地识别系统存在的问题，为评估、优化系统起到很好的辅助作用。

### 4 结论

通过航空发动机脉动装配生产线仿真，在规划设计阶段可以预知生产线的运行情况，对平衡方案进行量化分析论证，可指导优化设计；在运营阶段则可以对现存的生产线做各种仿真实验，

分析其排产的合理性，更好地控制生产线的产能。实例应用证明，应用研发的航空发动机脉动装配生产线仿真系统，可较快速便捷搭建起脉动总装生产线仿真模型，使更多设计人员能够快速使用仿真分析工具，有利于工艺仿真在实际项目中的应用和推广。

### 参考文献

- [1] 张超,李慧.基于粒子群算法和仿真分析的飞机移动装配线平衡研究[J].航空科学技术,2016,27(11):61-67.
- [2] 魏小红,谈军,方红文等.航空发动机水平脉动总装生产线规划研究[J].航空制造技术,2015(19):8-12.
- [3] 魏小红,陈贵林,田小京等.航空发动机数字化脉动总装线规划技术研究[J].航空制造技术,2015(21):155-157,162
- [4] 魏方剑.飞机脉动生产线的建模仿真与优化方法研究[D].南京航空航天大学,2016.3
- [5] 连宇臣,徐尧,李琳,等.航空发动机脉动式装配生产线工艺仿真关键技术研究[J].航空制造技术,2020,1/2(63):57-63
- [6] 柴猛.基于扩展Petri网的飞机总装脉动生产线建模仿真及优化方法研究[D].南京理工大学,硕士学位论文

# 我国民航机务定检维修需求分析

■ 杨益嘉 梅宝兴 闫慧 郑应平 [工艺]

**摘要:** 一座机库的基建成本和运营成本都非常高,不管是对航空公司还是第三方MRO,在进行定检能力布局规划时,都会面临市场需求是什么样的、自身需求多少、在哪些城市布局、建设多大的机库等问题。本文建立了数学模型将定检需求量化,分析了影响定检布局的原因,希望可以给大家带来一些启发。

**关键词:** 民航;定检;量化分析

## 1 研究背景及意义

### 1.1 研究背景

改革开放以来,我国民航运输业快速崛起,发展速度走在世界前列。根据四大航年报显示,2016年总营业收入234.8亿元人民币,2019年总营业收入341亿元人民币,年均复合增长率达9.8%<sup>[1]</sup>。民航运输业和民航维修业的发展紧密绑定,福祸相依。2020年,新冠疫情发生后,全球民航业都受到了前所未有的挑战,国内航空公司和第三方MRO也面临巨大的运营压力。疫情影响将持续一段时间但总会过去,中立的看法认为,到2023~2024年,MRO市场将恢复到2019年的水平<sup>[2]</sup>。民航维修领域未来长期的发展整体向好,依旧有很大的成长空间。

### 1.2 研究意义

飞机维修产业按照维修内容可划分成航线维修、机体维修、发动机维修和部附件维修四大类,机体维修可进一步划分为定检维修、整机喷漆、飞机改装三大板块。在定检体系中,维修等级由低到高分A检、C检、D检。大部分A检可以在室外机坪完成,C检和D检维修工序复杂且维

修时间较长,需要进飞机库进行维修,这就涉及到机库使用的问题。

飞机库专业性强,效率要求高,除了基本的建设安装费用,大厅内通常配置起重机、修理坞、地井、喷漆升降平台等设备,车间内会配置专业机床、测试台等设备,因此,修建一座飞机维修库花费巨大。随着我国机队规模增加,飞机维修量逐年增加,飞机维修机库逐渐进入大规模建设潮。对航空公司或者第三方MRO来说,合理的机库规模是投资的关键。机库规模过大,维修业务量不足,会造成建设方的亏损。机库规模过小,很难形成规模效应,尤其对航空公司来说,无法满足本身机队的维修需求,溢出的维修业务量只能外包,外包会导致一是增加飞机的维护成本,二是交于别的维修机构无法保障飞机按时交付率,增加航空公司航班准点率的风险。因此,飞机库容量合理性无论是从投资还是保障飞机安全的角度都至关重要。

本着合理利用社会资源的原则,应从市场定检需求出发,利用科学的手段分析影响机库建设规模的主要因素,建立定检需求和定检机库规模之间的关系。量化分析整个定检市场的需求,再结合建设方市场定位,确定定检机库在目标年年底需要建多少,争取为建设方以最合理的投资节奏和投资规模获取最理想的经济效益,对国内航

作者简介:杨益嘉,女,工程师,2016年毕业于西北工业大学飞行器制造工程专业,现就职于中航建投民航工程设计研究院。

空公司和第三方MRO的机库建设规划有重要指导意义。

## 2 定检维修需求量化分析

### 2.1 主要影响因素

飞机定检入库必须有对应的维修机位，因此，定检业务量利用机位数体现。根据对飞机定检维修特点的深入研究，笔者将影响机位数量的因素总结为维修周期、停车场时间、入库率、第三方业务量等几方面。

#### (1) 维修周期

维修周期指的是飞机在做同等级的检修之间的时间间隔，代表单架飞机每年会进库维修的频率。比如窄体机每月需要进行1次A检，那表示一年会有12次进库维修，每27个月进行一次C检，那表示每年要进库的次数是4/9，每次进库维修都会占用机位的工作时间，因此，维修周期影响机位数量的分析计算。

#### (2) 停车场时间

停车场时间指根据维修工作包的具体内容，飞机每次检修需要进库占用机位的时间。A检停车场时间较短，大约需要1天，C检和D检维修内容更多，停车场时间更长，比如某宽体机C检需要停车场22.4天，D检需要停车场45天。飞机的停车场时间就影响到机位的使用时间，这也是影响机位数量的主要因素之一。

#### (3) 入库率

入库率指的是飞机每次维修时进入机库概率，与不同维修等级包含的工作包以及维修基地所处的地区都有关系。如果是C、D检，因涉及维修内容复杂，需要借助专业工艺设备进行维修，入库率是100%。A检工作相对简单，不需要每次都入库维修，中国地域辽阔，南北天气差异大，北方地区因雪季长，入库率更高一点，南方晴朗天气多，入库率更低，一旦具体到某个区域，入库率和当地气候条件相关，全国A检平均入库率在25%左右。

#### (4) 第三方业务量

第三方业务量是针对于航空公司而言的，指的是非本公司所执管机队的维修业务量占总维修量的比例，在具体到测算航空公司建设定检机位数量时会根据公司战略规划用到此参数。对国内绝大部分航空公司而言，维修机库最主要的任

务是保障本公司飞机的完好率，第三方业务通常是比重很少的部分。对没有运营机队、专门做第三方维修业务的MRO来说，第三方业务量就是100%，具体业务量和第三方MRO在所在地区能争取到的维修业务量有关。

#### (5) 非例行维修率

除了在工作计划内的维修内容，实际生产过程中，会因为特殊情况，对机位有新的利用。比如航线或者A检时排故，遇到换发、换起落架的情况，需要进库维修；如果由于航材周转不利导致飞机无法按时完成维修，则已经在位维修的飞机会增加停车场时间，降低机位的流转率；比如个别地区极端天气，导致维修工作中断等等，这一系列在例行维修工作内容中无法预测但又实际存在的非例行维修工作，同样会影响机位流转速度。

#### (6) 机位利用率

不考虑紧急加班的情况，一年里有周末、公休日等非上班时间，因此每个机位每年提供的有效维修天数占全年时间约72%，在衡量机位数量时，也需要考虑。

### 2.2 定检需求模型

上述几个因素是影响机位数设计的主要因素，机队规模则是维修量的基础。以A检维修为例，在机队规模一定的情况下，对A检机位的需求可以通过下述模型分析。

$$N_A = F_Z \times T_A \times R_A \times W_A \times (1 + D_A) \div U_A \div (1 - O_A) \quad (1)$$

$N_A$ ——A检机位需求；

$F_Z$ ——窄体机数量；

$T_A$ ——A检维修库内停车场天数；

$R_A$ ——A检入库率；

$W_A$ ——A检维修周期；

$D_A$ ——非例行维修率；

$U_A$ ——机库年利用率；

$O_A$ ——第三方业务量占总维修量的比例。

C/D检维修机位数量计算方法和式(1)类似，但是只做C检的机库并不符合实际情况，通常C/D检机库同时需要进行A检维修，因此，C/D检机库的实际机位需求还需要将 $N_A$ 考虑进去。例如，如果公司最高级别检修为D检，则对应机库的机位数 $N = N_A + N_C + N_D$ 。

### 2.3 国内市场需求分析

国内整个民航市场定检机位需求的基础是国内的民航机队规模。综合波音、空客、商飞等国际主流OEM的预测结果，根据座级估算法、增长

率法、回归模型法，充分考虑B737max、新冠疫情等突发事件的影响，预计到2025年，我国机队规模约5089架，其中宽体客机560架，窄体客机4274架，宽体货机69架，窄体货机186架。2030年，我国机队规模约6972架，其中宽体客机767架，窄体客机5856架，宽体货机94架，窄体货机255架。根据上一节提出的模型对国内各级别定检需求进行测算，预计目标年国内定检对机位的需求如下表所示：

国内定检机位需求表

年份	宽体机位需求	窄体机位需求
2025年	45	262
2030年	61	359

据统计，目前，国内已建成的维修机库大约包含120个窄体维修机位和90个宽体维修机位，支撑起了我国2019年872亿的飞机维修市场规模。从飞机外形尺寸分析，1个宽体维修机位可以兼容2架窄体飞机进库维修，灵活性更高。国内大型航司在规划之初本着保障自家宽体机维修需求的原则，即使宽体机机队规模不足以撑起那么多宽体机位，也倾向于建设宽体机位而不是把这部分维修需求剥离出去，交给其他航司或者MRO。MRO在规划之初，考虑到业务灵活性，吸引更多航司达成合作协议，也会倾向于建设宽体机位或者宽窄体机位结合的维修基地。因此，目前国内已建成的宽体机位比国内整体需求多，如果未来航司的维修策略没有大的调整，大概率也会延续这一趋势。另外，从机位类型缺口来看，窄体机位是未来定检需求的主力军，如果将国内定检机位资源充分利用起来，宽体机位的建设可以适当放缓，窄体机位建设可以加快步伐。航司和第三方MRO在预测定检需求时应结合自身需求和市场定位综合评判进行规划。

### 3 规划定检布局需考虑的因素

在分析自身定检维修需求之后，下一步就需要考虑将这个扩张的版图向哪个城市扩展。定检维修间隔比较长，不需要每次飞行之后检查，因此定检网络的布局不需要根据城市航班密集程度去设置，选址更灵活。航司和第三方MRO考虑在哪个城市布局定检能力时需重点考虑以下因素：

(1) 该区域的政策导向，对航空产业的扶持程度

当地政府如果对航空业有扶持政策，在税收、用地、审批程序等方面会给企业以极大的支持。比如国内的厦门市，政府把航空业作为当地支柱产业之一，因此发展起来了厦门航空、厦门太古等具有行业竞争力的航空企业。

(2) 当地已成立的航司主基地或者大型MRO

如果航司以保障自家机队定检需求进行业务布局，因为有本身的定检需求做强大支撑，当地是否已有能力较强的维修机构影响并不大，但是第三方业务的拓展会受到影响，因为合作关系有延续性，想要从其他维修机构手里把客户争取过来难度很大。对于第三方MRO来说，没有自家机队作为最基本的业务支撑，完全靠第三方业务，在某区域已经有其他强大的维修机构时，介入市场更难，在获得确定的业务来源之前，发展前景不够明朗。

(3) 定检布局存在集群效应，不宜全国分散布局

定检需要设置机库和其他专业维修设施设备，投入大，维护成本高，专业维修人员的薪资成本也高，如果能实现设备、设施共享，提高利用率，充分调动人员工作效率，则可以大大降低投资和运营成本。因此，在规划新的定检布局时，应保持深度维修能力相对集中，避免在各个城市零散分布，可以提高收益性。

## 4 结论

定检维修布局对于航空公司和第三方MRO来说是影响公司正常运营、稳健发展的重要因素，是落实公司发展战略的重要举措。管理决策层在制定发展计划时需同时具备科学性、合理性、前瞻性，才能在多变局势下迎接新的挑战 and 机遇，创造更高价值。

### 参考文献

- [1] 郭志帅. 中国民航维修业"十三五"回顾与思考[J]. 民航管理, 2020, No.361(11):24-29.
- [2] 任淑霞, 宋可为, 孙明. 疫情下的全球民航MRO市场正逐步恢复[J]. 航空维修与工程, 2020(9):17-20.

# 国内航线维修布局方法探讨

■ 杨益嘉 闫慧 崔怿 郑妍 [工艺]

**摘要:** 航线维修是保障飞机日常飞行安全的必要程序和手段。考虑到航线维修站点的运营成本,航空公司不可能让站点遍地开花,而将业务外委给其他维修机构,同样会带来很大支出,且会存在保障不及时的风险。笔者针对此问题分析了影响航线发展规划的主要因素,建立了航线网络基本方法,希望可以给业内带来一些启发。

**关键词:** 民航;航线维修;航线规划

## 1 研究背景及意义

### 1.1 研究背景

改革开放以来,我国民用航空产业快速崛起,同时带动了民航维修产业的发展。国内的民航维修产业市值已经占到全球维修产业市值的20%。民航维修分为航线维修、定检维系、发动机维修和附件维修四大类,航线维修的需求来源于航班起降,分为航前维修和航后维修。航线维修提供过站检查及飞机放行、过夜定检、每日定检、每周定检、故障排除、技术支援等服务,是保障航班准时、安全运行的关键维修环节。

近10年,国内航班量一直攀升,航班起降次数逐年增加,每年增速维持在8%~11%之间,2019年的增速更是创下新高,达到了22%。2020年由于疫情影响,上半年大量航班取消,全球民航业都受到了前所未有的挑战,MRO市场也受到了严重打击,全球市场规模比疫情前预测值916亿美元少了45%<sup>[1]</sup>。随着新冠疫苗的研制以及全球各国抗疫措施不断加强,2023年,全球民航市场将恢复到疫情之前的水平,MRO市场恢复更加缓慢,约在2025年能完全恢复<sup>[2]</sup>,民航业未来长期的发展依旧有很大的成长空间。



图1 2010~2019年国内起降架次统计



图2 2010~2019年起降架次增长率统计

### 1.2 研究意义

航线维修具有盈利性高、门槛较低的特点,无论是航司还是MRO,在拓展业务版图时,通常热衷于把航线维修作为切入点,原因主要有以下两方面。

作者简介:杨益嘉,女,工程师,2016年毕业于西北工业大学飞行器制造工程专业,现就职于中航建投民航工程设计研究院。

从运营需求方面来看,各大航司的航线维修网络越发达,越有利于自家航班保障。从乘客飞行需求来看,最关心的是航班是否准点,其次才是服务、餐饮等内容。因此,航班准点对于航空公司市场运营来说更为重要。因此,出于自身需求,如果不考虑建立航线维修能力的成本,航司会更倾向于建立自己的航线维修能力,这样自家飞机的准点率才会放在最重要的位置,免去很多协调的困难。

从投入产出比方面来看,航线维修和定检维修、发动机维修和附件维修相比,初期投资低。航线保障的需求如果交由其他维修机构完成,会产生额外的维护费用,如果是自建能力,航线维修不需要修建机库、厂房等生产设施或者配备修理坞、地井等特种设备,在必要时可以租用其他公司的设施设备,最大的支出是人工成本和材料成本。运营成本和其他维修种类相比来说比较低,维修内容相对简单,单位工时收费差异并不大(航线维修通常260元/工时,定检维修通常300元/工时),投入产出比非常高。

即使航线维修是值得投资的重点领域,网络布局也不可能广撒网全面铺开,因此,企业在制定发展规划时,需要仔细筛选从哪些城市逐步拓展服务网络对自身发展是最有利的。本文总结了航司在扩大航线网络时需考虑的主要因素,为航空公司制定航线发展计划提供新的思路。

## 2 影响航线发展规划的主要因素

### 2.1 自家业务量足够大

如果自建航线保障能力,则在该网点的航班准确率比交由其他机构负责更容易掌控,这是面向市场和客户、从航班需求方面分析的。面向业务量组成时,对航司来说,自身保障需求是最主要、也是最稳定的业务来源,是扩张航线网络的主要驱动力。在衡量是否该在某个城市建立航线网点时,航司自己运营的机队如果在当地有足够的航班起降架次,尤其是在建立能力的初期,如果自身保障需求能达到大部分业务量目标,甚至是“自给自足”,则可以降低因业务量不足导致的营业收入无法达到投资成本的亏损风险。

### 2.2 当地有足够大的潜在第三方业务量

第三方MRO自身并没有运营机队,完全为其他航空公司提供飞机维修服务,也能支撑维修网

点的运营成本并盈利。对航司来说,这种模式是可以借鉴的,除了保障自营机队需求以外,把航线保障能力当成一个可创收的服务产品,把自己当成维修市场的第三方,在制定扩张计划时不局限于自家航班起降架次带来的维修量在当地是否足够撑起投入的成本。即使航司在某个城市暂不具备航线保障能力,但是该城市的民航发展潜力非常巨大,那么第三方业务也是撑起航线保障业务量的重要组成部分。

### 2.3 当地第三方业务竞争程度

对航司来说,除了自营机队带来的航线保障业务量是稳定的,第三方业务量是要去争取,这就需要考虑到当地的市场竞争是否激烈。因此,需要进行充分的市场调研,当地是否是其他航空公司的主运营基地,比如成都之于国航,昆明之于东航等,以及当地是否有维修口碑过硬的第三方MRO,比如新科宇航之于上海和广州,山东太古之于济南和日照。如果当地已经有其他具有较强的技术维修能力的机构,从合作延续性来看,前期航司在介入当地市场所能争取的第三方业务量就不是非常乐观。前期可以通过其他城市的航线业务对等置换的方式获取部分第三方业务量,待中后期可以靠业务能力和其余合作方式逐步扩大当地市场份额。

## 3 区域关于民航发展的政策导向

政策支持对于行业发展是非常重要的,如果某些城市对当地民航市场有大力扶持的政策,首先当地民航的发展前景是可以期待的。其次,布局时不仅需要投入人力、设施、材料,还有运营期间的税收、融资成本、用地成本等等,如果政策上对维修机构在当地建设新能力非常友好,还能从政策支持方面获得补贴,降低航线网络布局的投入成本。

## 4 建立航线网络基本方法

### 4.1 建立备选扩张序列

航线维修来源于航班起降,因此,航线维修的业务量和航班起降架次是强相关的比例关系。

根据上节分析的影响航线发展规划的主要因素,航线保障的业务来源一个是自营机队产生的,一个是其他航司机队产生的第三方业务量。

笔者把城市分为3个序列，序列1是某航司（称为A航）应该重点发展航线维修的城市，序列2是A航起降架次top30的城市，序列3是全国机场起降架次top30的城市。把全国起降架次top30的城市和某航司（称为A航）起降架次top30的城市进行交叉对比，重叠的部分则是自身业务量和第三方业务量驱动最强的序列1，市场潜力最大，序列2、3除去序列1的城市，可作为远期发展的备选。如果航司规模较小，可以把序列范围适当缩小，选择top10或者top20，同理，如果航司规模较大，则序列范围可适当放大到top40或者更多。

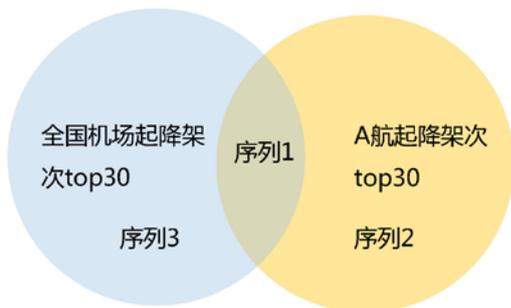


图3 序列1产生示意图

## 4.2 研究市场竞争和产业政策

根据上述分析，除了市场业务量，当地的市场竞争环境和产业政策对该城市是否适合A航司发展航线保障能力同样有重要影响。因此，在获得备选发展城市之后，就需要对每个城市进行细化研究。

### 4.2.1 市场竞争

国内航空业务量发展迅猛，航空维修机构也遍地开花，目前重点维修机构布局见图4。

以广州为例，广州白云国际机场是国内三大航空枢纽之一，航线网络已覆盖全球230余个通航点，已有近80家中外航空公司在此运营，是中国南方航空公司、海南航空、中国东方航空公司、深圳航空公司、九元航空公司、中原龙浩航空公司和浙江长龙航空公司等基地机场。白云机场2019年旅客吞吐量突破7300万人次、航班起降近50万架次、货邮吞吐量超190万吨，市场业务量非常可观。

广州航空业务量发展如火如荼，当地的维修机构实力也非常强劲。广州飞机维修工程有限公

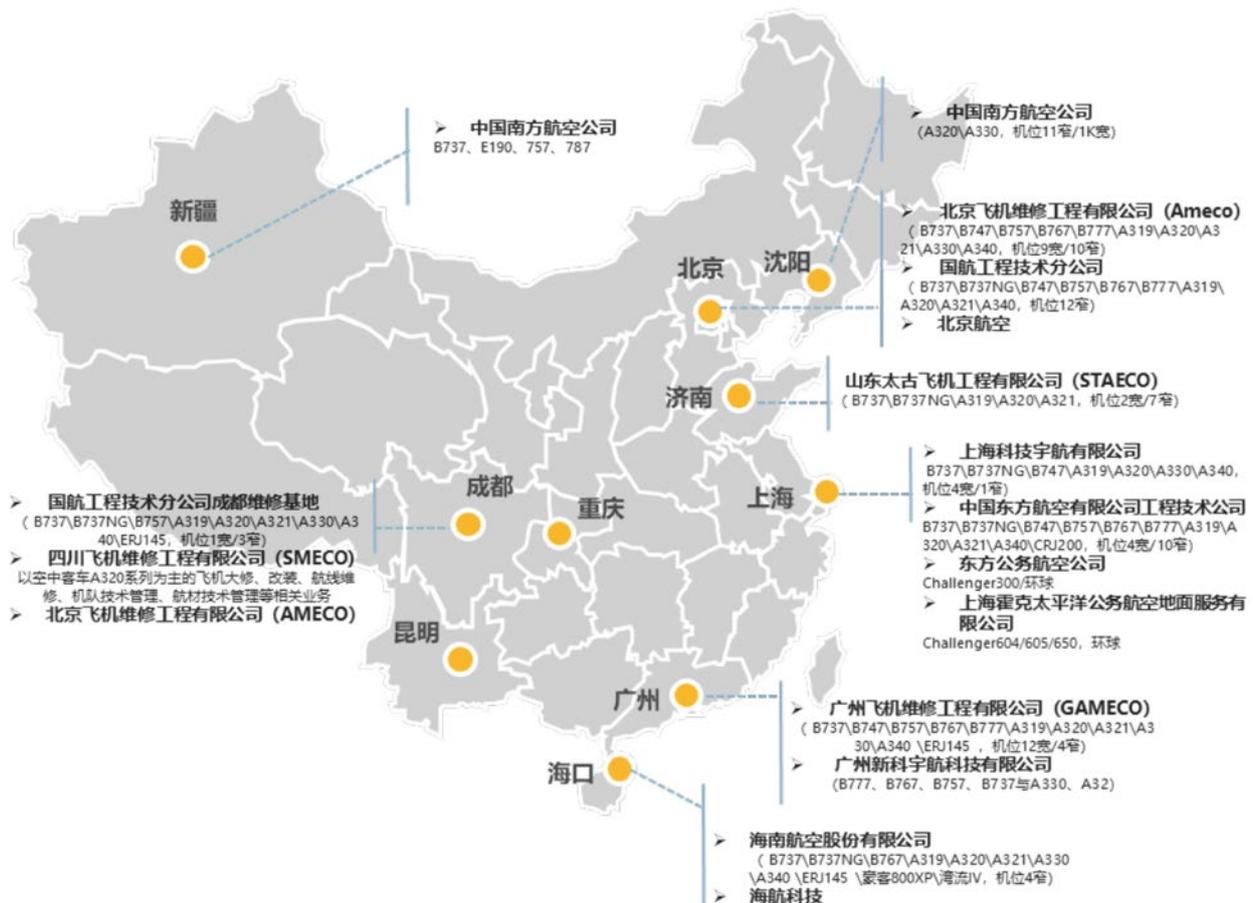


图4 国内重点维修机构分布情况

各省市部分民航产业政策表

城市	临空经济示范区	省市航空产业利好政策	宏观政策
杭州	✓	《浙江省民用机场发展“十三五”规划》、《关于建设民航强省的若干意见》、《浙江省航空产业“十三五”发展规划》、《杭州临空经济示范区总体方案》	
广州	✓	《广东省人民政府办公厅关于进一步加快民航业发展的意见》、《广州航空经济示范区建设方案》	粤港澳大湾区、一带一路枢纽机场
成都	✓	《四川省人民政府关于加快四川民航业发展的意见》、《成都临空经济示范区发展规划》	
南京	✓	《江苏省民用航空条例》	
郑州	✓	《郑州航空港经济综合实验区“十三五”发展规划》、《郑州航空港经济综合实验区发展规划(2013—2025年)》	
北京	✓	《北京临空经济示范区总体方案》	京津冀协同发展
西安	✓	《关于扶持航空产业及战略性新兴产业发展的奖补政策》	
重庆	✓	《重庆临空经济示范区建设总体方案》	长江经济带核心
上海	✓	《上海市综合交通“十三五”规划》	长江经济带核心、一带一路枢纽机场
长沙	✓	《长沙临空经济示范区总体方案》	
青岛	✓	《山东省民用机场布局规划》、《青岛胶东临空经济示范区总体方案》	
贵阳	✓	《贵阳临空经济示范区发展规划(2018—2030)》	
武汉		《湖北省“十三五”民用航空发展及中长期机场建设规划》	长江经济带核心
大连		《关于促进通用航空和航空零部件制造产业快速发展的实施意见》	
沈阳		《关于促进通用航空和航空零部件制造产业快速发展的实施意见》	
珠海		《广东省人民政府办公厅关于进一步加快民航业发展的意见》	粤港澳大湾区
揭阳		《广东省人民政府办公厅关于进一步加快民航业发展的意见》	
深圳		《广东省人民政府办公厅关于进一步加快民航业发展的意见》	粤港澳大湾区
厦门		《中国(厦门)全球一站式航空维修基地建设工作方案》	
天津		《关于贯彻落实“十三五”现代综合交通运输体系发展规划的实施意见》	京津冀协同发展
济南		《山东省民用机场布局规划》《关于进一步加快民航业发展的意见》	
三亚			海南自贸岛
南宁		《南宁临空经济示范区发展规划(2020—2030)》	
长春		《长春临空经济示范区发展规划(2020—2030)》	

司(GAMECO)由南航和和记黄埔共同控股, GAMECO深耕国内维修市场30余年, 维修能力遍布国内24个城市, 其中22个站点具有南航各机型的航线维修能力, 分布在广州总部和各分子公司, 并承接国内外航司的飞机维修业务。成立10年的广州新科宇航科技有限公司是由广东省机场管理集团和新科宇航合资经营的第三方MRO机构, 不运营机队, 在白云机场主要服务对象是国内外航司, 维修经验同样丰富。除了这两大维修巨头以外, 国航、东航、海航等航司均在当地有航线维修能力。

广州属于业务量和竞争程度成正比的基地, 如果A航司想要在广州建立航线维修能力, 除了自家机队的业务量来源稳定以外, 想要争取第三方业务难度非常之大, 因此, 在衡量是否该布局、该投入多少人力物力时, A航司应该以自家业务量为主进行考量。

#### 4.2.2 产业政策

“十三五”以来, 国家层面及各省市地区为促进航空产业发展出台多项政策, 扶持力度和各省市实际情况相关。

以厦门市为例, 为打造全球“一站式”航空维修基地, 服务国家大飞机战略, 厦门市大力发展当地航空维修产业, 提升产业国际竞争力, 抢占全球飞机维修市场份额, 从行业政策上对航空业的支持比较完善和全面。

在创新航空维修监管制度方面, 支持维修企业承揽国内航空公司境外包修业务, 促进境内跨区域维修业务的发展; 在完善产业发展扶持政策体系方面, 出台航空维修产业发展的具体扶持政策(包括人才保障政策), 并试点认定“飞机及其零部件维修服务”属技术先进型服务业务范围, 支持航空维修企业享受所得税优惠政策, 同时加大落实市政府关于支持航空维修企业享受技术先进型服务业企业所得税优惠政策力度; 在加快产业集聚发展方面, 扶持现有企业进一步拓展业务领域, 吸收引进世界领先技术, 实现“工艺流程升级”和“产品升级”, 鼓励拓展航线维护业务, 打造完善航空维修产业链, 建成临空产业集聚区。

厦门目前聚集了一批具有较强影响力的航空产业企业, 厦门太古、厦门航空等等, 这都和当地政府长期对航空产业的支持分不开, 这对企业发展是非常强大的助力, 因此, A航司在甄选航

线网络布局城市时, 需要深入研究当地的政策情况, 以便做出正确判断。

#### 4.3 形成航线布局网络

在分析了市场业务量、竞争环境和产业政策之后, 需要对备选发展城市进行一个综合分析, 本文推荐将层次分析法+专家打分法结合起来使用。

层次分析法是在20世纪70年代由美国运筹学教授提出的一种简便、灵活而又实用的多准则决策方法, 基本原理是将指标体系作为整体分解不同层次, 再根据每一层不同的特性分解为独立指标, 从最底层开始, 逐步上升, 将每一层的数据指标整合, 回答最上层的问题。

影响航线发展的因素较复杂, 最后又回归到如何筛选最佳发展城市的问题上, 笔者把航线维修产业视作一个系统, 依照各环节影响指标层层分析、相互比较、加权综合打分的思维模式进行决策。最终影响机务维修产业的结果是由每一个层次的指标权重加权综合得到的, 管理者可以直观的观测到每一项指标, 最后通过专家打分得到的各层次影响因素相对于总目标的相对权重, 通过加权计算得到各指标体系的得分, 以此给出航线网络布局判断。

## 5 结语

航线保障对航司来说是运营的必备环节, 无论大中型航司是否该扩大航线保障网络, 往哪些城市扩大, 还是小航司是否应该介入航线保障市场, 从哪些城市去开拓, 都需要经过详细的分析和论证才能得到最契合航司发展需求的结论, 希望本文提炼的影响因素和分析方法能为国内航司提供一些参考。

#### 参考文献

- [1] 王琳锋 陈伟 任淑霞 宋可为. 2021-2031年全球民用航空MRO市场预测[J]. 航空维修与工程, 2021(6):20-22.
- [2] 任淑霞, 宋可为, 孙明. 疫情下的全球民航MRO市场正逐步恢复[J]. 航空维修与工程, 2020(9):17-20.

# 航天发射场数据中台系统研究

■ 卢晓涛 贾佳 黄娅 张立乾 冯中华 [工艺]

**摘要:** 航天发射场的管理系统决定了航天发射场管理水平。本文在传统的航天发射场C3I系统、其他管理系统基础上提出了航天发射场数据中台体系,并基于此体系,对航天发射场的数据中台系统架构建设进行了设想。该体系可以提高航天发射场决策指挥的能力,提高各个系统开发的效率、质量,降低运维的成本。

**关键词:** 航天发射场;数据中台;系统架构;决策指挥;敏捷

## 0 引言

目前,世界上共有20余个航天发射场,绝大部分在美国、俄罗斯、中国和欧洲。我国已有4座航天发射场,分别是酒泉、太原和西昌这3座内陆发射场和一个沿海地区的海南文昌发射场。还有一个即将在十四五期间建设的宁波国际商业航天发射中心,该项目总投资额200亿元人民币。

航天发射场主要是完成运载火箭和航天器的装配、测试和发射、监视和安全控制,飞行中的跟踪测量、获取数据并处理和分析。

世界各国都制订或实施了各自的发射场现代化计划。大多计划通过采用先进的发射流程,提高标准化、自动化程度等手段降低成本,缩短发射周期,提高发射能力,增强安全性和可靠性<sup>[1]</sup>。

我国的航天发射处于国际领先水平,为了保持、扩大我国的航天发射场管理水平,本文试图分析我国航天发射场管理平台的数据中台研究。在发展日益迅速、系统异日庞杂、数据越来越丰富的大数据、人工智能、物联网时代,通过数据中台的研究和开发,推动我国航天发射场管理向敏捷化、智能化、集约化发展。

## 1 航天发射场C3I系统

传统的航天发射场主要使用C3I系统(Command Control Communication and Intelligence,指挥、控制、通信与情报系统),泛指实时获取信息,处理信息,传输信息,进行态势分析、威胁估计、决策,然后实施有效指挥和控制,以夺取优势的复杂而宏大的人—机系统<sup>[2]</sup>。C3I系统主要应用在军队指挥自动化、列车自动调度、电网输配电控制、空中交通管制、城市交通管理、大型工程项目计划协调、航天发射等领域。

C3I系统结构复杂,规模大,涉及面广,主要包括雷达系统、控制指挥系统、跟踪系统<sup>[3]</sup>、通信系统。除了C3I系统外,航天发射场还使用供电系统、供气系统<sup>[4]</sup>、浅层风预报系统、救护保卫系统、风险管理系统<sup>[5]</sup>、数字孪生系统<sup>[6]</sup>、仿真系统<sup>[7]</sup>、异常检测、设备管理系统<sup>[8]</sup>、远程故障诊断系统<sup>[9]</sup>、自动判读系统<sup>[10]</sup>、地面设备管理系统、远程静电测试系统软<sup>[11]</sup>等。

航天发射场的C3I系统作为特殊的大型信息系统,降低其开发成本、提高开发速度一直是核心的难题。研究者们先后提出过复用、面向对象建模、面向服务(SOA)等手段提高开发的效率。为提高航天发射场试验任务能力,研究航天发射场各类信息化应用之间的互联、互通问题。软件复用

作者简介:卢晓涛,男,工程师,2019年毕业于北京科技大学信息系统与工程管理专业,现就职于航空工业规划总院智能技术中心。

就是将已有的软件成分用于构造新的软件系统。陶章志<sup>[12]</sup>提出了C3I软件的构件化开发具体实施思路与研发策略。面向对象建模方法是一种自底向上的归纳和自顶向下的分解相结合的方法,是一种围绕真实世界的概念来组织模型思考的方式,符合人们的认知方式,陈长喜<sup>[13]</sup>认为该方法在表现C3I系统中的实体和用户需求等方面有很大优势。唐立文<sup>[14]</sup>分析了“信息孤岛”产生的原因,并提出了面向服务(SOA)的航天发射场信息化基础框架。张鹏<sup>[15]</sup>在航天发射场指挥决策系统(CDD)基础上,提出了航天发射场一体化指挥决策系统体系架构,该架构是考虑在CDS设计过程中融入SOA进行体系架构设计的方法和模型。

## 2 数据中台

数据管理发展史经历了数据文件、数据库、数据仓库、数据挖掘、数据平台、数据中台这几个阶段。阿里的“大中台、小前台”概念使得国内了解了中台,该概念是阿里参观Supercell时提出的。Supercell是芬兰一家仅有300名员工的小公司,却接连推出多款爆款游戏,是全球最会赚钱的明星游戏公司。其成功的秘诀在于他们有一个强大的技术平台,用以支持众多的小团队进行游戏研发。这就是中台技术,该技术对于存在多项目并行,各项目相对独立,但业务需求所需要的支持类似的公司,存在巨大的价值。

UPS的首席信息官Juan Perez在2017年启动了网络规划工具的试点,利用算法和数据来优化路由,2018年这个项目为UPS节约了3900万加仑的能源消耗,缩短了3.64亿km的路程。现在利用算法,机器学习,深度学习的技术来加工数据,通过数据来驱动企业的运营已经成为了UPS的核心竞争力<sup>[16]</sup>。

张宏远认为<sup>[17]</sup>数据中台是一个物理存在的系统,是企业或机构需要建设的位于数据源与数据应用系统之间的一个中间平台。毕辉认为<sup>[18]</sup>数据中台是数据服务(Data API)工厂,是一个能够满足业务创新的中间层、是可以通过统一标准和口径的数据技术,实现对海量数据进行采集、计算、存储、统计和治理的数据应用架构。姚洪<sup>[19]</sup>认为数据后台是各分散业务数据,这些数据存储在各业务系统里,不具有数据提供能力和数据服务能力;而数据前台是提供给用户的已经治理的有效数据;数据中台是链接数据后台和数据前

后,将无质量的后台数据汇集在一起,形成大数据,通过数据治理,梳理出有效的数据来。

王健认为<sup>[20]</sup>前台是由各类前台系统组成的前端平台,例如用户直接使用的网站,手机App,微信公众号等都属于前台范畴。后台是由后台系统组成的后端平台。每个后台系统一般管理了企业的一类核心资源(数据+计算),例如财务系统,产品系统,客户管理系统,仓库物流管理系统等。基础设施和计算平台作为企业的核心计算资源,也属于后台的一部分。后台更多解决的是企业管理效率问题,而中台要解决的才是前台的创新问题。中台存在的唯一目的就是更好的服务前台规模化创新,进而更好的响应服务引领用户,使组织真正做到自身能力与用户需求的持续对接。

数据中台包括基础数据层、公共数据层、应用服务层、数据研发平台、数据管理平台<sup>[21]</sup>。基础数据层,包括数据采集平台、计算平台、存储平台,这些可以使用云计算服务,也可以自建。公共数据层,包括数据湖(数据仓库),负责公共数据模型的研发,还包括统一指标(标签)平台,负责把模型组织成可以对外服务的数据。应用服务层,负责将公共数据区的数据提供对外服务,包括数据分析平台、数据接口平台、数据可视化平台,多维查询平台等。数据研发平台,涵盖数据开发的各类工具,如:脚本开发工具、数据管道工具、模型设计工具、数据调度工具等。数据管理平台,针对全链路的数据管理,保证可以监控数据流向、数据使用效果、数据生命周期,以衡量数据的价值与成本。

Data API是数据中台的核心,它是连接前台和后台的桥梁,通过API的方式提供数据服务,而不是直接把数据库给前台、让前台开发自行使用数据<sup>[22]</sup>。数据中台建设的最大挑战,是如何找到有价值的业务场景。如用户画像API、计算API、查询API等。数据中台是企业的数字工厂,负责把数据加工成为数据资产。

数据中台优势:数据融合;快速开发;从静态变为动态(比如基于多源数据的风险预警)。从人看报表、再综合产生知识,到系统融合数据后,直接通过算法计算出知识,如用户画像。

## 3 航天发射场数据中台体系

当前阶段,航天发射场有很多应用系统,但

是数据也分散在各个系统中,管理者和各个使用部门不得不面对信息孤岛所产生的数据鸿沟和低效的系统间信息互通。而且很多系统有相似的需求,如设备的数据,对于C3I系统、设备管理系统、风险管理系统、仿真系统、数字孪生系统等都是需要的,而且存在重复开发的低效模式。

敏捷开发也是当前的一个主流管理、开发的哲学和工具,主要是快速响应客户需求的理念、方法、工具。软件业、互联网助推系统的敏捷开发<sup>[23-24]</sup>,产业界助推敏捷组织<sup>[25-26]</sup>、敏捷制造<sup>[27]</sup>、敏捷供应链<sup>[28-29]</sup>,项目管理界主推敏捷项目管理<sup>[30]</sup>等。数据中台技术可以助推航天发射场众多管理系统的快速开发、快速迭代。

基于数据中台技术、敏捷思想提出的航天发射场数据中台体系如图1所示。

智慧应用层,主要包括C3I系统、供电系统、供气系统、层风预报系统、救护保卫系统、风险管理系统、数字孪生系统、仿真系统、异常检测、设备管理系统、远程故障诊断系统、自动判读系统、地面设备管理系统、远程静电测试系统、供应链管理系统等。这些前台系统间有较高的业务关联需求,适合采用中台技术。物联接入系统主要采集设备数据、传感器数据、雷达数据、应用系统数据等,并对这些数据做存储、清洗等工作。数据中台主要起到中间层的作用,通过数据接口API、融合、数据挖掘、数据治理等方便数据的集成、开发的复用,提高各个系统开发的效率、质量、效益。通过高度的数据集成、知识融合等手段,提高航天发射场决策指挥的能力。

## 4 发射场数据中台系统架构建设设想

### 4.1 发射场数据中台技术体系

为了高效满足航天发射场信息化业务系统数据分析和应用的需求,建设涵盖数据存储系统、大数据资产管理系统、数据治理、数据模型和数据接口服务等多个层次体系架构的航天发射场数据中台技术体系,作为航天发射场数据服务基座,支撑发射场数据全生命周期处理和数据服务化,以需求为牵引、以应用为驱动,挖掘数据价值,构建设备管理、生产运维、环境安防等数据服务。

基于中台的云计算、大数据及先进的分布式体系架构,以数据标准化、技术内核工具化、元数据驱动智能化为原则,向下基于统一的标准API下行数据接口融合智能物联网接入系统,提供大数据存储、多源异构海量数据管理;向上基于统一的标准API上行数据接口输出数据,支撑业务层智能管控应用系统。通过平台数据服务,实现系统从数据采集到数据服务全链路通的全流程一体化,支撑数据资产管理、设备远程监控诊断、预测维护等基于大数据的应用服务及拓展。

### 4.2 发射场数据中台架构设计

系统基于模块化微服务技术建设各个子系统,以保障中台的高可靠性运行。中台以大数据服务技术为核心,通过容器化部署、高可用设计,以及若干微服务组件构建的数据中台,建立可以快速配置组合的微服务集群,使得系统能够快速可靠扩展,降低未来的运营风险及成本。

发射场数据中台技术架构如图2所示。

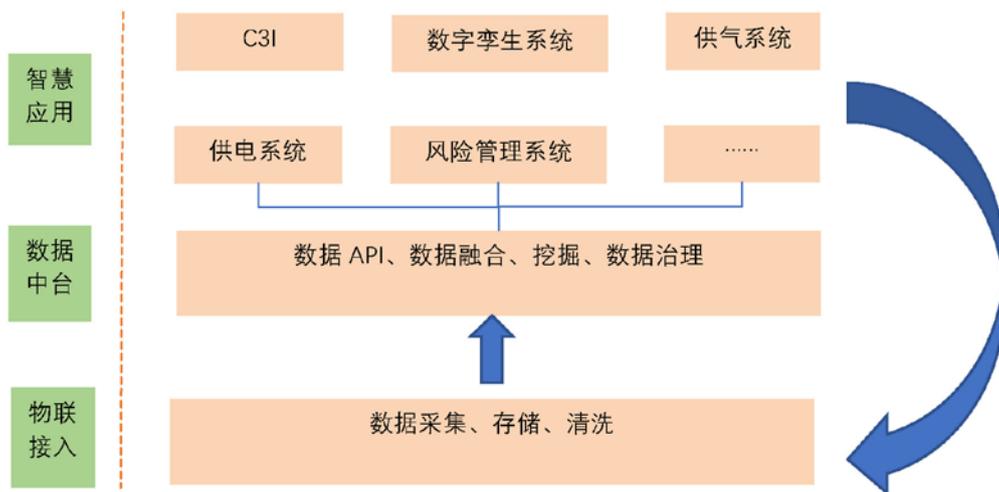


图1 发射场数据中台技术设计架构图

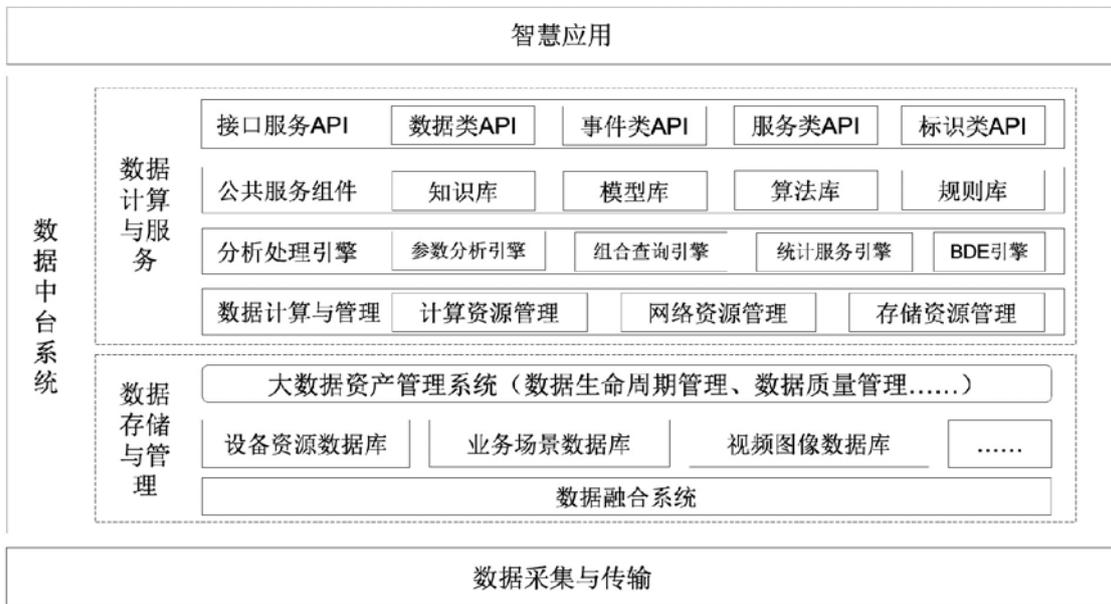


图2 发射场数据中台技术架构体系

发射场数据中台建设主要包括数据存储与管理、数据计算与服务两个方面的功能。中台通过ETL服务机制，将采集的相关数据转换为主题数据进而形成数据仓库，并利用hadoop等相关数据技术完成大数据的分析与处理，从而面向业务需求提供数据存储、计算、分析、展现能力，支撑智慧应用层建设。

平台的数据采集与交换通过数据融合系统实现统一的数据标准、融合与存储。通过kafka机制进行数据分发，将数据转发至数据库层，并建设大数据管理系统，实现设备资源、业务场景、视频图像等异构、非异构数据的存储，通过平台数据分析处理引擎，实现数据的实时分析、离线分析；基于平台公共服务组件，形成各类数据服务基础模型和规则库，提供通用数据分析模型，并通过各类数据API接口实现数据层与应用分布链接。

## 5 总结展望

建设智慧化航天发射场当以目前航天发射场综合保障系统中的瓶颈为需求牵引，综合运用云计算、大数据、人工智能、物联网等技术，构建全面数据采集、实时监控测量、统一数据存储、综合信息处理及适应性信息推送的智能化信息物理融合平台，以构建专业化、集成化、智慧化的综合保障能力，确保发射场地面设施设备用时可

靠、持续可靠，满足航天发射高可靠性与高安全性要求，适应常态化、高密度航天发射的需求，有助于构建高效的航天发射保障控制体系，从而有效提升航天发射的可靠性和安全性，并极大提高航天发射试验的工程效能。

## 参考文献

- [1]梁唐,李亚楠.美、俄、欧航天发射场运营模式分析[J].国际太空,2020(09):18-22.
- [2]罗雪山,张维明.C3I系统理论基础C3I系统建模方法与技术[M].北京:国防科技大学出版社,2000.
- [3]陈长喜,郭立红,唐雪松,申会民.基于UML的C3I系统软件建模[J].计算机测量与控制,2006(09):1260-1262.
- [4]胡清忠,褚福磊.航天发射场供气系统健康管理技术[J].振动.测试与诊断,2019,39(01):78-82+222.
- [5]崔豹,赵继广,陈景鹏,张杨.航天发射场风险分析系统研究[J].安全与环境工程,2014,21(04):152-158.

# 某直升机中央件疲劳试验台配套土建设施设计研究

■ 郭达维 徐学民 孟芸 [工艺]

**摘要:** 直升机中央件的受载形式复杂,进行中央件疲劳试验台土建设施设计时需首先充分了解试验的加载方式和流程,进而才能转化为土建各专业能够理解的设计输入。本文着重根据笔者在某直升机中央件疲劳试验台配套土建设施实际设计中的经验,对直升机中央件的疲劳试验、载荷转换方法以及土建设施设计条件等工艺专业设计的方法和过程进行介绍,为此类试验台的工艺设计提供参考。

**关键词:** 直升机中央件; 疲劳试验台; 工艺设计

## 1 引言

直升机作为通过驱动旋翼提供升力的航空器,其受载情况与固定翼航空器有所不同。结构中主要的载荷为低频率、高应力幅值的疲劳载荷,所以在直升机的研制直至生产各阶段中,各类直升机组成结构均需要进行疲劳试验,具体包括:

(1) 方案设计阶段,开展原理性疲劳试验、新材料与新构型前期预研疲劳试验,以配合设计专业进行机体结构、起落架和旋翼系统初步打样设计。

(2) 详细设计阶段,开展旋翼系统、机体结构等部件疲劳试验,为结构设计优化和详细强度分析提供试验依据。

(3) 试验试飞阶段,进行结构设计研制疲劳试验及部分性能试验,以暴露结构疲劳薄弱部位、得到直升机部件的性能指标,为改进设计及工艺、制定使用维护和修理说明书以及制定直升机和其部件使用寿命提供试验数据。

(4) 鉴定/取证阶段,完成鉴定疲劳试验,确定结构和工艺的最后状态。

(5) 批生产阶段,进行质量控制的疲劳试验,保证产品的质量稳定性。

直升机中央件是用于连接直升机传动轴和旋翼的结构,在直升机的旋翼桨毂结构中起到“承上启下”的作用,其具体位置如图1所示。中央件与多个部件连接,受载形式复杂,载荷种类多样。按照载荷随时间的变化关系进行分类,中央件所受载荷包括静载荷及动载荷两类,其中静载荷大小方向恒定,动载荷的大小会随时间发生变化,主要包括静态离心力 $F_l$ 、静态扭矩 $C$ 、静态升力 $F_S$ 、动态弯矩 $M$ 、动态剪力 $T$ 、作用于弹性轴承中心处及阻尼器耳片处的阻尼器载荷 $F_{ca}$ 、 $F_{cb}$ 。

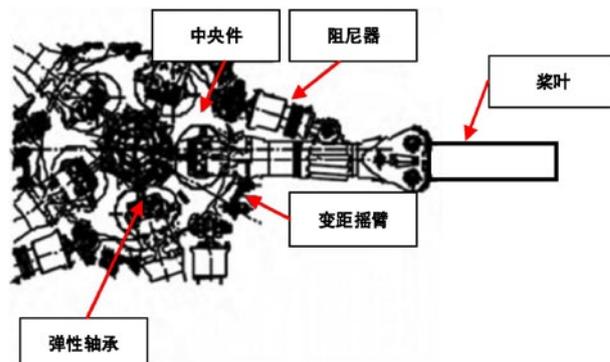


图1 直升机旋翼桨毂结构示意图<sup>[1]</sup>

作者简介: 郭达维,男,助理工程师,2020年毕业于北京理工大学飞行器设计专业,现就职于航空工业规划总院飞机工程事业部。

对于大部分型号直升机而言, 通过将钢架结构的中央件疲劳试验台固定于承力地轨上能够满足试验载荷的加载、承力要求; 而某型直升机载荷大, 原有试验台设计方案中地轨及钢架无法满足承力需求, 需要通过建设承力墙等土建配套条件以支撑该机型的试验需求。

## 2 中央件疲劳试验载荷分析

从上节的分析可以看出, 疲劳试验贯穿直升机型号研制和服役的整个过程, 特别是全尺寸疲劳试验, 对于结构疲劳薄弱部位的分析、确定直升机使用寿命及技术状态均具有重要意义, 全尺寸疲劳试验的流程图如图2所示。

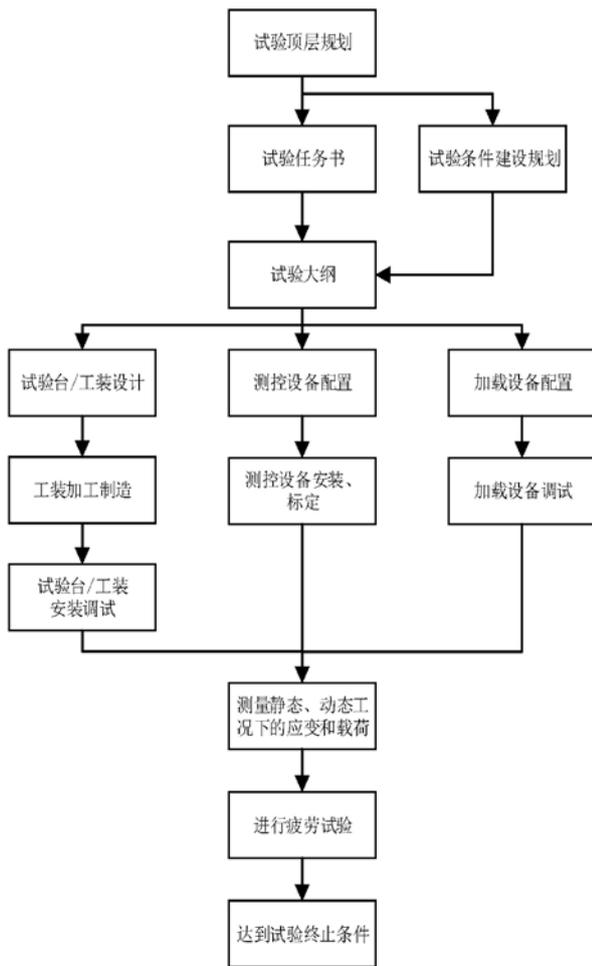


图2 全尺寸疲劳试验流程图

由图2可得, 疲劳试验条件建设规划与试验任务书编制平行展开, 对于常规的二力杆型试验

件以及材料的性能试验, 通常采用疲劳试验机完成; 而对于包括中央件在内的直升机部件级疲劳试验, 其载荷多, 受力形式复杂, 均采用非标定制的试验台, 结合加载控制系统、数据采集系统、液压泵站系统等设备, 组成完整的试验系统, 具体架构如图3所示。

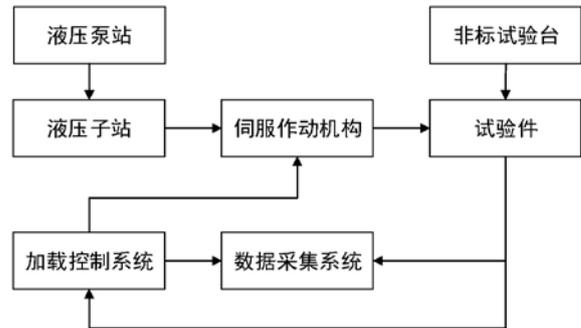


图3 试验系统架构图

某直升机中央件疲劳试验台配套土建设施工艺条件的确定需要在了解试验各项需求的前提下开展, 并结合试验大纲进行转化, 形成土建各专业能够理解、具有可实施性的载荷输入。

以具有6个支臂的直升机中央件为例, 其受载情况如图4所示, 中央件空间坐标系为OXYZ, 图中的*i*取值范围为1~6, 分别依次代表6个支臂, 每个支臂均有其局部的 $O_iX_iY_iZ_i$ 坐标系。其中 $F_{li}$ 和 $F_{cai}$ 作用于中央件各支臂球弹性轴承中心处,  $F_{li}$ 以 $X_i$ 方向为正;  $C$ 、 $F_s$ 、 $M$ 、 $T$ 作用于桨毂中心处,  $C$ 、 $F_s$ 以 $Z$ 方向为正,  $M$ 、 $T$ 均为动态载荷;  $F_{cbi}$ 作用于各支臂对应的阻尼器耳片处;  $F_{cai}$ 及 $F_{cbi}$ 载荷作用方向始终保持相互平行, 与 $X_i$ 方向的夹角为 $\frac{4\pi}{180}$ , 阻尼器受拉时阻尼器载荷取正值, 随着试验进行, 决定该载荷大小的相位将会随时间变化, 每个支臂所受动载荷的相位依次相差 $\frac{2\pi}{6}$ 。

## 3 疲劳试验载荷转化

直升机中央件所受载荷包括静载荷与动载荷, 且载荷形式除了拉压力以外, 还包括弯矩、剪力和扭矩。此外, 由于动载荷的存在, 在疲劳试验过程中, 中央件在XOY平面内所受合力方向将在该平面内旋转, 且为了模拟直升机正常平飞/降落工况以及俯冲/拉起工况, 需要循环施加高周疲劳载荷及低周疲劳载荷, 其中高周疲劳指的是材料在低于其屈服强度的循环应力下, 经过

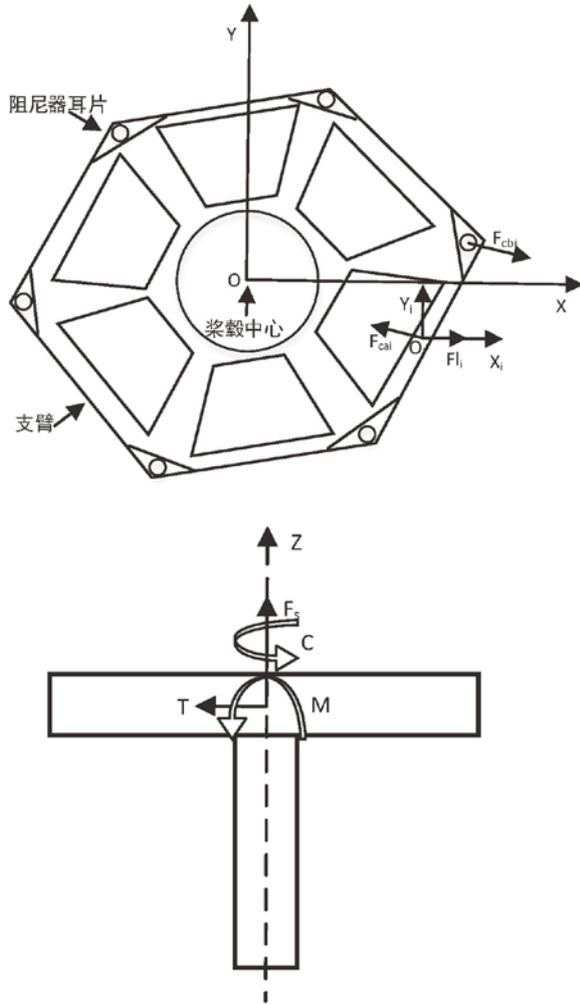


图4 6支臂中央件载荷图

104~105以上循环次数而产生的疲劳,而低周疲劳则是应力水平较高,破坏循环次数一般低于104的疲劳。上述工况也对载荷施加以及大小调整的可实施性提出了要求。

实际上,在疲劳试验过程中,载荷均通过作动筒以及加载连杆实现,所以需要将各类载荷进行整合,将弯矩、剪力分解至各支臂对应的弹性轴承处转化为拉或压力,以简化疲劳试验的载荷加载方法。

经过载荷的转化,中央件载荷类型共4类,包括离心力 $F_x$ 、摆振力 $F_y$ 、挥舞力 $F_z$ 以及阻尼器力 $F_a$ ,前3个载荷的力作用方向分别沿各支臂 $O_i X_i Y_i Z_i$ 坐标系的3个轴向,各支臂阻尼器力 $F_{ai}$ 的作用方向与 $X_i$ 轴夹角为 $4\pi/180$ 。其中离心力、摆振力均为拉力,挥舞力和阻尼器力则可能为拉力或压力。由于某机型中央件共有7个支臂,所以该中央件疲劳试验台共有28个载荷按相位协调加

载,载荷形式均为拉力或压力。

#### 4 工艺设计条件确定

某机型中央件疲劳试验台将建设于疲劳试验厂房中,通过本文上一节的载荷分析与转化,直升机中央件所载荷均能通过作动筒以及加载连杆施加,7支臂所受的离心力、摆振力和阻尼器力绕桨毂中心一周,所以为给加载装置提供边界支撑条件,中央件疲劳试验台的承力墙确定为正多边形,加载装置通过承力墙上的T型槽进行连接。

在XOY平面内,由于离心力、摆振力为拉力,而阻尼器力为拉力或压力,加载方向的不同对于承力墙的要求不同,故考虑设计内外两个多边形承力墙。阻尼器加载连杆共7个,离心力、摆振力加载作动筒共计14个,为了便于14个加载作动筒布置,将外圈承力墙用于离心力和摆振力的加载,外圈承力墙受力均为拉力;内圈承力墙用于阻尼器力的加载,承力墙可能受拉力或压力。

内外承力墙与加载载荷的对应关系明确后,需要确定承力墙的具体形状。由于外圈承力墙上的加载作动筒共计14个,故外圈承力墙为正14边形,最大直径约为24m,而固定于承力墙上的作动装置距离中央件较远,所以离心力和摆振力通过作动筒结合钢丝绳施加。

由于内、外圈承力墙所对应的载荷均在中央件的XOY平面内,为保证通过钢丝绳施加的载荷传递至中央件上,内圈承力墙需要开洞,每个支臂对应的离心力载荷与阻尼器载荷对应一条边,此条边上也需要开洞以保证钢丝绳穿过,故内圈承力墙同样为正14边形,最大直径约为11m。

中央件所受的挥舞力载荷方向垂直于厂房地面,载荷为拉力或压力,通过加载连杆施加,考虑到中央件与传动轴连接部分结构有一定长度,疲劳试验台中央部分设置一定深度的地坑。为保证挥舞力对应加载连杆的固定,在地坑内设置钢制底盘,底盘与试验台基础通过若干锚栓连接,与中央件试验件通过螺栓连接。中央件疲劳试验台布局如图5所示。

中央件疲劳试验台的总体布局确定后,应基于试验台使用部门在试验大纲中提出的试验载荷,确定土建结构设计专业所需的设计输入,包括的内容如表所示。

由表可得,土建结构设计专业所需的设计输

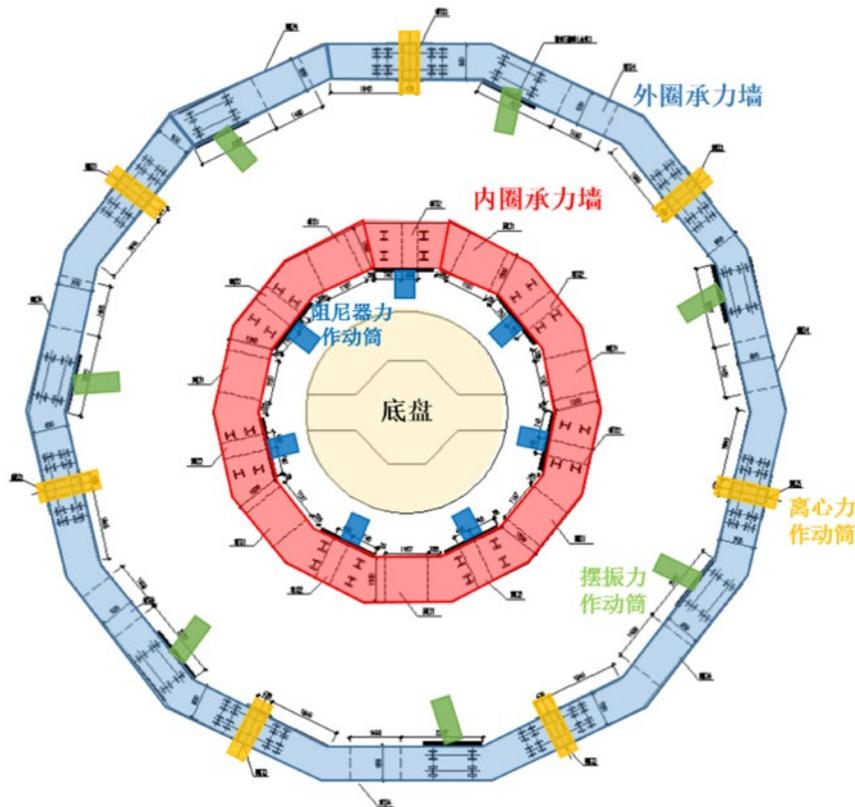


图5 中央件疲劳试验台布局

入包括各类载荷在不同工况下的极值、循环周期和总次数。此外，还需要依据试验大纲给出中央件疲劳试验台总循环次数以及使用年限以供分析。

与试验台内外圈承力墙不同，试验台底盘由于与中央件试验件和施加挥舞力的加载连杆连接，不仅需要承载垂直于XOY平面的挥舞力 $F_z$ ，还需要承载XOY平面所产生的载荷，需要将底盘受力的最不利工况提供给土建结构专业，包括静态扭矩 $C$ 、静态升力 $FS$ 、动态弯矩 $M$ 和动态剪力 $T$ 。根据使用部门初步确定的底板厚度250mm，结构专业利用最不利工况、试验台总循环次数及使用年限分析对底盘进行疲劳分析，反推材料的

强度极限，最终选取合适的材料。

至此，直升机中央件疲劳试验台设备基础相关的土建专业输入条件已完备，该试验平台所在厂房组成主要包括厂房试验大厅和附楼，试验大厅主要布置包括中央件疲劳试验台在内的非标试验台，附楼包括为非标试验台提供动力源的液压泵间/水泵间、变电站等配套功能性房间，以及对二力杆型试验件进行试验的试验机间。工艺专业后续需要确定与疲劳试验厂房相关的其他条件，具体内容不在本文中赘述。

## 5 结论

本文以某直升机中央件疲劳试验台为研究对象，结合中央件的受力情况和试验需求分析并转化形成了能作为土建结构专业设计输入的工艺条件，并简要分析了该试验台所在疲劳试验厂房的若干工艺需求，为此类试验台的工艺设计提供了参考思路和可行的分析路线。

## 参考文献

- [1] 喻琴, 李满福, 郑俊伟. 国外球柔性浆毅结构型技术分析与发展研究.[J]直升机技术, 2016(2):60-66.

中央件疲劳试验载荷表

序号	载荷类型	工况	载荷极值	循环周期/次数
1	离心力 $F_x$	高周工况	518 kN ± 195 kN	5s/3000万次
2		低周工况1	0~532 kN	15s/80万次
3		低周工况2	0~630 kN	15s/0.1万次
4	摆振力 $F_y$	高周工况	0~190 kN	5s/3000万次
5	挥舞力 $F_z$	高周工况	-70 kN ± 300 kN	5s/3000万次
6	阻尼器力 $F_a$	高周工况	35 kN ± 196 kN	5s/3000万次

# 上海某钢筋混凝土单层厂房 火灾后鉴定及修复

■ 潘抒冰 张广英 金来建 [结构]

**摘要:** 上海某钢筋混凝土单层工业厂房从着火到扑灭明火约1.5h, 过火面积约1900m<sup>2</sup>。火灾后结合《火灾后建筑结构鉴定标准》(CECS 252: 2009), 调查分析火灾后结构的受损情况, 对各构件的损伤情况, 受损混凝土强度, 受损钢筋强度进行现场实测, 并对受损结构的残余承载力进行验算。本文给出该建筑物结构火灾后的修复处理方案, 消除了火灾事故后结构的安全隐患。

**关键词:** 火灾; 损伤; 检测; 残余承载力; 修复

## 1 概况

### 1.1 工程概况

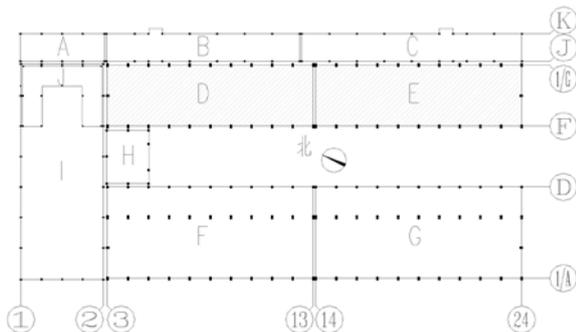


图1 厂房分区

上海某厂房建筑面积10443m<sup>2</sup>。本工程结构共分10个区, 分区如图1。本次受灾为D、E区域(上图中阴影部分面积), 共约2400m<sup>2</sup>。结构类型为单层钢筋混凝土框架, 采用现浇钢筋混凝土屋面板, 跨度18m, 长度120m, 柱距为6m。屋面板板顶标高15.6m, 局部有出屋面天窗层, 该区域内还布置有1台桥式吊车。

项目始建于2013年, 至火灾发生尚未投入使用。火灾发生时, 受灾区域主体结构均已施工完毕, 区域内的防腐、防火涂装均已施工完毕。

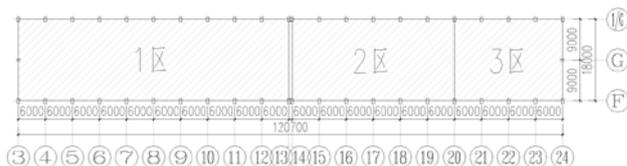


图2 受灾区域划分

从着火到扑灭明火约1.5h, 过火面积约1900m<sup>2</sup>。根据火灾的影响范围和房屋受损程度, 房屋质量检测报告将受灾区域划为3个分区, 分区示意如图所示: 1区受火灾影响较大, 2区为轻度灼伤, 3区主要受烟熏。

### 1.2 火灾后结构的受损情况

受灾区域的主要影响范围及最高温度为: 1区的最高温度约为800°~1000°, 2区的最高温度约为700°~900°, 3区的最高温度<200°。

火灾后1区的混凝土构件损伤情况分别如表所示。

### 1.3 过火后构件受损检测

根据《火灾后建筑结构鉴定标准》(CECS 252: 2009), 1区混凝土构件的初步鉴定评级为Ⅱb~Ⅲ级, 围护结构的初步鉴定评级为Ⅱb级; 2区混凝土构件的初步鉴定评级为Ⅱa~Ⅱb级, 围护结构的初步鉴定评级为Ⅱb级; 3区混凝土构件的初步鉴定评级为Ⅱa级, 围护结构的初步鉴定评级为Ⅱa级, 无鉴定评级为Ⅳ级构件。

Ⅱa级: 轻微或未直接遭受烧灼作用, 结构材

作者简介: 潘抒冰, 女, 工程师, 2008年毕业于天津大学土木工程专业, 现就职于航空工业规划总院飞机工程事业部。

火灾分区1区混凝土构件损伤情况表

构件位置	房屋损伤描述	
F/4轴柱	表面熏黑,牛腿处混凝土剥落	
F/6、(1/G)/6轴柱	箍筋外露	
F/7轴柱	混凝土剥落	
(1/G)/7轴柱	表面发黄	
(1/G)/8轴柱	表面发黄,局部混凝土剥落	
F/11轴柱	表面发黄,局部混凝土剥落,箍筋外露	
(1/G)/11轴柱	混凝土剥落,箍筋外露	
F~(1/G)/5轴、 F~(1/G)/7轴梁	表面发黄,混凝土剥落,箍筋外露	
F~(1/G)/6轴梁	表面发白,混凝土剥落,箍筋外露	
F~(1/G)/8轴、F~(1/G)/9、 F~(1/G)/10轴梁	表面熏黑	
板顶标高15.6m处 楼板	F~(1/G)/11~12轴、 G~(1/G)/6~7轴、 G~(1/G)/9~10轴、 F~G/11~13轴板	表面熏黑,混凝土剥落,钢筋外露
板顶标高19.1m处 天窗板	5~6/(1/F)~(0/G)轴	混凝土爆裂,钢筋露筋,总露筋面积约为2.1m <sup>2</sup> 、1.54m <sup>2</sup> 两处
	6~7/(1/F)~(0/G)轴	混凝土爆裂,钢筋露筋,总露筋面积约为2.32m <sup>2</sup>
	7~8/(1/F)~(0/G)轴	混凝土爆裂,钢筋露筋,总露筋面积约为0.27m <sup>2</sup>
	8~9/(1/F)~(0/G)轴	混凝土爆裂,钢筋露筋,总露筋面积约为0.96m <sup>2</sup> 、2.64m <sup>2</sup> 两处
	9~10/(1/F)~(0/G)轴	混凝土爆裂,钢筋露筋,总露筋面积约为5.62m <sup>2</sup> 、3.03m <sup>2</sup> 两处
	10~11/(1/F)~(0/G)轴	混凝土爆裂,钢筋露筋,总露筋面积约为10.94m <sup>2</sup> 、5.83m <sup>2</sup> 两处
11~12/(1/F)~(0/G)轴	混凝土爆裂,钢筋露筋,总露筋面积约为8.48m <sup>2</sup> 、6.99m <sup>2</sup> 两处	

料及结构性能未受或仅受轻微影响,可不采取措施或仅采取提高耐久性的措施。

Ⅱb级:轻度灼烧,未对结构材料及结构性能产生明显影响,尚不影响结构安全,应采取提高耐久性能或局部处理和外观修复措施;

Ⅲ级:中度烧灼尚未破坏,显著影响结构材料或结构性能,明显变形或开裂,对结构安全或正常使用产生不利影响,应采取加固或局部更换措施。



图3 火灾后各部位受损情况

《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252:2019)在Ⅱa、Ⅱb级评级标准中更加明确了对结构安全的影响程度要求,其余表述大致相同。

#### 1.4 混凝土、钢筋强度检测结果

根据现场调查及试验测试结果可知,混凝土强度和钢筋强度均有不同程度的损失,部分构件表面烧疏使得截面变小,承载力显著降低。为了解火灾对整体结构的影响,本文根据过火结构的实际受损状况,并结合实测混凝土强度和钢筋强度结果。根据《混凝土结构现场检测技术标准》GB/T50784-2013和《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010,采用PKPM-2010结构计算软件,对该受火后整体结构进行承载能力计算。

1区3-3/F~(1/G)轴区域受火灾影响较大,吊车严重变形、损坏,大部分梁、板存在混凝土爆裂、脱落、露筋现象,部分柱存在瓷砖脱落、混凝土脱落、露筋、墙面瓷砖大面积脱落,且火灾造成部分楼板和梁、柱表面受损厚度大于钢筋保护层厚度,因而构件中钢筋的黏接力必然有所降低,尤其部分楼板钢筋严重外露甚至架空,因此要保证该结构以后的使用安全,必须对受损构件进行补强处理。测试结果推定混凝土的强度值为30.9MPa,设计时按C30的混凝土强度等级考虑。

2区14-20/F~(1/G)轴区域为轻度烧灼,部分钢结构平台变形,部分梁、板存在混凝土爆裂、脱落、露筋现象,部分柱存在装饰层脱落、露筋现象。测试结果推定混凝土的强度值为29.8MPa,设计时按C30的混凝土强度等级考虑。

3区20-24/F~(1/G)轴区域主要受烟熏,少量梁、板、柱存在粉刷脱落、露筋现象。混凝土构件无裂缝等异常现象,测试结果推定混凝土的强度值为38.6MPa,设计时按C35的混凝土强度等级考虑。

损伤部位的钢筋力学性能仍能满足有关规范要求。本项目梁、柱采用HRB400级钢筋,《火灾后建筑结构鉴定标准》(CECS 252:2009)无HRB400级钢筋灾后折减的规定,参照标准附录G的条文说明,钢筋在高温冷却后其屈服点及抗拉强度与常温下相等,降低有限。为确保结构安全,对钢筋屈服强度按照附录G取0.85的折减系数。《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252:2019)附录G给出了HRB400级钢筋强度灾后折减的相关明确规定,0.85的折减系数也满足新版规范的要求。

## 2 结构承载力验算

根据《建筑抗震设计规范》附录J单层厂房横向平面排架地震作用效应调整:J.2.3:排架柱的剪力和弯矩应分别乘以相应的调整系数,除高低跨度交接处上柱以外的钢筋混凝土柱,其值可按表J.2.3-1采用。本项目为钢筋混凝土无檩屋盖,一端山墙,屋盖长度为60m,查表得调整系数取1.3。将以上计算的柱底力进行计算,现有灾后的柱配筋满足计算要求,可不进行加固,故柱子仅进行修复处理。

由于厂房使用要求的变化,由腐蚀性等级调整为只考虑自然环境影响,根据《混凝土结构设计规范》判定为环境类别一类。梁最大裂缝允许值由0.15mm调整为0.3mm,根据裂缝限值导算梁底受拉钢筋。梁截面尺寸为500mm×1600mm;跨中弯矩标准值为1459.6kN·m;  $F_{tk}=2.01\text{MPa}$ ;  $E_s=2.0\times 10^5\text{MPa}$ ;  $d_{eq}=25\text{mm}$ 。

(1)按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率:  $\rho_{te}=(A_s+A_p)/A_{te}=A_s/465000$ ,考虑翼缘作用。

(2)裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数:  $\psi=1.1-0.65f_{tk}/(\rho_{te}\sigma_s)=0.546$ 。

(3)按荷载标准组合或准永久组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度:  $w_{max}=\alpha cr\cdot\psi\cdot\sigma_s/E_s\cdot(1.9C_s+0.08d_{eq}/\rho_{te})\cdot 0.3=5.688/A_s\times(95+930000/A_s)$ 。设  $1/A_s=x$ ,解一元二次方程得  $A_s=5195\text{mm}^2$ 。

梁底实配受拉钢筋满足受力要求,可不加固,仅修复处理即可。

## 3 处理措施

### 3.1 柱处理措施

结合《建筑抗震设计规范》附录J对柱子内力的调整和pkpm的计算结果,对受灾后柱子进行修复处理措施。凿除柱表面受损混凝土,清理构件,在新旧混凝土界面涂刷结构界面胶,用灌浆料补齐构件截面,外用聚合物砂浆刮平。

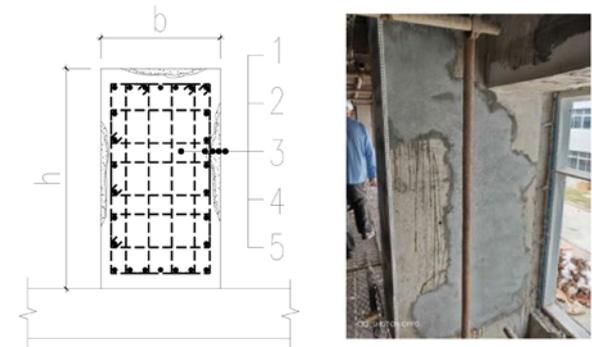
### 3.2 梁处理措施

综合考虑混凝土和钢筋强度降低,取消梁腐蚀性等级,对梁进行修复处理措施。凿除梁表面受损混凝土,清理构件,在新旧混凝土界面涂刷结构界面胶,用灌浆料补齐构件截面,外用聚合物砂浆刮平。

### 3.3 板处理措施

楼板厚度为130mm,尺寸较小,混凝土保护层厚度相对较小,又直接受到火焰冲击,热量不易逸散,其灼着温度较高,在火焰持续作用下,受损情况较为严重。根据不同区域板构件的损伤情况不同,采取相应的不同处理措施。对混凝土剥落,钢筋外露的板进行拆除并重新浇筑,面积约1500m<sup>2</sup>,剩余约900m<sup>2</sup>,根据实际情况进行修复。

为了保证新增板与原结构的整体性,拆板时



b—柱修复大样图

c—柱修复后

- 1.原结构无损砼
- 2.结构界面胶
- 3.灌浆料
- 4.聚合物砂浆刮平
- 5.建筑涂料

图4 柱修复

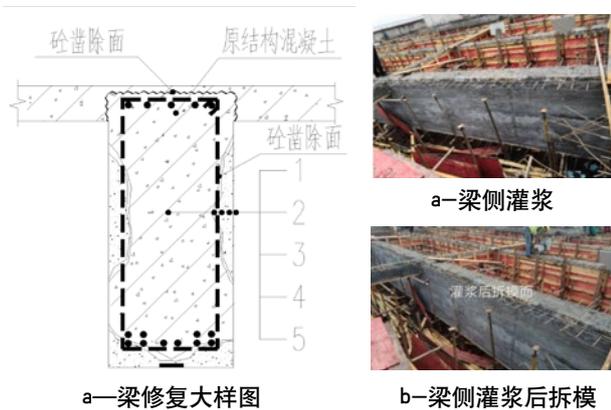
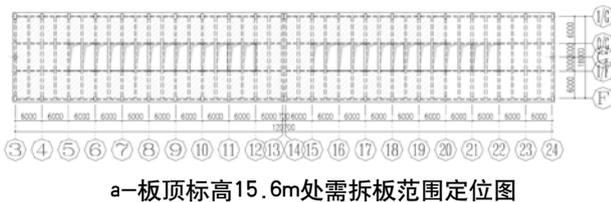
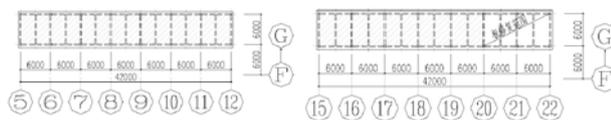


图5 梁修复



a-板顶标高15.6m处需拆板范围定位图



b-板顶标高19.1m处需拆板范围定位图 c-板顶标高19.1m处需拆板范围定位图

图6 板处理范围分区

原板钢筋梁边200mm长度保留，新增板钢筋与原板钢筋焊接。

### 3.4 其他处理措施

此外吊车梁、牛腿进行修复，吊车轨道及联接，重新更换，管道支架重新制作安装，对局部损坏的维护墙体先掏砌，然后重新粉刷。

## 4 施工注意事项

火灾后的主体结构修复施工是一项专业性、工艺性很强的工作，应由有相关施工资质、深化设计能力和火灾后修复工程施工经验的专业单位承担。修复施工前施工方应对受损主体结构进行现场复查。施工方应根据对受损主体结构复查的结果，结合修复设计施工图的要求，确认每个受损部位的修复要求是否适用。

## 5 结论

火灾损伤后现场资料收集、分析并建立技术档案。正确选择方案是进行有效的修复补强的先

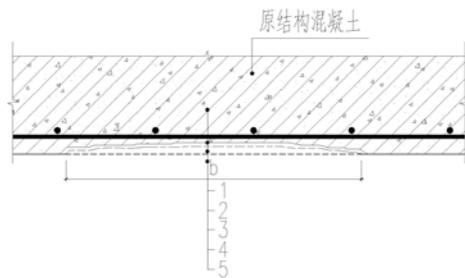


图7 板修复做法

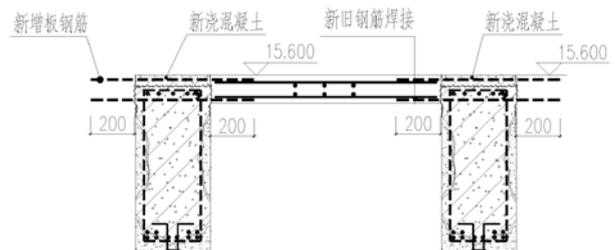


图8 拆板与梁交接处示意



a-板拆除后 b-新浇板

图9 板修复

决条件。施工的可操作性和质量保证是修复设计应关注的焦点。

火灾对结构造成的损伤是不均匀的，即使是同一构件的不同部位，受火损伤的程度也是不同的。本工程受损面积大，构件多，要对单个构件进具体检测和鉴定评级，工作量很大。后期的修复或加固设计要针对单个构件结合鉴定结果逐一计算分析，目前，火灾后的结构主要通过构造措施加以修复，最终使修复后的结构能够满足承载能力及耐久性能的要求。

本工程于2019年年中完成修复工作，修复效果良好。

### 参考文献

- [1] CECS252: 2009, 火灾后建筑结构鉴定标准[S], 北京: 中国计划出版社, 2009.

# 大型综合气候环境实验室的 结构设计研究

■ 裴永忠 王亮 覃杰 张虎 张广英 金来建 [结构]

**摘要:** 气候环境实验室是在室内模拟各种气候环境的一种特殊实验室,其结构荷载很大且分布复杂,局部结构要暴露于实验环境中。根据实验室地坪的使用环境和荷载作用特点,设计了一种专门针对大型气候环境实验室的地坪结构系统。进行极端温度条件下的混凝土试件冻融试验,分析不同混凝土配合比和添加剂在冻融循环下的抗冻性能。建立不同计算模型,对实验大厅结构进行抗震反应分析,考察主体结构—屋盖悬挂骨架耦联的地震反应及其动力相互作用,重点分析屋盖悬挂骨架对主体结构的影响;加设粘滞阻尼器,减小骨架与主体结构之间相对变形,降低大震下地震作用。基于结构-设备相互作用对多层框架附楼进行抗震分析,并与基于等效荷载的传统抗震设计方法进行比较。

**关键词:** 气候环境实验室;地坪结构;冻融循环;耐久性;悬挂运输骨架;耦合模型;减震

## 1 工程概况

气候环境实验室是在室内人工模拟自然中各种气候环境的特殊实验室,用以完成飞机、兵器、汽车、电力输变电系统等的气候环境实验<sup>[1]</sup>。某综合气候环境试验室由实验大厅及其附属用房组成,可以进行包括低温/高温环境(最低-55℃、最高+74℃)、湿/热环境(湿度从10%至90%)、淋雨环境、吹雨(风)、冻雨、降雪、太阳辐照以及各单项气候条件的组合条件试验。图1即为综合气候环境实验室效果图,图2为建筑结构平面布置图。

实验室呈品字形,分前后两个实验厅。前部实验大厅跨度76.5m,进深64m,后部实验小厅跨度31.2m,进深30m,屋盖下弦标高均为27m。大厅屋盖采用正交正放网架,厚度3.8m~6.8m,网格尺寸6.1×6m。屋盖大门边设反梁,反梁下弦采用型钢截面。网架节点为焊接球,支座采用球

铰支座。排架柱为双肢格构钢柱,主肢为H型钢截面,纵向柱间支撑采用防屈曲支撑。主厂房钢结构构件均采用Q345B钢。

气候环境实验室大厅由内舱板及地坪保温层形成一个封闭的保温隔热环境(图2(b)),各种实验将在这个封闭的空间进行。在实验大厅内部上空设计了一套钢骨架系统,由吊杆穿越保温层悬挂于屋盖结构之下,称之为“悬挂运输骨架”,用来吊挂轨道、风管及各种实验功能模块等。悬挂运输骨架和地坪上层板是暴露于实验环境的,而主体结构是由保温层与实验室大厅内部隔绝的,主体结构按常温情况设计。

设备附楼用来放置循环风、制冷、新风等设备和管线,采用钢筋混凝土框架—防屈曲支撑结构,主要柱网(10.8+13+13)m×12m。局部设地下室,二层为局部设备夹层,三层为开敞空间,屋盖采用钢网架结构,跨度36.8m。框架每边布置防屈曲支撑。附楼中间跨标高4.5m设置设备钢平台,通过橡胶隔震支座与柱牛腿连接。循环风设备主要布置在三层(11m标高),共5组,上部风管通过吊杆吊在网架下弦或放置在混凝土梁上。

作者简介:裴永忠,男,研究员,2009年毕业于清华大学结构工程专业,现就职于航空工业规划总院飞机工程事业部。

气候环境实验室大厅2015年3月完成施工图设计,气候环境实验室2018年10月竣工并投入运行,一年多来使用良好。



图1 气候环境实验室效果图

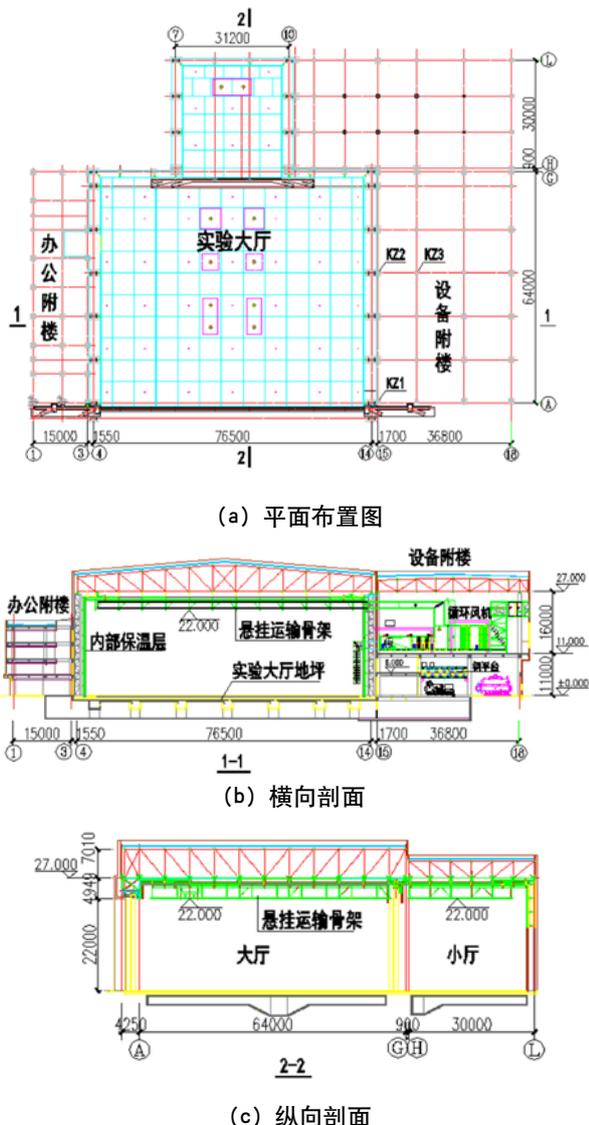


图2 气候环境实验室布置图

## 2 设计参数及结构特点

### 2.1 主要设计参数

结构设计使用年限为50年;实验室大厅建筑结构的安全等级为一级,附楼为二级;抗震设防烈度8度,设计基本地震加速度值 $0.2g$ ,设计地震分组第一组,III类场地;基本风压 $0.35kN/m^2$ ,地面粗糙度B类;基本雪压 $0.25kN/m^2$ 。

### 2.2 结构主要特点

特殊的工艺要求,气候环境实验室在结构方面主要具有以下特点:

(1) 结构荷载很大且分布复杂。实验大厅屋盖下弦的从上至下悬挂内舱板及骨架、运输骨架、管线等,荷载达 $1.80kN/m^2$ ,其中大部分荷载悬挂在距屋盖下弦 $2m\sim 5m$ 范围内,加上屋盖上弦荷载,屋盖的总荷载达 $2.60kN/m^2$ (不包括屋盖自重)。设备附楼布置大量设备和管线,合成楼面均布荷载达 $20kN/m^2$ ,其中循环风机高大,质量刚度分布不均匀。因此,用传统的直接以荷载形式作用于主体结构的计算模型能不能准确反映结构在地震作用下的真实受力,需要符合实际荷载和刚度分布的更精确模型验证。

(2) 实验室大厅地坪需要特殊设计。地坪直接暴露于实验环境之下,其设计是本工程的关键技术之一,其具有以下主要特点:

- 1) 需要有保温隔热性能;
- 2) 满足极端冻融和干湿交替环境下的耐久性要求;
- 3) 适应的剧烈高低温度变化;
- 4) 具有较大的承载能力。显然,一般工业厂房中的普通地坪做法不能满足上述要求的,无先例可循必须特殊设计。

(3) 特殊的屋盖悬挂钢骨架系统设计。悬挂运输骨架直接暴露大厅环境下,要适应剧烈温度变化;大部分管线和实验模块直接悬挂于钢骨架系统;使用中或地震作用下的晃动幅度限定于一定范围。悬挂钢骨架系统设计也无先例可循,是本工程的另一设计难点。

## 3 地坪结构设计

### 3.1 使用环境和荷载

#### 3.1.1 使用环境

根据实验室功能的要求和热工分析报告<sup>[3]</sup>,地

坪结构的使用环境要求如下:

(1) 根据热力学分析,在持续低温实验中上层混凝土板全部进入低温状态,但中间保温层能够保证下层混凝土板在常温状态下。

(2) 地坪上层板不但有冻融循环,而且经历干湿交替的过程。

(3) 不做盐雾等腐蚀性实验。

(4) 实验室最低使用温度 $-55^{\circ}\text{C}$ ,最高使用温度 $74^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 在 $-25^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 温度区间进行降雪、冻雨等实验。

(6) 环境温度低于 $-25^{\circ}\text{C}$  ( $-55^{\circ}\text{C} \sim -25^{\circ}\text{C}$ )的最大可能实验次数为4次/年。

### 3.1.2 主要荷载

实验室地坪主要的荷载包括可实验设备的轮压、运输车辆的轮压、各种实验设备放置的压力荷载,以及实验过程中实验件的固定和锚固产生的拉力。拉力较大装置专门设计基础。

综合气候环境实验室能满足大多说飞机机型的气候环境实验,中部宽度24m范围内按B747-400飞机空重的轮压计算,其他部位按10t牵引车轮压计算。这两种荷载可以包络其他荷载。

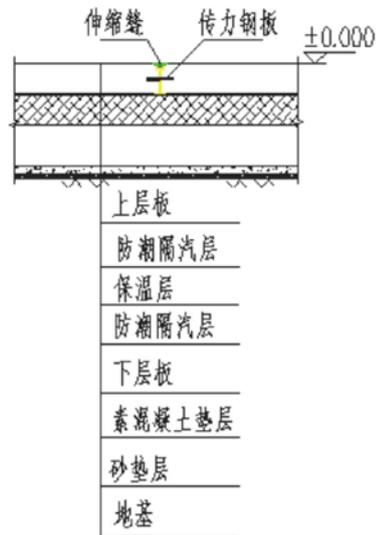
### 3.2 地坪结构做法

针对气候环境实验室,设计了一种专门的地坪结构系统。该系统由上至下由上层钢筋混凝土地坪板(简称上层地坪板)、上隔离层、中间保温层、下隔离层、下层钢筋混凝土地坪板(简称下层地坪板)、混凝土垫层以及细砂垫层等组成。中间保温层采用泡沫玻璃,泡沫玻璃导热系数小、强度高,性能稳定,造价相对低廉,满足地坪保温隔热、较高的承载力和耐久性要求,其厚度系根据热工计算确定。

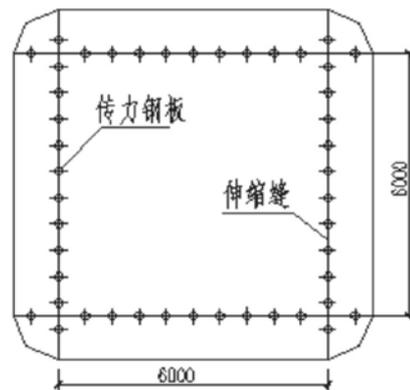
上层地坪板由 $6\text{m} \times 6\text{m}$ 或 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 的板块组成,板块之间设温度缝,适应剧烈冷热温度变化;根据荷载分布设计不同板厚,中部范围板厚300mm,其余区域厚250mm,下层地坪板均为400mm厚。伸缩缝上宽下窄,下部板缝宽度根据温度变化和板宽计算确定;缝边采用封边角钢和特殊加工的型钢;采用菱形传力钢板传递板块之间的剪力,能承受较大局部荷载且受力均匀;上部板缝稍宽,便于设置圆柱形密封橡胶棒和密封胶条进行密封。地坪板平面布置见图2(a),剖面及单块板如图3。

地坪的上层钢筋混凝土板设计使用年限30

年;下层混凝土板处在保温层以外,设计使用年限50年。本工程中的地坪耐久性设计主要针对上层地坪板。



(a) 地坪剖面



(b) 单块板布置

图3 气候环境实验室地坪

### 3.3 极端温度环境下的冻融试验

极端环境下混凝土的冻融试验比较了不同混凝土强度(C40和C50)、不同的养护条件(标准养护,自然养护)、掺加钢纤维混凝土与普通加气混凝土的对比。还对基于现行规范的快冻法(水冻水融)和极端气温环境下的非标准试验(气冻水融)两种试验条件进行对比。试验于2015年7月~2016年1月在中国飞机强度研究所和西安建筑科技大学进行。

#### 3.3.1 极端温度下的冻融循环

根据实验可能的工况需求并结合冻融试验条

件,设计了极端温度下的冻融循环试验。试验共进行120个冻融循环周期,每10个冻融循环为一个小循环,如图4所示。一个小循环中低温段试验件中心温度均降至 $-55^{\circ}\text{C}$ ,前9次试验将试验件中心温度升至 $20^{\circ}\text{C}$ ,此时对所有的试验件进行一次浇水,保证试验件的含水量,第10次循环试验件中心温度升至 $74^{\circ}\text{C}$ 。一个小循环结束后对每组试验件进行耐久性性能测试,测试项包括混凝土试件质量、相对动弹性模量、抗压强度、抗折强度等。试验件参数测试完毕后,将剩下的试块进行浸泡处理4天,充分吸收水分,再进行下个循环试验。

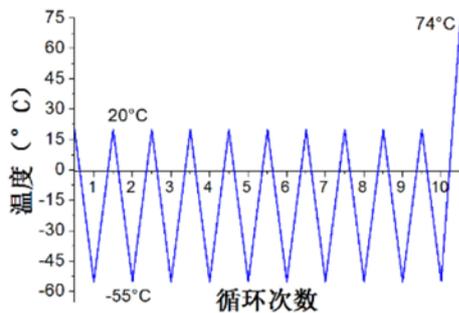


图4 极端温度环境下一个冻融循环周期

### 3.3.2 试验件

试件分为5组(表1),其中G1~G4为气冻组,G5为水冻组。标准养护系按《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)要求;自然养护是则在常温下进行,养护时间不少于14天。

### 3.3.3 试验结果

图5给出了G1~G4组试件的相对动弹性模量、质量损失率、强度损失率和抗折损失率随冻融循环次数的变化关系。冻融试验结果分析表明:

(1) 养护条件对混凝土的抗冻性能有更显著的影响。相同混凝土配比情况下,自然养护条件下试件(G3组)的耐久性低于标准养护下的试件

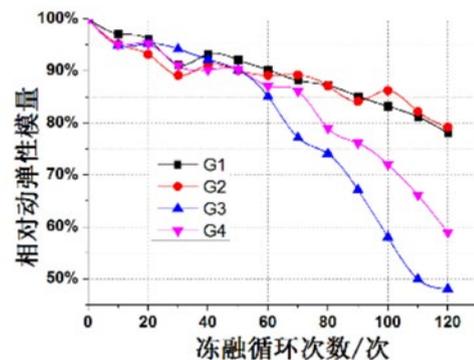
(G2组)。

(2) 添加钢纤维能够一定程度提高混凝土在冻融循环后的抗压和抗折性能。

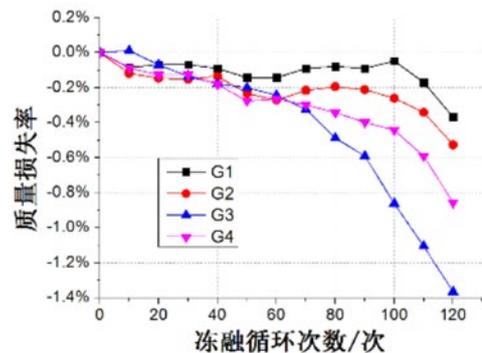
(3) 对于C40(G2组)和C50(G1组)两种标号下混凝土抗冻性能相差并不大。

### 3.3.4 基于试验结果的性能评价

据试验数据整理后,混凝土动弹性模量损失率如表2所示。表2冻融耐久年限是结合气候环境实验室地坪预计每年至多4次高低温的工况,以混凝土动弹性模量损失达到40%作为判别依据,以气冻气融试验冻融循环次数来推算的。按照现行规范,试验试件是标准养护下进行的,即按G2组试



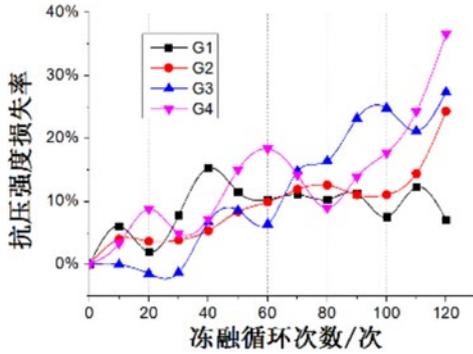
(a) 相对动弹性模量与冻融循环次数关系



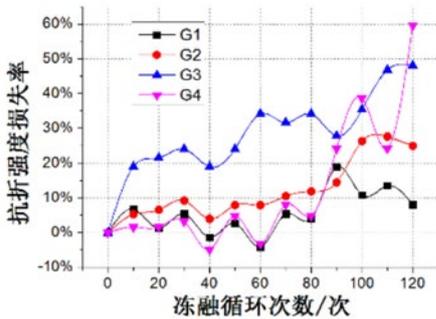
(b) 质量损失率与冻融循环次数关系

表1 试件信息表

组别	混凝土强度等级	钢纤维 $\text{kg}/\text{m}^3$	引气剂体积率	养护条件	长方体试件数量/个	长方体 /mm	正方体试件数量/个	正方体 /mm
G1	C50	78	4%	标准养护	40 (3)	$150 \times 150 \times 550$	40	$150 \times 150 \times 150$
G2	C40	78			40 (2)		40	
G3	C40	78		自然养护	40 (3)		40	
G4	C40	0		标准养护	40 (1)		40	
G5	C40	0		标准养护	40	$100 \times 100 \times 400$	40	$100 \times 100 \times 100$



(c) 抗压强度损失率与冻融循环次数关系



(d) 抗折强度损失率与冻融循环次数关系

图5 G1~G4组混凝土试件结果

件判定耐久性。可见，本次试验得到的试件预测耐久性使用年限 >> 30年，满足要求。

### 3.4 地坪结构计算

气候环境实验室地坪的做法类似于由上下混凝土板和中间保温层组成的夹芯板，但是与一般夹芯板受力不同，地坪上层板是由6m\*6m一块的板块组成，板块之间由传力钢板传递竖向荷载，计算分析更加复杂。

#### 3.4.1 有限元模型

实验室地坪的受力十分复杂，计算中做了简化。首先将上层混凝土板按板单元计算，板之间的传力钢板按只考虑剪切刚度的弹性连接，其单元仅能传递剪力，左右可滑动，保温层模拟为弹性支承，如图6 (a)，计算得到上层混凝土板的

内力和传力钢板的剪力；再将下层板作为放置在弹性地基上的板，将第一次计算得到的力作用于下层板上 (图6 (b))，计算得到下层混凝土板的内力。

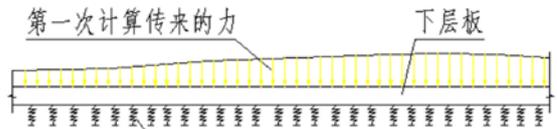
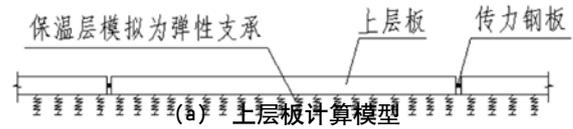


图6 地坪板计算模型

有限元分析中传力钢板只有一个方向的抗剪刚度，其抗剪刚度计算公式为：

$$SD_z = GA / \Delta \quad (1)$$

其中，G为剪切模量，A为受剪面积， $\Delta$ 为温度缝的宽度，设计中为10mm，但考虑到实际工作中有收缩工况，计算偏安全考虑两种情况， $\Delta = (10, 20) \text{ mm}$ 。

保温层中泡沫玻璃的弹性模量是重要的控制参数，计算中为了比较分析，分别取 $E_{cg} = 1000, 600, 300 \text{ MPa}$ 这3种情况，设计中按最严格要求的。地基为3:7灰土垫层，计算中基床系数取 $k = 80000 \text{ kN/m}^3$ 。

#### 3.4.2 结果分析

根据B747的轮压、轮距和地坪板板块布置，寻找荷载最不利分布<sup>[6]</sup>。计算比较不同弹性模量的保温材料、两种温度缝间距和混凝土板刚度 (C40和C20) 降低时上层地坪板和传力钢板的受力变化，C20混凝土是考虑C40混凝土由于耐久性导致强度降低50%时的一种近似。

图7和图8给出了不同计算模型下上层板和传力钢板的受力，可以看到：

(1) 飞机轮压靠近板角时，上层板和传力钢板受力最大；

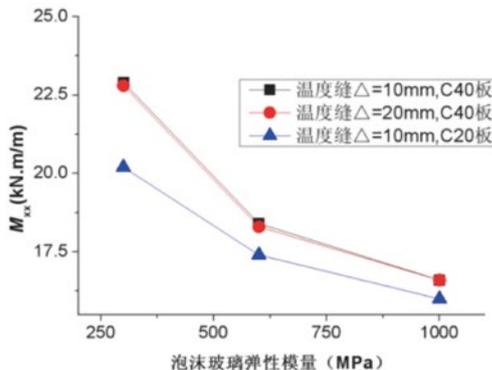
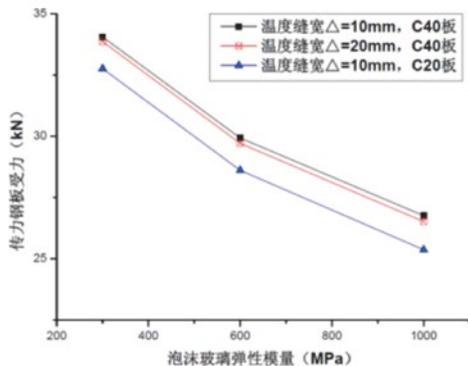
(2) 上层板和传力钢板受力随泡沫玻璃弹性模量增大而减小；

(3) 温度缝宽度对受力影响不大；

表2 混凝土构件冻融耐久性年限评估

名称	动弹性模量损失率/%	冻融耐久年限/a
G1	0.22	> 30
G2	0.21	> 30
G3	0.52	≈ 25
G4	0.41	≈ 30

(4) 混凝土板性能下降时, 上层板和传力钢板受力会减小, 但幅度不大, 不到5%。



### 3.4.3 裂缝分析

上层地坪板设计中按现行《混凝土结构设计规范》中二级裂缝控制, C40混凝土,  $f_{tk}=2.39N/mm^2$ 。

气候实验室的地坪板应力, 不但要考虑荷载作用下的受弯应力, 还要计算板的上下表面温差导致的温度作用应力。对于标准组合, 有:

$$\sigma_{ck} = \sigma_p + \psi_c \sigma_t \quad (2)$$

式中  $\sigma_{ck}$  为标准组合应力,  $\sigma_p$  为荷载应力,  $\sigma_t$  为温度应力,  $\psi_c$  为组合系数, 取0.6。考虑到上层地坪板的做法, 未计入收缩摩阻应力。

竖向荷载按空载的飞机轮压, 考虑最不利的轮压分布, 有限元分析得到的板边最大弯矩  $-20.3kN \cdot m$ , 板中弯矩  $13.1kN \cdot m$ , 则对板边有:

$$\sigma_p = \frac{6M_c}{h^2} \times 10^3 = \frac{6 \times 20.3}{300^2} \times 10^3 = 1.35N/mm^2$$

温度应力的计算公式参考文献<sup>[9]</sup>, 式中  $\phi$  为松弛系数,  $\phi=2$ 。根据热工分析报告<sup>[3]</sup>, 实验中降温

过程中板顶和板底之间最大计算温差为  $9.8^\circ C$ , 取  $\Delta t=10^\circ C$ , 有:

$$\sigma_t = \frac{E\alpha t}{1+\phi} = \frac{3.25 \times 10^4 \times 1.0 \times 10^{-5} \times 10}{1+2} = 1.08N/mm^2$$

则有:

$$\sigma_{ck} = 1.35 + 0.6 \times 1.08 = 2.00N/mm^2 < f_{tk} = 2.39N/mm^2$$

满足要求。

## 3.5 耐久性设计

### 3.5.1 混凝土结构的环境类别

根据地坪使用环境和做法, 对应现行《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010), 地坪结构混凝土结构的环境类别, 上层混凝土板按三a级, 下层混凝土板按二b级。实际设计中的控制参数如表3, 比规范要求的指标偏严格。

表3 设计中的耐久性基本要求

位置	环境等级	最大水胶比	强度等级	最大氯离子含量 (%)	最大碱含量 (kg/m <sup>3</sup> )	抗渗等级	最小保护层厚度 (mm)
上层板	三a	0.40	C40	0.15	3.0	-	30
下层板	二b	0.45	C35	0.15		P6	20

### 3.5.2 排水、防水措施

大厅地坪的排水孔每隔一块板设置一个, 共42处; 排水孔位于板块中心, 板上表面向排水点找坡, 坡度0.5%。多点排水保证每处的实验落水都能快速排走, 避免积水。伸缩缝设计中已经考虑了耐久性问题, 缝的防水由两道密封胶保证, 密封胶是在环境试验箱经过极端温度循环试验检验的。

### 3.5.3 施工控制措施

#### (1) 混凝土材料质量控制

1) 选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。  
2) 粗骨料采用碎石, 颗粒级配宜满足连续级配最大密度原则, 最大粒径不宜超过20mm; 软弱颗粒含量不宜大于5%, 含泥量不宜大于1%; 坚固性5次循环试验质量损失不大于3%, 直接抗冻试验不小于25次; 骨料与水泥有良好的黏聚性。

3) 砂采用中砂, 细度模数在2.0~3.0之间, 坚固性采用硫酸钠溶液检验, 试件满足5次循环试验质量损失不大于8%, 含泥量不大于2%, 不得含有黏土块, 云母含量不大于1%。

#### (2) 控制入模时间。在夏季不应超过气温和

28℃，负温下不得低于12℃。当周围大气温度低于养护中混凝土表面温度20℃时，混凝土表面必须保温覆盖以降低降温速率。如在夏天浇筑，应避免阳光直射模板和新浇混凝土。

(3) 控制养护时间。根据表4确定混凝土湿养护时间。

表4 混凝土湿养护时间

50%<相对湿度<75%，无风，无阳光直射		相对湿度<50%，有风或阳光直射	
日平均气温(℃)	湿养护时间(天)	日平均气温(℃)	湿养护时间(天)
5	7	5	14
10	5	10	10
≥20	3	≥20	7

(4) 正式施工前进行局部浇筑试验。

正式施工前，先进行样块施工，用以综合检验施工可行性，预先发现问题。样块共9块，每块3m×3m，完全按照地坪设计做法，混凝土材料配合比采用前面试验中G2组的配合比。

在样块混凝土浇筑过程中，发现有部分钢纤维在地坪表面露头，即使降低钢纤维含量，仍无法完全避免钢纤维露头的施工问题。实际上层地坪板块很多，每板块均有小的排水坡度，浇筑时钢纤维露头问题更不易解决。露头的钢纤维在地坪表面形成锈蚀斑痕，会形成将来混凝土劣化和内部钢筋锈蚀的诱导点，对地坪耐久性是不利的。之前试验数据也表明，不添加钢纤维的混凝土(G4组)耐久性略低于添加钢纤维的混凝土，但也能基本满足30年的使用寿命，满足设计目标，施工却更加可靠，因此最终实施的混凝土中并没有添加钢纤维，但加密了上层地坪板的配筋。

## 4 考虑悬挂运输骨架耦合作用的实验室大厅结构设计

### 4.1 悬挂运输骨架

#### 4.1.1 悬挂骨架设计

图9为屋盖悬挂结构详图，从上至下，包括内舱板骨架、内舱板、喷淋系统、悬挂运输骨架、风管、轨道等。悬挂骨架是由吊杆直接悬挂于屋盖，吊杆直径50mm的镀锌钢棒，穿越顶部的保温层内舱板。悬挂骨架由两向正交的H型钢组成(图

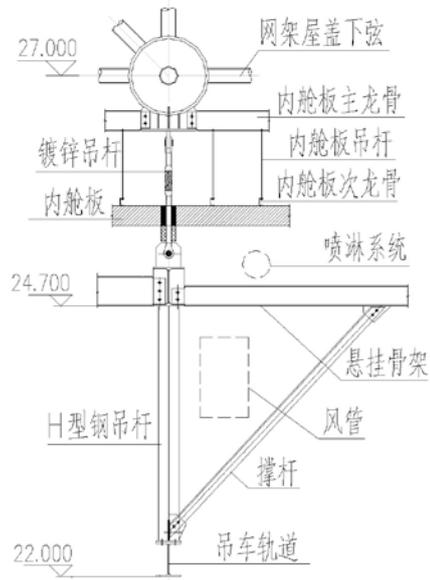


图9 上部运输骨架详图

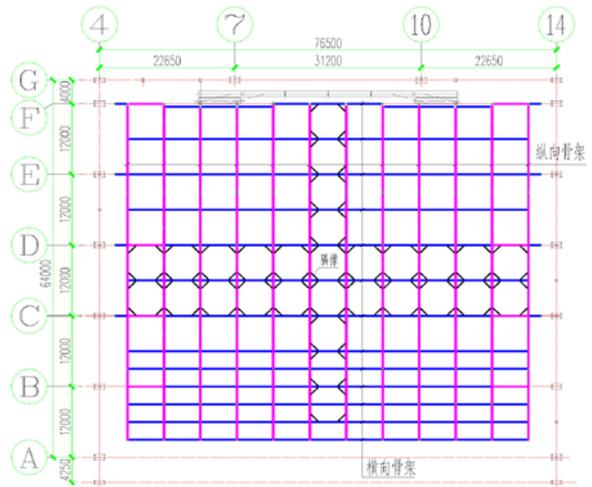


图10 24.7m标高处运输骨架平面图

10)，梁底标高24.7m，局部设置隅撑，保证平面内的几何稳定，温度作用下又不产生过大的内力。悬挂骨架下设H型钢吊杆，悬挂纵向的吊车轨道，轨道底标高22m，H型钢吊杆设斜撑，保证轨道的稳定。消防喷淋管道、暖通风管分别设置于运输骨架上、下部空间之内。悬挂运输骨架均采用E级钢。

悬挂运输骨架直接暴露于实验大厅的各种实验环境之中，结构设计中需满足以下要求。

(1) 适应升、降温的剧烈温度变化，骨架允许水平方向变形，减少的温度应力；

(2) 在实验设备吊挂、设备运行等外部激震作用下,控制其振动幅度,避免影响使用;

(3) 在温度、使用及多遇地震作用下,悬挂运输骨架的变形应与内舱板协调,保证建筑整体完好。

#### 4.1.2 主要的荷载和作用

特殊的使用功能,导致实验大厅的荷载很大。屋盖上弦的屋面恒荷载(不含网架自重)为 $0.7\text{kN}/\text{m}^2$ ,包括屋面做法和悬挂于上弦的管线。下弦的荷载依次从上至下包括内舱板骨架、内舱板、喷淋系统、悬挂运输骨架、风管、轨道等,下弦恒荷载为 $1.8\text{kN}/\text{m}^2$ ,其中悬挂运输骨架、轨道及其吊挂管线的荷载约为 $1.45\text{kN}/\text{m}^2$ 。这样,在仅考虑恒荷载的情况下,计算得到的悬挂运输骨架与主体结构屋盖的质量比约为70%。

模拟各种气候环境的模块挂于运输轨道,每种工况荷载和位置并不相同,设计中考虑了不同工况。计算整体指标时偏安全取均布荷载 $0.5\text{kN}/\text{m}^2$ 。主体结构是由保温层与实验室大厅内部隔绝的,可按建设地区的温差取值,实际设计中,偏安全取 $\pm 40^\circ\text{C}$ 。悬挂运输骨架位于大厅内部,实验温度高温 $+74^\circ\text{C}$ ,低温 $-55^\circ\text{C}$ 。

#### 4.1.3 悬挂骨架的减震控制

为适应实验中剧烈温度变化,悬挂运输骨架通过吊杆悬挂于屋盖之下,水平方向没有设置侧向约束。为避免使用中实验设备吊挂或运行等外部激励作用下可能产生晃动,影响使用。同时防止地震作用下,悬挂运输骨架过大晃动对主体结构及内舱板破坏,设置了阻尼器。选用速度相关型的粘滞阻尼器。静载作用下,阻尼器自身不提供额外刚度,保证骨架在温度变化下自由变形;在动荷载作用下,阻尼器输出阻尼,消耗能量,降低结构的动力反应。

不同水准地震作用下,设定不同减震控制目标:

(1) 小震下,悬挂运输骨架与主体结构基本同步;

(2) 中震下,悬挂运输骨架与主体结构相对位移控制在预留范围内;

(3) 大震下,悬挂运输骨架不对主体结构造成破坏。

粘滞阻尼器的计算模型如式(1):

$$F = C v^\alpha \quad (1)$$

式中C阻尼系数, $\alpha$ 为速度指数,F为输出力。根据参数分析,阻尼器的主要参数见表5,阻

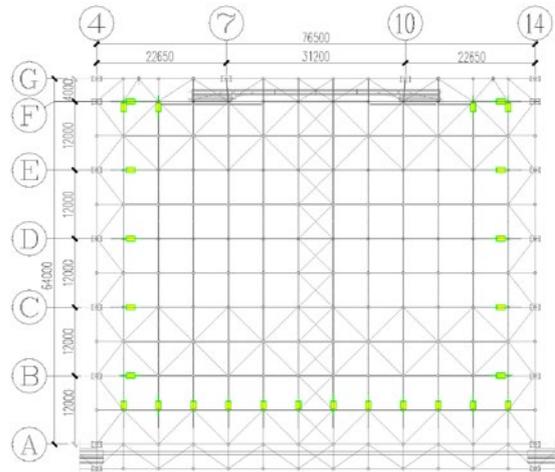


图11 阻尼器平面布置

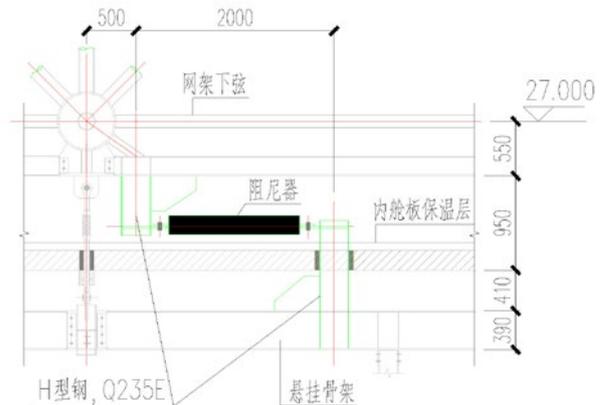


图12 阻尼器布置详图

尼器平面布置见图17,为便于维护和降低造价,阻尼器是放在保温层外面的常温环境下,其构造如图18。

表5 粘滞型阻尼器规格表

编号	输出力F (kN)	阻尼系数C ((kN.s/m)	速度指数 $\alpha$	允许变形量 (mm)
ZNQ1	150	100	0.3	$\pm 250$

## 4.2 计算模型

建立了3种计算模型进行分析。

(1) 将悬挂骨架以及其他悬挂物作为荷载直接作用于屋盖下弦,即为传统的计算模型,定义为等效荷载模型;

(2) 将悬挂运输骨架作为结构构件建于计算模型中,与主体结构共同计算分析,悬挂管线等按实际作用位置施加,考虑阻尼器,定义为考虑减震的耦合模型。

(3) 与耦合模型一样, 但为了比较分析, 不考虑阻尼器, 定义为自由悬挂的耦合模型。为更好的对比空间作用的影响, 对应每一种模型, 建立平面和空间模型。

表6 不同计算模型

模型	结构力学模型
等效荷载模型	
考虑减震的耦合模型	
自由悬挂的耦合模型	

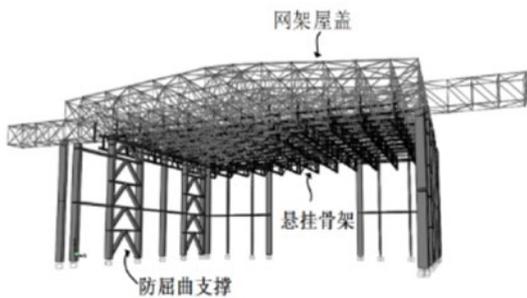


图13 耦合的整体模型

### 4.3 计算结果分析

#### 4.3.1 结构动力特性

粘滞阻尼器只提供附加阻尼, 不提供附加刚

度, 不改变结构的自振周期。表7给出了等效荷载模型与耦合模型动力特性。

平面模型的计算结果可见, 耦合模型中第一阶振型为悬挂结构的平动, 主体结构的第一阶振型出现在第二阶, 其周期远小于等效荷载模型计算得到自振周期。可见因悬挂结构连接吊杆侧向刚度小, 耦合作用并不明显。等效荷载模型中, 屋盖质量 (M) 与骨架质量 (m) 重合, 主体结构自振周期可以近似认为  $T=2\pi\sqrt{(M+m)/K}$ 。耦合模型中, 屋盖质量与悬挂质量不重合, 可近似作为两个子系统。此时, 主体结构自振周期可近似认为  $T\approx 2\pi\sqrt{M/K}$ , 而吊杆刚度小, 单自由度的悬挂结构如按单摆考虑, 自振周期可近似认为  $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 。注意到悬挂结构与主体结构振动是相反的, 具有减震的效果。

空间模型中由于结构的空间效应, 表现出更复杂的模态。耦合模型中前5阶振型均为悬挂结构的振动, 有平动还有扭转及局部振型, 以主体结构振动的模态出现的更晚, 在第6阶 (横向) 和12阶 (纵向)。

#### 4.3.2 屋盖及悬挂骨架

限于篇幅, 本文地震输出采用1987年美国El Centro地震加速度记录, 峰值加速度为0.36g, 按照我国现行《建筑抗震设计规范》采用的地面峰值加速度 (PGA) 作为调幅指标, 竖向地震作用按水平地震的65%。等效荷载模型的罕遇地震下弹塑性时程分析表明<sup>[11]</sup>, 仅有柱间支撑和局部极少网架杆件进入塑性, 故以下的各水准地震下的分析均为弹性时程分析。

##### (1) 悬挂骨架与主体结构的变形差

设置阻尼器的主要目的就是控制悬挂骨架与屋盖结构之间的相对变形, 防止晃动过大造成次生破坏。表8和图14~17的结果表明, 阻尼器的设置对悬挂骨架在地震作用的晃动具有较好的控

表7 不同计算模型动力特性

等效模型	阶数	周期	振型描述	耦合模型	阶数	周期	振型描述
单榀模型	1	2.307	主体结构X向平动	单榀模型	1	4.244	悬吊骨架X向平动
	2	0.811	主体结构竖向振动		2	1.357	主体结构X向平动
	3	0.455	二阶竖向振动		3	0.810	主体结构竖向振动
整体模型	1	2.091	主体结构X向平动	整体模型	1	3.334	悬吊骨架X向平动
	2	1.308	主体结构Y向平动		2	2.471	悬吊骨架X向扭转
	3	1.283	主体结构X向扭转		3	1.976	悬吊骨架Y向平动
	4	0.771	主体结构Y向扭转		4	1.807	悬吊骨架Y向扭转
	5	0.726	主体结构竖向振动		6	1.407	主体结构X向平动
	6	0.494	主体结构竖向振动		12	0.844	主体结构Y向平动

制。还可发现，在自由情况下，悬挂结构与主体结构变形并不同步，是相反的，显然，这样虽然具有减震效果，却因相对晃动过大，损坏保温层及管线等附属结构，是不允许的。

表8 空间模型下悬挂骨架与主体结构的最大变形差 (mm)

模型	无减震	减震
小震	59.2	15.3
中震	168.8	70.8
大震	337.3	133.9

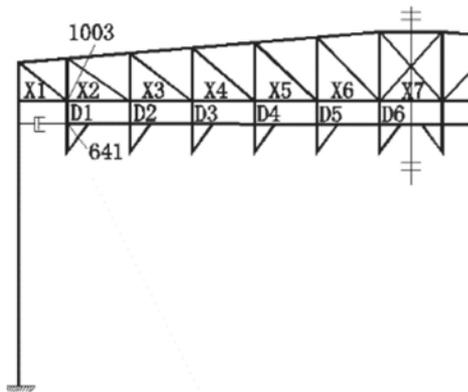


图14 节点和杆件编号

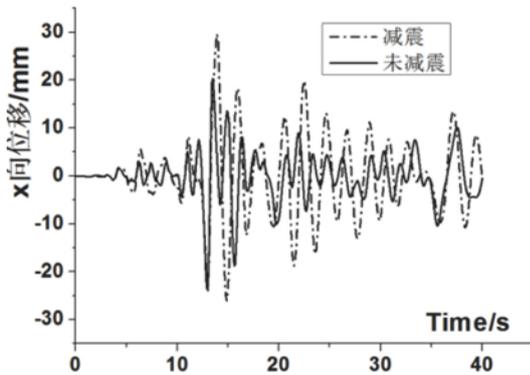


图15 节点641的位移时程

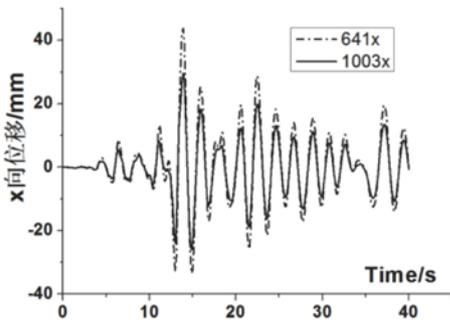


图16 加设阻尼器后两节点的位移时程

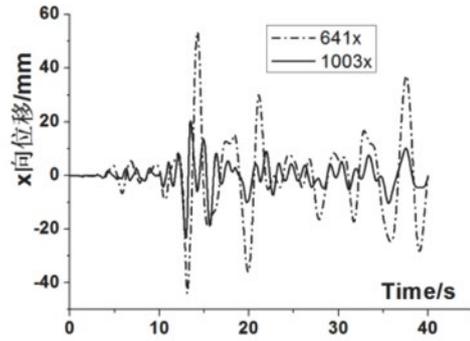


图17 未设阻尼器时两节点的位移时程

(2) 悬挂吊杆的内力

图18为多遇地震作用下各个吊杆的内力。计算结构表明，水平地震作用对吊杆内力影响极小，吊杆的内力主要是由竖向地震作用引起的，最大在跨中，然后逐渐减小。阻尼器对吊杆内力几乎没有影响。多遇地震作用下跨中吊杆的最大内力为5.14kN，静载下吊杆拉力为67kN，最大动静比 $\xi=0.08$ 。

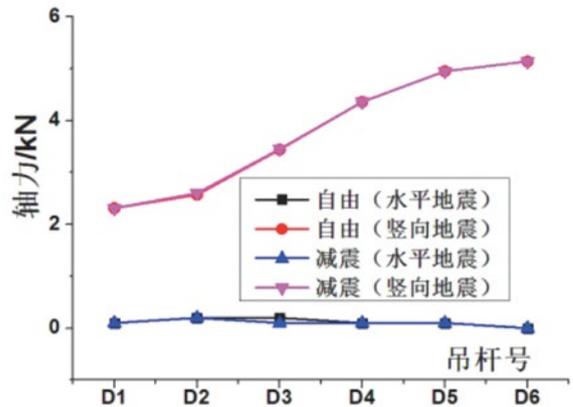


图18 多遇地震作用下吊杆内力的比较

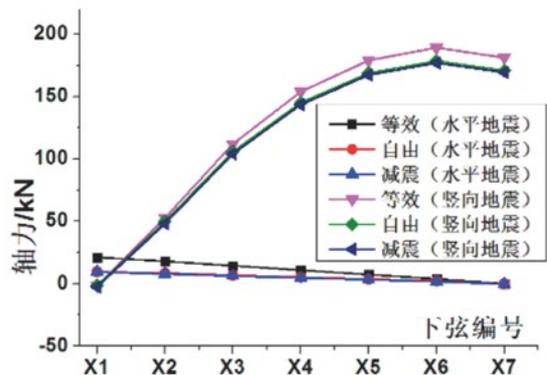


图19 多遇地震作用下下弦内力的比较

### (3) 网架的内力

主要分析对应支承柱处网架下弦杆在地震作用下的表现。图19为多遇地震作用下各个下弦杆的内力。对于大跨度屋盖，水平地震作用主要影响支座附近杆件，竖向地震作用则对跨中弦杆影响更大。竖向地震作用下弦杆最大内力189.3kN（按等效荷载模型），最大动静比 $\xi=0.10$ 。吊挂骨架对下弦杆最大内力有所降低，减低幅度较小，约5%。阻尼器对网架内力影响很小。

#### 4.3.3 柱顶位移和柱底弯矩

表10和表11给出了不同模型下计算得到的跨度方向柱顶侧移和柱顶弯矩。结果表明，等效荷载模型将悬挂骨架重量直接施加于屋盖，柱顶位移、柱底反力都是最大的。对于自由悬挂的耦合模型，悬挂骨架类似单摆式TMD（调谐质量阻尼器），降低了整体结构动力反应。注意到，平面模型的降低幅度稍大于空间模型，但不同水准下降低的幅度基本上是一样的。

表9 不同模型柱顶位移 (mm)

模型		等效荷载	自由悬挂	减震
平面模型	小震	42.2	22.6 (53.7%)	34.8 (82.5%)
	中震	120.3	64.6 (53.7%)	81.7 (67.9%)
	大震	235.3	129.0 (54.8%)	152.70 (64.9%)
空间模型	小震	38.9	25.8(66.3%)	29.1(74.8%)
	中震	111.0	73.5(66.2%)	70.2(63.2%)
	大震	221.7	146.9(66.3%)	138.2(62.3%)

表10 不同模型柱底弯矩 (kN.m)

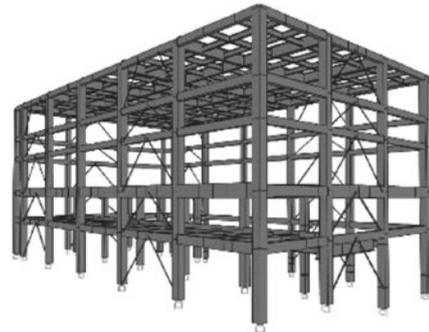
模型		等效荷载	自由悬挂	减震
平面模型	小震	1268.0	680.9 (53.7%)	1070.9 (84.5%)
	中震	3279.4	1941.9 (59.2%)	2511.1 (76.6%)
	大震	7076.7	3880.4 (54.8%)	4676.1(66.1%)
空间模型	小震	1179.0	783.3(66.4%)	894.1(75.9%)
	中震	3362.6	2234.0(66.4%)	2145.3(63.8%)
	大震	6719.2	4463.9(66.5%)	4174.6(62.1%)

对于减震的耦合模型，小震作用下，阻尼器控制上部悬挂的变形，悬挂结构荷载近于同步参与地震反应，因而结果更接近等效荷载模型。随着地震水平增加，主附结构间的相对变形增大，耦合程度降低，同时，阻尼器输出阻尼加大，主体结构位移和反力较等效模型计算结果占比减少，大震时接近于无减震的模型。

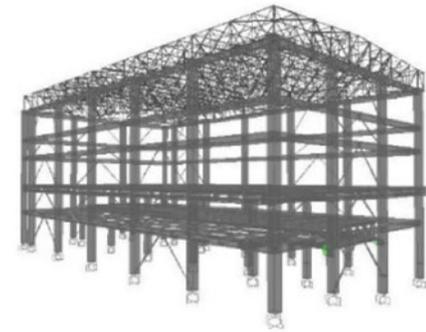
## 5 考虑设备耦合的附楼抗震分析

### 5.1 计算模型

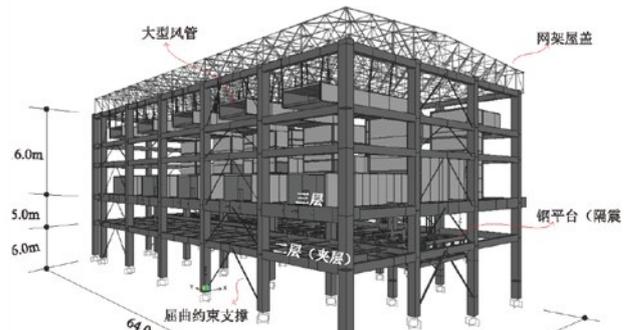
设备附楼布置大量设备和管线，楼面荷载很大，其中循环风机高大，质量刚度分布不均匀。设计中采用PKPM之SATWE计算，模型做了一定简化，采用钢梁模拟屋盖网架和4.5m标高的钢平台，为简化设计模型。为了慎重，补充建立了两种更精确的计算模型，采用SAP2000进行分析。一是加入实际的钢网架和钢平台的模型，设备和管线等均作为荷载直接作用于相应楼层或屋盖，定义为等效荷载模型；二是将主要设备和管线作为计算模型一部分，与主体结构共同计算分析，定义为结构-设备耦合模型。



(a) 简化设计模型



(b) 等效荷载模型



(b) 结构-设备耦合模型

图20 3种计算模型

### (1) 等效荷载模型

等效荷载模型中,按实际布置和截面输入屋盖钢网架和钢平台。钢平台通过直径为400mm的铅芯橡胶隔震支座与柱牛腿连接,支座水平等效刚度1.311kN/mm,水平等效阻尼比28.5%,屈服后刚度0.723kN/mm,屈服力40.2kN。设备和管线等均作为荷载直接作用于相应楼层或屋盖,与设计模型一致。

### (2) 结构-设备耦合模型

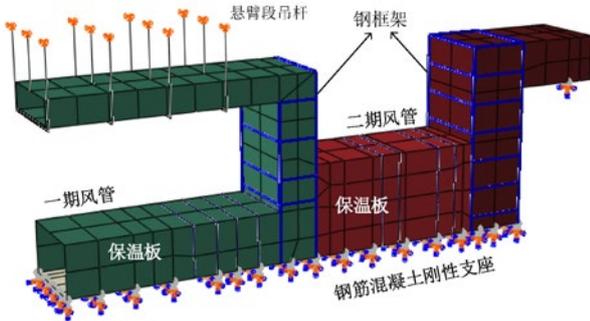


图21 循环风机的外形和边界条件

三层楼面上放置的循环风机由一期和二期两部分组成(图21)。风机结构主要由厚200mm的保温板和加强用的钢框架组成,其主体通过支墩支承于楼板之上,一期上部风管悬臂段通过吊架悬吊于网架结构;二期上部风管悬臂段支承于框架梁上。风机内部设有换热器、风阀、导流片等功能元件,一期和二期内还分别设置有风机。在有限元模型中以刚性竖杆支撑的集中质量质点模拟风机的影响。最终的结构-设备耦合分析模型如下。

#### (1) 循环风机和风管保温板以

壳单元模拟。采用正交异性材料,材料参数为 $G_{12}=21.8\text{MPa}$ , $E_1=20.6\text{MPa}$ , $E_2=105.6\text{MPa}$ , $\nu_{12}=0.2$ 。

(2) 风机、换热器、风阀、导流片等功能件只输入质量,不考虑刚度。

(3) 管道按实际截面建模,管线支座采用线性连接模拟。

(4) 吊杆按实际杆件建立模型。

(5) 楼面活荷载仍按 $5\text{kN/m}^2$ 。

### 5.2 动力特性

表11系不同模型下计算得到的结构动力特

性。通过比较可以发现,结构模型越精细,局部振型反应越充分。耦合模型中,循环风设备一期悬臂段吊挂于屋盖,故振动明显,但与楼板位置接近部分局部振动并不明显;钢平台采用了减震支座,其振型先于主体结构振型,简化模型则没有反映出这一情况。应该注意到,3种计算模型的整体振型和周期相差并不大,可见设备对主体结构的动力特性影响比较并不大。

### 5.3 反应谱分析

3种模型的基底剪力如图22。耦合模型计算得到的基底剪力最小,与简化的设计模型相比,X向降低16.3%,Y向降低9.1%,可见,设备的局部振动降低了主体结构的整体地震力。

分别选取一层及三层的角柱(KZ1)、边柱(KZ2)、中柱(KZ3),对比不同模型在地震作用下的剪力及弯矩,由表中可知,底层柱的规律与基底剪力是一致的,设计模型最大,耦合模型最小。但是三层柱中,设计简化模型柱底偏小,而等效模型和耦合模型则基本一致,用交叉梁模拟网架还是有较大的误差。可见进行多模型比较是必要的。

表11 不同模型的动力特性(周期/s)

简化设计模型			等效荷载模型			耦合模型		
振型	周期	振型描述	振型	周期	振型描述	振型	周期	振型描述
1	1.27s	整体X向平动	1	1.724	钢平台Y向平动	1	1.574	一期悬臂段y向平动
2	1.140s	钢平台Y向平动	2	1.706	钢平台X向平动	2	1.550	钢平台Y向平动
3	0.97s	整体Y向平动	4	1.312	整体X向平动	3	1.494	钢平台X向平动
4	0.82s	屋盖竖向振动	6	0.963	整体Y向平动	8	1.305	整体X向平动
5	0.81s	整体扭转	7	0.881	整体扭转	16	0.962	整体Y向平动
						18	0.880	整体扭转

三种模型基底剪力

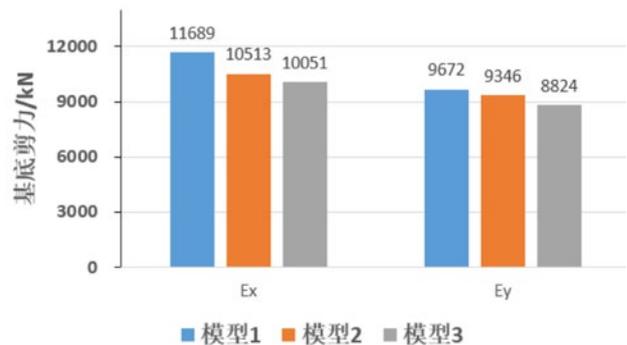


图22 3种模型基底剪力

表12 不同位置柱的地震力

地震方向	柱位置	简化设计模型		等效荷载模型		耦合模型	
		V/kN	M/kN.m	V/kN	M/kN.m	V/kN	M/kN.m
Ex	KZ1-1	549	2378	503	2211	479	2100
	KZ2-1	466	1909	423	1742	399	1644
	KZ3-1	406	1654	375	1521	372	1466
	KZ1-3	56	286	63	346	69	358
	KZ2-3	131	1754	133	1800	130	1754
Ey	KZ1-1	302	1306	294	1274	278	1202
	KZ2-1	355	1419	345	1382	326	1304
	KZ3-1	498	1717	482	1664	452	1563
	KZ1-3	80	390	119	615	115	593
	KZ3-3	142	612	202	908	195	877

## 6 主要结论

综合气候环境实验室是我国第一个大型综合气候环境实验室，目前已经建成投入使用。在设计过程中，实现了很多技术突破，产生了多项自主创新的成果。结构设计方面，其创新性主要表现在以下几个方面。

根据大型气候环境实验室地坪的使用环境特点和主要荷载，设计了一种专门的地坪结构系统，满足实验功能要求。这种地坪系统在国内属首次。

针对本工程中气候环境实验室的地坪结构系统，给出了一种适用的结构计算方法。

针对气候环境实验室的极端温度环境下的进行冻融试验，试验结果不但为气候实验室地坪耐久性设计提供了技术支撑，而且填补相应领域的研究空白。

设计一种用于气候环境实验室的屋盖悬挂骨架系统，给出屋盖悬挂骨架的减震控制方法。该骨架设计无先例可循，不但完成气候环境实验室项目设计，而且为大跨度屋盖中悬吊系统设计提供一种新思路。

实验大厅结构设计中建立了传统的等效荷载模型、分别考虑减震和不减震的悬挂骨架—主体结构耦合模型等3种计算模型进行分析，详细分析了主体结构和悬挂系统的受力以及悬挂系统对主体结构的影响，在国内大跨度结构的实际工程设计中尚属首次，其成果为类似工程的分析提供宝贵经验。

基于结构—设备相互作用对多层框架结构进

行抗震分析，并与基于等效荷载的传统抗震设计方法进行比较，设备附楼结构设计更加安全合理。

### 参考文献

[1] 刘海燕, 马建军, 张惠. 大型气候环境实验室空气处理系统方案探讨[J]. 装备环境工程, 11(4), 2014:107-113  
 [2] 张国东. 冷库设计及实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013

[3] 某气候试验室室内地坪及系留环区域温度分布及热流密度的研究报告[R]. 北京: 北京工业大学, 2017年11月

[4]. GB/T 50082-2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009

[5] 某气候环境试验室地坪试验研究[R]. 西安: 中国飞机强度研究所, 2016年05月

[6] 裴永忠. 气候环境试验室复杂地坪结构的计算分析, 建筑结构, Vol.49(S1), 2019

[7] 李金玉. 冻融环境下混凝土结构的耐久性设计与施工. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002

[8] 冻融循环下大型气候试验室地坪的设计与试验研究[R]. 北京: 中国航空规划设计研究总院有限公司, 2016年11月

[9] 中国工程建设标准化协会标准, 纤维混凝土结构技术规程(CECS 38:2004), 北京: 中国计划出版社, 2004

[10] 李爱群. 工程结构减振控制. 北京: 机械工业出版社, 2013.

[11] 大型气候环境实验室上部运输系统减震控制研究[R]. 北京: 中国航空规划设计研究总院有限公司, 2017

[12] 裴永忠, 王亮. 考虑悬挂骨架耦合作用的大跨度结构抗震分析, 第十七届空间结构学术会议论文集, 西安, 2017

[13] 基于结构—设备相互作用的大型气候试验厂房地震反应及减震控制研究[R]. 北京: 中国航空规划设计研究总院有限公司, 2017

# 基于污水管线堵塞的过流能力仿真分析

■ 杨宗玥 施曼 [给排水]

**摘要:** 为探究污水管线在存在淤积物时的运行工况,本文采用Fluent软件建立物理模型并划分结构化网格,并以稳态条件初始化,研究污水管道真实存在淤积物的水流工况以及速度变化规律。同时,本文针对维持管道过流能力、避免管道堵塞的相关因素及具体措施加以讨论,为工程设计提供参考。

**关键词:** 污水管道; Fluent仿真; 堵塞

随着新版《室外排水设计标准》GB50014—2021(以下简称新排标)的实施,城镇已建有污水集中处理设施时不应设置化粪池的理念也随之落地。化粪池设置的重要初衷是在城市尚未建设污水厂站时,对生活污水进行简单处理。随着污水收集处理率提高,以及污水排放标准日益严格,化粪池在污水处理过程中的积极作用越发有限。同时,由于化粪池对生活污水中的COD具有截留效果,其将导致污水厂站进水COD浓度不足,污水厂为保证脱氮除磷效果被迫增加碳源投加量。可见,化粪池在当前背景下的弊端愈发突显,取消化粪池的做法势在必行。然而,城市污水管线存在不同程度的堵塞淤积问题,以北京市为例,北京城区存在较多淤积物的管线数量超过50%,其中15%的管线存在着更为严重的堵塞问题。因此,取消或粪池后的污水管线具有更高的堵塞风险。

目前,在室外工程设计过程中,针对排水管线的水力计算多数默认管线没有发生堵塞,即考虑的是在理想条件下的运行过程,而随着实际运行时间的延长,管道内部水力条件愈发复杂,常规的水力计算已不能如实反映管道过流能力。

## 1 材料与方法

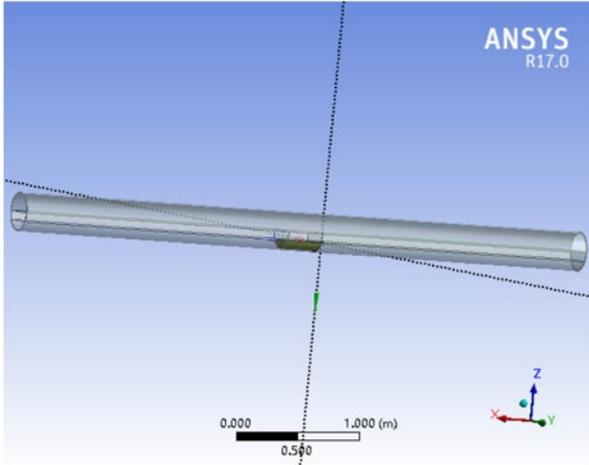
针对流体的仿真分析需要先后进行前处理、仿真计算以及后处理3个步骤。前处理将完成定义的流体域及壁面条件导入至Fluent软件,通过选取适当的能量方程,定义与实际问题相符的材料物性与边界条件进行仿真计算,并通过后处理程序输出计算结果。本次仿真各参数详细设置分别如下:

### 1.1 几何模型与网格绘制

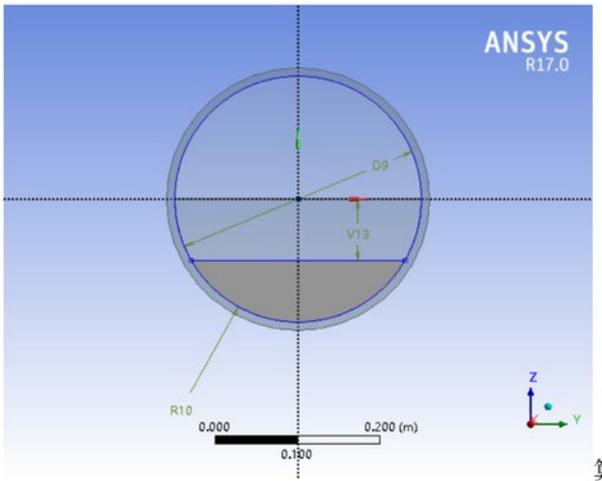
利用Geometry模块对污水管线堵塞模型进行三维设计,管线长度4m,管径为DN300,充满度0.55,其中XOY平面上方流体域为空气,下方为液态水,两流体域之间为可通过的界面。淤积物位于管线长度方向中点位置,堵塞高度75mm,堵塞长度150mm。三维几何模型如图1所示。

采用Meshing模块对三维模型划分计算网格,网格整体采用六面体扫略形式,接近淤积物的局部位置采用棱柱形式,并沿水流动方向适当增加网格密度。同时,增加贴近及管道壁面及淤积物壁面的流体域网格密度,以反映边界层的物理特性,网格总数816833个。采用正交质量对网格质量进行评价,一般认为当网格质量越好时,该值越接近于1.0。本次网格正交质量平均值为0.979,说明其利于Fluent计算结果收敛,划分效果如图2所示。

作者简介: 杨宗玥,男,助理工程师,2020年毕业于北京建筑大学电力建筑与土木工程专业,现就职于中航建投民航工程设计研究院。



(a) 污水管线及淤积物实体



(b) 堵塞位置剖面

图1 污水管道三维几何模型

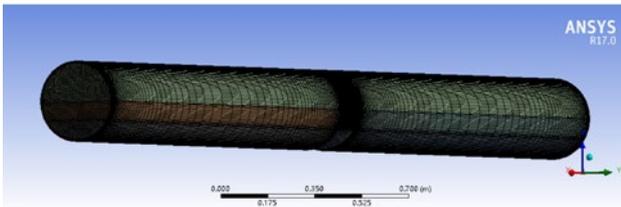


图2 模型网格划分图

## 1.2 仿真与计算

本次研究对象是污水管道内的水流流动。由于该过程为无压状态气—水两相分层流动，流态为湍流，因此需要将流动状态考虑为多相流进行参数设置。Fluent提供Volume of Fluid (VOF)、Mixture以及Eulerian这三种模型供选择，其中VOF

模型可以通过求解单一的动量方程并跟踪区域内每个流体的体积分数来模拟两种或两种以上的非混溶流体，适用于分层或者具有自由液面的流动<sup>[1]</sup>，故本次仿真选用VOF模型，以稳态条件进行计算。

将Meshing划分的三维网格导入至Fluent软件，在求解器设置中选择稳态过程，管道坡度通过沿Z轴负方向，以及X轴正向添加重力分量实现。同时，在多相流中设置分别将空气和液态水设置为主相和副相，相界面设置表面张力值为 $0.073\text{N/m}$ 。计算模型选用Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型，该模型相比于标准 $k-\epsilon$  具有更高的计算精度。管道壁面材质为聚乙烯，粗糙系数取 $0.010$ 。采用速度入口作为入口边界条件并定义流速值，在重力流条件下水流不受到外界压力，出口假定为自由出流，故采用压力出口，并将出口压力值设置为 $0$ ，同时分别将流体域和空气域进出口水的体积分数设置为 $1$ 和 $0$ ，表明进出口只有单相介质流入或流出。初始化过程选择标准初始化，从all zones开始计算并将水的体积分数设置为 $0$ ，完成初始化后通过patch将流体域水中水相的体积分数设为 $1$ ，即通过patch将整个流体域上半部分完全划分为空气，下半部分完全划分为水。这与实际工况相一致，且一定程度上可防止因初始条件与实际差距过大导致计算残差过高的问题，有利于数据收敛，其余计算参数均采用默认值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 管道堵塞时水流运动规律

当管径为DN300，充满度为 $0.55$ ，坡度为 $0.003$ 时，管道流量为 $33.8\text{L/s}$ ，流速为 $1.05\text{m/s}$ 。管道内气—水相界面以及流速沿管长方向的变化规律如图3、图4所示。

相界面位置图显示，当污水管道存在淤积物时，水流呈现出堰流的典型特征，上游水流由于受到淤积物阻塞作用而升高，雍水最高处位置充满度为 $0.75$ ，明显高于入口处设定的充满度 $0.55$ 。同时，上游流速沿水流方向呈现下降趋势，由入口处 $1.05\text{m/s}$ 降低至约 $0.8\text{m/s}$ 。当水流经过淤积物后，可观察到液面高度逐步下降，于出口处充满度恢复至 $0.5$ 。流速云图显示，水流经过淤积物后，流速因水流跌落明显增加，于液面最低处升高至 $1.3\text{m/s}$ ，并在下游的流动过程中，由水流边界至中心位置流速呈现上升趋势。此外，水流经过淤积

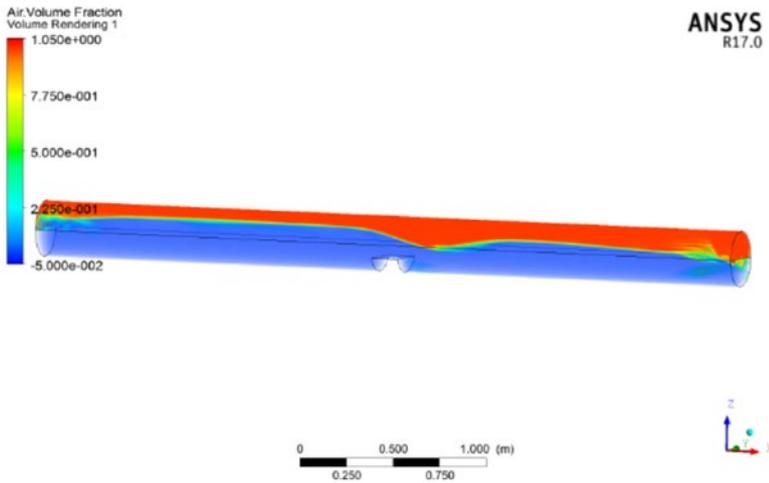


图3 管道气—水相界面位置图

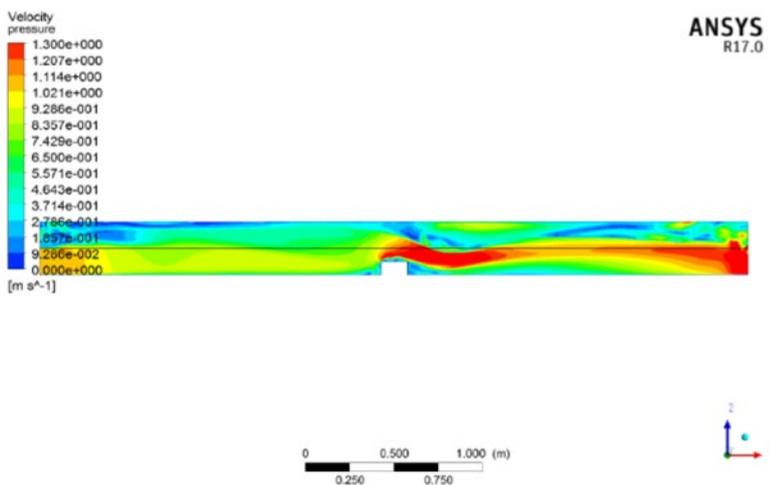


图4 管道中心位置流速云图剖面

物后，速度梯度于垂直方向明显升高，且在淤积物下游约1.5m范围靠近管道壁面的部分位置存在低流速区。可以看出，当管道已存在淤积物时流速随之降低，而流速低于管道自清流速时，难以通过冲刷的形式使得淤积物随水流动，该区域管道发生堵塞的可能性相对较高。

本次仿真过程中，采用速度入口定义了水流入时的速度值，同时在初始化时定义了水的入口范围，故流量随之确定，且在计算过程中维持不变。可以看出，淤积物的存在一定程度上降低了上游水流流速，当流量一定时，水流通过抬高液面的形式缓解管道因淤积对过流能力带来的不利影响。随着入口流量增加，管道内液面位置随之上升，并于充满水时达到过流能力的临界值。此时若进水流量进一步增加，将不能满足排水需求。

随着城市排水系统的运行过程，污水不断对管道造成腐蚀及冲刷作用，管道随之逐渐出现不同程度的功能性缺陷以及结构性缺陷，包括淤积、破口、渗水等。同时，位于地下水及河道下方的管段存在外来水源入渗问题。例如广州市某区域内存在淤积物的管段占比36.67%，其中被严重阻塞的管道约为9.16%<sup>[2]</sup>。另一针对北京某非中心城区污水管道的监测结果显示，地下水日均入渗量平均占管网日均累计流量的27.43%，河流入渗流量则占12.9%<sup>[3]</sup>。以上数据表明，当前污水管网存在实际过流能力低于理论值，以及未预见流量过高的问题。若将化粪池贸然取消，将会提高污水中大体积杂质含量，增加污水管道的堵塞风险。同时由于污水流量的波动性，将导致水量峰值时排水能力不足，存在污水溢流的可能性；而在水量低谷时，新排放的污水混合液由于流量不足，当流至淤积物下游的低速区范围内时，其包含的杂质存在被拦截的可能，从而延长淤积长度。取消化粪池的重要目标，是将生活污水中的有机物成分尽量保留，输送至城市污水处理设施，减轻外加碳源的投放压力，而当粪便以沉积物形式堵塞在管道内时，其含有的有机物一同被截

留，这显然未达到规范设置时的预期效果。因此，在取消设置化粪池后，应当采取适当的做法保证管道具有稳定输送固体杂质的能力。

## 2.2 维持管道过流能力的措施

流速是决定污水管道是否淤积的重要原因，管道淤积物按照其物理特性，可分为底层颗粒沉积物、有机质层以及生物膜3种组成成分，其中后两者易受到水流剪切作用而从既有沉积物中脱落<sup>[4]</sup>。生活污水具有较好的可生化性，有机质含量相对较高，通过水流自身冲刷可有效控制淤积物的增长速度。研究结果显示，有机物倾向于吸附在大粒径颗粒上，而N、P元素所在颗粒粒径相对较小，当流速小于0.6m/s时，污水中以小颗粒污染物为主，当流速进一步增大后，沉降下来的大颗粒污染物再次随水一同流动<sup>[4]</sup>。较大管道流速一方面有利

于污水管线维持畅通,另一方面也利于改善污水厂进水的可生化性,故在设计过程中应针对管道流速值密切关注。

管道坡度及管径作为设计过程中的常用参数,对管道的堵塞过程具有重要影响。坡度值增加一方面增加了水流流速,降低管线堵塞的可能性,但若管道发生淤积时过流能力削减更为明显。实验结果显示,在管径以及淤积体积相同的前提下,管道坡度由0.5‰增至5‰后,过流能力削减幅度范围为12%~28%<sup>[5]</sup>。因此,设计过程中可以适当增加坡度从而维持管道过流能力的长期稳定,但同时也应适当增加清淤频次。同时,管径是影响流速的重要参数。当流量以及坡度一定时,管径增加意味着过流面积增大,淤积物厚度呈现增加趋势。另外对于过流量更大的下游区域,沉积物含量随污水流量一同增加,因此下游污水管沉积物的厚度大于上游区域。针对广州市污水管网的调研结果显示,管径由DN500增加至DN1000的过程中,沉积量由2%逐步增加至约12%<sup>[6]</sup>。对于污水量较为稳定的地区,可通过水力计算将管径确定在相对较小的范围内,以增加水流流速;而在水量波动大的区域,为避免水量波谷时段因流速不足导致的淤积问题,化粪池是否取消应谨慎考虑。

### 3 结语

(1) 当污水管线存在淤积物时,水流呈现出堰流的典型特征,雍水最高处位置充满度为0.75。淤积物上游流速降低至约0.8m/s,水流经过淤积物后流速增加,于液面最低处升高至1.3m/s。分析认为,流速是决定污水管道是否淤积的重要原因,当流速大于0.6m/s时有利于有机颗粒物随水流动,当管道已存在淤积物时流速随之降低,大粒径杂质易被截留。

(2) 流速是决定污水管道是否淤积的重要原因,当流速大于0.6m/s时,有利于有机颗粒物随水流动,可通过加大坡度或采用适当管径降低管道堵塞的可能性。在水量波动大的区域,为避免水量波谷时段因流速不足导致的淤积问题,化粪池是否取消应谨慎考虑。

#### 参考文献

[1] 刘丹. 污水管网汇流段水力变化对污染物的运移影响特性[D]. 西安建筑科技大学, 2020.

[2] 付博文. 城市污水管道中污染物沉积特性研究[D]. 西安建筑科技大学, 2016.

[3] 李志丽, 姜明洁, 潘冉, 等. 北京市非中心城区排水管网监测及运行状态分析[J]. 中国给水排水. 2021(网络首发): 1-9.

[4] 桑浪涛, 石烜, 张彤, 等. 城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律[J]. 环境科学. 2017, 38(05): 1965-1971.

[5] 王建龙, 王泽熙, 李晗, 等. 雨水管道沉积物累积对过流能力影响的模拟试验[J]. 环境工程技术学报. 2021(网络首发): 1-8.

[6] 张伟, 余健, 李葳, 等. 广州市排水管道沉积现状研究分析[J]. 给水排水. 2012, 48(07): 147-150.

# 大型全封闭煤库消防设施设计探讨

■ 曹雅萌 陆新生 [给排水]

**摘要:** 通过对大型全封闭煤库消防设施设计难点进行分析,本文以某大型全封闭煤库为例,介绍其消防设施设计要点,从煤库建筑特点实际情况出发,结合现行设计规范要求提出技术解决方案,为类似工程消防设施设计提供技术依据及设计支持。

**关键词:** 全封闭煤库;消防设施设计;消防水炮

## 1 前言

煤场是燃煤电厂重要组成部分,煤场是否安全直接关系到整个燃煤电厂正常安全运行。

燃煤电厂的煤场有3种形式:

(1) 露天煤场,以前露天煤场在燃煤电厂中占80%以上,这种形式的煤场造价费用低;煤场露天,散热快,可防止煤的自燃,缺点是占地面积大,利用率不高,并且在运输、装卸过程中,极易对周围环境造成扬尘污染。

(2) 半封闭煤场,带有顶棚,煤库四周设有挡煤墙,可在一定程度上抑制扬尘,较露天煤场投资大。

(3) 全封闭煤库,由于环保要求提高,近年来逐步推广使用的新型储煤形式,采用全封闭结构、自然或机械通风,环保效果好,场地利用率高,缺点是土建及设备投资大、工期长。

随着国家对燃煤电厂环保要求的提高,露天煤场、半封闭煤场(加防煤抑尘网)已不能满足现在高标准的环保要求,燃煤电厂新(改扩)建

煤场采用全封闭煤库,将是未来的发展趋势。全封闭煤库有其自身特点,消防设施设计无设计规范可循。本文将分析全封闭煤库的特点,以某大型全封闭煤库为例,结合现有相关规范探讨大型全封闭煤库消防设施系统设计。

## 2 全封闭煤库特点及消防设施设计难点

目前国内运行的燃煤电厂多为大容量机组。大容量机组燃煤电厂配套的全封闭煤库建筑面积大,其建筑面积一般多在3万 $m^2$ 以上。全封闭煤库是大跨度、超大空间的单体建筑。上部为拱形钢结构网架,四周下部为钢筋砼基础和挡煤墙,网架屋盖采用压型钢板封闭,顶部设有采光和自然通风设施。建筑高度较高,净空高度均在50m以上。

全封闭煤库建筑火灾危险性分类为丙类,建筑耐火等级为二级。根据《建筑设计防火规范》(GB50016-2014)(2018年版)3.3.2条注3“一、二级耐火等级的煤均化库,每个防火分区的最大允许建筑面积不应大于1.2万 $m^2$ ”。仓库内设置自动灭火系统时,每座仓库的最大允许占地面积和每个防火分区最大允许建筑面积增加1倍,也就是

作者简介:曹雅萌,女,助理工程师,2017年毕业于南昌航空大学环境工程专业,现就职于航空工业规划总院市政工程设计研究院。

说,即使设有自动灭火系统的全封闭煤库每个防火分区的最大建筑面积不应大于 $2.4\text{万m}^2$ 。当建筑面积超过 $2.4\text{万m}^2$ 时,建筑专业就要考虑设置不同的防火分区,采取防火分区技术措施,如设置防火墙等。设置防火墙对斗轮机式全封闭煤库显然是不现实的。故对于全封闭煤库而言,设置防火墙根本无法实现。

有人可能会提出,采用防火分隔水幕进行防火分隔,根据《自动喷水灭火系统设计规范》(GB50084—2017) 5.0.14条防火分隔水幕系统的设计基本参数应符合下表的规定。

表 水幕系统设计基本参数

水幕类别	喷水点高度 h(m)	喷水强度[L/ (s·m)]	喷头工作压力(MPa)
防火分隔水幕	$h \leq 12$	2.0	0.1
防护冷却水幕	$h \leq 4$	0.5	

根据规范要求防火分隔水幕喷水点高度应 $\leq 12\text{m}$ ,而全封闭煤库高度均在 $40\text{m}$ 以上,因此利用防火分隔水幕对全封闭煤库进行防火分隔不满足规范要求,在实际工程中也是难以实现的。

由于各相关规范均无对燃煤电厂全封闭煤库防火分区界定,故消防部门一般根据《建筑设计防火规范》(GB50016—2014)(2018年版)作为全封闭煤场防火分区的界定依据。但实际很难执行,因煤库面积是根据规范规定的贮煤天数确定的。目前国内运行的 $2 \times 300\text{MW}$ 及以上机组的燃煤电厂全封闭煤场建筑面积均在 $3\text{万m}^2$ 以上,且超面积全封闭煤库已大量建成,究其原因是在编制《建筑设计防火规范》(GB50016—2014)(2018年版)时,还没有建筑面积如此大的全封闭煤库,因此全封闭煤库防火分区仅参此条执行。

全封闭煤库为高大空间、建筑面积大,远超出现行规范要求的防火分区面积。特别是大、中型燃煤发电厂全封闭煤库建筑面积是不可避免超出规范要求,且全封闭煤库面积往往不是由消防专业所左右的,故只能对全封闭煤库的消防设施采取必要措施,同时需要对现有相关消防规范要有正确的解读。

### 3 主要消防设施的设计

全封闭煤库的消防设施设计应结合全封闭煤库的特点,并对相关规范本质含义进行全面的理解,采取有效的消防措施。下面以某全封闭煤库为例,介绍全封闭煤库的主要消防设施设计要点。

某燃煤电厂全封闭煤场整体宽度 $224.5\text{m}$ 、封闭长度 $467\text{m}$ ,总占地面积为 $10.48\text{万m}^2$ 。根据《火力发电厂与变电站设计防火标准》(GB50229—2019)第3.0.5条规定,“每座室内贮煤场最大允许占地面积不应大于 $5\text{万m}^2$ ,每个防火分区面积不宜大于 $1.2\text{万m}^2$ ,当防火分区面积大于 $1.2\text{万m}^2$ 时,防火分区之间应采用宽度不小于 $10\text{m}$ 的通道或高度大于堆煤表面高度 $3\text{m}$ 的防火墙进行分隔”。煤库共分为3个部分,间距为 $10\text{m}$ ,均采用预应力钢桁架结构,结构顶标高均为 $61.3\text{m}$ ,结构跨度 $222\text{m}$ 。东侧、西侧煤库封闭宽度均为 $224.5\text{m}$ 、封闭长度均为 $130.5\text{m}$ ,建筑面积均为 $2.9\text{万m}^2$ ,中部煤库封闭宽度 $224.5\text{m}$ 、封闭长度 $186\text{m}$ ,建筑面积为 $4.1\text{万m}^2$ ,确保每座室内贮煤库最大占地面积不大于 $5\text{万m}^2$ 。煤库按照场内斗轮机轨道顶高度作为建筑 $\pm 0\text{m}$ 标高,相当于绝对标高 $1701.2\text{m}$ ,建筑室内外高差 $0\text{m}$ 。

#### 3.1 室内外消火栓系统

根据《火力发电厂与变电站设计防火标准》(GB50229—2019)中第7.3.2条规定,室内贮煤场可不设置室内消火栓系统,故全封闭煤库可不设置室内消火栓系统。

根据《火力发电厂与变电站设计防火标准》(GB50229—2019)中第7.2.3条规定,室内贮煤场周围的消防给水管网应为环状。室外消火栓水量 $45\text{L/s}$ ,火灾延续时间 $3\text{h}$ 。故全封闭煤库周围的消防给水管网设计为环状,消火栓采用地下式消火栓,距路边不大于 $2\text{m}$ ,间距不大于 $120\text{m}$ 。

#### 3.2 固定消防炮灭火系统

根据《建筑设计防火规范》(GB50016—2014)(2018年版)中第8.3.5要求“难以设置自动喷水灭火系统的展览厅、观众厅等人员密集的场所和丙类生产车间、库房等高大空间场所,应设置其他自动灭火系统,并宜采用固定消防炮灭火系统”。因此全封闭煤库应优先设置固定消防炮灭火系统。

根据《火力发电厂与变电站设计防火标准》(GB50229—2019)中第7.5.6条规定“设置在

室内贮煤场内的固定灭火水炮，应保证至少一门水炮的水柱到的煤场内任意点；每门水炮的流量不宜小于20L/s；应具有直流和水雾两种喷射方式”。火灾延续时间1h。

消防水炮的具体布置为：沿南北两侧挡煤墙上方架空检修马道及输煤暗廊上方高空平台共布置3行共计22门消防炮；单门消防炮工作压力为0.8MPa，流量为20L/S，射程60m。水炮的布置间距 $\leq 110\text{m}$ ，布置高度约12m。

在库外厂区环状布置的消防炮给水管网主干管管径为DN200。环状供水管网设置两路进水管，从煤场西北角新建消防炮加压泵房就近接入。加压泵房内设两组雨淋阀，平时雨淋阀后管道内为无水状态。发生火灾时，消防炮系统启动雨淋阀及消防主泵，管道快速充水灭火。灭火后将低位泄水阀打开并放空水炮管道内的积水，待其积水放空后再将该泄水阀关闭。消防炮加压泵房外雨淋阀前端消防炮干管设置水泵接合器2套。

消防炮控制：消防炮采用图像探测器的探测方式确定是否发生火灾，并完成自动灭火。发生火灾时，消防炮泵出水干管上的压力开关、消防控制中心、消防水泵房就地控制3种方式均可启动消防炮泵并报警。自动消防炮本身、手动控制箱及消防控制中心3种方式均可控制消防炮进行灭火。

### 3.3 移动式灭火器系统

灭火器设置满足《建筑灭火器配置设计规范》（GB50140-2005），本工程属于A类火灾场所中危险级，选用20kg推车式磷酸铵盐干粉灭火器，灭火器最大保护距离40m。

### 3.4 火灾报警及控制系统

根据《火灾自动报警系统设计规范》（GB50116-2013）设置火灾报警及控制系统。火灾探测报警及灭火控制系统是一个独立的系统，该系统包括消防报警主机、区域分机、火灾应急广播、消防专用电话、火灾探测设备、消防控制设备及电源装置等。

## 4 结语

(1) 全封闭煤库的消防设计，不仅要考虑消防系统如何设置，还应根据项目所在地，考虑消防系统采用干式还是湿式系统，为消防系统顺利运行做多方面准备。

(2) 全封闭煤库可以不设置室内消火栓系统。

(3) 全封闭煤库可设置固定消防炮，作为其主要消防设施，设置在室内贮煤场内的固定灭火水炮，应保证至少一门水炮的水柱到的煤场内任意点，每门水炮的流量不宜小于20L/s，应具有直流和水雾两种喷射方式。

(4) 全封闭煤库室外消火栓系统用水量45L/s，火灾延续时间3h。

(5) 新版《火力发电厂与变电站设计防火标准》（GB50229-2019）的相继实施，补充了对于高大封闭空间消防设置的设计要求，除了根据规范要求进行设置消防系统，还应符合项目当地消防部门的要求。

### 参考文献

- [1] 《建筑设计防火规范》（GB50016-2014）（2018年版）
- [2] 《火力发电厂与变电站设计防火标准》（GB50229-2019）

# 全光无源网络在安防系统中的应用

■ 梁静 [电气]

**摘要:** 本文详细介绍了全光无源网络, 并对其技术特点和基本结构做了系统性描述。通过阐述GPON技术在安防系统中的应用, 提供了设备参数的计算及设备选型流程参考。

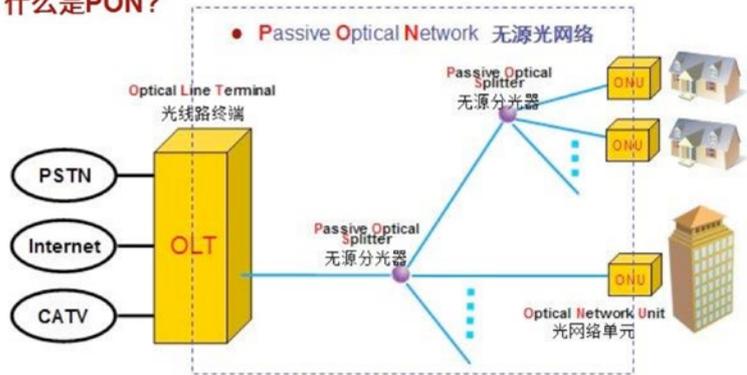
**关键词:** 无源光网络; GPON; OLT (光线路终端); 码流

## 1 前言

近年来, 随着通信技术发展, 越来越多的场合运用到全光无源网络通信技术, 其具备布线灵活、信息安全性高、传输速率快, 中间链路无需供电电源等特点, 也逐步进入工业园区的网络建设中。随着光线布线设备与材料价格趋于降低, 在末端点数较多或布线距离较远的情况下, 与传统有源网络布线系统价格相当, 用于园区室外安防系统优势明显。

本文主要研究全光无源网络在安防系统中的应用。首先, 详细介绍了全光无源网络, 对其技术特点和基本结构做了系统性的描述。其次, 说明了安防系统的技术参数, 包括视频信号在单位时间内使用的数据流量(码流); 系统传输带宽的最小限度。最后,

### 什么是PON?



- > PON是一种点到多点（P2MP）结构的无源光网络；
- > PON由光线路终端OLT（Optical Line Terminal）、光网络单元ONU（Optical Network Unit）和无源分光器POS（Passive Optical Splitter）组成；

图1 PON网络构架

重点阐述了GPON技术用于安防系统中, 设备参数计算及设备选型流程。

## 2 全光无源网络简介

### 2.1 什么是PON

无源光网络PON（Passive Optical Network）

作者简介: 梁静, 女, 高级工程师, 2002年毕业于同济大学电子信息工程专业, 现就职于航空工业规划总院机载工程事业部。

因标准协议不同可分为GPON、EPON和NGPON。目前用途广泛的是GPON技术，故本文主要结合GPON技术论述其在安防系统中的应用。

GPON(Gigabit-Capable PON) 技术是基于ITU-TG.984.x标准的最新一代宽带无源光综合接入标准，具有高带宽，高效率，大覆盖范围，用户接口丰富等众多优点。

### 2.2 GPON技术设备基本结构

GPON技术的设备基本结构由局端的OLT(光线路终端)、用户端的ONT/ONU(光网络终端或

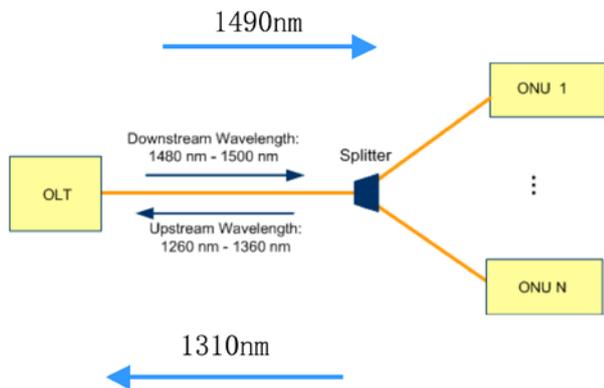


图2 光纤复用

称作光网络单元)、ODN(光分配网络)以及网管系统组成，其中ODN(光分配网络)包括连接OLT(光线路终端)与ONT/ONU(光网络终端或称作光网络单元)的单模光纤(SM fiber)和无源分光器(Splitter)。

GPON 速率高达2.5Gbps，能提供足够大的带宽以满足未来网络日益增长的对高带宽的需求，同时非对称特性更能适应宽带数据业务市场。

PON系统采用WDM技术，实现单纤双向传输。

为了分离同一根光纤上多个用户的来去方向的信号，采用以下两种复用技术：下行数据流采用广播技术；上行数据流采用TDMA技术。

### 2.3 GPON技术的主要特点

(1) 业务支持能力强，具有全业务接入能力，是提供语音、数据和视频综合业务接入的理想技术。

(2) 可提供较高带宽和较远的覆盖距离。GPON系统可以提供下行2.488G bit/s，上行1.244 G bit/s的带宽。在20km传输距离下，支持1:64分光比。

(3) 带宽分配灵活，GPON系统中采用的

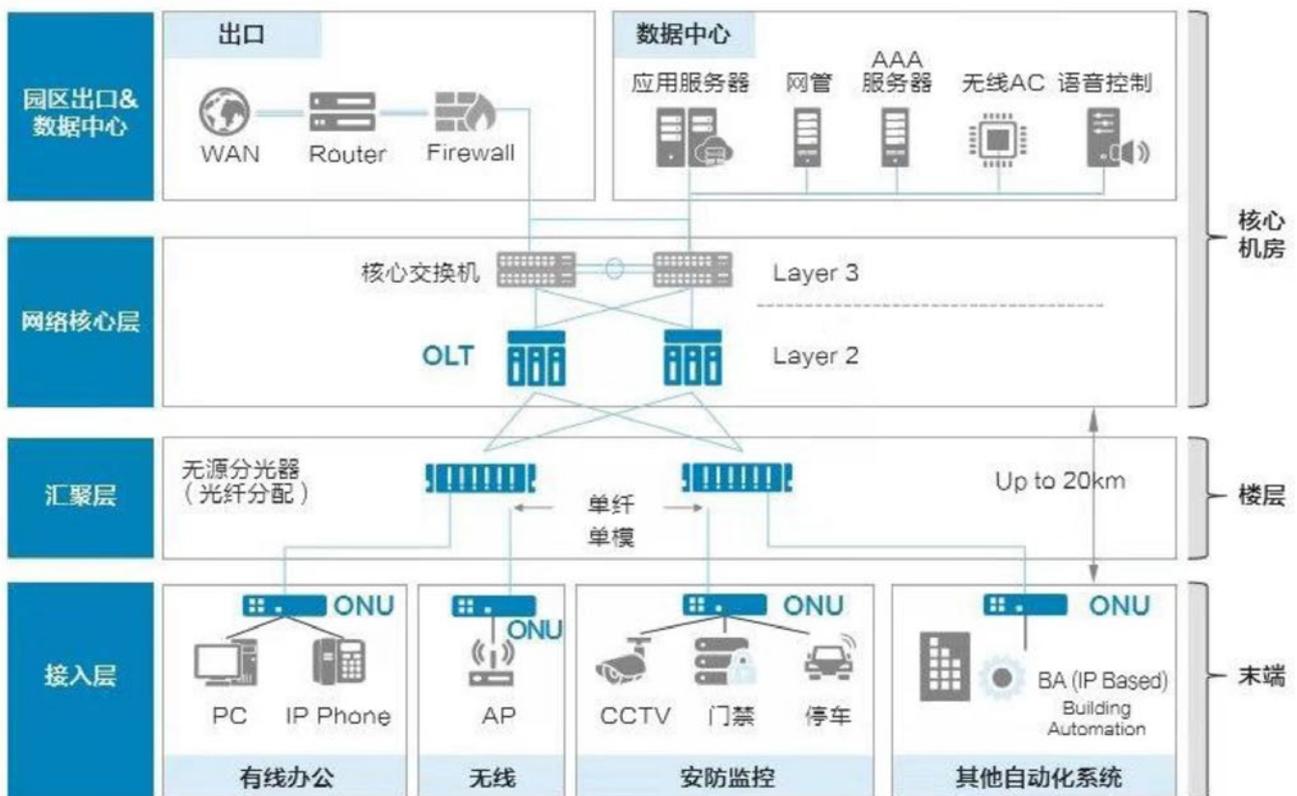


图3 PON网络架构图

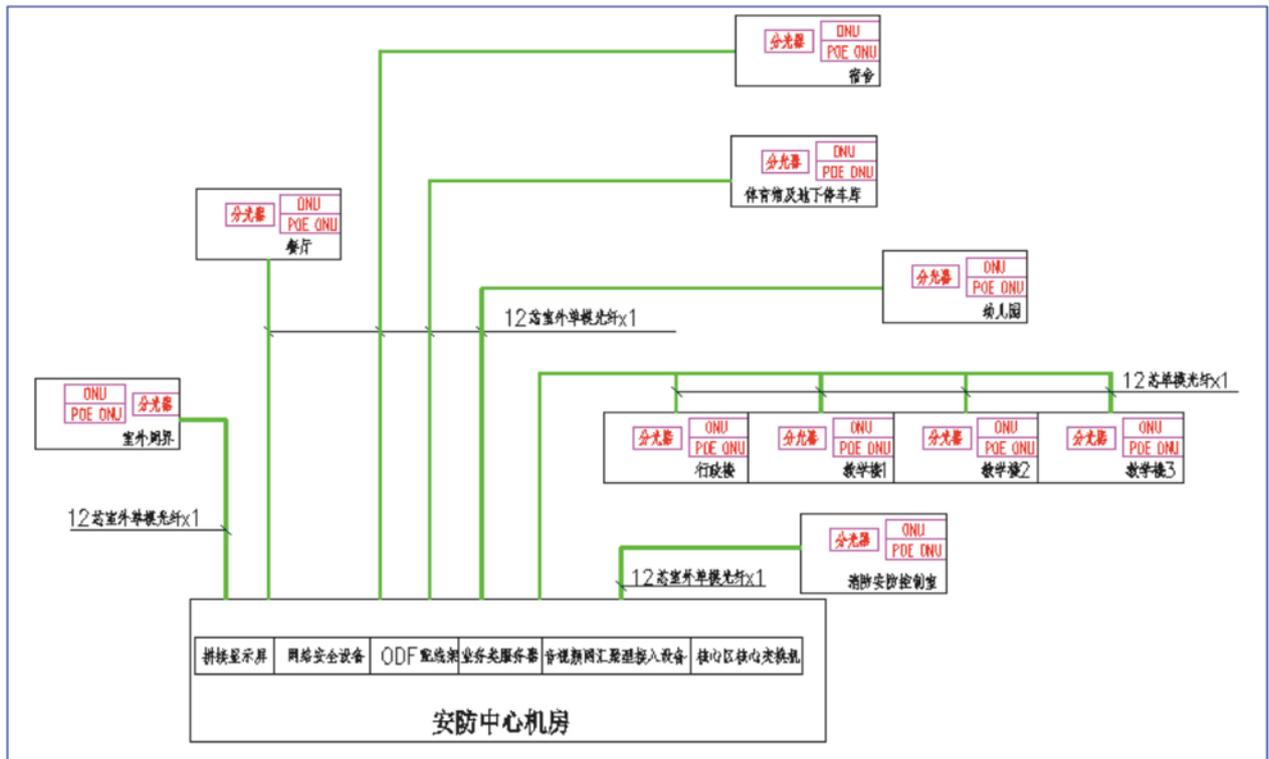


图4 春蕾小学安防系统架构图

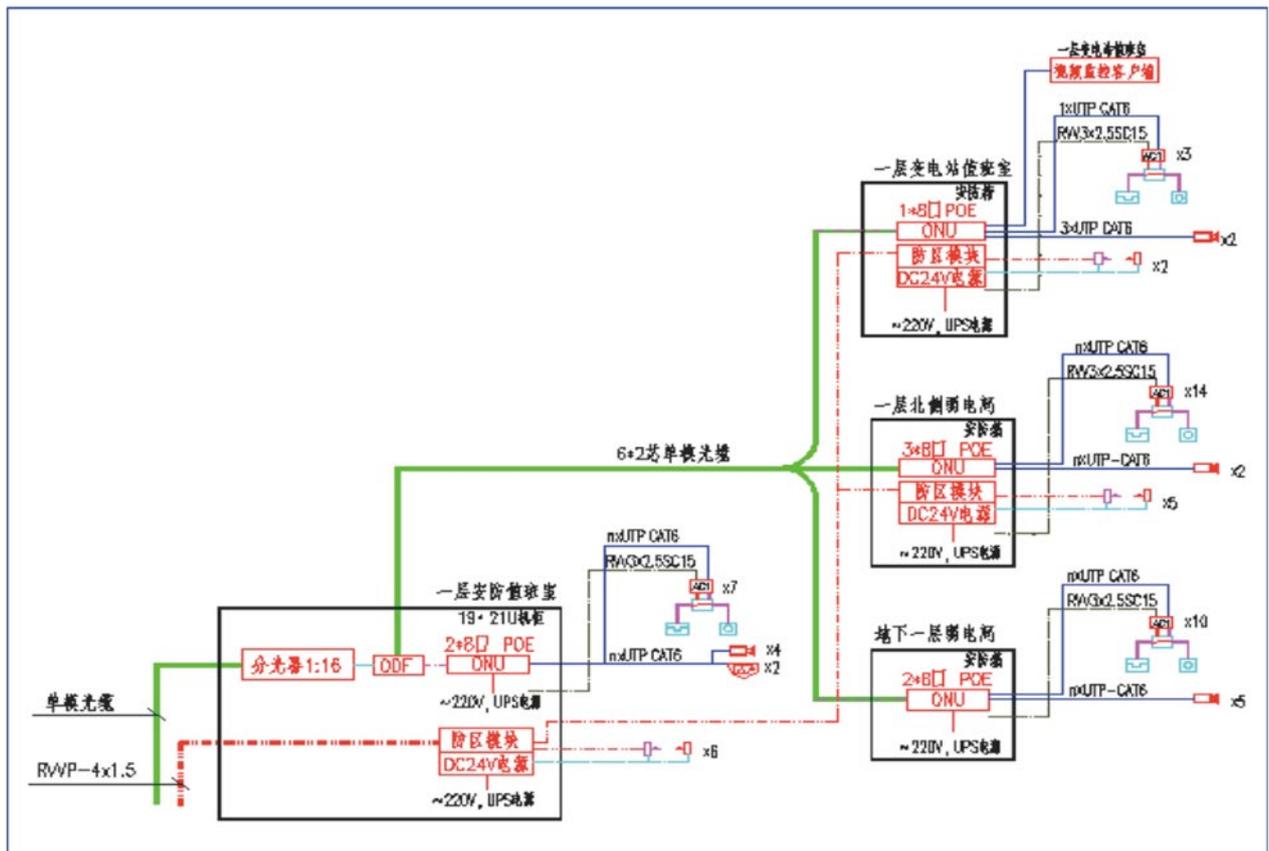


图5 某园区动力中心安防系统图

DBA算法可以灵活调用宽带，能够保证各种不同类型和等级业务的服务质量。

(4) ODN（分光器）的无源特性减少了故障点，便于维护。

(5) GPON可以采用级联的ODN结构，即多个分光器可以进行级联，大大节约了主干光缆。

### 3 安防系统网络要求

#### 3.1 传输速率与带宽

**比特率：**每秒传送的比特（bit）数，比特率越高，传送的数据越大。

**码流：**视频文件在单位时间内使用的数据流量，是视频编码中画面质量控制中最重要的部分。同样分辨率下，压缩比越小，视频文件的码流越大，画面质量就越高。

**传输带宽：**监控点需要计算上行的最小限度带宽，监控中心需要计算下行的最小限度带宽。

传输带宽最小值=单台比特率\*摄像机台数，摄像机的比特率与视频格式有关：

720P 视频格式每路摄像机的比特率为2Mbps，10台摄像机所需的网络上行带宽至少为20Mbps；

1080P 视频格式每路摄像机的比特率为4Mbps，10台摄像机所需的网络上行带宽至少为40Mbps。

#### 3.2 双码流传输

视频分辨率越大，视频码率也越大，图像也越清晰，但与此成正比的，视频码流在网络传输中所占用的带宽也越大，视频解码显示时占用的系统资源也越多。因此在视频监控所采用的视频分辨率的越来越高时，传统的互连网络很难承载码率过大的视频流。为解决这一难题，“双码流”的概念应运而生。双码流，顾名思义，将同一视频源编出两路码流，这两路码流可以是同一分辨率的，也可以是不同分辨率的。

视频监控一般采用双码流（1080P+720P）一路用于显示，一路用于存储，综合考虑，一路视频信号的视频码率约为10Mbps。如果20路视频信号传输至一台交换机，其上行带宽要大于200M，如采用以太网传输，应选择千兆上行端口，百兆下行端口的交换机。

#### 3.3 GPON技术用于安防系统

智能安防系统以维护企业公共安全为目的，

在企业周界、出入口、建筑物内、特定场所/区域，通过采用人力防范、技术防范和物理防范等方式综合实现对人员、财产、信息、生产、设备、建筑或区域的安全防范。技术防范是指运用安全防范产品和其他相关产品所构成的视频安防监控系统、入侵报警系统、出入口控制系统等实现企业安全防范。

智能安防系统采用人脸识别、AI等技术，布点多，传输数据量大，传输距离长，对网络传输的带宽和速率有很高的要求。采用GPON技术可以满足智能安防的需求。

另外，GPON技术采用全光纤传输，传输链路中没有供电需求，适合布线距离远，监控点分散的场合，如大型工业园区室外及周界监控、单层面积超大的工业厂房等。

### 4 GPON技术承载安防系统设备选型流程

#### 4.1 组网信息搜集

了解对接设备的性能、安装环境、供电情况、业务带宽，统计对接设备数量。根据搜集到的信息，选择POE ONU或非POE ONU，并根据受电设备所需功率，比对POE ONU最大供电功率。依此测算POE ONU最大下挂受电设备数量。

对接设备业务带宽需求，决定了ONU上PON端口的类型。如果并发带宽较大，而分流比较小的GPON带宽（如1:4或1:8）不能满足要求，建议使用10G GPON OLT和ONU。

#### 4.2 ODN分光比

ODN分光比的选择，取决于单台ONU并发带宽。如ONU下行并发带宽需求600M，ONU上联口为GPON（1.24G/2.48G），那么分光比为1:4， $2.48G/4=620M$ ；10GPON测算相同。另如果对上行带宽有特殊要求，需考虑上行带宽的并发值。

#### 4.3 链路光功率计算原则

链路光功率计算是ODN网络规划设计过程中一个关键点，其直接反映出链路设计的合理性。GPON视频回传网络，链路光功率衰减常用标准等级有Class B+和Class C+，在长距离覆盖区域可以使用Class D光模块；XGS-PON视频回传网络，链路光功率衰减常用标准等级为Class N2。具体链路衰减要求值及链路光功率计算中常用的标称参数取值如表所示。

说明：这里的最大链路衰减值为PON模块

链路光功率计算标称参数取值表

序号	参数类型		描述		衰减值 (dB/km)
1	光缆 (G.652D)		1310nm		0.38
			1490nm		0.26
			1550nm		0.25
2	连接器		熔接		0.1
			适配器		0.2
			机械连接器		0.3
3	富裕度		距离小于5km		1
			距离小于10km		2
			距离小于20km		3
分光器损耗					
分光比 (n=1,2)	n:2	n:4	n:8	n:16	n:32
插入损耗 (i/j)	3.2	7.2	9.63	13.5	16.5
GPON/XGS-PON端口支持的光功率预算					
链路等级	GPON Class B+	GPON Class C+	GPON Class D	XGS-PON N2	
最大链路衰减 (dB)	28	32	35	29.5	

的接收灵敏度最大值。

ODN链路衰减=光缆总衰减+熔接点总衰减+连接头总衰减+

分光器总衰减 + 3dB(冗余)

ODN链路衰减 =  $L \times a + n1 \times b + n2 \times c + n3 \times d + e + f$  (dB)

a. 表示光纤每公里平均损耗 (dB/km), L 为光纤总长度, 单位Km, 工程中使用的光纤跳线, 尾纤等, 一般长度较短, 可以忽略。

b. 表示光纤熔接点损耗 (dB), n1表示熔接点的数目。

c. 表示光纤机械接续点损耗 (dB), n2表示机械接续点的数目。

d. 表示连接器损耗 (dB), n3表示连接器数目。

e. 表示光分路器损耗 (dB), 这里只考虑一级分光。如果是二级分光, 则要分别考虑二个光分路器造成的损耗。

f. 表示工程余量, 一般取3dB。

设计中, 应对网络中最远用户的光通道衰减进行核算, 采用最坏值法进行ODN光通道衰减核算, 检查全网的光通道损耗是否满足要求, 并根据需要对网络设计方案做适当调整。GPON网络OLT目前光模块主要为ClassB+和ClassC+两种。ONU侧的收光功率范围一般比OLT侧少1~2dbm。

# 某车间带铍粉尘除尘方案设计

■ 熊进华 [暖通]

**摘要:** 本文根据实际工程介绍了铍铝粉尘除尘系统的方案设计, 针对铍铝材料生产工艺的不同工段, 介绍了除尘系统的设计方法, 总结了含铍废气除尘系统设计中需要注意到问题。

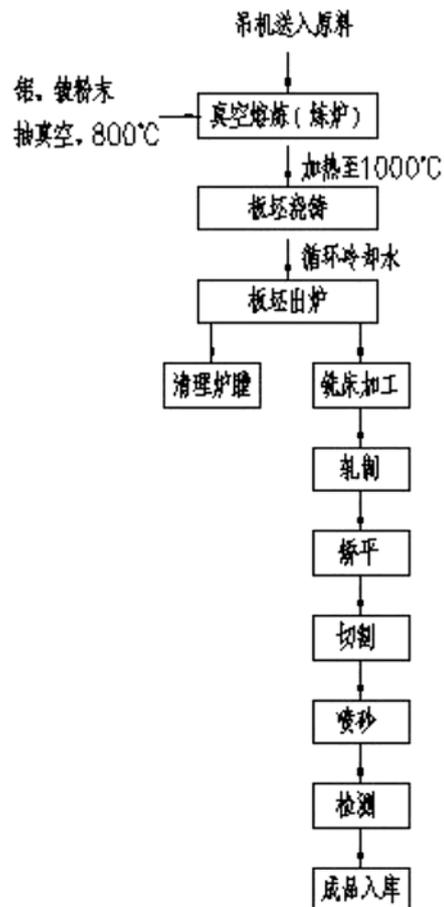
**关键词:** 含铍废气; 除尘系统; 滤筒除尘器; 高效过滤器; 袋进袋出过滤器

## 0 引言

铍为钢灰色轻金属, 不溶于水, 溶于稀盐酸、稀硫酸。铍铝合金材料广泛应用导弹、火箭、超高速结构件、飞机制动器和电子计算及磁盘驱动器。根据《高毒物品名录》(卫法监发[2003]142号, 铍及其化合物属于高毒物品。吸入铍及其化合物的烟尘、蒸汽, 将导致化学性支气管炎和肺炎, 甚至引起以脏器或组织的病变而致癌。由于铍的毒性剧烈, 我国针对铍污染制定了非常严格的环保及卫生标准。本文结合实际项目探讨带铍的粉尘除尘系统的设计。

## 1 工程概况

本项目为铍铝材料的铸造和机械加工, 主要工艺包括真空熔炼、板坯浇铸、板坯出炉、机加工、可逆轧制、喷砂处理、水刀切割、板材矫平、无损检测及成品入库, 具体工艺流程及简介如下:



工艺流程图

作者简介: 熊进华, 女, 高级工程师, 2006年毕业于南京理工大学暖通空调专业, 现就职于航空工业规划总院机载工程事业部。

表1 铍的产生速率及产生量表

房间名称	产尘	产生浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	风量 (m <sup>3</sup> /h)	产生速率 (kg/h)
局排系统 熔铸阶段	油蒸汽+铍金属挥发物	5	100	$5 \times 10^{-4}$
局排系统 开炉阶段	油蒸汽+铍金属挥发物	$1 \times 10^{-3}$	3400	$3.4 \times 10^{-6}$
局排系统 机加区	切削液+铍粉	$1.45 \times 10^{-4}$	5400	$7.83 \times 10^{-7}$
全排系统 铸造区	油蒸汽+铍金属挥发物	$4.1 \times 10^{-5}$	10500	$2.60 \times 10^{-6}$
全排系统 机加区	切削液+铍金属挥发物	$3.0 \times 10^{-6}$	101150	$8.2 \times 10^{-8}$
合计				$5.03 \times 10^{-4}$

在整个铍铝材料的铸造和机械加工过程中，含铍粉尘主要源于熔铸工序，铍材料精密加工区的机加工工序采用湿法作业，产生含铍废气量微小。

熔铸阶段：先进铍材料研发中心熔铸工序持续时间为2h/天，期间精密铸造炉或等离子熔炼炉处于真空状态（炉内压力 $1 \times 10^{-2}$ Pa）且真空泵持续运行，因此该阶段含铍粉尘不会外溢至大厅内，均由真空抽出。排气温度经循环水冷却后，烟气温度不高于除尘器的上限温度93℃。

开炉阶段：熔铸前需开炉投料、熔铸结束后需开炉取件，投料和取件时，沉积于炉壁和工具上的少量铍粉尘会溢出。熔炼炉板坯出炉前利用循环冷却水降温，排风烟气温度为25℃。

铍材料精密加工：铍车床自带封闭壳及排风系统，保证机床内维持负压。

## 2 排放标准

我国现有规范对铍及其化合物的排放制定了严格的环保及卫生标准，本文整理罗列出来以供参考。

(1) 《工业炉窑大气污染物排放标准》

(GB9078-1996)中，各种工业炉关于铍及其化合物的排放浓度标准，规定排气筒最低允许高度为15m。

(2) 《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996)中关于关于铍及其化合物的排放浓度标准见表3。

(3) 《工业场所所有害因素职业接触限值化学有害因素》(GBZ2.1-2019)中关于铍及其化合物在工业场所中化学因素职业接触限值见表4。

(4) 本项目真空精密铸造炉和等离子熔炼炉排放废气中铍颗粒物执行《工业炉窑大气污染物排放标准》GB9078二级标准；精密加工区废气执行《大气污染物综合排放标准》GB16297二级标准，熔炼铸造

表2 大气污染物排放限值

有害物名称	标准级别	1997年1月1日前安装的工业窑炉	1997年1月1日起安装的工业窑炉
		排放浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	排放浓度 (mg/m <sup>3</sup> )
铍及其化合物(以Be计)	一	0.01	禁排
	二	0.015	0.01
	三	0.015	0.015

区与加工区共用排气筒，由于《工业炉窑大气污染物排放标准》GB9078中颗粒（有色金属熔炼炉）和铍及其化合物有组织排放浓度限值均严于《大气污染物综合排放标准》GB16297，因此排气筒颗粒物和铍有组织排放浓度均严格要求执行《工业炉窑大气污染物排放标准》GB9078，采用15m高排气筒，排放浓度 $0.01 \text{ mg/m}^3$ 。

表3 大气污染物排放限值

有害物名称	最高允许排放浓度 mg/m <sup>3</sup>	最高允许排放速率, kg/h				无组织排放监控浓度限值	
		排气筒高度 (m)	一级	二级	三级	监控点	mg/m <sup>3</sup>
铍及其化合物 (以Be计)	0.015	15	禁排	$1.3 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$	周界外浓度 最高点	0.001
		20		$2.2 \times 10^{-3}$	$3.3 \times 10^{-3}$		
		30		$7.3 \times 10^{-3}$	$11 \times 10^{-3}$		
		40		$13 \times 10^{-3}$	$19 \times 10^{-3}$		
		50		$19 \times 10^{-3}$	$29 \times 10^{-3}$		
		60		$27 \times 10^{-3}$	$41 \times 10^{-3}$		
		70		$39 \times 10^{-3}$	$58 \times 10^{-3}$		
		80		$52 \times 10^{-3}$	$79 \times 10^{-3}$		

表4 工业场所空气中化学因素职业接触限值

有害物名称	职业接触限值, mg/m <sup>3</sup>			临界不良健康效应
	最高容许浓度	时间加权平均容许浓度	短时间接触容许浓度	
铍及其化合物 (以Be计)	—	0.0005	0.001	铍过敏、铍病、肺癌

### 3 除尘系统设计

#### (1) 熔铸阶段局排系统

铍材料研发铸造区将2台真空精密铸造炉、2台真空加热炉合设一个局部排风除尘系统,其余感应熔炼炉、箱式电阻炉、湿式喷砂机等设备合设一个局部排风除尘系统,共设2套除尘系统。

铍材料研发铸造区真空精密铸造炉、真空加热炉、感应熔炼炉、真空热处理炉、手套箱等设备产生的铍粉尘,设置局部伞形排风罩进行收集,将收集的含铍废气经滤筒除尘器、两级过滤(中效过滤+高效过滤)装置处理后,排至室外排气筒。

(2) 铍材精密加工区的机加工程序采用湿法作业,产生含铍废气量微小。铍材精密加工区的车床、铣床、研磨机、线切割机等设备产生的铍粉尘,设置局部吸尘管或吸尘罩,将收集的含尘含油废气经油雾过滤器和两级过滤(初效过滤+高效

过滤)装置处理后,排至室外排气筒。

(3) 高效过滤器选择过滤等级在H13级以上的过滤材料,即 $0.3 \mu\text{m}$ ,过滤效率99.99%。

(4) 为避免发生废气过滤净化装置击穿失效后导致铍异常排放,熔炼炉废气排放系统的两级过滤装置采用一用一备,并设置压差在线检测设施,在发生过滤器击穿时立即自动切换至另一套备用过滤装置。两级过滤装置击穿失效的情况下,设备用除尘装置,铍废气经过室外备用酸液吸收塔净化后排放,酸液吸收塔的净化效率最低为90%,则事故情况下铍排放速率为 $5 \times 10^{-5} \text{kg/h}$ ,排放浓度为 $1.04 \times 10^{-5} \text{mg/m}^3$ ,远低于铍粉尘的排放限值(排放浓度 $0.01 \text{mg/m}^3$ ,15m高排气筒排放速率 $3.5 \text{kg/h}$ )。

(5) 铍材料研发铸造区由于开炉与关炉会有铍粉尘落在地面上,为保障人员安全及室内环境,设一套地面高负压清扫吸灰系统,风量为 $2050 \text{m}^3/\text{h}$ ,吸气管管径 $\varnothing 100$ ,同时可使用4个吸气口,经旋风除尘器+高负压除尘器+两级高效过滤装置净化装置处理后排至室外排气筒。

(6) 根据《工作场所有害因素职业接触限制第1部分 化学有害因素》GBZ2.1-2019的规定,工作场所时间加权平均容许浓度PC-TWA $\leq 0.0005 \text{mg/m}^3$ 。铍件加工区相对非铍件加工区,应为负压区。除通过局部排风除尘系统处理的废气,其他均由全面排风系统排出,经两级过滤(初效过滤+高效过滤)净化装置处理后,排至排气筒。

(7) 本项目相关过滤器均采用袋进袋出过滤

表5 铍废气的治理措施及排放速率表

房间名称	风量 (m <sup>3</sup> /h)	治理措施	过滤效率	排放浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	排放速率 (kg/h)
局排系统 精密铸造区熔铸 阶段	100	滤筒除尘器+两级过滤(中效过滤+高效过滤) /酸液吸收塔	99.9%	$5 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-7}$
局排系统 精密铸造区开炉 阶段	3400	滤筒除尘器+两级过滤(中效过滤+高效过滤) /酸液吸收塔	99.9%	$1 \times 10^{-5}$	$3.4 \times 10^{-8}$
局排系统 机加区	5400	油雾除尘器+两级过滤(初效过滤+高效过滤)	99%	$1.45 \times 10^{-6}$	$7.83 \times 10^{-9}$
全排系统 精密铸造区	10500	两级过滤(初效过滤+高效过滤)	99%	$4.1 \times 10^{-7}$	$2.60 \times 10^{-8}$
全排系统 机加区	101150	两级过滤(初效过滤+高效过滤)	99%	$3.0 \times 10^{-8}$	$8.2 \times 10^{-10}$
				$5.56 \times 10^{-6}$	$5.35 \times 10^{-7}$

注：精密铸造区熔铸阶段与开炉阶段排风系统不同时运行，合计时选取最大排放速率

器，操作人员不与滤筒直接接触更换滤筒，避免人员与粉尘接触。

(8) 除尘系统方案汇总见表5

铍废气经处理后通过15m高排气筒排放，排放浓度为 $5.56 \times 10^{-6}$ mg/m<sup>3</sup>，排放速率 $5.35 \times 10^{-7}$ kg/h，远低于表2中铍及其化合物排放限值排放浓度0.01mg/m<sup>3</sup>，15m高排气筒排放速率3.5kg/h)。

## 4 结论

(1) 铍属于高毒物品，为有效降低项目对人员及周边环境的不利影响，铍粉尘处理及排放标准应严格执行项目所在地标准及环评要求，如当地无标准，执行国家规范标准中高要求。

(2) 工艺流程对铍粉的产尘及废气的捕集、净化至关重要，需和工艺结合杜绝有毒有害物质的产生及扩散。

(3) 含铍粉尘主要源于熔铸工序，铸造区熔炉含铍废气在滤筒除尘器后增加了两级过滤(中效过滤+高效过滤)，保证系统的高可靠性。考虑过滤器装置意外情况，根据铍粉的特性，备份了一

套酸液吸收塔装置，进一步提高系统安全性。

(4) 机加车床铍粉尘废气中通常含有少量的油气、水蒸气、油滴等，这些废气不能直接进入高效袋式除尘器，会造成糊袋，降低除尘器的寿命。因此在含尘废气进入除尘器之前，根据车床选用的润滑油，选择油雾净化过滤器将油雾、水滴除去。

(5) 对于铍粉场所，建议设全面排风系统，保证房间负压，含铍粉尘不外泄。

(6) 除尘系统设计中，建议所有风机均采用备用风机，风机交替运行，一台故障时立即切换另一台风机，提高系统安全性。

## 参考文献

- [1]杨春晖. 铍铜加工过程中含铍废气治理方案探讨. 有色金属加工, 2013, 8
- [2]田学智, 万晓慧. 铸造车间烟尘和粉尘的收集及除尘方案设计. 铸造设备与工艺, 2019, 10
- [3]大气污染物排放标准: GB16297-1996.

# 基于美国标准的某航站楼暖通设计

■ 李建民 孟凡兵 马超龙 [暖通]

**摘要:** 本文详细介绍了以美国标准为设计依据的某航站楼暖通系统设计,阐述了负荷计算、防排烟系统设计的原则和设计思路。通过整个项目设计过程,本文总结了国外项目设计流程和深度,梳理了美国标准与国标的主要差异,以供设计参考。

**关键词:** 美国标准;暖通;航站楼设计

## 1 项目概况

本项目位于特立尼达和多巴哥共和国。新航站楼位于现状航站楼东侧,独立建设。航站楼总建筑面积为2.5万m<sup>2</sup>,建筑类别为航站楼多层民用建筑,建筑耐火等级为一级。航站楼为1层半的前列式构型,建筑层数为地上2层:1层(到达层)标高为±0m,面积为1.5万m<sup>2</sup>;2层(出发层)标高为5.7m,面积为1万m<sup>2</sup>。航站楼高度为23.65m,使用功能为国际国内航站楼功能。

## 2 设计依据

本项目要求采用美国标准进行施工图设计。美国国家标准学会(American National Standards Institute, ANSI)、美国消防协会(National Fire Protection Association, NFPA)或其他权威性机构通过程序将相关标准认定为联邦标准后,该标准可能被采纳为某一方或地区标准<sup>[1]</sup>。美国各州再通过相关政府文件对这一标准进行认定后,能在该州行政管辖区内流通使用,因此,美国各州使用的设计标准并不完全相同。这些标准里面没有强制性执行技术法规,均为指导设计师设计的手册。ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)编制的大部分标准均通过了ANSI的批准,进而被各州或其他国家广泛采用。

本次设计空调、通风设计依据的主要规范、标准如下:

- (1) ASHRAE Handbook;
- (2) ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality;
- (3) ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy;
- (4) ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2010 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings;
- (5) IBC-2018 International Building Code;

本次设计防排烟设计依据的主要规范、标准如下:

- (1) NFPA 90A-Standard for the Installation of Air-Conditioning and Ventilating Systems 2018 ;
- (2) NFPA 90B-Standard for the Installation of Warm Air Heating and Air-conditioning Systems 2018;
- (3) NFPA 92-Standard for Smoke Control Systems 2018;
- (4) NFPA 204-Standard for Smoke and Heat Venting 2018;
- (5) NFPA 5000 Building Construction and Safety Code;
- (6) UL 555 Standard for Fire Dampers;

作者简介: 李建民,男,工程师,2015年毕业于天津大学供热、供燃气通风与空调工程专业,现就职于中航建投民航建筑院。

- (7) UL 555C Ceiling Dampers;
- (8) UL 555S UL Standard for Safety for Smoke Dampers.

### 3 空调系统设计

#### 3.1 空调负荷计算

##### 3.1.1 室外设计参数

室外设计参数参照了ASHRAE设计手册。图1表示了特立尼达和多巴哥地区部分设计气象参数,气象参数表中各个参数含义可参考文献<sup>[2]</sup>。

ASHRAE气象参数统计采用的是不保证率方法。不保证率为各种不同年百分率条件下的空气干球温度、湿球温度、露点温度以及风速等的一组参数超出平均值的情况出现的时间为全年(8760h)小时的n%,即用全年百分率n%表示不同的不保证率,比如0.4%表示全年超出平均值时间是0.004X8760h=35h。美国标准室外设计气象参数需要业主或设计师根据所服务的房间性质和重要程度采用不同年累计发生频率下的参数值。本次设计采用累年年百分率0.4%的数据。

##### 3.1.2 室内设计参数

室内设计参数参照了ASHRAE手册HVAC应用“商业和公共建筑”和“旅馆、汽车旅馆和宿舍”章节中的参数。

ASHRAE Handbook-Fundamentals和ASHRAE Standard 55通过图表法给出特定衣服热阻、人体新陈代谢、气流速度不超0.2m/s情况下舒适区域室内设计温度在21~28℃之间。ASHRAE Standard 62.1规定室内设计相对湿度不应超过65%。IBC国际建筑标准规定距地面1m高度以上室内设计温度不低于20℃。

ASHRAE Standard 62.1提供了两种新风量计算方法:规定设计法和性能设计法。规定设计法计算公式如下:

$$V_{bz} = R_p \times P_z + R_a \times A_z \quad (1)$$

式(1)中:  $V_{bz}$ 为房间所需新风量( $m^3/h$ ),  $A_z$ 为计算房间面积( $m^2$ ),  $P_z$ 为房间内人数(人),  $R_p$ 为每人所需室外新风量( $m^3/(h \cdot \text{人})$ ),  $R_a$ 为单位地面面积所需新风量( $m^3/(h \cdot m^2)$ )。规定设计法新风量计算包括两个部分:与房间内人数成正比,意在稀释室内人员本身及其活动产生的污染物;与室内地板面积成正比,意在稀释建筑材料、家具、空间内与人数不成正比的活动及暖通系统散发的污染物<sup>[3]</sup>。ASHRAE Standard 62.1给出了不同类型场所单位人员和地面面积所需新风量。

性能设计法针对房间内影响健康和舒适的污染物,根据污染物散发量和所允许的最大浓度,运用质量守恒方程计算新风量,取最大值作为该

ANR ROBINSON INTL, Trinidad and Tobago																WMO#: 789613
Lat: 11.150N		Long: 60.833W		Elev: 12		StdP: 101.18		Time Zone: -4.00 (CAE)		Period: 90-14		WBAN: 00410				
Annual Heating and Humidification Design Conditions																
Coldest Month	Heating DB		Humidification DP/MCDB and HR						Coldest month WS/MCDB				MCWS/PCWD to 99.6% DB			
	99.6%	99%	99.6%			99%			0.4%		1%					
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	
1	22.8	22.9	18.1	13.1	25.3	18.9	13.7	25.4	10.1	28.9	9.3	28.8	1.4	60		
Annual Cooling, Dehumidification, and Enthalpy Design Conditions																
Hottest Month	Hotest Month DB Range		Cooling DB/MCWB						Evaporation WB/MCDB				MCWS/PCWD to 0.4% DB			
	0.4%		1%		2%		0.4%		1%		2%					
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)
9	5.3	32.0	26.1	31.2	25.9	31.1	25.9	27.0	30.6	26.7	30.3	26.6	30.1	6.1	90	
Dehumidification DP/MCDB and HR																
0.4%		1%			2%			0.4%		1%		2%		Extreme Max WB		
DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	Enth	MCDB	Enth	MCDB	Enth	MCDB		
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)	
26.1	21.5	29.7	25.8	21.2	29.4	25.2	20.4	28.8	85.5	30.6	84.0	30.5	83.0	30.6	30.0	
Extreme Annual Design Conditions																
Extreme Annual WS			Extreme Annual Temperature				n-Year Return Period Values of Extreme Temperature									
1%	2.5%	5%	Mean		Standard Deviation		n=5 years		n=10 years		n=20 years		n=50 years			
(n)	(o)	(p)	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
9.2	8.4	7.9	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)		
			DB	20.4	33.1	2.0	1.5	18.9	34.2	17.7	35.0	16.6	35.9	15.1	36.9	
			WB	18.9	28.1	1.4	0.8	17.8	28.7	17.0	29.1	16.2	29.6	15.2	30.1	
Monthly Climatic Design Conditions																
(6)	DBAvg	Annual	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec		
		(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)		
(7)	DBStd	1.03	0.67	0.82	0.88	0.86	0.82	0.92	0.81	0.86	0.92	0.91	0.88	0.78		
(8)	Temperature HDD100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

图1 特立尼达和多巴哥部分气象参数表

房间最小新风量，计算公式如下：

$$Q = \frac{G}{(c_i - c_o) E_v} \quad (2)$$

式(2)中：Q为房间所需新风量(L/s)，G为污染物散发量(mg/s)， $c_i$ 为污染物浓度限值(mg/L)， $c_o$ 为室外空气中污染物浓度(mg/L)， $E_v$ 为通风效率(%)。理论上性能设计法计算值更精确。但是目前对污染物散发量和室内污染物浓度限值以及室内影响健康和舒适的污染物种类还不能定量。本次设计采用规定设计法计算新风量。

综上，结合业主提供国外已完成项目参考图纸，本次室内设计参数如表1所示。

### 3.1.3 冷负荷计算

美标对于负荷计算的要求和原理与国标是一样的，只是采用的方法不同。空调冷负荷计算基础理论的差别主要在于求解房间不透明围护结构动态热过程的计算方法。国内通常采用谐波反应法，ASHRAE手册采用辐射时间序列法，不同计算方法差别主要在核心算法的计算模型、计算原理以及模型假设等方面，不同计算方法之间计算结果存在一定误差，但都可以满足工程设计要求。项目开始阶段通过与业主开会，达成共识并形成会议纪要，本次设计采用国内常用暖通负荷计算软件计算冷负荷。本项目集中空调系统最大冷负荷为3137kW，空调面积冷负荷指标(含新风)为151W/m<sup>2</sup>。

### 3.2 冷源及末端

特立尼达和多巴哥属于热带海洋性气候，终年温度在20~34℃之间，全年分为旱季和雨季，因此该地区只需要供冷。根据当地调研的使用习惯，本次集中空调系统冷源采用3台风冷螺杆式冷水机组，单台制冷量为1096kW，冷媒采用7/12℃的冷冻水。循环水泵设4台，三用一备，水泵变频。空调水系统定压采用囊式常压罐定压补水。

循环水泵及定压补水装置设置在屋顶水泵房内。

航站楼内人员长期停留的区域均设计舒适性空调系统，根据不同条件要求：国际/国内候机厅、出发/到达大厅、国际行李提取厅等大空间设计低风速变风量全空气空调系统，空调设备采用组合式空气处理机组；商业、办公、休息室等内区小房间采用风机盘管加新风系统，新风机组采用卧式吊装新风机组；各层弱电间、配电间、消防控制室等根据电气专业要求设计分体空调系统，室外机摆放于室外地面或房中房屋面；信息机房根据弱电专业要求，设计机房专用空调系统。

## 4 防排烟系统设计

### 4.1 排烟系统设计

#### 4.1.1 排烟系统设计部位

《NFPA204-Standard for Smoke and Heat Venting》标准用于紧急排出建筑内产生的烟气的排烟系统设计，规范中排烟系统设计方法适用于所有类型的建筑。本标准设计的排烟系统不适用于烟层温度超过600℃的场合。

《NFPA92-Standard for Smoke Control Systems》标准用于大空间或相邻房间起火的排烟系统的设计和计算、防烟系统的设计、楼梯间加压系统的设计。针对大空间和连通空间的排烟方法可以是下列的一种或多种：

(1) 利用大空间作为蓄烟池，建立烟气层沉降模型，用于判断人员逃出这个空间之前，烟气层界面高度是否到达人员所在的高度。

(2) 大空间排烟，通过机械排烟使得空间内的烟气层界面在设计的时间间隔内维持在一定的高度。

(3) 大空间排烟，通过合适机械排烟量使得在一段时间内减慢烟气层下降的速度，使得人员从该空间疏散至安全的地方。

(4) 通过自然排烟使得空间内的烟气层界面

表1 室内空气设计参数

房间名称	空调季		风速	新风量		噪声	备注
	温度	相对湿度		单位人员所需	单位地面面积所需		
	℃	%		L/(s·人)	L/(s·m <sup>2</sup> )		
候机大厅	23	60	≤0.2	3.8	0.3	≤50	——
出发、到达大厅	24	60	≤0.2	2.5	0.3	≤50	——
商业	23	60	≤0.2	2.5	0.3	≤50	——
办公	23	60	≤0.2	2.5	0.3	≤45	——
行李提取厅	24	60	≤0.2	3.8	0.6	≤50	——
VIP等候室	23	60	≤0.2	2.5	0.3	≤45	——
电气设备用房	25	60	≤0.2	2.5	0.3	≤50	——

在一段时间间隔内维持在设计的高度。

(5) 通过自然排烟减缓空间内的烟气层界下降的速度,使得人员从该空间疏散至安全的地方。

(6) 通过反向气流阻止大空间内和连通空间内的烟气流动。

与国标不同,美标未明确规定设置排烟系统的场所和部位,排烟系统设计的目标是确保烟气层在认可的安全高度之上,以利于室内人员的逃生或烟气层下降到危险高度所需时间要大于建筑物内人员安全撤离所需的时间。针对火灾危险性场所的烟气并不非得排出到室外,需由设计人员性能化分析是否需要设置排烟系统。

#### 4.1.2 排烟系统计算方法

与国标排烟系统设计方法仅有代数公式法相比,美国标准排烟系统设计方法有代数公式法、比例模型法、火灾分区模型法。

本项目排烟系统设计方法采用代数公式法,根据发生火灾后人员逃出这个空间之前烟气层界面是否达到人员所在高度的函数关系,确定哪些区域需要设置排烟系统。本次设计国际行李提取厅、移民大厅、国际到达大厅以及内区办公走道等大空间采用机械排烟系统,值机大厅、迎客大厅、国际候机大厅等采用自然排烟系统。利用烟羽流模型公式计算产烟量,通过机械或自然排烟量与烟羽流产烟量相等使空间内的烟气层界面在设计的时间间隔内维持在一定的高度。自然排烟量和机械排烟量公式与国内《建筑防排烟系统技术标准》GB51251-2017标准提供的公式是一致的,利用国内防排烟计算软件可计算排烟量。美国标准未规定排烟风机必须放置于机房中,风机适用于其预期用途及其可能承受的温度即可。

#### 4.1.3 防烟分区划分

美标与国标对于防烟分区的定义是一样的,机械排烟系统和自然排烟系统不能同时服务于同一个防烟分区。对防烟分区面积、长边长度、挡烟垂壁高度也均有规定,但有差异。美国标准规定挡烟垂壁高度不小于房间净高的20%,没有不小于500mm的要求,高度小于房间净高30%时,挡烟垂壁之间距离不应小于1倍房间净高,防烟分区长度及宽度均不得超过房间净高的8倍,和房间净高、房间性质以及建筑类别没有关系。

#### 4.1.4 排烟口设置要求

美国标准规定单个排烟口面积不应超过 $2d^2$ ( $d$ 为设计烟层厚度),对于长宽比大于2的排烟

口,宽度不得超过设计烟层厚度。防烟分区任一点与最近排烟口之间的水平距离不得超过2.8倍房间净高,与建筑类型、房间净高以及是否具有自然对流条件等无关。单个排烟口最大允许排烟量和国标是一致的,在此基础上对排烟口之间最小间距做了公式计算要求。

#### 4.1.5 补风系统

美国标准规定设置排烟系统的场所均应设置补风系统,补风形式和补风口设置位置与国标一致。此外规定对于流向烟羽流的补风风速不应超过1m/s,从进风口到需排烟的防烟分区的气流通道的尺寸至少应是进风口的3倍,这是国标中未做规定的。

### 4.2 防烟系统设计

#### 4.2.1 防烟系统设计部位

《NFPA92-Standard for Smoke Control Systems》对建筑下列部位设置加压送风系统:

- (1) 楼梯井;
- (2) 防烟分区与非防烟分区之间;
- (3) 电梯井;
- (4) 前室;
- (5) 避难层。

美国标准防烟方式为机械加压送风,无自然通风措施。允许前室成为建筑烟气控制系统的一部分,可对前室增压也可不增压。对于电梯防烟措施,国标采用前室加压送风或自然通风。美国标准可以采用下列方法防止烟气进入电梯竖井:

- (1) 排除火灾楼层的烟气;
- (2) 对电梯前室加压送风;
- (3) 建造不透烟的电梯门厅;
- (4) 对电梯竖井加压送风;
- (5) 在电梯自动召回后关闭电梯门。

#### 4.2.2 防烟系统压差设计

对于防烟系统,应建立穿越防烟分区的最大最小压差,穿越两个指定空间的最小设计压差,如表2所示:

表2 最小设计压差

建筑物类型	天花板高度(ft)	设计压差(mm水柱)
喷淋	任意	0.05
无喷淋	9	0.10
无喷淋	15	0.14
无喷淋	21	0.18

美国标准中烟气控制系统的设计最小压差和防烟分区是否配有灭火喷水系统、防烟分区天花板

高度有关。最大压差值基于允许开门的最大力。

### 4.2.3 加压送风系统设计

美国标准加压送风系统送风方式和国标一样分为直灌送风系统和多点送风系统，直灌送风系统送风点允许布置在楼梯间里的任何位置。对于楼梯间高度超过30.5m的直灌送风系统应进行设计分析。对于送风点超过3层的送风系统，应进行设计分析，以确保因开门导致的加压空气损失不会使楼梯间的正压低于最小设计压力。

加压送风机可采用螺旋桨式轴流风机、离心风机或管道式轴流风机。在风机有挡风罩情况下，直灌送风系统可以使用屋顶风机或外墙式风机，风机不需要放在专用机房内。

美国标准对加压送风风量计算方法没有明确说明，风量由设计者根据需维持的最大最小压差计算确定。本项目均为封闭楼梯间，防烟方式采用楼梯顶直灌加压送风方式，加压送风量按照《建筑防烟排烟系统技术标准》GB51251-2017第3.4.5节公式计算，满足美标规定的楼梯间压差要求。

## 4.3 防火阀

### 4.3.1 防火阀类别

防火阀性能要求遵循UL 555标准。UL 555标准将防火阀分为静态防火阀、动态防火阀、防烟阀、防烟防火阀和走道排烟阀等。

静态防火阀安装在通风空调风管上，动作温度为71~100℃；动态防火阀安装在排烟系统风管上，动作温度为71~177℃；防烟阀安装在通风空调风管上，平时常开，无动作温度，可由消防控制室远程关闭；走道排烟阀安装在风管穿越走道处或作为末端排烟口安装在走道开孔部位，平时常闭，着火时打开；防火防烟阀安装在风管穿越防火屏障处，根据系统要求可设置两个动作温度感应，可达到设定温度自动关闭也可以消防控制室远程关闭。

### 4.3.2 防火阀安装形式

美国标准防火阀的主轴通过连杆机构与执行机构连接，阀门叶片及主轴所处平面与执行机构所处平面重合，从而可实现阀门本体位于墙洞内，执行机构位于墙洞外的安装形式<sup>[4]</sup>，阀门本体位于墙洞内可以更好的保护所穿防火屏障的耐火完整性，从而不需要像国内风管穿过防火隔墙、楼板和防火墙时，穿越处风管上的防火阀、排烟防火阀两侧各2m范围内的风管应采用耐火风管或风管外壁应采取防火保护措施，防火阀安装示意图如图2所示。

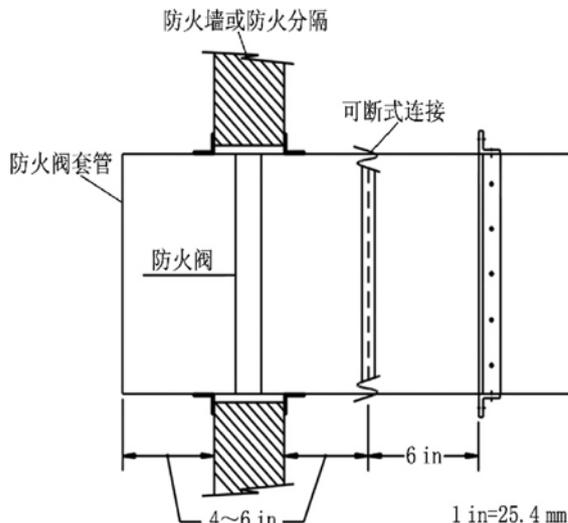


图2 防火阀安装示意图

### 4.3.3 防火阀安装位置

中美标准都明确规定通风、空气调节系统风管和排烟系统风管在什么情况下设置防火阀。中国标准规定了具体设置部位，美国标准以耐火极限为标准规定风管穿越需设置防火阀，规定如下：

- (1) 当风道和通风口穿过具有2h及以上耐火极限的墙体或分隔时；
- (2) 当风道和通风口穿过具有1h及以上耐火极限的竖井墙体时；
- (3) 当无竖井保护的风道穿过楼板或需要被保护的通风口穿过楼板时；
- (4) 当具有30min及以上耐火极限的墙体或分隔上开有通风口时。

结合以上要求，本次设计空调通风管道穿越防火隔墙、机房时设置动作温度为75℃的静态防火阀，空调通风管道穿越防火墙、楼板时设置动作温度为75℃的防火防烟阀，排烟风管穿越防火墙、机房、防火隔墙、楼板时设置动作温度为170℃动态防火阀。

## 5 设计流程、绘图深度

对于暖通专业施工图成品文件，美标与国标无本质差异，但标准体系的不同和设计流程及深度方面存在差异。美标体系没有可参照的“国标图集”，最终成品文件往往要具备各系统的节点安装详图。

### 5.1 设计阶段划分

美标一般会将会设计工作划分为3个阶段（30%

阶段、90%阶段、100%阶段），复杂项目可能会划分为更多的阶段（30%阶段、60%阶段、90%阶段、100%阶段）。

国内设计人员在初次参与国外项目的设计工作时，往往将30%阶段等价理解为国内的初步设计阶段，将90%及100%阶段理解为扩大初步设计阶段和施工图设计阶段，这种理解存在偏差。依此认知提交的各阶段设计文件往往不能满足地方审图的深度要求。国外的各设计阶段应视为国内施工图设计阶段的详细划分。

30%阶段侧重设计方案的确定，设计采用的依据、暖通空调、通风以及防排烟等系统方案制定、设备材料的选取在这个阶段都要通过会议与业主达成共识，避免后期画图过程造成重大翻车。

60%阶段侧重图纸主要暖通系统主要路由的确定。这个阶段涉及到暖通系统的平面图基本完成，可没有定位、标高。

90%阶段侧重图纸细节做法。此阶段可理解为国内设计施工图阶段深度，需有详细的定位、标高以及机房详图。

100%阶段侧重各系统节点安装详图。如风管吊装安装详图、管线穿墙、出屋面做法详图、风口安装详图等。

## 5.2 审图流程

项目每个阶段图纸先交由总承包商审核，根据其初审意见完成后，再提交当地咨询和独立审核单位进行审核，形成意见修改同意并签字后，将图纸提交业主审核，业主聘请一家咨询单位审核形成业主意见。待业主意见修改完成后进行下一阶段设计。

## 5.3 审图意见

国外审图机构的审图侧重点不同于国内，其审图更侧重于审图人员的专业经验，注重设计输入信息的来源是否可靠，设计方案是否合理，大致可分为以下几类：

### (1) 负荷计算书

负荷计算是30~60%设计阶段的主要审查内容之一，与国内负荷计算要求基本一致。

### (2) 设计方案

国外审图机构在30~60%设计阶段会通过设计说明及图纸审查设计方案的合理性。当与国内设计习惯存在差异时，只要理由充分、依据合理，和审图机构沟通达成一致意见即可。

### (3) 图纸表达方式及设计深度

图纸表达方式及设计深度相关的审图意见贯穿于各个设计阶段，主要体现在与当地习惯表述不一样。国外习惯每张平面图里均需表示涉及到的图例，原理图里面设备的参数以及尺寸等信息直接表示在设备旁，更方便看图人员查看。此表述方式值得学习。

### (4) 设计细节

60~90%设计阶段的图纸审查重点更倾向于图纸的设计细节，如管线走向的合理性、图纸中文字重叠等。

## 6 设计感想

(1) 美标项目设计没有强制性技术标准和规范，相关的手册、标准为设计师提供指导，但不能完全替代设计师的判断。设计更侧重于输入信息的来源是否可靠、与业主达成的共识以及工程师根据已获取数据做出的假设和判断，对于选用哪一种计算方法不做要求。只要方法合理，理由充分，灵活处理。

(2) 设计过程业主的意图、当地的习惯也很重要。针对一些设计方案在30%阶段尤其重视，要提前与业主沟通好，与业主达成共识，对于图纸表达需考虑当地习惯画法。

(3) 执行美标过程中，设计师需发挥主观能动性，并非丢弃国内合理做法，需从方案合理、表达清晰角度考虑问题。

(4) 以上所讲内容可能只适用于本项目，掌握美标设计逻辑思想，不同项目情况不同。

## 参考文献

- [1] 徐伟, 张时聪等. 国外暖通空调设计规范及编制机构介绍[J]. 暖通空调, 2012, 42(7): 61-66
- [2] 李娜. 关于ASHRAE设计气象参数的解读[J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(9): 42-46
- [3] 韩华, 徐文华等. 国外新风量标准设计指标的发展(1)——关于ASHRAE标准62-1989的修订[J]. 暖通空调, 2000, 30(5): 15-19
- [4] 叶剑云. 防火阀和排烟阀中美标准对比分析[J]. 暖通空调, 2019, 49(2): 36-41

# 三亚凤凰机场航站楼 冷源及空调系统优化分析

■ 高阳洋 孟凡兵 [暖通]

**摘要：** 航站楼空调冷热源系统在整个航站楼运行能耗中占有至关重要的地位，空调末端系统的优化设计直接影响空间的综合利用和整体呈现效果。本文以三亚凤凰国际机场航站楼扩建工程为例，对其不同冷源方案的能耗及经济性进行分析，同时结合航站楼空间特点和结构形式，对空调末端系统的优化策略进行论述，供设计参考借鉴。

**关键词：** 航站楼；冷热源；能耗；经济性；空调末端

## 0 引言

空调冷热源是集中式空调系统的核心，冷热源形式的不同，其造价、占用空间以及能耗的差别会很大。而影响空调冷热源方案设计的因素很多，如当地能源结构、建筑类型和规模、气候条件、当地政策等。冷热源方案的选择也会影响空调末端系统的运行效果，从而影响建筑室内的热湿环境。而空调末端系统的形式又千差万别，如何因地制宜地选取适合每个工程的空调末端系统，对整个建筑的成败也至关重要。

## 1 工程概况

三亚凤凰国际机场航站楼扩建工程，总建筑面积约5.2万 $m^2$ ，占地面积约1.5万 $m^2$ ，建筑高度23.5m（最高点26m，最低点16m），为多层民用建筑。如图1所示。航站楼长度约290m，进深约80m，其固定端采用登机楼形式，接两个E类机位兼C类飞机停放。航站楼主体3层，局部地下1层，结构形式采用全钢结构。首层为迎客大厅、行李用房、设备用房、员工及货物出入口和远机位候

机厅；二层为出发值机大厅、安检厅，免税商业街等；三层为候机区、餐饮特产区和VIP候机区。



图1 三亚凤凰国际机场航站楼扩建工程效果图

## 2 空调冷源系统的选择

空调冷热源的选择需综合多方面的因素。国内各地区的能源结构、价格、政策导向、环保要求等均不相同，而且还处在不断变化之中，这就使得在确定冷热源方案时，不仅要考虑技术的可靠性、投资的大小、运行费用的高低以及维护保养的难易程度等，还要考虑国家能源政策和环境保护等要求。同时，还需结合气候条件、能源状况、动态费用年值以及实际情况来综合考虑。

作者简介：高阳洋，女，高级工程师，2007年毕业于哈尔滨工程大学热能工程专业，现就职于中航建设建筑设计研究院。

三亚位于夏热冬暖地区，有全年供冷需求，且当地室外设计湿球温度较高，高达 $28.1^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。本项目的冷负荷约为7386kW，全年逐时冷负荷曲线如图2所示。当地电力充足，但针对机场工程并没有峰谷电价的优惠政策。结合本项目实际情况，考虑对水冷和风冷两种形式的供冷方案进行分析比较。

方案1：水冷形式。采用3台水冷离心式冷水机组，单台制冷量2462kW（700RT），其中一台为变频冷水机组。冷冻水流量为 $424\text{m}^3/\text{h}$ 台，冷却水流量为 $508\text{m}^3/\text{h}$ 台；冷冻水供回水温度为 $7^{\circ}\text{C}/12^{\circ}\text{C}$ ，冷却水供回水温度为 $32^{\circ}\text{C}/37^{\circ}\text{C}$ 。

方案2：风冷形式。采用6台风冷螺杆冷水机组，单台制冷量1237kW（350RT）。冷冻水流量

为 $212\text{m}^3/\text{h}$ 台，冷却水流量为 $254\text{m}^3/\text{h}$ 台；冷冻水供回水温度为 $7^{\circ}\text{C}/12^{\circ}\text{C}$ 。

### 3 不同冷源方案能耗比较

(1) 方案1的逐月能耗，如图3所示。全年总能耗约540万kWh，其中主机能耗约414万kWh，占总能耗的77%；冷冻水泵能耗约62万kWh，占总能耗的11%；冷却水泵及冷却塔的能耗约64万kWh，占总能耗的12%。

(2) 方案2的逐月能耗，如图4所示。全年总能耗约583万kWh，其中主机能耗约521万kWh，占总能耗的89%；冷冻水泵能耗约62万kWh，占总能耗的11%。

(3) 两种方案的能耗对比，如图5和图6所示。方案2比方案1全年总耗能多约43万kWh，即风冷系统比水冷系统全年总能耗高7.9%。从图6中看，二者差别并不明显，也就是说，水冷系统从总能耗角度看并没有绝对明显优势。究其原因，主要是受当地湿球温度较高的影响。其空调室外计算试求温度高达 $28.1^{\circ}\text{C}$ ，在某些时段，甚至风冷系统能耗与水冷系统持平或更低，如11月、12月、1月、2月。再加之方案1的冷却水系统耗能，致使两种方案能耗差异不大。

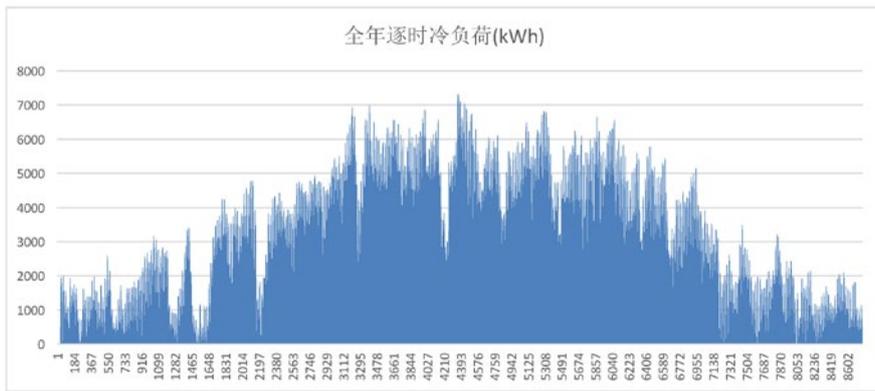


图2 全年逐时冷负荷曲线

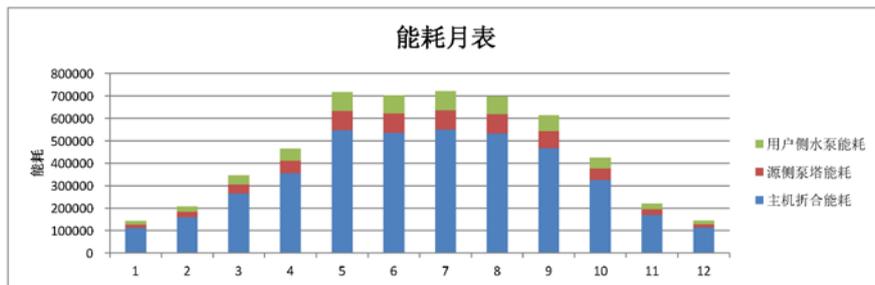


图3 方案1能耗月表

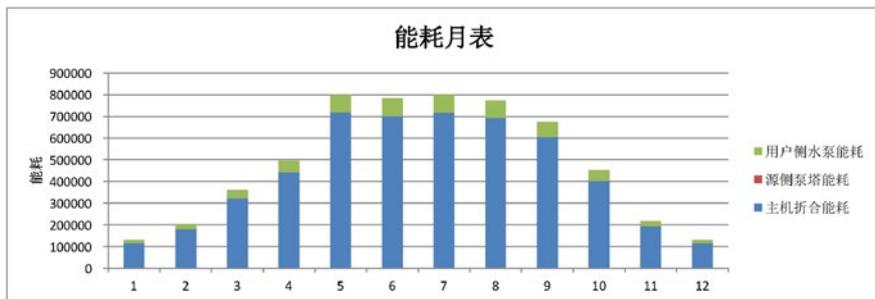


图4 方案2能耗月表

### 4 不同冷源方案经济性比较

初投资和运行费用是影响方案的重要因素。在全年动态能耗分析后，针对上述两种冷源方案，在设置合理的冷源运行控制策略基础上，对各方案的初投资费用、年运行费用

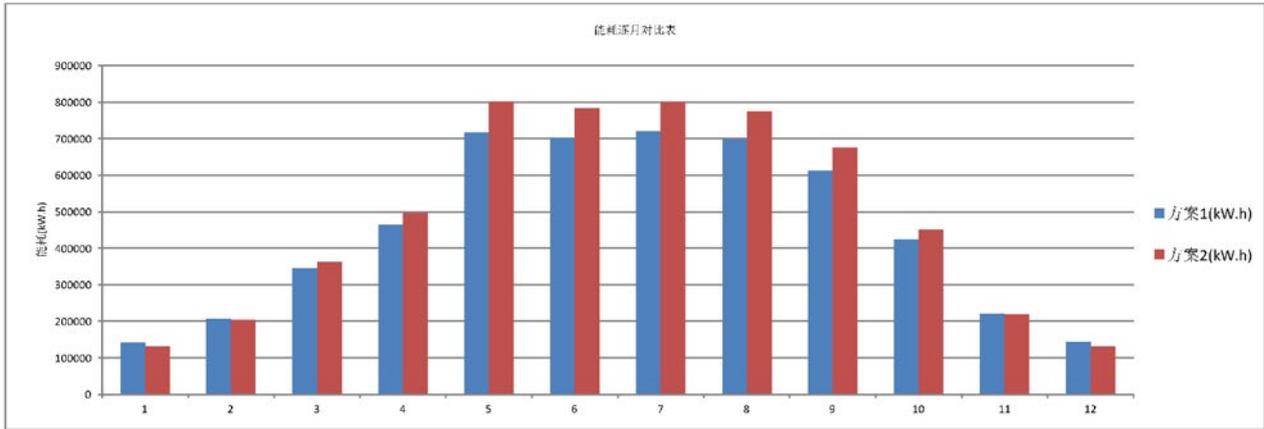


图5 能耗逐月对比表

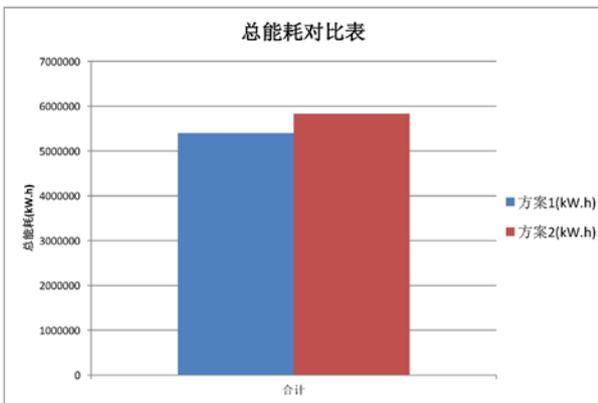


图6 全年总能耗对比表

以及费用年值进行了计算分析，如表所示。经对比分析，方案1较方案2初投资节省325万元，年运行费用节省19万，费用年值节省76万元。

综上，结合制冷设备的体积、占用空间等影响因素，选用方案1作为本项目的冷源方案，其整体的经济性和节能性均优于方案2。

## 5 空调末端系统优化分析

### (1) 高大空间空调末端方案

机场航站楼由于高度高，在高大空间容易造成垂直温度梯度；航站楼空间容积大，常因送、回风口的安装位置不尽合理造成水平方向的温

全年经济分析对比表

方案	方案1	方案2
初投资费用(万元)	962	1287
年运行费用(万元)	271	290
费用年值(万元)	440	516

度、速度梯度过大<sup>[2]</sup>。此外，与办公大楼相比较，大空间的地板面积和外墙面积都比较大，很容易受到外部环境的影响。

本航站楼的高大空间区域，如值机大厅、安检大厅、候机厅等采用球形喷口侧送风、集中回风的分层空调系统，有效降低了夏季空调的能耗。因为该地区没有明显的过渡季，从节省投资和空间角度出发，全空气空调系统均采用单风机系统。短暂的过渡季可根据室内负荷变化，在保证室内人员卫生要求所需新风量的前提下，采用变新风的方式进行室温调节，实现系统节能运行。

顶层的头层舱休息区因其个性化使用需求，采用直膨式全空气空调系统，自带独立冷源，可根据使用要求独立开启、关闭，无需和冷机的使用时间同步。室外机布置于通风良好处，结合建筑布局就近置于屋面处。室外机安装时设置了导风筒，保证气流不短路。冷媒管的室外和明装部分，考虑三亚地区的气候特点，采用抗老化耐腐蚀材料硬质包覆，其气流组织形式也采用球形喷口侧送风、集中回风的分层空调系统，降低夏季空调的能耗。

### (2) 全新风运行的必要性分析

综合分析三亚地区的全年气象参数，在全年8760个小时里，室外干球温度低于20℃的小时数为426h（相当于17.8天）；室外干球温度低于18℃的小时数为128h（相当于5.3天），选取典型气象参数如下：

室内温度24℃，相对湿度50%的情况下，计算的室内焓值为48kJ/kg.K；

室外温度20℃，相对湿度70%~80%的情况下，计算的室外焓值为46kJ/kg.K~50kJ/

kg.K。

也就是说,室外焓值或高于室内焓值,或与室内焓值的差值较小,没有全新风利用室外低温冷源的可能性。

因此,本设计根据室内负荷变化,在保证室内人员卫生要求所需最小新风量的前提下,采用变新风的方式进行室温调节,既能实现系统节能运行,又避免了管材的浪费,进而在设计合理的前提下,为后续综合管线的排布提供了方便。

### (3) 管线布置的合理化排布

综合管线的合理与否,直接影响建筑层高、使用空间,甚至影响结构梁高等。暖通专业内部各系统管线之间、本专业管线与其他机电专业管线之间、管线与结构之间的碰撞很常见,本项目因是扩建项目,需要结合原航站楼的层高进行限高设计。各层层高不超过6m,且没有夹层,结构考虑全钢结构进行设计,暖通专业管线从初步设计开始,就需要与结构专业、建筑专业全面精细配合。

首先,空调机房分散设置,避免管线集中;其次,支风管采用穿梁方案,梁洞位置和大小在结构专业计算建模之初就要合理化确定,保证结构设计可行及建筑空间高度可接受;再次,不能穿梁的空调干管集中区域,和建筑专业实时配合,确定可实现的吊顶高度及吊顶形式。以上前期工作看似繁琐,却可为之后的施工图设计乃至后期的管线配合工作提供方便和切实可行的依据。

### (4) 设备机房的合理化设置

动力站、风机房、空调机房、屋面设备、水泵是噪声和振动的源头,受建筑使用功能布局条件的限制,办公使用空间或人员长时间停留区域往往与设备左右或上下相邻,另外由于结构体系为钢结构易传振,为避免其噪声和振动对人员产生影响,设计时从以下方面综合考虑。

1) 尽量避免振动源头的机房位于办公或人员长时间停留区域的左右或上下。

2) 建筑隔声隔振非常重要。土建专业对机房的隔声、浮筑楼板和基础、内壁吸声等有明确要求,需严格按照要求实施。尤其是机房门,要求隔声量不小于50dBA。通常双道密封条、软包吸声材料才能达到,而且要求锁闭能够压紧。同时,产生噪音的站房内表面均贴吸声材料。浮筑基础和楼面要有专业隔振厂家核对技术方案实施。

3) 转动设备的吊装,如吊装空调、新风机组

和风机、多联机室内机、风机盘管、排气扇等均采用减振支吊架。

4) 转动设备与基础之间采用满足实际订购设备性能要求的减振器。

5) 组合空气处理机、新风机组、风机、水泵等动力设备及管道均选用高效、低噪音设备;通风、空调系统均设消声段或消声器,当订购的设备噪声超过设计值时,应重新核算并采取相应消声措施。

## 6 结语

(1) 冷热源方案的选择会影响空调系统功能的实现程度,需结合当地能源情况、建筑类型、气候条件、政策因素等,因时、因地综合考虑,确定其合理性。

(2) 从能耗和经济性角度进行研究,确定适合三亚地区航站楼的冷源方案,即电制冷的冷水机组方案。

(3) 在无明显过渡季地区,合理选择空调形式,不仅可以减少新风管道占用空间,而且可以减少机房占用的建筑面积,使系统设计能适合当地气候特点、建筑特点,并满足人文和环保要求。

(4) 设计前期预排综合管线,合理优化管线大小及其路径,提出合理的空间占用条件,对于节省层高、优化结构梁高具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 GB50736—2012
- [2] 罗奕臻.国内机场航站楼空调系统初探[J].制冷与空调,2012

## 动力工程设计研究院

中国航空规划设计研究总院有限公司动力工程设计研究院（以下简称“动力院”）始建于1951年，前身为航空动力工程设计研究所，经过60多年的发展，在航空、航天燃气轮机产品制造、航空发动机及燃气轮机装配维修、计量试验、新材料及民用建筑的规划、咨询、工程设计和工程总承包方面展现出强大的实力，并得到业界的广泛认可。尤其是在航空发动机维修行业在国内处于垄断地位，并获得国家优秀工程设计奖、部级优秀工程设计奖、科学进步奖等诸多奖项，实施的工程项目遍布全国各地。

动力院秉承“航空报国、强军富民”的集团宗旨，始终致力于为社会提供高端咨询服务。经过数十载春秋，动力院打造了发动机维修、航天、新材料、计量、民用建筑和EPC管理六大精英团队，汇集了数百名工程设计人才，拥有注册咨询工程师10名，注册规划师1名，一级注册建筑师10名，一级注册结构工程师17名，注册设备工程师10名，注册电气工程师3名，注册造价师7名，一级注册建造师5名，注册监理工程师5名。

动力院践行“创新成就梦想，实干铸就辉煌”的公司使命，提供咨询、设计、造价、建设等全过程的贴心服务，不断扩大高端领域规划咨询业务的范围和规模，致力于成为以设计为龙头提供投资咨询建设全过程服务的国际一流价值集成商。



2022年第1期（总第159期）  
2022年2月出版



中航集成设备有限公司新建生产实验楼