

# 航空工程建设

AERO-INDUSTRY ENGINEERING CONSTRUCTION

2021年第6期 总第158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

## 天府生物城成都蓉生药业有限责任公司重组凝血因子生产车间

**项目名称：**天府生物城成都蓉生药业有限责任公司重组凝血因子生产车间

**建设单位：**成都蓉生药业有限责任公司

**设计单位：**航空工业规划总院医药工程设计研究院

成都蓉生药业有限责任公司重组凝血因子生产车间项目为我院第一个洁净车间EPC项目，包含新建重组凝血因子生产车间、动物房以及配套园区地下车库，总建筑面积约2.8万m<sup>2</sup>。是我院实现EPC项目零的突破后在总承包领域又一重大的成果。

该项目采用高标准设计，结合项目所在地的要求，项目采用了装配式设计以及绿色建筑三级标准。是我院设计的第一个绿建三星工业建筑，也是在医药洁净车间设计中第一次尝试装配式设计，为我院适应政策变化迎合国家建筑工程发展的大方向积累了宝贵的经验。

在项目设计过程中，结合EPC项目对图纸深度的要求，我们对以往的设计项目中易错易漏的环节进行整理总结，对设计图纸在深度和准确度上进行了一次提升，不仅为本项目顺利推进奠定了坚实的基础，也为我院洁净车间的设计标准树立了一个标杆。同时在项目设计过程中也充分锻炼了队伍，为医药院今后在EPC领域的发展积累下宝贵的经验。



## 工信部：探索数据交易平台，提升管理开发水平

“着力激活数据潜能，加快研制工业数据交互等基础共性标准，探索建设数据交易平台，提升数据管理和开发利用水平。”11月20日，工信部部长肖亚庆在2021中国5G+工业互联网大会上表示，加强企业技术创新，用好产业数据资源，探索5G和工业互联网融合发展新路径。

赋能千行百业智能升级是发展5G+工业互联网的根本目的，据工信部总工程师韩夏介绍，赋能基础日益坚实、路径更加清晰。工业互联网网络、平台、安全三大功能体系初具规模，5G基站超过了129万座，特别是满足工业生产需要的大型传输、高精度定位等难点技术加快突破，工业5G的模组、网关等关键产品相继推出，价格明显下降。她建议，夯实网络基础，紧贴生产需求，推进工业5G切片虚拟专网、混合虚拟专网部署，开展5G专网试点，打造5G全连接工厂标杆，形成以建促用，建用结合的良好发展模式。要强化产业支撑，根据5G国际标准26、27以及后续版本的导入进程，进一步增强工业用5G低时延、高可靠、大连接的技术能力，同步推进相应器件、产品的研发和产业化进程。

（信息来源：《科技日报》）

## 国务院发布关于支持北京城市副中心高质量发展的意见

近日，国务院印发《关于支持北京城市副中心高质量发展的意见》（以下简称《意见》）。《意见》深入贯彻落实党中央、国务院决策部署，明确了支持北京城市副中心高质量发展的指导思想、基本原则、主要目标，提出了重点任务安排和组织实施要求。

《意见》提出，要强化规划管理，创建新时代城市建设发展典范：

实施高标准规划建设管理。强化国土空间规划管控，统筹划定落实永久基本农田、生态保护红线、城镇开发边界三条控制线。支持在城市副中心及周边地区制定高于国家标准、行业标准的市政设施建设、生态环

保等地方标准，推动绿色城市、森林城市、海绵城市、智慧城市、人文城市、宜居城市建设。加强城市设计引导，坚持地上地下立体开发，加强新建高层建筑管控，强化超大体量公共建筑、超高层地标建筑、重点地段建筑管理，塑造城市时代特色风貌。实施城市更新行动，积极推进城市生态修复和功能完善，因地制宜补齐既有居住社区建设短板。按照大部制、扁平化原则统筹使用各类编制资源，推进城市管理和执法体制改革。实施乡村振兴战略，构筑城乡融合发展的关键功能节点，带动区域农业农村现代化。

推进智慧城市建设。加强城市信息模型平台和运行管理服务平台建设，打造数字孪生城市，建设智慧高效的智慧城市数据大脑，探索形成国际领先的智慧城市标准体系。推动在城市副中心建设北京政务大数据平台，推广“互联网+政务服务”，支持城市副中心政务服务改革先行先试、提升效能。加强新型城市基础设施建设，提高市政基础设施体系化、网络化、智能化水平。实施智慧医疗、智慧交通等一批智慧惠民工程，提升城市服务品质。

构建便捷高效现代交通体系。建设以轨道交通为骨干、公共交通为主导的便捷智能综合交通系统。研究加强城市副中心与中心城区的轨道交通快速连接，支持城市副中心及周边地区有序规划建设市域（郊）铁路线网，提升通勤能力。制定市域（郊）铁路公交化运营标准，打造一批市域（郊）铁路示范项目。建立级配合理的城市路网体系，实施北京东六环路城市副中心段入地改造和国家高速公路功能外移。加快建设跨界道路和跨界河桥梁。制定实施城市副中心及周边地区综合交通一体化提升规划，提升互联互通水平。

提升公共服务水平。有序推动中心城区优质中小学教育资源和医疗资源在城市副中心及周边地区合理布局。建立健全疫情防控常态化机制和防控救治体系，强化基层医疗服务设施和医疗人员力量，提高应对重大突发公共卫生事件的能力和水平。鼓励社会力量依法依规举办国际化医院，支持医学院、高水平专科医院等建设，推进互联网医疗平台建设。推动京津冀区域基本医疗卫生服务资源共享、联动协作，逐步实现跨区域双向转诊、同级医院检查检验结果互认。高水平规划建设医养结合的多层次养老服务体系，推动北京养老服务项目向北三县等周边地区延伸布局。

（信息来源：《建筑时报》）

## 北京公司108号楼建设项目

建设地点：北京市

设计单位：航空工业规划总院医药工程设计研究院

建设情况：已竣工

本项目为一座高层丙类厂房，建筑总层数4层，总建筑面

积约1.5万 $m^2$ 。因生产工艺要求，本建筑的生物安全等级达到3级。设计团队充分考虑了项目总体进度以及生产工艺、生物安全等级的要求，并结合北京市建筑装配式设计的要求，采用了钢框架结构体系，同时外围护结构及内部隔墙全部采用装配式建筑构件，一方面为项目的整体建设进度提供了有力保障，另一方面打造绿色、节能的生产厂房，积极响应国家低碳节能的倡导。





## KIZARD 生命科学园项目

建设地点：阿联酋阿布扎比

设计单位：航空工业规划总院医药工程设计研究院

建设情况：施工中

KIZARD生命科学园项目位于阿联酋阿布扎比，项目建设规模约6万m<sup>2</sup>。

本项目设计规范及标准完全按照项目所在地的要求，是我院第一次真正意义上完全按照外方标准进行设计的项目，给设计团队带来巨大的挑战。项目设计方案充分考虑项目所在地的自然及人文环境特点，建筑整体方案及材料的选用在满足功能需求的同时，充分结合建筑节能和当地气候文化，打造有地方特点的优秀建筑。

## 新建重组新型冠状病毒疫苗车间项目 (L211项目)

建设地点：甘肃省兰州市

设计单位：航空工业规划总院医药工程设计研究院

建设情况：施工中

本项目为新建新冠疫苗生产厂房，厂房为地下1层，地上4层，其中2~4层南侧局部有夹层，屋面设置出屋面楼梯及设备机房。1层为预充包装车间；2层为西林瓶包装车间；3层为分装车间（5条西林瓶分装线+1条预充分装线）；4层为原液生产车间

（5条原液生产线+1条集中清洗配液中心）。

本建筑采用钢框架结构，东西轴线长96m，南北轴线长为66m。其中，主体部分柱网尺寸为（8m×12）×（8m×3+8.4m×5）。建筑高度32.45m，其中1层层高7.2m、2~4层层高均为7.8m（2~4层南侧局部夹层层高为3.9m）；局部出屋面部分层高6.5m。

本项目建筑风格以“现代大方、简洁明快”的主调与现状厂区高度协调统一，强调整个基地建筑的整体性。厂房造型方整，简单实用，统一的建筑立面、造型手法，从而形成整体的对外建筑形象。





## 长春百克生物科技股份有限公司生物研发生产基地项目

建设地点：吉林省长春市

设计单位：中国航空规划设计研究总院有限公司

建设情况：施工中

本项目用地位于长春市经济开发区主干道旁，毗邻绕城高速收费站，是进入开发区的第一站，是长春经济开发区的形象展示，也是本园区向城市展示的有力招牌。同时，项目用地毗邻长春百克生物科技股份有限公司疫苗生产基地，本地块

可以利用现有园区的配套设置，两个厂区合并使用，减少配套资源的重复，提升利用率，最大限度的发挥土地效益。

本次园区用地内新建建筑分别为3栋生产厂房、1栋综合类厂房、1座地下室，以及本园区内海绵城市需要使用的构筑物。

本项目的设计理念为“为业主提供永恒”。在立面造型上，本案以原厂区风格为蓝本，新老园区立面风格传承发展。整体风格统一，但又有明显的区别，寓意着新老更迭。项目采用红色贴砖，凸显建筑的厚重感，在寒冷的冬天带来一股暖意。

### 标准名称: 再生骨料预拌砂浆应用技术规程

标准编号: DBJ61/T 195-2021  
发布日期: 2021-08-04  
实施日期: 2021-08-31  
公告号: 陕建标发(2021)1005号  
发布部门: 陕西省住房和城乡建设厅

### 标准名称: 城市综合管廊施工及验收规程

标准编号: T/CECS 895-2021  
发布日期: 2021-07-20  
实施日期: 2021-12-01  
公告号: 第909号  
发布部门: 中国工程建设标准化协会

### 标准名称: 钢结构深化设计制图标准

标准编号: T/CSCS 015-2021  
发布日期: 2021-08-03  
实施日期: 2021-12-01  
公告号: 中钢构协(2021)23号  
发布部门: 中国钢结构协会

### 标准名称: 混凝土砌块墙体工程技术规程

标准编号: DBJ/T 15-18-2021  
发布日期: 2021-07-19  
实施日期: 2022-01-01  
公告号: 粤建公告〔2021〕45号  
发布部门: 广东省住房和城乡建设厅

### 标准名称: 钢结构制造技术标准

标准编号: T/CSCS 016-2021  
发布日期: 2021-07-26  
实施日期: 2021-11-01  
公告号: 中钢构协(2021)20号  
发布部门: 中国钢结构协会

### 标准名称: 超低能耗建筑用门窗认证通用技术要求

标准编号: T/CECS 10140-2021  
发布日期: 2021-07-15  
实施日期: 2021-12-01  
公告号: 第904号  
发布部门: 中国工程建设标准化协会

### 标准名称: 公共住房建设标准

标准编号: SJG 100-2021  
发布日期: 2021-07-23  
实施日期: 2021-08-15  
公告号: 深建标(2021)13号  
发布部门: 深圳市住房和建设局,深圳市发展和改革委员会

### 标准名称: 绿色小镇规划设计标准

标准编号: T/CECS 894-2021  
发布日期: 2021-07-15  
实施日期: 2021-12-01  
公告号: 第902号  
发布部门: 中国工程建设标准化协会

### 标准名称: 公安交通指挥系统工程建设通用程序和要求

标准编号: GAT 651-2021  
发布日期: 2021-07-20  
实施日期: 2022-01-01  
标准状态: 即将实施  
发布部门: 中华人民共和国公安部

### 标准名称: 建筑用系统门窗认证通用技术要求

标准编号: T/CECS 10139-2021  
发布日期: 2021-07-15  
实施日期: 2021-12-01  
公告号: 第903号  
发布部门: 中国工程建设标准化协会

(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 2021年12月  
 印数 1500册  
 电话 (010)62038235  
 传真 (010)62038297  
 封面 天府生物城成都蓉生药业有限责任公司重组凝血因子生产车间

# CONTENTS

## 目录 2021年第6期 总第158期

### 航空能力建设

- 02 深刻认识基于共识主动性的美军第三代武器装备体系，加紧构建中国特色武器装备现代化管理体系 佟京昊

### 研究与探讨

- 08 索球管桁架机库屋盖结构体系及应用  
 赵伯友 周方杰 韦恒 郭鹏
- 13 大跨度机库球管大门桁架节点转动刚度研究  
 韩奇昊 赵伯友 金来建 郭鹏
- 23 某民用机场油库消防设计实例  
 郝岩 陈洁如
- 29 微电网示范案例的控制策略  
 赵亮亮 赵瑞霞 滕飞 李江
- 35 澳门都市更新与活化研究——以风顺堂区为例  
 郭梦晓 林资政

### 工程设计

- 39 大温差蓄能式地源热泵系统在项目中的应用研究 赵磊 肖武
- 47 西安某空气源热泵系统运行问题分析 孙亚峰 王乃天
- 55 超高、低温实验室非稳态负荷计算方法的研究  
 申剑 傅建勋 刘银萍
- 60 总目录

# 深刻认识基于共识主动性的美军第三代武器装备体系，加紧构建中国特色武器装备现代化管理体系

■ 佟京昊 [工艺]

**摘要：** 本文介绍了美国在马赛克战略指导下正在建设的基于机器共识主动性培育的第三代武器装备体系，结合我国武器装备体系化发展与竞争的客观技术环境，提出加紧构建中国特色武器装备现代化管理体系的建议，以供参考。

**关键词：** 关键词：马赛克战略；武器装备；现代化管理体系

1982年6月发生的贝卡谷地空战，以色列军方通过灵活运用无人机、预警机、电子战飞机和第三代歼击机并配以恰当的战术、战法，在对同代战斗机和防空武器的作战中取得了战损比极其悬殊的辉煌战果。尽管战后，对于双方战机体具体的战损比一直有所争议，但无疑的是，在面对战机数量和武器先进性并没有处于劣势的叙利亚空军和防空部队，以色列空军用极小的代价取得了辉煌的战果，一举摧毁了叙利亚和前苏联耗时10年耗资20亿美元构建的贝卡谷地防空体系，为入侵黎巴嫩扫清了障碍。

而对于武器装备研究发展而言，贝卡谷地之战标志着对于武器装备实战效能的判断，不能再从武器装备的技术指标进行简单判断，而必须具备体系对抗的视野，从多平台体系构建和多维度对抗视角加以认识。伴随军事战争由“平台对平台”过渡到“体系对体系”，武器装备发展工作自然也需要

从体系视角加以研究和推进。目前，美军在马赛克战略指导下正在建设的基于机器共识主动性培育的第三代武器装备体系，对我国构建武器装备现代化管理体系以促进中国特色的武器装备体系化发展与评价机制要求日益迫切。

即使，贝卡谷地之战中显现巨大优势的第一代美式武器装备体系，更多的是来自于信息技术快速发展的促进，而非五角大楼的顶层设计工作。但当这种多平台协作的效能优势在武器装备实战对抗中得以充分显现后，也无疑引起了美国军事战略部门和军工巨头的高度重视。

在20世纪的最后20年里，美军在新武器平台发展上进行了一系列的技术验证和实战检验，最终根据体系协作需求进行了取舍和调整。最为代表性的就是美国空军在第四代主战机型上选择了体系协作效能更好的F-35，而非技术指标更为先进的F-22。也是在此期间，美军武器装备发展思想也逐步由武器装备的平台化发展向体系建设过渡，并

作者简介：佟京昊，男，高级工程师，1997年毕业于北京航空航天大学工艺专业，现就职于中航建设综合规划研究院。

在本世纪初逐步成熟。作为标志，五角大楼和美军各军兵种在本世纪初发布一系列技术战略指导文件中，都明确提出武器装备发展“从注重平台到注重能力转变”、“从大而全的单个整体系统到发展功能单一注重联合的分级系统转变”等武器装备发展由平台建设向体系建设转变的具体要求。

受益于这种武器装备发展思路的巨大调整，美军武器装备体系对抗能力得以大大加强。如果把贝卡谷地中展现的，并在虽后10余年里丰富完善的，基于信息技术进步而实现通讯广泛互联的美军武器装备体系称作第一代“体系化”武器装备体系。那么，在本世纪前15年，美军已经建设形成了从体系划代视角的第二代武器装备体系。与第一代武器装备体系协同基本依赖雷达与通讯技术不同，第二代武器装备体系间的连接与协同依托的是更为全面、先进的信息物理系统(Cyber-Physical Systems)技术。信息物理系统是一个基于网络通讯、复杂物理环境感知和大算力的多维复杂系统，非常适宜用于实现诸如战役指挥协调等大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务，也被视为催生工业4.0时代的关键性技术。正是基于这一技术，使得美军武器装备发展和应用更具层次和针对性，虽然没有势均力敌的对手使美军有机会充分展示这一代作战系统的整体实战效能，但是美军利用信息物理系统通过人机交互接口实现和物理进程的交互，实现了远程的、可靠的、实时的、安全的、协作的方式遥控无人机，进行远程精准打击的能力还是震动了世界。

但是，更值得警惕的是在过去5~10年间，得益于人工智能技术在进入到深度学习阶段后取得了突飞猛进的发展，一种古老的生物行为机制已可以被赋予到最先进智能化武器装备上，从而使武器装备或作战单元可以实现无人控制下的自主协同。其技术影响足以革新武器装备体系的协同机制，并进而促使现代军事指挥系统结构发生重大革新，已成为美军正在构建的第三代武器装备体系构建的代表性关键技术。这种技术就是集群智能技术，而其背后的行为机制就叫做“共识主动性”(Stigmergy)。

共识主动性是法国生物学家Pierre-Paul Grassé于1959年发明的新词，用于解释蚂蚁和白蚁这类大群落生物的集群智能行为。Grassé经过观察发现，蚂蚁和白蚁这些几乎没有任何智慧的生物，却能够合作建造具有复杂建筑结构的蚁巢。这

些生物的群体筑巢行为并非是源于一个关于巢穴的计划、组织和控制机制，蚂蚁之间甚至没有直接交流。因此，蚁巢的精致框架和复杂结构，完全是每个蚂蚁单独识别其他蚂蚁留下的生物激素和存留物后，达成共识，直接行动的结果。

这种行为机制可以使这些大群落昆虫协同完成远远超出个体能力的复杂任务。上世纪末，美国有专门团队历时数年在南美洲观察和研究NE行军蚁和ATTA切叶蚁之间复杂的攻防战争。数以百万计的无智能蚂蚁通过各自群体留存于环境间简单的信息表达，在群落战争中表现出大规模的智能协同机制，使各自战术能根据战争阶段、战场环境、战役进展而不断演变。美国国防高级研究计划局(DARPA)自上世纪后期就开始提出利用集群智能的作战概念并将其应用于无人机群作战仿真研究，资助了一系列集群智能领域的技术研究。直到以深度学习为代表的新一代人工智能技术取得重大突破，基于机器共识主动性的集群智能技术迅速在大量智能装备项目上取得应用。

这些基于共识主动性的集群智能武器以“自组网、去中心、主动协同”为特征，可以在群体活动的环境内构建集群内部信息场，各智能装备自主协同完成任务目标。由于并没有担负指挥、协调功能的关键个体存在，目前用以应对第二代体系化装备的“攻脑”、“断链”作战，在应对这些智能武器时都将很难取得实效。无疑，这种能够实现自主协同的集群智能武器装备，一旦投入战争，可以在战术和战略层面对所有以人类士兵为行动基础的军队形成压倒性优势。更值得警惕的是，蚂蚁的集群行为会受空间限制的根源在于，蚂蚁个体用以传达信息的化学信息素只能在较小的空间环境内传播、留存。而如果利用现代信息技术，这种共识主动性的行为机制则完全可以在更为广阔的空间和时间环境发挥作用，而美军正是在这一技术背景下提出了马赛克战的概念。

马赛克战概念是特朗普执政期间，为贯彻新版《国家安全战略》将美国军事战略指向“从反恐重返大国竞争”的要求，由美国国防高级研究计划局(DARPA)下属的战略技术办公室最先提出的。其概念界定为：“马赛克战”是集中应用高新技术，利用动态、协调和具有高度自适应性的可组合力量，用类似马赛克艺术创作的方式，将低成本、低复杂度的系统以多种方式链接在一起，建成一个类似“马赛克图案”的作战体系。

2019年9月10日,美国米歇尔航空航天研究所在DARPA指导下发布了《重塑美国军事竞争力:马赛克战》报告。该报告提出,“通过打造一个以具有复杂运算能力的由大量传感器、武器装备、作战人员和决策者组成的具有高度适应性的网络,可以根据战场情况的变化和作战需求,迅速自行组合和分解,形成具备‘不断适应新的作战任务’自适应能力的复杂作战系统。”2020年2月11日,美战略与预算评估中心(CSBA)发布《马赛克战:利用人工智能和自主系统实施决策中心战》报告,更进一步提出“将数量更多的、体积较小的、功能较少的作战单元,纳入更多无人系统、自主系统和人工智能元素,通过实施以‘马赛克战’为特点的决策中心战来战胜对手。这种以决策为中心的作战模式可以给敌人造成多个困境,以阻止他们达到目标”。反映出美国军事战略学者已经充分认识到,共识主动性行动机制在战争中体现的关键优势,是比建立能够自主协同的无人化武器部队更具优势的决策效率优势。

要充分理解这一点,其实可以从我党、我军的发展历程中找到答案。事实上,无论在抗日战争时期还是在解放战争时期,我党的军事指挥系统受制于安全环境和技术装备限制都不可能比敌人更具效率。而引导我军取得一次次辉煌胜利的正是在高度政治认同下形成的共识主动性。以百团大战为例,根据八路军总部向晋察冀军区、第129、第120师下达得《战役预备命令》,要求晋察冀军区派出10个团,第129师派出8个团,第120师派出4至6个团,参加正大线作战的总兵力就是22~24个团。但是,正是因为广大八路军指战员普遍存在强烈的“打击日本侵略者”的共识,作战主动性、积极性很高。很多部队根据自身所处位置和敌我情况,主动寻找战机,配合作战,使最终参战兵力达到或超过105个团,极大地打击了日本侵略者的嚣张气焰,粉碎了反动派关于八路军“游而不击”的谣言。类似情况,在抗日战争和解放战争中比比皆是。实践证明,在复杂战争环境下,这种基于共识主动性的分散式决策机制,往往比严密而统一的指挥系统更具效率优势。而蚂蚁等大群落生物的行为模式已经充分证明这种共识主动性不需要以高级智能作为基础,昆虫这种无智能生物一样可以把这种行为机制发挥得很好。因此,只要能把战争行为细化分解,再通过“信息——行动机制”开展大量仿真模拟培训,完全可以培训出适应具体任务的一系

列基于共识主动性的机器智能,支撑“马赛克战”成为现实。这些基于机器“共识主动性”而能够紧密联系,进行多维度自主协同和人机交互的军事软硬件系统共同构成的、以集群智能技术为代表技术的武器装备体系,正是笔者所介绍的美军“第三代武器装备体系”。

集群智能装备体系的出现可以说是多领域技术共同发展进步的结果。涉及生物仿生学、群体行为学、人工智能科学、新一代信息技术等诸多科技前沿领域并和军事指挥与战法研究深入融合。而我国传统国防科技工业从根本上讲是基于机械装备行业为主体构建的,几大军工集团分别由以前的第二、第三、第四、第五、第六、第七机械工业部改制发展而来,在很多新兴技术领域,从专业配置上就存在先天缺陷。在当前情况下,如果继续保留传统较封闭的武器装备发展方式,这些军工集团的确是很难独立应对集群智能武器装备体系出现形成的挑战。

要解决这一问题,必须要充分发挥新型举国体制,动员全社会科技工业力量,不只要实现习近平总书记在十九大报告中提出的“坚持富国和强军相统一,强化统一领导、顶层设计、改革创新和重大项目落实,深化国防科技工业改革,形成军民融合深度发展格局,构建一体化的国家战略体系和能力。”还要实现我国武器装备发展和国防科技工业建设“十四五”期间由要素驱动向创新驱动的巨大跨越。目前,我国武器装备发展和国防科技工业改革工作,困难很多,阻力很大,管理体制也需要进一步调整。在刚刚闭幕的全军装备工作会议上,中央军委主席习近平同志明确指出“加紧构建武器装备现代化管理体系,全面开创武器装备建设新局面,为实现建军一百年奋斗目标作出积极贡献。”为深入贯彻中央军委加紧构建武器装备现代化管理体系的要求,笔者结合武器装备体系化发展及竞争的客观技术环境,提出如下建议:

(1)党中央需要进一步加强对武器装备发展和国防科技工业改革的直接领导。

国防科技工业作为国家科技工业体系最重要的部分,相较普通工业领域有着专业覆盖广、技术难度大、供应链复杂、质量要求高的根本特点,也是国家资源要素投入的重点领域。其发展成果不仅直接决定现代军队的综合战斗力,也直接关系到国家科技工业体系的完整性和先进性。在世界范围内看,大量先进技术的出现都是优先应用于国防再逐

步转向民用的，国防科技工业的技术积累将决定国家科技体系发展的潜力和国际竞争力。我国国防科技工业过于依赖要素驱动的发展模式，缺少原始创新，可以说也正是导致国家科技工业体系大而不强的重要原因。

因为国防科技工业对国防实力和先进技术促进的综合性作用，美、俄等国的最高领导人始终高度重视本国国防科技工业发展。事实上，当今大部分颠覆性技术的出现和发展，都来自于美俄政府的引导和支持。美国国会和总统是国防工业发展的最高决策层，国会通过法律、法案和批准国防预算来对行业发展实施宏观调控；总统及其主持的国家安全委员会负责领导制订国防科技行业重大发展方针政策、军事与安全战略、重要武器与军事技术计划等。国防安全委员会之下，是在五角大楼设有研究与工程副部长办公室，领导多个司局负责国防科技工业发展与前沿技术探索工作。前述，美国国防高级研究计划局（DARPA）就是专职于战略前沿技术的前瞻性研究和培育资助的机构，同时也是直接向美国总统、国会和国家安全委员会的提供重要决策技术支撑机构。俄罗斯总统普京执掌国家权力以来高度重视俄罗斯国防科技工业建设工作，并设立了直接向总统负责的军事工业委员会制度。根据2013年2月新修改的《俄联邦政府军事工业委员会条例》规定：委员会设立1名主席（之前为主管工业的副总理兼任，2014年以来由普京亲自担任）、1名专职第一副主席，5名副主席，其中两名为专职副主席，其他3名副主席分别由内务部长、国防部长和工贸部长兼任。同时，俄联邦总统办公室设置专门司局与军事工业委员会对接，建立了一条常备的“联邦总统一政府和政府委员会—国防工业管理机构—军工集团和合资军工企业”的垂直管理体制。普京本人则每年两次亲自参加军事工业委员会会议，协调各方面意见，做出决策。

我国政治体制有自身特色，政府和军队是同在党领导下的两个系统。因此，对于国防科技工业建设这种必须实现军民融合深度发展的重要改革工作，仅调整一方面的工作机制是无法实现健康发展的，必须实现军政两方面改革的协调推进。这就需要党中央全面加强政治领导、强化顶层设计、协调改革推进、决策重大事项。回顾我国国防科技工业发展历程，在建国后相当长的时期，我国国防科技工业建设也是由中央最高决策层直接参与的。很多军工机构的组建、人员选配、建设选址都是由周恩

来总理圈定，甚至毛主席本人最终决定的。当前，国际形势风起云涌，我国处于由要素驱动向创新驱动发展跨越的关键时期，国防科技工业建设至关重要，迫切需要党中央对此高度关注，直接领导。

## （2）重视和培育党领导的战略科学家队伍。

深入研究美、俄国防科技工业管理的经验，可以看到每次重大的军事战略调整和国防技术进步，都有一支特殊的专家队伍在其中发挥了至关重要的作用，这就是深度融入国防科技行业发展的战略科学家队伍。战略科学家不同于一般概念的科学家，除了精深的技术造诣外，战略科学家更需要广阔的技术视野和深厚的经济学、管理学经验积累。战略科学家解决的不是某一领域的技术攻关问题，而是通过对前沿科学技术进步、发展的跟踪研究判断未来最可能引发国防、军事、工业变革的颠覆性技术产生的方向和路径。而美俄两国都是通过将战略科学家纳入国防科技工业管理体系，发挥这一群体引导国家科技工业竞争力提升的作用。前述由普京本人担任主席的俄罗斯军事工业委员会直接对接10余个高新技术领域专家委员会，这些专家委员会就是俄罗斯的战略科学家队伍，通过向俄军事工业委员会提供建议和报告引导俄罗斯科技工业建设与发展。而美国的国防高级研究计划局（DARPA），作为美国科技工业战略最高技术支持机构，其各项工作就是围绕美国战略科学家队伍开展的，很多经验值得深入研究与借鉴。DARPA的人员构成基本上就是以战略科学家（部门总监）和有望培养成战略科学家的创新型人才（项目经理）构成。

项目经理与部门总监任期短暂且不停轮换，是DARPA制度最鲜明的特征，也是该机构能持续创新的重要源泉。在DARPA，绝大多数雇员的任期一般只有4~5年。很明显，这种短暂的工作任期并不适合那些想找个“铁饭碗”的人。可是，为什么有那么多才华横溢的创新型人才会选择离开稳定的事业而接受DARPA提供的薪水可能更低、缺乏职业安全保障的工作呢？正如曾任DARPA战术技术办公室项目经理Dan Patti说，DARPA给予的是一次“改变未来、塑造未来”的机会，可以从美国国家的角度拥有自由和资源去发展自己认为重要的、甚至是革命性的新技术方向，这对战略科学家们充满了强大的吸引力。要在有限的时间，完成足以影响未来的科技项目培育任务，这种紧迫感时刻提醒着他们手头的重要工作已进入倒计时阶段。事

实上, DARPA的人员基本来自于军地科研机构或科技工业领域的核心技术人员、职业经理人或创业者, 在离开DARPA后, 很多人也回到了自己感兴趣的科技工业领域成为职业经理人或继续在前沿技术领域创新、创业。据报道, 今年3月, 科罗拉多矿业学院负责研究与技术转让的副校长斯蒂芬妮·汤普金出任美国国防高级研究计划局(DARPA)的局长接替了维多利亚·科尔曼而后者是亚特拉斯人工智能公司(Atlas AI)的前首席执行官。事实上, 这种具备战略科学家素质的人才, 本身也是前沿科技机构或企业发展的支柱型人才, DARPA与行业内这种频繁而广泛的高级人才流动, 也大大强化了五角大楼与美国科技工业前沿机构的交流与联系。这里需要指出的是上述DARPA独特的运行机制, 正是围绕着战略科学家团体的发展需求和工作特点而设计的。暨战略科学家和DARPA制度两者之中, 战略科学家处于中心位置。有了战略科学家群体, DARPA独特的制度才发挥出重要的作用。从这种角度上说, DARPA的核心工作之一, 就是在全国范围各尖端技术领域, 筛选和培养可以成为战略科学家的顶尖人才。作为一个以项目经理人为核心运转, 担负促进前沿科技进步的政府战略技术投资机构, 美国国防高级研究计划局对项目经理选择标准, 体现了多年来, 美国基于战略科学家培养经验总结出的战略科学家素质要求。概括起来3个方面:

- 1) 出众的技术才华;
- 2) 丰富的市场化项目管理经验与投融资经验;
- 3) 不囿于传统思维, 寻求以新技术改变世界的梦想家潜质。

回顾我国国防科技工业的建设里程, 以钱学森为代表的战略科学家和第一代中央领导的良性互动, 正是保障“两弹一星”等国防重大项目取得成功的关键所在。

2020年6月, 在专家学者座谈会上, 习近平总书记强调, “要深化科研人才发展体制机制改革, 完善战略科学家和创新型科技人才发现、培养、激励机制”。2021年9月27日~28日, 在北京召开的中央人才工作会议上, 习近平总书记提出, “要大力培养使用战略科学家, 有意识地发现和培养更多具有战略科学家潜质的高层次复合型人才, 形成战略科学家成长梯队。”参考美、俄经验, 国防科技领域正是大国战略科学家竞争的核心战场。伴随第三代武器装备体系发展, 中美科技工业领域竞争

必然日趋激烈, 我国国情不同于美国, 很难照搬DARPA的工作模式和运作机制。然而应对马赛克战挑战的复杂性、广泛性、紧迫性迫切需要能在国防前沿技术发展领域取得突破, 因此, 一定要把握好培养和用好战略科学家队伍这一DARPA取得成功的核心思想, 高度重视党的领导下战略科学家队伍建设, 开创充分用好战略科学家的新工作机制。

(3) 构建基于“技术——装备——战法”技术迭代的军民协作的工作方式。

自冷兵器时代, 战法的演变就和武器装备紧密相依, 甲、矛、盾、弓、马的克制与组合贯穿了各早期文明的军事韬略。而每一次武器装备的重大变革也都必然彻底改变战争方式, 国家的兴衰也常常由此而转变。得益于现代人类文明对于几次大战的反思和检讨, 冷战后, 大国间大规模的直接军事冲突明显减少。但是武器装备与战法之间的创新与迭代却未因此而减缓。相反的, 受科学技术快速进步的促进, 这种迭代关系日益快速和复杂。“科技进步催生新的武器, 新的武器衍生新的战法”本是一种简单的军事力量的发展逻辑, 但当霸权主义国家军事能力与国家利益紧密结合后, 一种由战法需求催生技术创新的反向逻辑也开始在发生作用,

“如果某种能力的提升能大幅提升军事优势的话, 那么也可以找找有什么潜在技术以何种方式可以形成这种能力”。而当大国间激烈对抗的领域和维度不断复杂化, 必然带来能力建设需求的广域化和复杂化, 当武器平台化发展已经无法适应这种能力建设要求时, 武器装备体系化时代也由此到来。

因此, 需要看到的是武器装备体系化发展竞争是来源于由科技进步——装备体系建设——军事战法革新的迭代关系的竞争, 这种发展方式, 正是催生当前第三代武器装备体系出现的创新驱动发展的根本方式。但是, 这种发展方式也戳中了我国国防科技工业建设的一些痼疾所在。如前所述, 我国大的政治体制是党领导的政府和军队并行发展的方式, 在传统上工业部门负责武器装备研发生产, 军事部门负责战争战法研究, 特别是我国在国防建设领域一直采取较为宽泛化的保密管理, 双方研究部门的直接交流较少, 军事部门和工业部门各自“关起门来做技术的”情况比较普遍, 战法更新与武器装备进步尚不能深度协调融合, 基础科学创新进步更是我国的弱项。而少数人借口以保密要求或体制机制原因, 为逃避和推卸发展责任, 不惜破坏各方合作与协同, 导致我国本就与先进国家存在明显差

距“技术——装备——战法”的迭代进步更加阻力重重。

同一阶段，美国通过提出马赛克战系列研究报告，明确国防技术战略导向，消除军方、工业部门、高校等研究机构之间的认知差距，使之联系更加紧密。将“技术——装备——战法”迭代推进到“技术创新——体系能力——战法战略调整”的新阶段。而这种发展迭代方式的调整将成为美国确保军事霸权的内生优势。美国国防科技工业体系历经两次世界大战和冷战考验，发展体制本身就比较成熟。虽然美国的国防科技体系也有官僚习气，但在五角大楼里也存在着DARPA这种体制极度灵活的机构。而且美国国防建设领域整体更加开放，参与的主体更加广泛。美国的国防科技战略发展的研究报告一般都是公开的，这有助于在广泛的参与主体间消除认知差距，统一共识；也有助于展开跨领域学术交流和同行业评价；最终形成美国高科技工业各主体参与国防建设的“共识主动性”。多年来，美国科技工业体系已经成功地将军队与政府研究机构、军工企业、知名大学、中介与情报机构紧密连接在一起，形成了高度协同的发展模式。在此模式下，美国国防科技工业得到广泛的基础研究支持下其结构会在市场规律的作用下根据先进技术进步而自行调整。目前美国排名前10的武器供应商中，有6家是航空航天企业，以谷歌为代表的大量人工智能企业，近几年承担了大量国防部合同，开始成为美国国防科技工业体系的总要组成。

因此，我国有必要迅速调整武器装备管理体制，完善管理体系，持续深化国防科技工业改革，强化科研机构、各类企业与军内研究力量的交流与协同，形成“打开门”做技术的全新局面。以促进国家高新技术快速发展并贡献于国防为根本目标，构建具有我国特色的“技术——装备——战法”迭代发展方式。

(4) 灵活把握责任体制与效率机制的平衡，以党领导下的职业经理人制度促进国家科技工业体系竞争力提升。

伴随美国军事、外交战略的调整，大国博弈已经成为必须面对的发展环境。国防科技工业建设和武器装备发展的竞争日益激烈与紧迫，还有一个重要问题需要引起高度重视。这就是，在我国国防科技工业的环境下，在企业管理上普遍采用的行政级别与分责体制和国防科技工业发展本身“高效率”要求不相适宜的问题。即使是在将“权力制

约”奉为道德标准的西方各国，也不会有企业追求在企业内部管理经营上实现广泛的制衡与制约，而是普遍采取由职业经理人专权的职业经理人制度。因为在市场环境下，这两种不同的企业管理制度造成的效率差距对于企业来说足以致命。为此，笔者建议在我国科技工业体系建设中尝试建立党领导下的职业经理人负责制。首先，是要强化和完善党在企业的政治领导职能、企业党委应以政治领导和责任监督职能为主，独立开展工作，而不应被企业日常经营活动所裹挟、同化。其次，要建立和完善国有企业职业经理人制度，强化对职业经理人的行政授权和考核，坚持责权利统一，杜绝职业经理人将行政经营责任分解下放和企业行政体系无序扩张。最后，通过推广以核心技术人员持股为关键的混合所有制改革，组建关键技术专家为主的战略议事机构，大幅提高和扩大关键技术人员在企业战略发展的话语权，形成技术骨干群体与职业经理人的良性互动。

# 索球管桁架机库屋盖结构体系及应用

■ 赵伯友 周方杰 韦恒 郭鹏 [结构]

**摘要:** 为破解球管桁架由于承载力不足应用受限的局面, 本文提出一种新型预应力索—球管边桁架机库屋盖体系。在球管大门边桁架加网架的传统屋盖设计方案基础上, 将边桁架由矩形截面改为不规则矩形—上弦三排弦杆、下弦两排弦杆, 在下弦圆钢管内通长设置集束高强钢绞线, 形成一种新型索—球管边桁架预应力屋盖体系。通过对边桁架下弦体内高强索的预张拉, 可以有效提高球管大门边桁架的承载力, 改善屋盖的变形性能。索—球管边桁架屋盖结构体系突破了在100m以上单跨机库屋盖设计中必须采用箱形或H形截面大门边桁架的局面, 在国内多个100m~140m跨机库设计中得到应用, 技术经济指标高, 实施效果良好。

**关键词:** 机库; 索—球管桁架; 球管桁架; 大门边桁架; 高强钢绞线; 贯穿空心球节点

## 1 引言

国内大跨度机库屋盖设计一般采用双层或3层平板型焊接球节点空间网架结构, 平面上三边设有钢筋混凝土柱支承; 沿结构跨度方向的一边开敞, 无落地支承, 开敞边采用由两榀或多榀大跨度钢桁架组成的大门边桁架支承大厅网架。传统设计方案的屋盖结构体系见图1, 包括首都国际机场四机位机库、A380机库, 浦东国际机场机库群以及厦门高崎机场机库群在内的国内90%以上的机库屋盖均采用上述结构体系。大门边桁架用钢量占屋盖总用钢量的30%~50%, 是大跨度机库重要的受力构件, 也是技术创新的突破点。

桁架单元内力主要为轴力, 其杆件采用各向承载力相同的圆钢管, 材料利用率高, 技术经济指标佳。相比于其他节点型式桁架, 球管桁架—焊

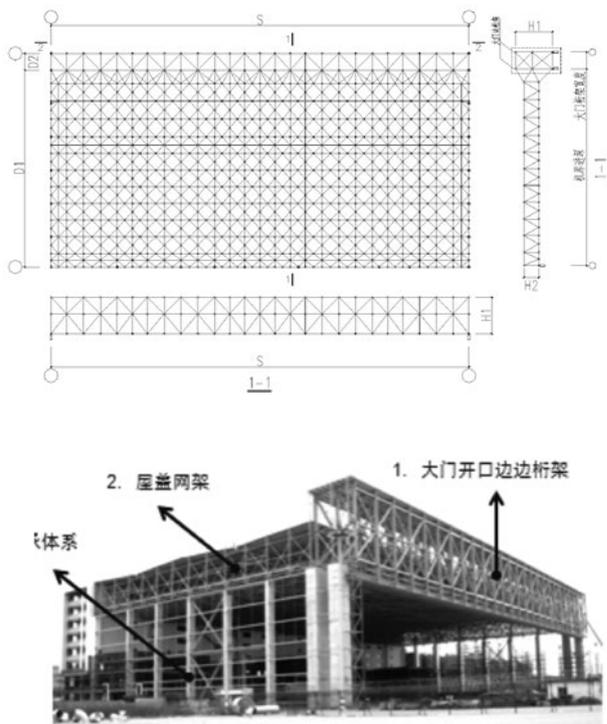


图1 空间网架+大门边桁架屋盖体系

作者简介: 赵伯友, 男, 研究员, 1998年毕业于北京工业大学结构工程专业, 现就职于中航建设民航工程设计研究院。

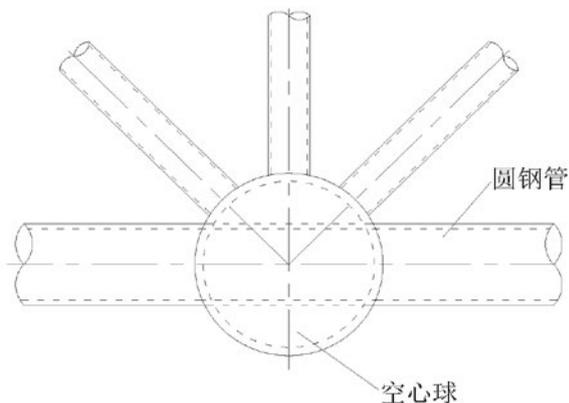


图2 深圳公务机二期机库球管边桁架+网架屋盖结构体系

接空心球或者贯穿空心球节点（弦杆贯穿空心球节点）桁架，见图2，因具备“强节点、弱杆件”的特性，更能满足大跨度机库悬挂移动设备的受力需要，在国内中小跨度机库屋盖设计中得到了广泛应用。

当机库跨度超过100m时，大门边桁架弦杆最大内力将突破1万kN，受制于管材供应及大直径焊接球节点加工制作能力，球管大门边桁架的应用受到限制，大门边桁架只能采用H形或箱形截面桁架。与球管桁架相比，H形或箱形截面桁架不足之处如下：

- (1) 加工、制作及拼装难度大、周期长，材料损耗率大；
- (2) 节点构造复杂，节点尺寸普遍超过节间长度20%以上；
- (3) 杆件次生弯矩效应显著。

为破解球管桁架在100m以上跨度机库屋盖设计中应用受限的局面，首次提出一种新型索一球管边桁架机库屋盖体系，通过高强索的应用及截面形状的改变，有效提升球管桁架的承载力，将球管边桁架屋盖的应用范围突破至150m跨。

## 2 索一球管桁架

### 2.1 结构体系

在图1所示传统设计方案的基础上，将大门边桁架设计成不规则的矩形截面，上弦设置3排受压弦杆，下弦设置两排受拉弦杆，如图3所示。大门边桁架下弦两排圆钢管弦杆内设置通长高强集束钢绞线，如图4所示。圆钢管材质Q355\*B，屈服强度355Mpa；钢绞线材质JTG-fpk1860，极限抗拉强度1860Mpa。

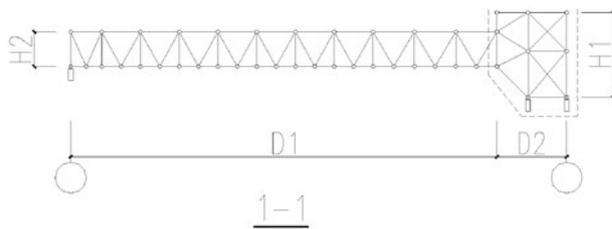


图3 不规则矩形大门边桁架

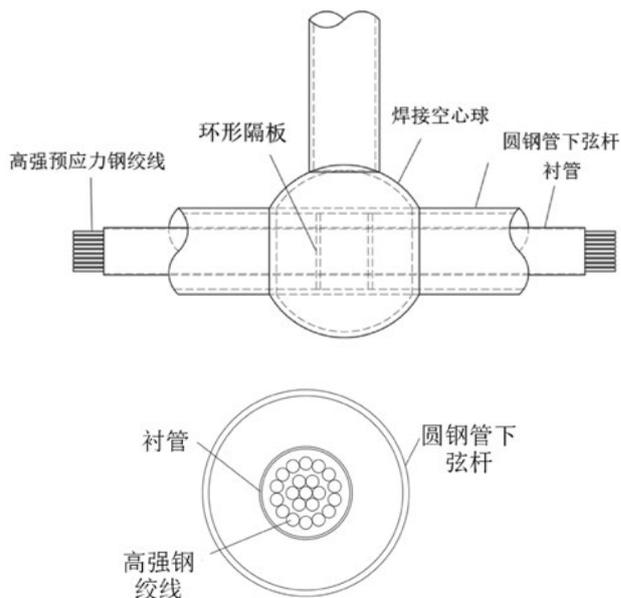


图4 下弦体内集束钢绞线

上弦采用3排弦杆，弦杆内力被分散；施工过程中通过对高强钢绞线的有效预张拉，除了可以在大门桁架中建立有益的预应力状态外，预应力钢绞线与圆钢管组成的组合截面共同受力，可以极大提高下弦杆件的承载力。截面形状的改变及索的加持，球管桁架可以应用到更大跨度的机库屋盖设计中，利用高强钢绞线抗拉能力强的特点弥补圆钢管

抗拉承载力不足的缺陷, 实现1+1>2的效果。

### 2.2 承载力

将大门边桁架提取出如图5所示的一端简支、一端滑动的简支桁架, 杆件的截面面积为 $A_1$ 、 $A_2 \cdots A_n$ , 弹性模量为 $E_1$ ; 索的截面面积为 $A_s$ , 弹性模量为 $E_2$ ; 桁架杆件长度为 $L_1$ 、 $L_2 \cdots L_n$ ; 索的长度为 $L$ 。假设屋盖网架作用于大门边桁架的荷载为均布荷载, 在均布线荷载 $q$ 的作用下, 桁架滑动端支座B点产生水平线位移 $\Delta$ 。

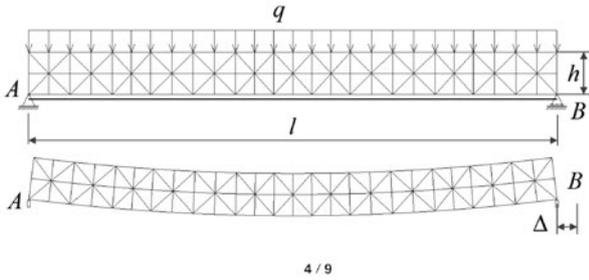


图5 索桁架分析模型

在小变形体系下, 支座水平位移满足:

$$\Delta = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \cdots \Delta l_m \quad (1)$$

$\Delta l_i$ : 第 $i$ 根下弦杆件的轴线变形;  $m$ 为下弦杆件数量。

考虑变形协调, 索的伸长量 $\Delta L_s$ 等于下弦杆件的轴向变形之和:

$$\Delta_s = \Delta = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \cdots \Delta l_m \quad (2)$$

根据应力应变关系, 式(2)可表达为:

$$\frac{Tl}{E_2 A_s} = \sum_{i=1}^m \frac{N_i l_i}{E_1 A_i} = \frac{N_1 l_1}{E_1 A_1} + \frac{N_2 l_2}{E_1 A_2} + \cdots \frac{N_m l_m}{E_1 A_m} \quad (3)$$

$N_i$ : 第 $i$ 根下弦杆的轴力;  $T$ : 索的拉力。

为简化分析, 取 $E_1 = E_2$ , 将式(3)改写为:

$$\frac{Tl}{E_2 A_s} = \sum_{i=1}^m \frac{N_i l_i}{E_1 A_i} = \frac{N_1 l_1}{E_1 A_1} + \frac{N_2 l_2}{E_1 A_2} + \cdots \frac{N_m l_m}{E_1 A_m} \quad (4)$$

假定桁架的节间长度相等, 式(4)可以改写为:

$$T = A_s (\sigma_1 + \sigma_2 + \cdots + \sigma_m) / m = A_s \bar{\sigma} \quad (5)$$

对于等截面下弦杆, 根据其杆件应力分布的

柱状图拟合的曲线为二次抛物线, 如图6所示。按理论应力曲线和简化应力曲线计算的下弦杆平均应力与跨中弦杆最大应力的比值分别为0.67、0.5, 工程应用中可以偏安全地取0.5, 式(5)可改写为:

$$T = 0.5 A_s \sigma_{\max} \quad (6)$$

$\sigma_{\max}$ : 等截面弦杆桁架下弦跨中最大应力。

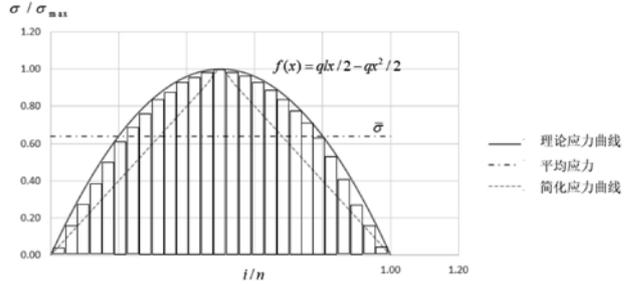


图6 等截面下弦杆应力分布

### 2.3 竖向支承刚度

根据能量法原理, 图6所示简支索桁架节点在单位力作用下的挠度及相同条件的简支桁架相应节点在单位力作用下的挠度为:

$$\Delta_1 = \sum_{i=1}^n \frac{N_{si}^2 l_i}{EA_i} + \frac{T^2 l}{EA_s} \quad (7)$$

$$\Delta_2 = \sum_{i=1}^n \frac{N_i^2 l_i}{EA_i} \quad (8)$$

$\Delta_1$ 为简支索桁架节点在单位力作用下的挠度,  $\Delta_2$ 为简支桁架相应节点在单位力作用下的挠度;  $N_i$ 、 $N_{si}$ 分别为桁架及索桁架的杆件内力。为简化分析, 索及钢材的弹性模量假定相等。

下弦杆内力与索杆的拉力符合式(9)、式(10)的关系。

$$(N_{si} + T) \approx N_i \quad (9)$$

$$N_{si} < N_i \quad (10)$$

式(7)可由式(3)改写为:

$$\Delta_1 = \sum_{i=1}^m \frac{N_{si} (N_{si} + T) l_i}{EA_i} + \sum_{i=m+1}^n \frac{N_{si}^2 l_i}{EA_i} \quad (11)$$

由于索拉杆仅对索桁架下弦杆的内力影响较

大, 对其他杆件的内力影响可以忽略不计, 根据式(9)、式(10)可得:

$$\sum_{i=1}^m \frac{N_{si}(N_{si}+T)l_i}{EA_i} < \sum_{i=1}^m \frac{N_i^2 l_i}{EA_i} \quad (12)$$

$$\Delta_1 = \sum_{i=1}^m \frac{N_{si}(N_{si}+T)l_i}{EA_i} + \sum_{i=m+1}^n \frac{N_{si}^2 l_i}{EA_i} < \Delta_2 = \sum_{i=1}^n \frac{N_i^2 l_i}{EA_i} \quad (13)$$

由式(13)可知, 索拉杆可以增加索桁架的竖向刚度, 但增加的幅度有限, 工程实际中可以忽略其对于结构刚度的影响。

## 2.4 初始预拉力

可分3个阶段对索桁架进行受力分析。

(1) 对钢绞线施加预拉力 $T$ , 不考虑结构自重, 索桁架不承受外荷载;

(2) 索桁架承受外荷载, 使下弦跨中钢管经历消压状态之后开始受拉;

(3) 索桁架继续承受外荷载至下弦跨中钢管受拉屈服, 此时假定钢管与索拉杆组合截面达到设计承载力极限。

其受力过程分别是:

1) 钢管承受预压应力, 跨中杆件应力值达到 $\sigma_{01}$ , 钢绞线中张拉预应力值为 $\sigma_{02}$ ;

$$\sigma_{01} = T/A \leq f_y \quad (14)$$

$$\sigma_{02} = T/A_s \quad (15)$$

2) 钢管与索拉杆共同受力至跨中钢管达到消压状态;

$$\sigma_{01} = 0 \quad (16)$$

$$\sigma_{02} = T/A_s + 0.5T/A \quad (17)$$

3) 下弦跨中钢管受拉屈服, 钢管内力不再增加, 增加的内力由索拉杆承担。

$$\sigma_{01} = f_y \quad (18)$$

$$\sigma_{02} = T/A_s + 0.5T/A + 0.5f_y \quad (19)$$

其中,  $f_y$  是为钢管的屈服强度,  $A$  为下弦跨中圆钢管弦杆的截面面积。

高强钢绞线的设计承载力取其极限破断应力的倍, 索杆下弦设计承载力及极限承载力分别为:

$$N = Af_y + 0.4A_s f_{sy} \quad (20)$$

$$N = Af_y + A_s f_{sy} \quad (21)$$

其中,  $f_{sy}$  为钢绞线的极限破断应力。

由式(19)可知, 索桁架下弦增加的承载力由索的截面面积与初始预拉力贡献, 通过对下弦索杆施加预拉力可以提高钢管在弹性范围内的强度, 提高其抗拉承载力, 如图7所示。工程设计中可由式(14)、式(19)及式(20)确定初始预拉力 $T$ 及索的面积 $A_s$ 。

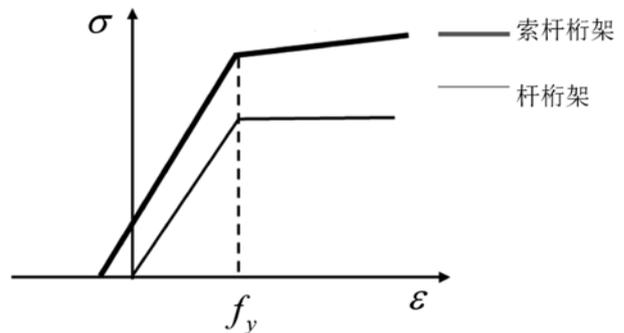


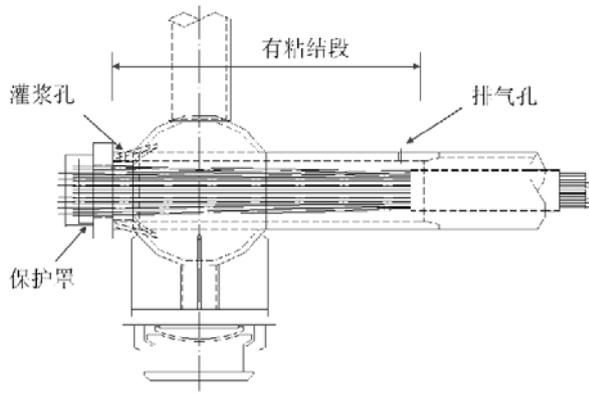
图7 索杆下弦应力—应变示意图

## 3 工程应用

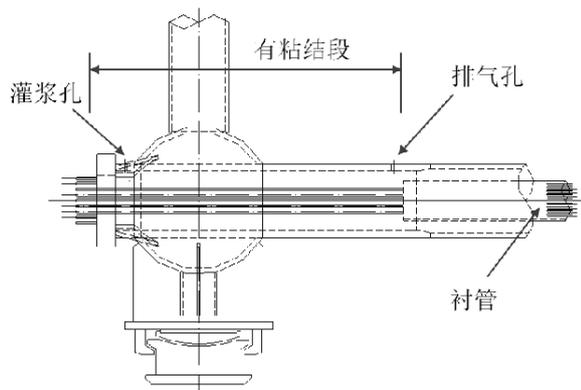
索一球管边桁架屋盖结构体系在100m跨度以上大跨度机库中的应用如表所示。在索一球管桁架的两端支座处分别设置体内预应力索的锚固端与张拉端, 如图8示。为避免因锚具松弛造成钢绞线的预应力损失, 在张拉端与锚固端均设置有粘结段。

表 索一球管边桁架屋盖体系应用情况

工程名称	跨度/进深(m)	悬挂设备	下弦最大内力(kN)	索规格	钢管规格	用钢量(kg/m <sup>2</sup> )	竣工时间
广州白云机场G1机库	137/68	/	16616	55 $\phi$ 15.2	$\phi$ 550 $\times$ 32	78	2014
广州白云机场G2机库	137/68	5t多支点悬挂吊车	16616	55 $\phi$ 15.2	$\phi$ 550 $\times$ 32	78	2016
哈尔滨太平机场拆解机库	125/64	10吨三支点悬挂吊车	9780	40 $\phi$ 15.2	$\phi$ 500 $\times$ 30	113	2016
乌鲁木齐地窝堡机场乌航机库	128/80	10吨三支点悬挂吊车, 悬挂升降平台	13456	53 $\phi$ 15.2	$\phi$ 500 $\times$ 40	118	2020
山西拆解机库	125/64	5t多支点悬挂吊车	9677	40 $\phi$ 15.2	$\phi$ 450 $\times$ 30	92	2020
成都天府国际机场国航维修机库	146/91	15吨四支点悬挂吊车	14655	69 $\phi$ 15.3	$\phi$ 500 $\times$ 40	108	2021



(a) 张拉端



(b) 锚固端

图8 支座节点构造

施工难点在于钢绞线的安装、张拉。屋盖整体高空就位后，下弦穿索方案如图9所示。先行手动穿过单根牵引钢丝绳，将牵引钢丝绳一端连接卷扬机，另一端连接待穿钢绞线，用卷扬机将钢绞线一次牵引到位。

预应力钢绞线张拉前应标定张拉设备，按标定的数值进行张拉。预应力钢绞线张拉采用双控：张拉力控制为主，结构变形控制为辅。



图9 穿索方案

#### 4 结论与展望

索桁架可以极大地提高下弦杆件的承载力，减小圆钢管的截面规格，使得球管桁架可以在更大跨度的机库中得到应用。

索桁架对于大门边桁架的支承刚度的改善不大，但预应力张拉过程中的反拱值对于屋盖的变形形态有改善作用。

如大门边桁架的上弦采用受压承载高的钢管混凝土截面，索桁架预期可以实现更大跨度的机库。

#### 参考文献

- [1] 赵伯友, 周方杰, 韦恒. 一种大跨度机库边桁架预应力结构体系及其施工方法: 中国, ZL201610678210.5[P]. 2016-08-17.
- [2] 赵伯友, 林伟, 朱丹, 等. 东航航线机库/STARCO大修机库结构设计[J]. 建筑结构, 2009, 39(10): 9-14.
- [3] 朱丹, 裴永忠, 徐瑞等. 北京A380机库大跨度结构设计研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(2): 1-8.
- [4] 沈顺高. 大跨度机库方案的概念设计与动力性能研究
- [5] 中国工程建设标准化协会标准. 预应力钢结构技术规程[S]. 北京: 中国技术出版社, 2006.

# 大跨度机库球管大门桁架节点转动刚度研究

■ 韩奇昊 赵伯友 金来建 郭鹏 [结构]

**摘要:** 为突破传统设计中节点连接只能假定为刚接或铰接的局限性, 本文对大跨度机库球管大门桁架节点转动刚度进行了有限元参数分析和计算公式回归, 通过线性回归推导的节点转动刚度回归公式, 提出采用半刚性设计方法能够更准确把握杆件次弯矩, 可减小次弯矩对球管桁架设计的影响, 并扩大球管桁架应用范围, 以供工程设计参考。

**关键词:** 大跨度机库; 球管大门桁架; 节点转动刚度

## 0 引言

大跨度机库平面一般呈矩形, 三边可以设支承体系, 面向机坪的一侧开敞, 要求不设或尽量少设支承柱, 开敞边设置电动悬挂或下支承、上导向平开大门。大跨度机库屋盖设计中, 大门开口边设置由两榀或多榀大跨度钢桁架组成的大门桁架支承大厅钢结构, 大门桁架需要负担屋盖近一半的重量, 其截面跨高比一般控制在10~12之间, 以获得足够的竖向承载力及支承刚度, 大厅部分一般采用空间网格或主次桁架结构体系, 如图1、图2所示。大门桁架用钢量占屋盖总用钢量的30%~50%, 是大跨度机库屋盖重要的受力构件<sup>[1-3]</sup>。



图1 空间网架+大门桁架屋盖结构体系

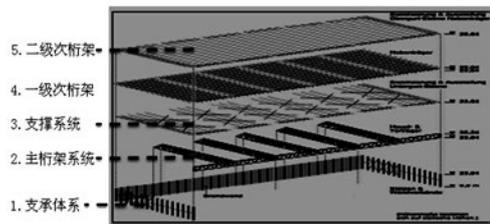
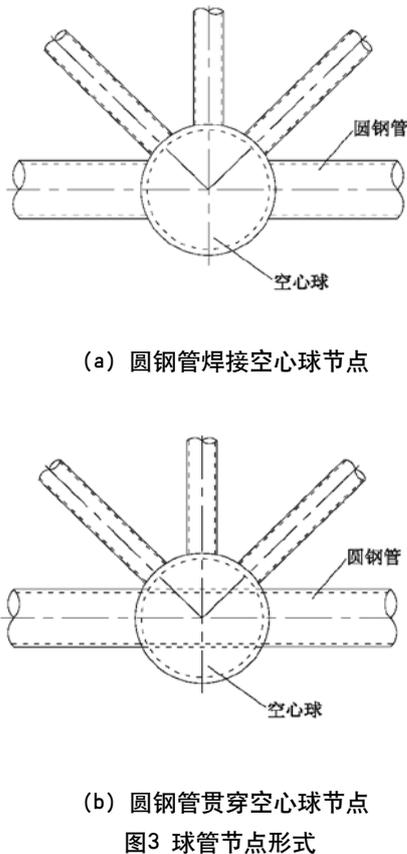


图2 多级桁架+大门桁架屋盖结构体系

作者简介: 韩奇昊, 男, 助理工程师, 2020年毕业于中国航空规划设计研究总院有限公司结构工程专业, 现就职于中航建投民航工程设计研究院。

大门桁架一般采用球管桁架（杆件采用圆钢管；节点采用焊接空心球或者贯穿空心球，如图3所示）、H形截面桁架或箱形截面桁架等几种常用桁架形式。桁架杆件单元内力主要为轴力，采用截面各向承载力相同的圆钢管，材料利用率最高，节点构造简单，技术经济指标最佳。球管桁架因其加工制作、施工以及受力方面的优势，在国内大跨度机库建设中得到广泛应用，并且随着管材供应能力与焊接球加工制作能力的提升，球管桁架机库的跨度已突破100m，达到160m。



随着机库跨度增大，杆件截面尺度越来越大，长径比越来越小，由于焊接空心球节点特别是弦杆贯穿空心球节点的实际约束能力，弦杆中产生的次弯矩越来越不容忽视。当次弯矩产生的弯曲应力占截面总应力的比例超过30%时，就需要采用抗拉弯、压弯承载力更高的H形截面或箱形截面桁架代替球管桁架，球管桁架应用范围就会受到限制。因此，在大跨度机库球管桁架设计中，采用较真实的转动刚度模拟节点转动性能，必将能更准确地把握结构的受力及变形性能，提高设计效率和扩大球

管桁架应用范围。

目前，国外焊接球节点应用较少，对球管节点转动刚度的研究基本处于空白状态。国内学者<sup>[4-8]</sup>对焊接空心球（不包含贯穿空心球）节点转动刚度的研究仅适用于空心球直径在300mm~700mm之间，圆钢管直径在102mm~299mm之间，不满足大跨度机库球管桁架设计需求。本文在前人研究的基础上进行了球管桁架节点转动刚度有限元分析，并提出节点转动刚度简化公式，可供大跨度机库球管大门桁架设计参考。

## 1 转动刚度定义

欧洲规范规定，节点转动刚度取弯矩—转角曲线（见图4）中节点抗弯承载力设计值的2/3处对应的割线刚度作为节点转动刚度 $K$ ，计算方法见式（1）、式（2）。

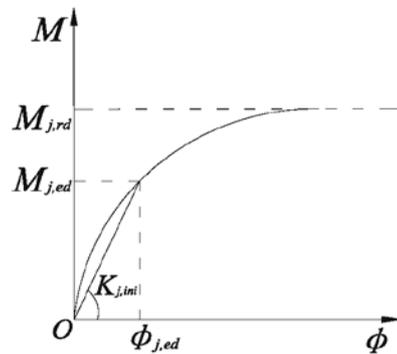


图4 弯矩—转角曲线

$$K_{j,ini} = \frac{M_{j,ed}}{\phi_{j,ed}} \quad (1)$$

$$M_{j,ed} = (2/3)M_{j,Rd} \quad (2)$$

式中， $M_{j,ed}$ 为节点弹性抗弯承载力， $M_{j,Rd}$ 为节点抗弯承载力设计值， $M_{j,Rd}$ 取值为节点弯矩—转角曲线由上升段进入平直段的拐点所对应的弯矩值， $\phi_{j,ed}$ 为弯矩达到 $M_{j,ed}$ 时对应的转角。

节点转角 $\phi$ 取杆件根部弹性区域截面的转角，根据平截面假定 $\phi = \frac{\Delta u}{h}$ ，其中 $\Delta u = u_1 + u_2$ 为杆件根部弹性区域截面上下表面相对位移差， $h$ 为杆件截面高度，见图5。

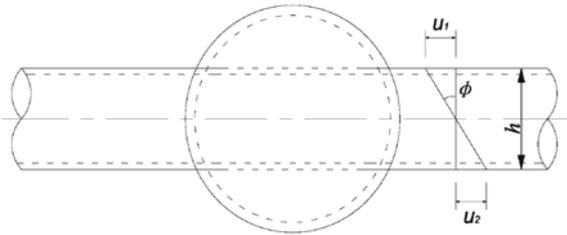


图5 节点转角计算示意图

## 2 有限元模型建立及参数化分析

### 2.1 有限元分析模型的建立

本文采用ABAQUS通用有限元程序对球管大门桁架典型节点进行了精确模拟。圆钢管采用C3D8实体单元进行模拟，空心球采用S4R壳单元进行模拟。钢构件材料各向同性，弹性模量 $E=2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ 、材料强度 $f_y=345 \text{MPa}$ 、泊松比 $\mu=0.3$ ，考虑材料的非线性，钢材应力—应变关系采用理想弹塑性模型。由于球管节点在荷载作用下空心球和杆件交界处会产生较大变形，变化的几何形状会引起结构的非线性特性，故模型中同时考虑几何非线性。

球管桁架典型节点主要有TK型节点、K型节点和T型节点。考虑轴力分析模型边界条件为弦杆一端自由，施加垂直于轴线的荷载，另一端为滑动铰支座，腹杆远端为滑动铰支座，滑动铰支座约束垂直于杆方向的位移，见图6。不考虑轴力分析模型边界条件为弦杆一端自由，施加垂直于轴线的荷载，另一端为刚接，腹杆远端为固定铰支座，见图7。

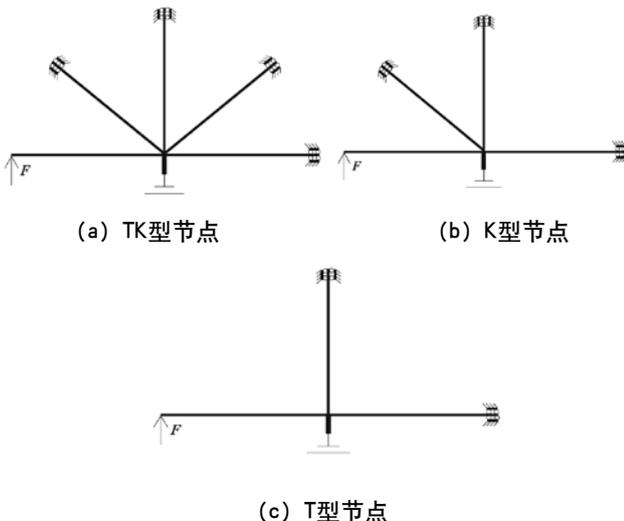


图6 球管桁架典型节点考虑轴力影响分析模型

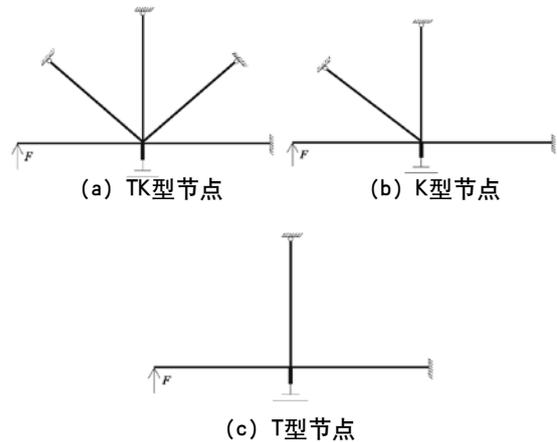


图7 球管桁架典型节点不考虑轴力影响分析模型

### 2.2 有限元模型参数化分析

#### 2.2.1 杆件轴力影响

对图8所示的计算模型，通过有限元分析计算节点转动刚度，其中节点焊接空心球规格为 $D900 \times 40$ ，斜腹杆与弦杆夹角均为 $38.7^\circ$ 。考虑杆件中轴力时（见图9，拉力为正，压力为负），节点转动刚度为 $51721 \text{m/rad}$ ，比不考虑杆件中轴力时的节点转动刚度（ $51948 \text{kN} \cdot \text{m/rad}$ ）减小 $0.4\%$ 。杆件内力对节点转动刚度分析影响较小。

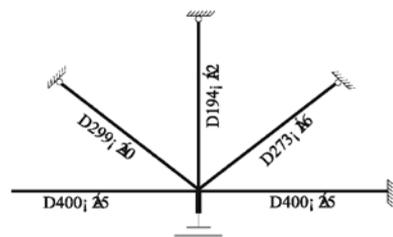


图8 球管桁架节点计算模型

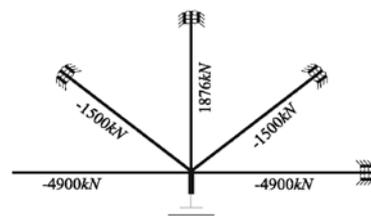


图9 球管桁架节点杆件内力图

#### 2.2.2 节点腹杆布置形式影响

为了探究节点腹杆布置形式对节点转动刚度的影响，选取球管桁架3个典型节点进行计算。节

点计算模型及杆件布置见图10，杆件信息见表1；球节点规格均为D900×40，斜腹杆与弦杆夹角均为38.7°。

节点转动刚度计算结果见表2。与TK节点转动刚度相比，K型节点转动刚度减少2.1%，T型节点转动刚度减小4.4%，节点腹杆布置形式对节点转动刚度影响较小。

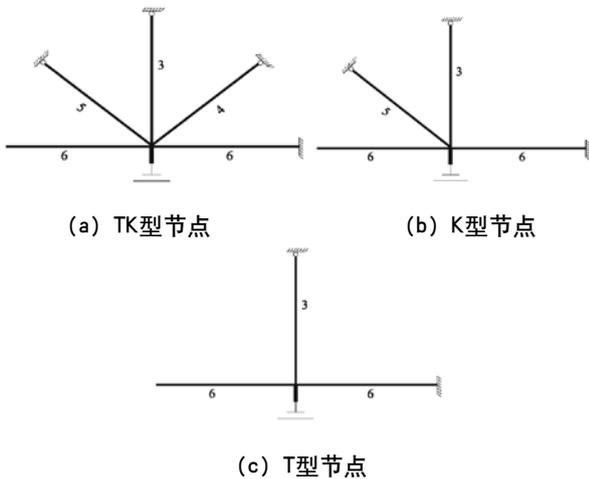


图10 节点计算模型及杆件布置图

表1 杆件信息表

杆件编号	截面规格	管径/mm	壁厚/mm
3	D194×12	194	12
4	D273×16	273	16
5	D299×20	299	20
6	D400×25	400	25

表2 节点转动刚度

节点型式	节点转动刚度/kN·m/rad
TK型	51948
K型	50857
T型	49624

### 2.2.3 空心球壁厚影响

采用TK型节点分析，弦杆规格550mm×40mm，斜腹杆规格均为550mm×40mm，竖腹杆规格450mm×25mm；斜腹杆与弦杆夹角均为45°。空心球直径1500mm，空心球壁厚参数取42mm、46mm、50mm、55mm、60mm及70mm、75mm。

#### (1) 焊接球节点

节点转动刚度计算结果见表3，焊接球节点转动刚度与空心球壁厚的关系见图11。节点转动刚度随空心球壁厚增加而增加，焊接球节点转角以空心

球变形与弦杆变形为主，见图12；当空心球壁厚由42mm增加到75mm时，即 $\tau$ 由1.050增加到1.875时，节点转动刚度增加94.9%，增加壁厚可有效增加焊接球节点的转动刚度。

表3 节点转动刚度计算结果

空心球壁厚/mm	$\tau$	$M_{j,ed}/kN \cdot m$	$\phi_{j,ed}/rad$	转动刚度/kN·m/rad
75	1.875	1027.9	0.0065	158139.6
70	1.750	927.8	0.0065	142740.8
60	1.500	1069.8	0.0087	122961.6
55	1.375	852.8	0.0080	106594.2
50	1.250	810.5	0.0081	100062.0
46	1.150	697.6	0.0079	88303.9
42	1.050	892.4	0.0110	81130.7

注： $\tau$ 为焊接球壁厚与弦杆壁厚比。

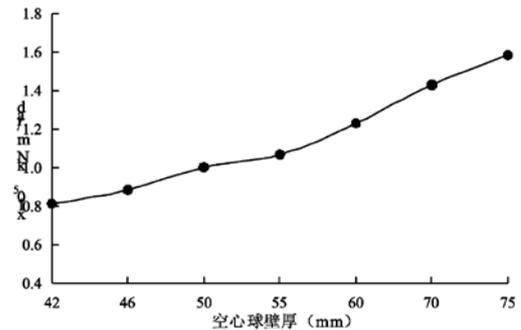


图11 焊接球节点转动刚度—空心球壁厚曲线

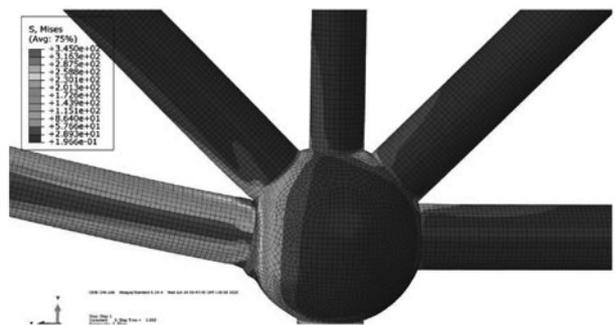


图12 焊接球节点变形图

#### (2) 贯穿球节点

节点转动刚度计算结果见表4，贯穿球节点转动刚度与空心球壁厚的关系见图13。空心球壁厚由42mm增加到75mm时，即 $\tau$ 由1.050增加到1.875时，节点转动刚度仅增加7%。与焊接球节点相比，空心球壁厚对贯穿球节点转动刚度影响较小，贯穿球节点转角以弦杆变形为主，空心球局部变形

不明显, 见图14。

表4 节点转动刚度计算结果

空心球壁厚 /mm	$\tau$	$M_{j,ed}/$ kN·m	$\phi_{j,ed}/$ /rad	转动刚度 /kN·m/rad
75	1.875	1387.6	0.0083	166374.2
70	1.750	1365.0	0.0083	164064.5
60	1.500	1293.3	0.0081	160653.0
55	1.375	1273.3	0.0080	158566.8
50	1.250	1238.9	0.0079	156817.8
46	1.150	1244.6	0.0080	155961.2
42	1.050	1238.9	0.0080	155448.7

注:  $\tau$  为焊接球壁厚与弦杆壁厚比。

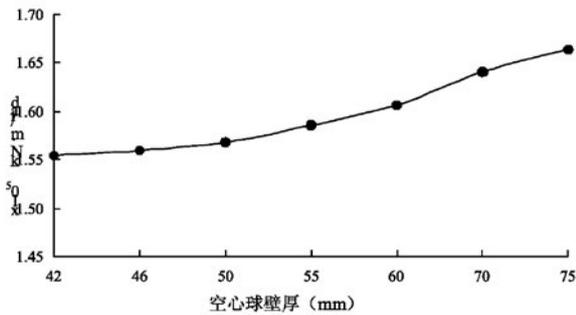


图13 贯穿球节点转动刚度—空心球壁厚曲线

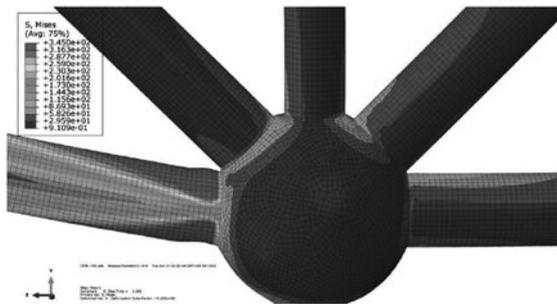


图14 贯穿球节点变形图

### 2.2.4 空心球直径影响

采用T型节点分析, 弦杆规格400mm×20mm, 竖腹杆规格351mm×18mm。空心球壁厚30mm, 空心球直径参数取1000mm、950mm、900mm、850mm、800mm及750mm、700mm。

#### (1) 焊接球节点

节点转动刚度计算结果见表5, 焊接球节点转动刚度与空心球直径的关系见图15。节点转动刚度随空心球直径增大而减小, 当空心球直径由700mm增加到1000mm时, 即 $\beta$ 由1.750增加到

2.500时, 节点转动刚度减小38.8%。空心球直径增大, 在弯矩作用下, 弦杆与焊接球连接处受压区更易发生局部屈曲, 见图16。

表5 节点转动刚度计算结果

空心球直径 /mm	$\beta$	$M_{j,ed}/$ kN·m	$\phi_{j,ed}/$ /rad	转动刚度 /kN·m/rad
1000	2.500	384.6	0.0153	25209.0
950	2.375	418.2	0.0153	27267.1
900	2.250	457.3	0.0155	29599.6
850	2.125	481.3	0.0156	30912.6
800	2.000	526.5	0.0157	33503.9
750	1.875	582.5	0.0159	36592.0
700	1.750	682.5	0.0166	41210.0

注:  $\beta$  为焊接球直径与弦杆直径比。

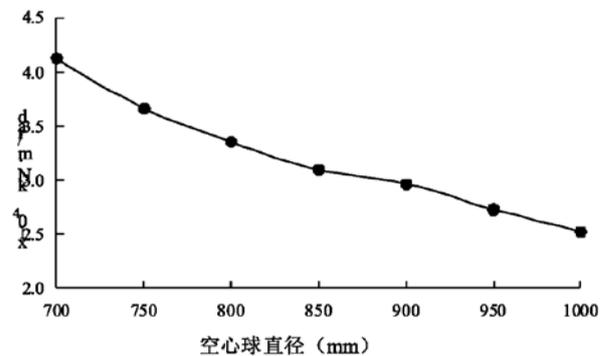


图15 焊接球节点转动刚度—空心球直径曲线

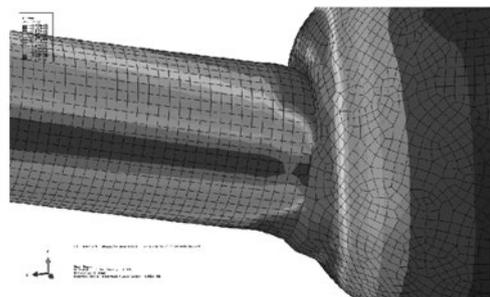


图16 焊接球节点变形图

#### (2) 贯穿球节点

节点转动刚度计算结果见表6, 贯穿球节点转动刚度与空心球直径的关系见图17。节点转动刚度随空心球直径减小基本保持不变, 当空心球直径由700mm增加到1000mm时, 即 $\beta$ 由1.750增加到2.500时, 节点转动刚度减小1.5%。贯穿球节点转角以弦杆变形为主, 空心球变形较小, 基本保持为弹性状态, 见图18, 空心球直径变化对节点转动刚

度影响较小。

表6 节点转动刚度计算结果

空心球直径/mm	$\beta$	$M_{j,ed}$ / $kN \cdot m$	$\phi_{j,ed}$ /rad	转动刚度/ $kN \cdot m/rad$
1000	2.500	835.4	0.0173	48241.9
950	2.375	849.2	0.0174	48829.9
900	2.250	852.1	0.0174	48964.5
850	2.125	873.2	0.0181	48304.1
800	2.000	889.9	0.0182	48950.0
750	1.875	891.6	0.0185	48315.5
700	1.750	867.2	0.0177	48979.3

注： $\beta$ 为焊接球直径与弦杆直径比。

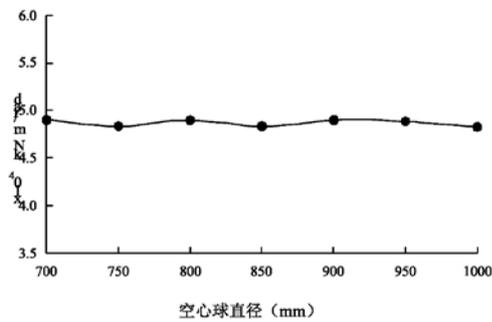


图17 贯穿球节点转动刚度—空心球直径曲线

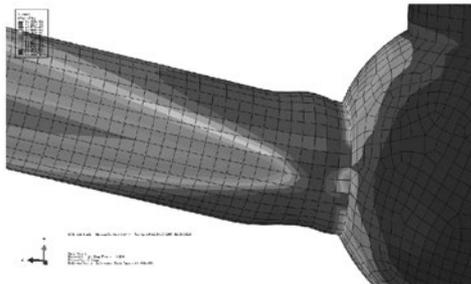


图18 贯穿球节点变形图

### 2.2.5 弦杆壁厚影响

采用TK型节点分析，空心球规格 $1500\text{mm} \times 55\text{mm}$ ，斜腹杆规格均为 $550\text{mm} \times 40\text{mm}$ ，竖腹杆规格 $450\text{mm} \times 25\text{mm}$ ；斜腹杆与弦杆夹角均为 $45^\circ$ 。弦杆直径 $500\text{mm}$ ，弦杆壁厚参数取 $40\text{mm}$ 、 $37.5\text{mm}$ 、 $35\text{mm}$ 、 $32.5\text{mm}$ 、 $30\text{mm}$ 及 $27.5\text{mm}$ 、 $25\text{mm}$ 。

#### (1) 焊接球节点

节点转动刚度计算结果见表7，焊接球节点转动刚度与弦杆壁厚的关系见图19。节点转动刚度随弦杆壁厚增大而增大，当弦杆壁厚由 $25\text{mm}$ 增加到

$40\text{mm}$ 时，即 $\tau$ 由 $2.200$ 减小到 $1.375$ 、 $\gamma$ 由 $20.000$ 减小到 $12.500$ 时，节点转动刚度增加 $36.2\%$ 。

表7 节点转动刚度计算结果

弦杆壁厚/mm	$\tau$	$\gamma$	$M_{j,ed}$ / $kN \cdot m$	$\phi_{j,ed}$ /rad	转动刚度/ $kN \cdot m/rad$
40.0	1.375	12.500	987.3	0.0120	82201.3
37.5	1.467	13.333	942.4	0.0121	78202.0
35.0	1.571	14.286	904.1	0.0121	74788.9
32.5	1.692	15.385	847.1	0.0121	69761.7
30.0	1.833	16.667	809.4	0.0122	66328.3
27.5	2.000	18.182	767.3	0.0122	62670.1
25.0	2.200	20.000	748.3	0.0124	60342.0

注： $\tau$ 为焊接球壁厚与弦杆壁厚比， $\gamma$ 为弦杆径厚比。

#### (2) 贯穿球节点

节点转动刚度计算结果见表8，贯穿球节点转动刚度与弦杆壁厚的关系见图20。与焊接球节点相比，贯穿球节点变形主要以弦杆变形为主，弦杆壁厚对贯穿球节点转动刚度影响较大，弦杆壁厚由 $25\text{mm}$ 增加到 $40\text{mm}$ 时，即 $\tau$ 由 $2.200$ 减小到 $1.375$ 、 $\gamma$ 由 $20.000$ 减小到 $12.500$ 时，节点转动刚度增加 $40.9\%$ 。

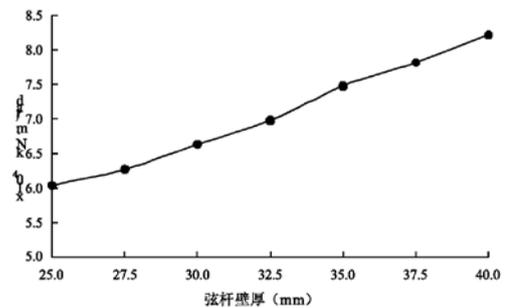


图19 焊接球节点转动刚度—弦杆壁厚曲线

表8 节点转动刚度计算结果

弦杆壁厚/mm	$\tau$	$\gamma$	$M_{j,ed}$ / $kN \cdot m$	$\phi_{j,ed}$ /rad	转动刚度/ $kN \cdot m/rad$
40.0	1.375	12.500	1694.9	0.0133	127736.4
37.5	1.467	13.333	1624.1	0.0133	122172.5
35.0	1.571	14.286	1551.0	0.0133	116411.8
32.5	1.692	15.385	1470.4	0.0134	110145.3
30.0	1.833	16.667	1391.4	0.0134	103926.3
27.5	2.000	18.182	1306.8	0.0134	97368.3
25.0	2.200	20.000	1220.2	0.0135	90658.8

注： $\tau$ 为焊接球壁厚与弦杆壁厚比， $\gamma$ 为弦杆径厚比。

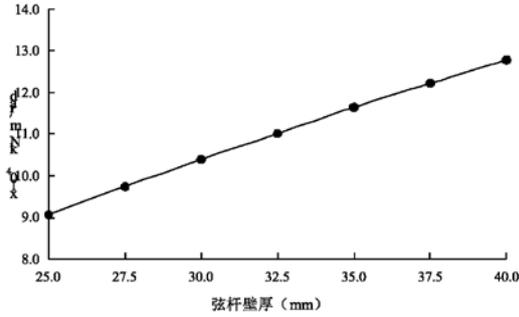


图20 贯穿球节点转动刚度—弦杆壁厚曲线

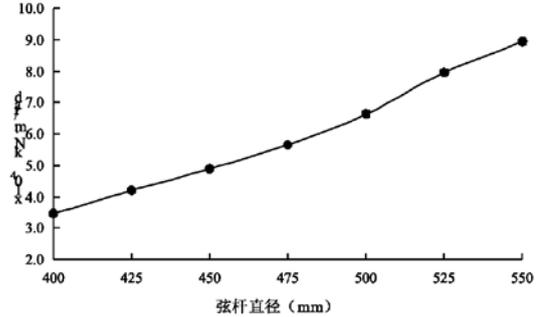


图21 焊接球节点转动刚度—弦杆直径曲线

### 2.2.6 弦杆直径影响

采用TK型节点分析，空心球规格1500mm×55mm，斜腹杆规格均为400mm×20mm，竖腹杆规格351mm×18mm；斜腹杆与弦杆夹角均为45°。弦杆壁厚30mm，弦杆直径参数取550mm、525mm、500mm、475mm、450mm及425mm、400mm。

#### (1) 焊接球节点

节点转动刚度计算结果见表9，焊接球节点转动刚度与弦杆直径的关系见图21。焊接球节点转动刚度随弦杆直径增加而增加，当弦杆直径由400mm增加到550mm时，即β由3.750减小到2.727、γ由13.333增加到18.333时，节点转动刚度增加142.6%。

#### (2) 贯穿球节点

节点转动刚度计算结果见表10，贯穿球节点转动刚度与弦杆直径的关系见图22。对于贯穿球节点，当弦杆直径由400mm增加到550mm时，即β由3.750减小到2.727、γ由13.333增加到18.333时，节点转动刚度增加104.3%。弦杆直径对于贯穿球节点转动刚度影响较大。

表10 节点转动刚度计算结果

弦杆直径 d/mm	β	γ	$M_{j,ed}$ /kN·m	$\phi_{j,ed}$ /rad	转动刚度 /kN·m/rad
550	2.727	18.333	1559.5	0.0122	128311.1
525	2.857	17.500	1477.1	0.0127	115922.1
500	3.000	16.667	1395.0	0.0134	104164.7
475	3.158	15.833	1314.0	0.0141	93101.8
450	3.333	15.000	1225.6	0.0149	82266.1
425	3.529	14.167	1140.7	0.0158	72274.5
400	3.750	13.333	1053.0	0.0168	62786.8

注：β为焊接球直径与弦杆直径比，γ为弦杆径厚比。

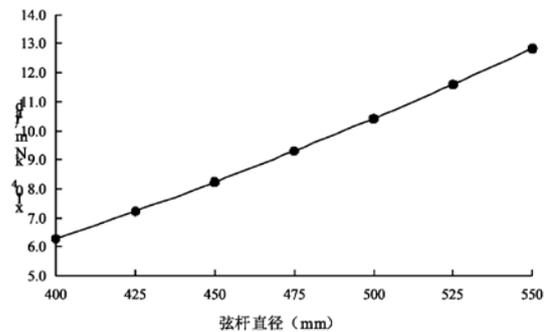


图22 贯穿球节点转动刚度—弦杆直径曲线

表9 节点转动刚度计算结果

弦杆直径 d/mm	β	γ	$M_{j,ed}$ /kN·m	$\phi_{j,ed}$ /rad	转动刚度 /kN·m/rad
550	2.727	18.333	994.3	0.0112	89023.4
525	2.857	17.500	930.9	0.0118	79022.1
500	3.000	16.667	810.1	0.0122	66373.4
475	3.158	15.833	722.7	0.0128	56542.0
450	3.333	15.000	657.6	0.0134	48900.2
425	3.529	14.167	597.7	0.0142	42045.8
400	3.750	13.333	557.9	0.0152	36688.3

注：β为焊接球直径与弦杆直径比，γ为弦杆径厚比。

## 3 转动刚度计算公式线性回归

首先根据不同影响参数，建立节点转动刚度参数化模型<sup>[9]</sup>。

$$K = a_0 E \tau^{a_1} d^3 \beta^{a_2} \gamma^{a_3} \quad (3)$$

式(3)中，弹性模量 $E=2.06 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ ， $\tau$ 为焊接球壁厚与弦杆壁厚比， $d$ 为弦杆直径， $\beta$ 为焊接球直径与弦杆直径比， $\gamma$ 为弦杆径厚比。

焊接球节点与贯穿球节点的有限元分析数据

表11 线性回归数据

节点编号	空心球规格 D×T /mm	弦杆规格 d×t /mm	$\beta$	$\tau$	$\gamma$	焊接空心球 节点转动 刚度值 /kN·m/rad	贯穿空心球 节点转动 刚度值 /kN·m/rad
1	1500×75	550×40	2.727	1.875	13.750	158139.6	166374.2
2	1500×70	550×40	2.727	1.750	13.750	142740.8	164064.5
3	1500×60	550×40	2.727	1.500	13.750	122961.6	160653.0
4	1500×55	550×40	2.727	1.375	13.750	106594.2	158566.8
5	1500×50	550×40	2.727	1.250	13.750	100062.0	156817.8
6	1500×46	550×40	2.727	1.150	13.750	88303.9	155961.2
7	1500×42	550×40	2.727	1.050	13.750	81130.7	155448.7
8	1000×30	400×20	2.500	1.500	20.000	25209.0	48241.9
9	950×30	400×20	2.375	1.500	20.000	27267.1	48829.9
10	900×30	400×20	2.250	1.500	20.000	29599.6	48964.5
11	850×30	400×20	2.125	1.500	20.000	30912.6	48304.1
12	800×30	400×20	2.000	1.500	20.000	33503.9	48950.0
13	750×30	400×20	1.875	1.500	20.000	36592.0	48315.5
14	700×30	400×20	1.750	1.500	20.000	41210.0	48979.3
15	1500×55	500×40	3.000	1.375	12.500	82201.3	127736.4
16	1500×55	500×37.5	3.000	1.467	13.333	78202.0	122172.5
17	1500×55	500×35	3.000	1.571	14.286	74788.9	116411.8
18	1500×55	500×32.5	3.000	1.692	15.385	69761.7	110145.3
19	1500×55	500×30	3.000	1.833	16.667	66328.3	103926.3
20	1500×55	500×27.5	3.000	2.000	18.182	62670.1	97368.3
21	1500×55	500×25	3.000	2.200	20.000	60342.0	90658.8
22	1500×55	550×30	2.727	1.833	18.333	89523.4	128311.1
23	1500×55	525×30	2.857	1.833	17.500	79622.1	115922.1
24	1500×55	500×30	3.000	1.833	16.667	66373.4	104164.7
25	1500×55	475×30	3.158	1.833	15.833	56542.0	93101.8
26	1500×55	450×30	3.333	1.833	15.000	48900.2	82266.1
27	1500×55	425×30	3.529	1.833	14.167	42045.8	72274.5
28	1500×55	400×30	3.750	1.833	13.333	36688.3	62786.8

如表11所示,根据最小二乘法线性回归,得到简化计算公式(4)、(5)。

$$K_h = 1.3626Ed^{3.00}\beta^{-1.46}\tau^{1.12}\gamma^{-1.90} \quad (4)$$

$$K_g = 0.0374Ed^{3.00}\beta^{-0.13}\tau^{0.07}\gamma^{-0.75} \quad (5)$$

式(4)、式(5)中, $K_h$ 为焊接球节点转动刚度, $K_g$ 为贯穿球节点转动刚度,弹性模量 $E=2.06 \times 10^8 \text{kN/m}^2$ , $\tau$ 取值范围1.05~2.20;取值范围0.4mm~0.55mm; $\beta$ 取值范围1.75~3.00; $\gamma$ 取值范围12.5~20.0。

为了检验回归公式的可靠性,另取表11之外的节点转动刚度有限元分析值对回归公式进行检验。焊接球和贯穿球节点计算信息见表12。

式(11)、式(12)计算的转动刚度结果与有限元分析结果见表13、表14。公式计算结果与有限元分析结

表12 节点信息

节点编号	焊接空心球规格 D×T	弦杆规格 d×t	$\beta$	$\tau$	$\gamma$
a	1125×40	475×30	2.368	1.333	15.833
b	1125×40	450×30	2.500	1.333	15.000
c	1025×35	450×30	2.278	1.167	15.000
d	925×35	450×30	2.056	1.167	15.000
e	825×35	425×25	1.941	1.400	17.000
f	750×30	425×25	1.765	1.200	17.000

表13 焊接球节点转动刚度对比

节点编号	有限元分析值 /kN·m/ rad	公式计算值 /kN·m/ rad	误差 %	节点编号	有限元分析值 /kN·m/ rad	公式计算值 /kN·m/ rad	误差 %
a	64654.2	62256.4	-3.7	d	64628.3	62104.0	-3.9
b	57670.1	54193.5	-4.4	e	57623.2	55010.4	-4.5
c	55833.4	53476.5	-4.2	f	54959.3	53170.9	-3.3

表14 贯穿球节点转动刚度对比

节点编号	有限元分析值 /kN·m/ rad	公式计算值 /kN·m/ rad	误差 %	节点编号	有限元分析值 /kN·m/ rad	公式计算值 /kN·m/ rad	误差 %
a	92575.8	94055.6	1.6	d	81517.3	84004.8	3.1
b	80645.3	82727.9	2.6	e	66868.4	65714.2	-1.7
c	80838.6	82918.8	2.6	f	66874.5	65783.6	-1.6

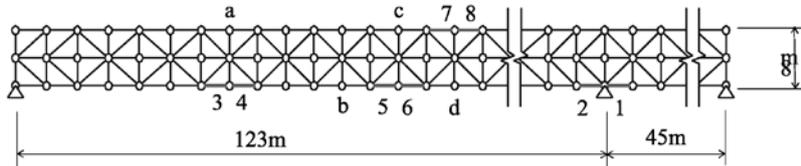


图23 大门桁架关键杆件、节点布置图

果吻合良好，误差在5%以内，符合工程计算精度要求。

#### 4 工程应用

某球管桁架机库跨度123m+45m，屋盖结构安全等级一级，重要性系数1.1，钢材材质均为Q355B。在“1.3×恒载+1.5×活载”组合工况下，采用不同节点连接假定——铰接、刚接及半刚性连接，探究大门桁架内力与节点挠度的变化。半刚性连接采用回归计算公式（4）、（5）计算节点转动刚度值，并将此数值输入到模型中进行计算分析。三种连接假定设计中仅给出关键杆件、关键节点计算分析结果，见表15~表19。关键杆件、关键节点布置见图23。

表15 关键杆件节点转动刚度计算结果

杆件编号	空心球规格	杆件规格	节点转动刚度 (kN·m/rad)
1	D900×40	D400×25	56823.2
2	D900×40	D500×30	109241.6
3	D800×30	D500×30	108651.6
4	D800×30	D500×30	108651.6
5	D800×30	D500×30	108651.6
6	D800×30	D500×30	108651.6
7	D800×30	D500×30	108651.6
8	D800×30	D500×30	108651.6

由表15~表18可知，半刚性连接模型与刚接连接模型相比，其杆件应力减小4%~20%，次弯矩

表16 铰接连接关键杆件计算结果表

杆件编号	轴力 (kN)	应力 (MPa)
1	-5647.4	208.9
2	-6921.9	165.7
3	10147.7	229.1
4	10088.7	227.8
5	10064.6	227.2
6	9991.5	225.6
7	-9836.4	235.5
8	-9649.5	231.0

表17 刚接连接关键杆件计算结果表

杆件编号	轴力 (kN)	次弯矩 (kN·m)	弯曲应力 占截面总应力 (%)	应力 (MPa)
1	-5636.6	279.8	34.2	316.9
2	-6903.1	286.5	24.8	219.8
3	10093.7	125.4	8.9	250.1
4	10019.3	125.4	8.9	248.4
5	10001.2	109.6	7.9	245.2
6	9938.1	110.2	8.0	243.9
7	-9778.3	204.4	14.7	274.3
8	-9591.2	205.5	15.0	270.0

表18 半刚性连接关键杆件计算结果表

杆件编号	轴力 (kN)	次弯矩 (kN·m)	弯曲力占截面 总应力 (%)	应力 (MPa)
1	-5633.0	132.1	19.7	259.6
2	-6903.7	138.4	13.7	191.6
3	10115.7	66.0	4.9	240.1
4	10041.8	66.1	4.9	238.4
5	10020.7	57.7	4.3	236.4
6	9955.3	58.2	4.4	235.0
7	-9806.2	92.7	7.2	253.0
8	-9615.2	93.5	7.4	248.5

表19 关键节点挠度

节点编号	铰接挠度 (mm)	节点编号	刚接挠度 (mm)	节点编号	半刚接挠度 (mm)
a	535	a	532	a	533
b	553	b	550	b	551
c	530	c	529	c	529
d	479	d	476	d	477

减小47.4%~54.6%，可有效减小次弯矩的影响；半刚性连接模型与铰接模型相比，其杆件应力增加4%~25%。

由表19可知，节点连接假定对大门桁架节点挠度影响不超过1%。

## 5 结语

对大跨度机库球管大门桁架节点转动刚度进行了有限元参数分析和计算公式回归，得出以下结论：

(1) 杆件内力、腹杆形式对节点转动刚度影响较小。

(2) 对于焊接空心球节点，弦杆直径、空心球壁厚增加，节点转动刚度显著增大；空心球直径增加，节点转动刚度减小；弦杆壁厚增加，节点转动刚度增大。

(3) 对于贯穿球节点，随着弦杆直径和壁厚的增加，节点转动刚度显著增大；空心球壁厚增加，节点转动刚度略微增大；空心球直径对节点转动刚度几乎没有影响。

(4) 利用最小二乘法得到节点转动刚度回归公式，公式计算结果与有限元模拟结果吻合良好，误差在5%以内，符合工程计算精度要求，可应用于工程设计。

(5) 利用回归公式，将计算节点转动刚度输入到实际工程中，与刚接连接模型比较发现，杆件应力减小4%~20%，次弯矩减少50%左右，可有效减小次弯矩的影响。

## 参考文献

- [1] 朱丹, 裴永忠, 徐瑞等. 北京A380机库大跨度结构设计研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(2):1-8.
- [2] 赵伯友, 林伟, 朱丹等. 东航航线/STARCO大修机库结构设计[J]. 建筑结构, 2009, 39(10):9-14.
- [3] 沈顺高. 大跨度机库方案的概念设计与动力性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
- [4] 孙晨辉. 焊接空心球节点刚度的有限元分析[D]. 浙江: 浙江工业大学, 2008.
- [5] 廖俊, 张毅刚. 焊接空心球节点荷载-位移曲线双线性模型研究[J]. 空间结构, 2010, 16(2):31-38.

[6] Han Qinghua, Liu Yiming, Xu Ying. Stiffness characteristics of joints and influence on the stability of single-layer latticed domes[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 107:514-525.

[7] 齐国材. 基于半刚性节点的椭圆形弦支穹顶力学性能分析[D]. 天津: 天津大学, 2018.

[8] 闫翔宇, 张起舞, 齐国材等. 压弯作用下焊接空心球节点抗弯刚度研究[J]. 实验力学, 2019, 34 (6) : 945-953.

[9] GB50017-2017 钢结构设计标准[S].

# 某民用机场油库消防设计实例

■ 郝岩 陈洁如 [给排水]

**摘要:** 本文以某民用机场油库消防设计为例,介绍了固定式泡沫灭火系统及固定式消防冷却水系统的水量计算参数和方法、消防管网布置形式和“一键消防”等要点,以期为机场油库消防设计提供参考。

**关键词:** 机场油库消防;固定式泡沫灭火系统;固定式消防冷却水系统

## 0 引言

近年来,我国民用航空市场呈现跨越式发展,每一座新建或改扩建的机场均会配套机场油库的新建或改扩建项目。其中,油库消防作为保障正常生产与人员安全的重要措施,越来越被人们广泛关注。目前,机场油库多采用以消防泡沫系统进行灭火,辅助以消防冷却水进行火势控制的模式进行消防设计。本文以某民用机场油库的消防设计为例,介绍了具有代表意义的固定式泡沫灭火系统以及固定式消防冷却水系统的设计特点。

## 1 项目概述

某民用机场油库占地面积约35.8亩,现有3座200m<sup>3</sup>地上立式储罐,总库容为600m<sup>3</sup>。本期新建直径与罐壁高分别为15.5m和11.9m的2000m<sup>3</sup>立式内浮顶锥底储油罐3座、1座10m<sup>3</sup>半地下立式收集罐、容积均为20m<sup>3</sup>的地上及埋地卧式储罐各1座以及附属生产生活建筑物或构筑物若干,本期总库容6600m<sup>3</sup>,属于四级石油库。远期规划拆除现有3

座200m<sup>3</sup>地上立式储罐,在前期设计的基础上增设7座同等规模的2000m<sup>3</sup>立式内浮顶锥底储油罐,总库容20000m<sup>3</sup>,属于三级石油库。

## 2 消防设计

### 2.1 消防水源

现有油库储罐区采用生产、生活及室外消防合用的管网,不满足《石油库设计规范》(GB50074-2014)要求的“一、二、三、四级石油库应设独立的消防给水系统”,同时,现状供水的水量、水压均无法满足消防的设计要求,因此本期新建消防泵房及消防水罐,通过消防冷却水加压泵、泡沫加压泵及泡沫混合装置、独立的泡沫、消防冷却水管网对新建罐区进行消防保护,同时满足现有罐区及新建生产生活建筑物及构筑物的消防供水要求。

### 2.2 消防系统概述

本期消防对象为油罐区所有油罐和新建建筑单体。其中,新建储油罐区采用固定式液上喷射低倍数泡沫灭火系统和固定式水幕喷淋冷却水系统,并配置小型移动式灭火器材,同时新建储油罐区消防兼顾现有罐区的消防保护。新建单体采用室外消火栓系统和小型移动灭火器材进行消防保护。

作者简介:郝岩,男,助理工程师,2020年毕业于北京建筑大学环境工程专业,现就职于中航建设机场规划设计研究院。

## 2.3 油罐区消防设计

储油罐采用内浮盘技术,该浮盘材质采用不锈钢浮筒式内浮盘,应属于易熔性金属,其消防系统应按固定顶油罐进行设计。

### 2.3.1 消防系统计算

#### (1) 泡沫混合液用量计算

根据《泡沫灭火系统技术标准》(GB 50151-2021)的设计条款,本期油罐区采用固定式低倍数泡沫灭火系统,泡沫液种类为3%的环保型低倍数水成膜泡沫液,供给强度为 $6.0\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ ,持续供给时间为45min,泡沫灭火系统设计流量按1座 $2000\text{m}^3$ 储油罐灭火计算。经计算,扑救着火罐罐体的泡沫混合液流量至少为 $18.87\text{L}/\text{s}$ ,同时考虑到泡沫发生器喷射时对环管受力均衡的影响以及管道阀门操作的简便性,因此每座 $2000\text{m}^3$ 储油罐设置2套PCL16型泡沫产生器(每套流量为 $16\text{L}/\text{s}$ ),对称布置;同时采用1只PQ4泡沫枪(流量为 $4\text{L}/\text{s}$ )进行流散液体火灾的扑救工作,连续供给时间20min。泡沫液用量统计详见表1所示。

表1  $2000\text{m}^3$ 储油罐泡沫液计算表

项目	设备配置	泡沫液量( $\text{m}^3$ )	泡沫液总量( $\text{m}^3$ )	泡沫混合液设计流量( $\text{L}/\text{s}$ )
着火罐泡沫液用量	2套PCL16泡沫产生器	2.59	5.79m (裕度系数 $k=2.0$ )	36
泡沫枪泡沫液用量	1只PQ4泡沫枪	0.15		
管网泡沫液用量	DN150 L=320m	0.16		

储罐区泡沫灭火系统扑救一次火灾的泡沫混合液设计用量,应包括罐内用量、该罐辅助泡沫枪用量以及管道剩余量。本期油罐组最远端着火罐距离消防泵房的管线距离约为320m,管内泡沫混合液流速约为 $2.04\text{m}/\text{s}$ ,到达最远端着火油罐用时157s,满足规范要求的“泡沫消防水泵启动至泡沫混合液或泡沫输送到保护对象的时间小于5min”。同时,规范要求泡沫液应有不少于100%的富余量。经计算,泡沫混合液设计流量为 $36\text{L}/\text{s}$ ;考虑到机场油库安全性要求较高,同时配置泡沫混合液的水量占消防总用水量的比例较小,因此本次设计按泡沫混合液100%富余,即泡沫液与对应配

置的水量均按100%富余,其中水量为 $187.21\text{m}^3$ ,泡沫液量为 $5.79\text{m}^3$ 。远期仍考虑一个油罐着火,其泡沫混合液用量与本期一致。

#### (2) 消防冷却水用量计算于5min的要求。

本期新建3座 $2000\text{m}^3$ 储油罐,一字布局,采用固定式消防冷却水系统,罐上喷头采用“左右半环”布置。根据《石油库设计规范》(GB50074-2014)对消防冷却的要求,本期油罐区着火的最不利情况为中间的 $2000\text{m}^3$ 储油罐着火,除着火罐需进行全周冷却外,在距离着火油罐罐壁 $1.5D$ ( $D$ 为着火罐直径)范围内,相邻的2座 $2000\text{m}^3$ 储油罐均需进行半周冷却。远期共建设10座 $2000\text{m}^3$ 储油罐,两排布置,每排一字布置5座油罐,喷头仍为“左右半环”布置。远期消防冷却水用量包括着火罐的全周冷却外,还包括相邻的1座全周冷却和4座半周冷却,同时,规范指出“当相邻的地上储罐超过3座时,可按照其中较大的3座储罐进行计算”,因此远期相邻罐将以1座全周冷却和2座半周冷却进行设计。着火罐及相邻罐供给强度均按 $2.5\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^3$ 设计,冷却时间6h,冷却水计算见表2。

表2  $2000\text{m}^3$ 储油罐消防冷却水量计算表(近远期)

项目	消防冷却水流量( $\text{L}/\text{s}$ )	消防冷却水总流量( $\text{L}/\text{s}$ )	配置泡沫混合液需水量( $\text{m}^3$ )	消防总用水量( $\text{m}^3$ )
本期	着火罐	24.14	63.28	187.21
	相邻油罐	24.14		
	室外消防栓流量	15		
远期	着火罐	24.14	87.42	2076
	相邻油罐	48.28		
	室外消防栓流量	15		

本项目消防系统按近期设计,兼顾远期预留,消防系统用水量近期为 $1555\text{m}^3$ ,远期为 $2076\text{m}^3$ 。油罐顶部实际布置SPTM-II-9型水幕喷头29个,每个喷头设计流量为 $50.0\text{L}/\text{min}$ ,经校核,近期消防冷却水供给量为 $64.17\text{L}/\text{s}$ ,消防水罐储水量应为 $1573\text{m}^3$ ;根据实际复核计算,远期消防冷却水供给量为 $88.33\text{L}/\text{s}$ ,消防水罐储水量应为 $2096\text{m}^3$ 。因此本期新建2座 $1100\text{m}^3$ 消防水罐,有效容积满足设计要求。

### 2.3.2 消防设施

本项目新建2座1100m<sup>3</sup>消防水罐。消防水罐采用聚氨酯保温材料及电伴热进行保温,其中聚氨酯保温层厚度为100mm,电伴热采用HTR电伴热带并配置相应配电柜。水罐内设置高低液位报警装置,液位就地显示,并远传至控制室兼消防值班室。同时设置温度监测设置,对水罐内水温进行监测。

日常泄露补水水量量较小,由室外给水管网供给补充,低液位时打开补水电动阀,高液位时关闭补水阀电动阀;初次充水或检修后充水由机场引入的DN150供水干管补给,新建的DN150补水管,满足水罐96h补满的要求。

新建1座消防泵房,内设消防泵、泡沫比例混合装置、稳压装置等;消防供电满足两路独立电源,主要设备见表3。

表3 消防泵房主要设备表

序号	名称	规格	单位	数量	备注
1	电动消防冷却水	Q=90L/s、 H=70m、 N=110kW	台	2	1用1备
	加压泵				
2-1	电动消防泡沫	Q=40L/s、 H=100m、 N=75kW	台	1	主泵
	加压泵				
2-2	柴油机消防泡沫 加压泵	Q=40L/s、 H=120m、 N=107kW	台	1	备用泵
3	平衡式泡沫	PHP80(%)	套	1	
	比例混合装置	Q=4-40L/s、 P=1.6MPa			
4	泡沫液储罐	AFFF3	m <sup>3</sup>	6	混合比 3%
5	消防稳压装置		套	1	配套阀 门附件
5-1	配套稳压水泵	Q=3.0L/s、 H=58m、 N=4.0kW	台	2	1用1备
5-2	立式隔膜式气压 水罐	V=900L、 调节容积150L	座	1	

### 2.3.3 消防管网布置

从消防冷却水泵出水总管上引出2根DN250供水管至油罐区,每根供水管可以通过100%的消防冷却水流量,于油罐区防火堤外布置成环,管网埋地敷设,其上设置室外地上式消火栓,布置间距不超过60m。每座新建2000m<sup>3</sup>储油罐从消防冷却水环管上引出2根DN100支管,其上设置电动阀门,跨越防火堤接入罐区后引至罐壁顶端设置一圈环状冷却水管,罐上冷却水环状管分成2个半环,上面设置水幕喷头。现有的200m<sup>3</sup>储油罐采用移动式消防冷却水系统,由本次新建的环状供水管网上的室外消火栓实施消防防护。

从消防泵房的泡沫混合液干管上接出1根DN150泡沫混合液管至2000m<sup>3</sup>油罐区,围绕防火堤设置成环,地上架空敷设,其上设置室外地上式泡沫消火栓,布置间距不超过60m。

每座2000m<sup>3</sup>储油罐配置2个PCL16型立式泡沫产生器,用管道引至防火堤外,其上设置电动阀门,与泡沫混合液环管连接。现有200m<sup>3</sup>储油罐采用移动式泡沫消防系统,由新建室外泡沫管网上的泡沫栓进行防护。

泡沫混合液管道应保证高点至放空阀有0.2%的坡度,可根据地势和埋深适当调整管线坡度;防火堤内的消防管线应保证0.3%的坡度坡向放空阀,每次使用后放空。本次新建2000m<sup>3</sup>油罐组最远端着火油罐距离消防泵房的管线距离约为320m,管内泡沫混合液流速约为2.04m/s,达最远端着火油罐用时157s,满足规范要求的不大于5min要求。

### 2.3.4 管材、防腐、阀门

防火堤外消防管线均采用焊接钢管,焊接,埋地管线需做防腐处理。防火堤内泡沫管线采用焊接钢管;消防冷却水管线采用内外镀锌无缝钢管,法兰连接。管材执行标准为《低压流体输送用焊接钢管》(GB/T 3091-2015)、《输送流体用无缝钢管》(GB/T 8163-2018)。

罐区消防管线及阀门公称压力均为1.6MPa。

埋地焊接钢管采用环氧煤沥青特加强级防腐,详细做法参见《给水排水管道工程施工及验收》(GB 50268-2008);地上敷设的泡沫混合液管除锈后外刷防锈漆两道,再刷聚氨酯面漆两道,地上敷设的消防冷却水管除锈后外刷防锈漆两道,刷聚氨酯面漆两道(内外镀锌无缝钢管只刷聚氨酯面漆两道)。消防管道及设备涂色按照《民用航空

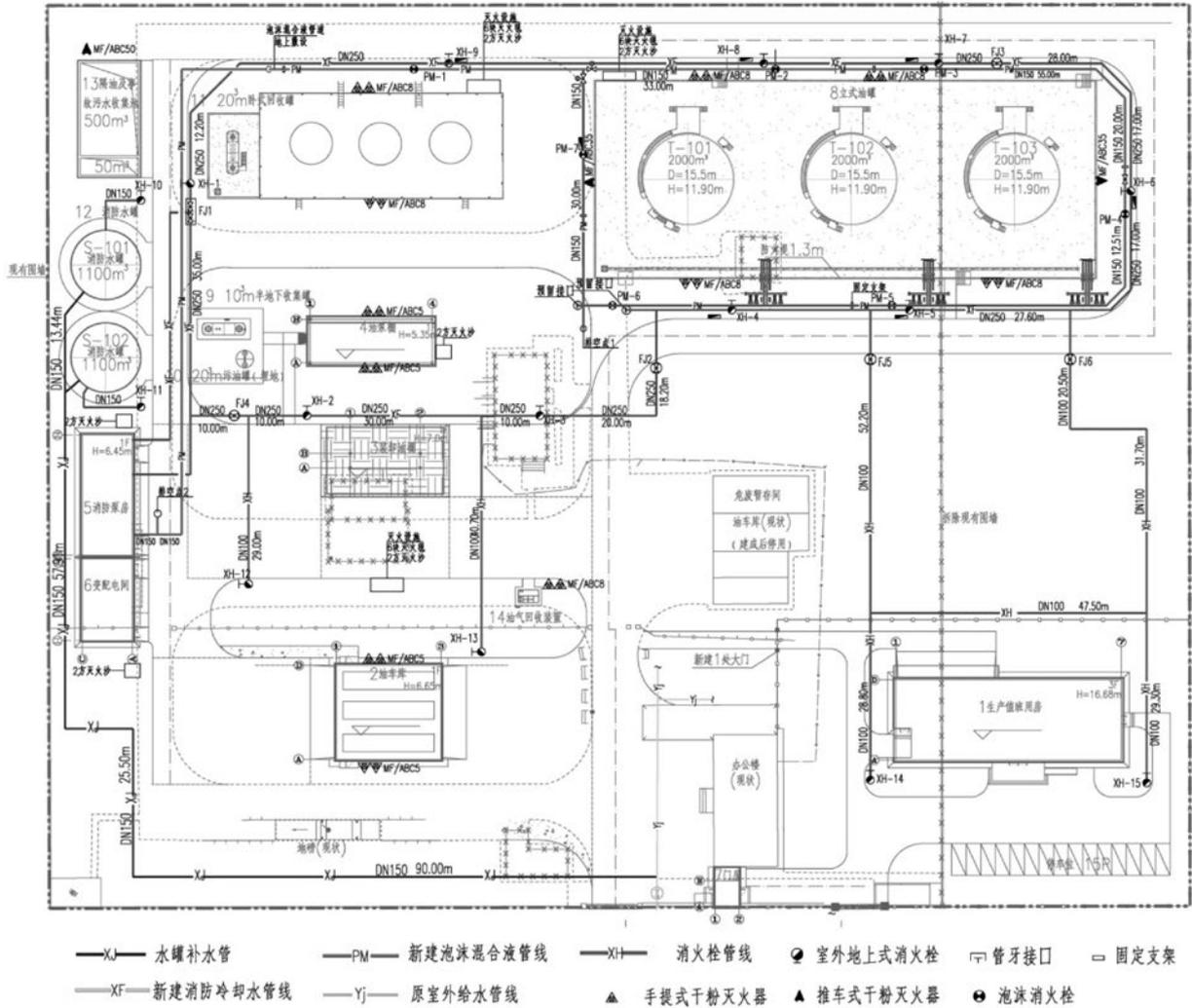


图1 某民用机场油库改扩建项目消防平面图

油料设备完好技术规范》(MH/T 6002-2008) 执行。

消防水罐钢板表面采用磨料喷射处理, 防锈等级应达到《涂覆涂料前钢材表面处理表面清洁度的目视评定第1部分: 未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级》(GB/T 8923.1-2011) 中Sa2.5级。施工和验收标准参考《钢质石油储罐防腐蚀工程技术标准》(GB/T 50393-2017) 的规定。消防水罐外涂色按照《民用航空油料设备完好技术规范》(MH/T 6002-2008) 执行。

### 2.3.5 “一键消防”与罐区的消防控制

为坚决贯彻落实党中央提出的“从根本上消除事故隐患”的指示要求, 机场油库消防设计逐渐推广使用一种能够“一键式启动”特定消防程序的系统, 因其具有操作简单、反应迅速的特

点, 已经在机场油库消防领域被广泛应用。报警系统、泡沫系统以及消防冷却水系统都是机场油库消防系统不可缺少的部分, 三者相对独立, 为提高消防灭火的效率与便捷性, 以一键启动为枢纽, 将三者有机结合起来。报警系统通过进行时实时监控或人工巡检结合手动报警器的方式将火情信息的输入, 工作人员以全景摄像机作为火情确认手段, 启动着火罐对应的一键消防按钮。考虑到泡沫混合液从泡沫产生器产出并喷入被保护储罐内部, 一旦发生勿喷则会污染整个油罐, 造成严重的经济损失。因此, 机场油库消防设计的“一键式启动”需经人工确认火灾情后, 方可进行一键启动着火罐对应的消防既定程序。

本项目在控制室兼消防值班室内设有火警专用受警录音电话一部、直通机场消防队的电话一部、在消防值班室及消防泵房设声光报警装置, 实

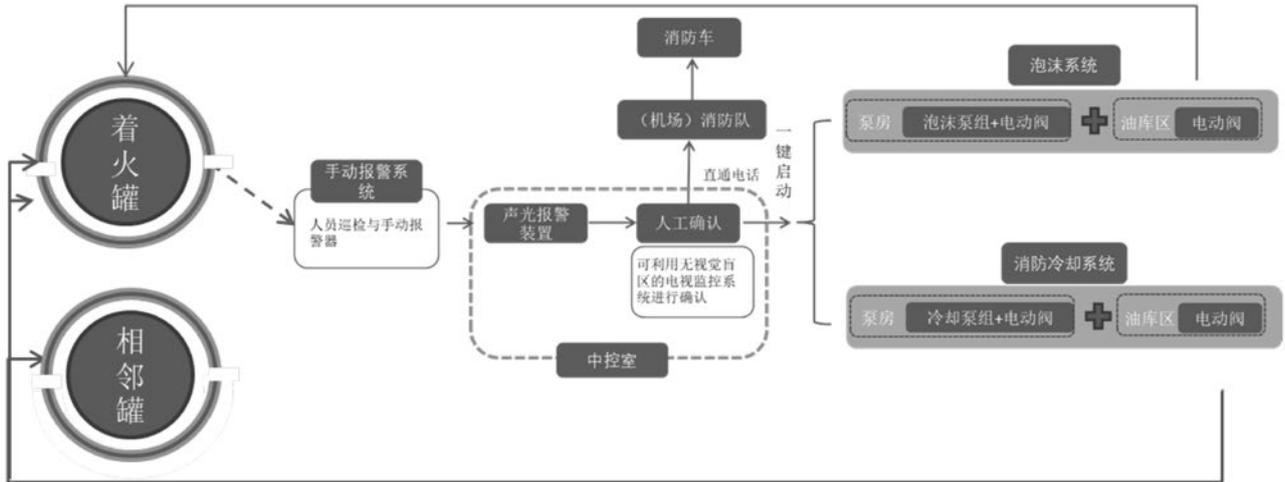


图2 一键消防示意图

表4 灭火器材统计表

序号	计算单元	火灾危险等级	火灾种类	灭火器材	灭火器材数量
1	油罐区	严重	B	MF/ABC8	8具
				MFT/ABC35	2辆
				灭火沙	2m <sup>3</sup>
				灭火毯	6块
2	装卸油棚	严重	B	MF/ABC8	8具
				灭火沙	2m <sup>3</sup>
				灭火毯	6块
3	油泵棚	严重	B	MF/ABC5	4具
				灭火沙	2m <sup>3</sup>
4	油车库	严重	B	MF/ABC5	4具
5	生产值班用房	中	A	MF/ABC4	18具
6	消防泵房及变配电间	中	A	MF/ABC5	4具
			E (配电间)	MT7	2具
				灭火沙	4m <sup>3</sup>
7	漏油及事故污水收集池	严重	B	MFT/ABC50	1辆
8	油气回收装置	严重	B	MF/ABC8	2具
9	航煤回收罐区	严重	B	MFT/ABC50	1辆

现消防通讯的高效化。

场区人员会定时对油库进行巡检，当发现储罐着火时，按下附近手动报警器，信号将传输到消防值班室的声光报警装置，提醒中控室工作人员存在火情。工作人员通过全景摄像机进行确认，经确认某罐确实存在火情时，启动对应的消防按钮，一键启动消防冷却水泵、泡沫消防水泵、泡沫比例混合装置以及新建罐区防火堤外消防支管上安装的电动阀门。同时，在火灾确认后，向整个油库进行广播，通知并指导人员疏散。消防应急广播与火灾声报警器应分时交替工作，在控制室可手动或按预设控制联动控制选择分区、启动、停止播放火灾紧急广播。

消防冷却水泵同时具有自动启泵功能。本项目油罐消防冷却水系统采用临时高压给水

系统,并设置稳压装置为系统稳压,稳压泵平时运行工况为:管网压力下降到设定值0.35MPa时,稳压泵自动启泵,补充管网的泄漏量,管网水的压力随之升高;当管网压力升高到设定值0.42MPa时,稳压泵自动停泵。如此循环使管网压力维持在0.35~0.42MPa。当发生火灾时,罐区任意打开一个消火栓或开启油罐消防冷却水支管阀门,管网压力迅速下降,当管网压力下降到0.3MPa时,消防冷却水泵自动启动,稳压泵停止。消防泡沫系统管路平时处于排空状态,火灾时需人工确认后,方可一键启动相应消防泵和阀门。

### 2.3.6 其他消防设计

#### (1) 单体消防设计

本次新建单体仅设室外消火栓系统和小型移动灭火器材,室外消防流量为25L/s,火灾延续时间2h。在新建的DN250环状消防管网上引出两根DN100消防管线,其上设置地上式消火栓,间距不超过120m,保护半径不超过150m,供水压力不小于0.3MPa,保护范围可覆盖油库生活区新旧单体室外消防。

#### (2) 小型移动灭火器材

根据《石油库设计规范》(GB 50074-2014)的规定,在新建储罐区、装卸油棚、油泵棚、油车库、生产值班用房、消防泵房及变配电间等处均配置小型移动式灭火器材。灭火器放在明显和便于取用的地点,且不影响安全疏散。灭火器应设置牢固,并且铭牌向外。二氧化碳灭火器不得选用装有金属喇叭喷筒的二氧化碳灭火器。此外,还应按规范要求配置灭火沙、灭火毯等灭火器材见表4。

### 2.3.7 消防依托

某民用机场消防站位于机场内,距离油库直线距离约200m,可在接到消防报警后5min内到达现场,消防车辆及泡沫液配备满足本项目要求,可

作为本项目的消防依托。现机场消防站消防车辆配置如表5。

## 3 结论

某民用机场油库改扩建消防设计要点可归纳为以下几点:

(1) 2000m<sup>3</sup>立式内浮顶油罐采用易熔浮盘,需进行固定式泡沫灭火系统和固定式消防冷却水系统的消防设计与水量计算,其中消防冷却水量需采用实际布置的喷头流量进行校核;泡沫灭火系统需要以消防水泵启动至泡沫混合液输送到保护对象的时间进行校核。

(2) 机场油罐区的消防冷却水管网为环状布置;油罐区消防泡沫管网习惯上也以环状布置。

(3) 为提高机场油库消防灭火的反应效率,“一键消防”被广泛应用。但为了防止泡沫勿喷,需经人工确认火情后方可启用。

### 参考文献

- [1] GB50074-2014 石油库设计规范[S].
- [2] GB50151-2021 泡沫灭火系统技术标准[S].
- [3] 董林林.油库消防联动控制系统[J].石油化工安全环保技术,2015,31(2):17-20.

表5 消防车辆配备表

序号	名称	数量(辆)	备注
1	泡沫快速调动车	1	0.6吨泡沫/辆
2	主力泡沫消防车	2	2吨泡沫/辆
3	重型泡沫消防车	2	2.5吨泡沫/辆
4	消防通讯指挥车	1	
5	消防保障车	1	
6	火场照明车	1	

# 微电网示范案例的控制策略

■ 赵亮亮 赵瑞霞 滕飞 李江 [电气]

**摘要:** 为整合下属单位的技术产品开展绿色能源的广泛应用,某集团在北京某地建成了一套由风力发电、光伏发电、储能单元和负载组成的微电网系统。本文通过介绍该微电网控制系统的设计和微电网的主控制策略,分析微电网的孤网运行、孤网与并网的切换等技术问题,提出控制策略,为设计提供参考。

**关键词:** 微电网; PCS; 孤网运行; 控制策略; 控制逻辑

## 0 引言

我国碳达峰——碳中和的战略目标背景下,一些知名企业愿意用绿色电力生产产品,使产品在国际市场上更具竞争力。风力发电和光伏发电目前作为绿色电力,因选址灵活、布置便利、度电成本越来越低等特点,相对于其他绿色电力更具竞争力和适应性。为此,本文将某集团整合的多能源微电网示范项目首次公开,为减少碳排放提供一个示范性案例。

该集团多能源系统示范项目利用北京某地会议中心的屋面布置了风力发电机和光伏板,将锅炉房二层的换热间改造成储能装置和多能源监控设施的中央控制室,并在酒店礼堂内布置了数据显示屏。考虑到产品整合、示范效果、实地选址以及气象资源等综合因素,微电网示范项目最终规模确定为4台5kW水平轴风力发电机、20kW光伏发电系

统、40kW(3h)储能单元、10kW基本用电负载和30kW可变负载。

## 1 微电网的控制系统设计

### 1.1 控制系统架构

如图1所示,微电网的总配电柜汇集了风力发电机进线、光伏发电进线、40kW(3h)锂电储能系统进线、10kW基本负载馈线、30kW可调负载馈线以及与市政电网相连的总开关。10kW基本负载包括澡水循环泵、照明及空调、设备控制电源。30kW可调负载由可控硅调控器控制锅炉水箱的电加热器承担。锅炉间二层的中央控制室内布置了光伏逆变器、总配电柜、储能系统、PLC中央控制柜等重要设备。如图2所示,风力发电机控制箱和风机汇电箱在会议中心的楼顶,在楼顶处设置了远端IO箱。

为了实现微电网的监控,控制系统分3种形式与重要设备进行控制、测量、保护或报警信息等数据交换。控制系统对监测数据进行分类和处理

作者简介: 赵亮亮,男,研究员,2004年毕业于天津大学电力系统及其自动化专业,现就职于航空工业规划总院市政工程设计研究院。

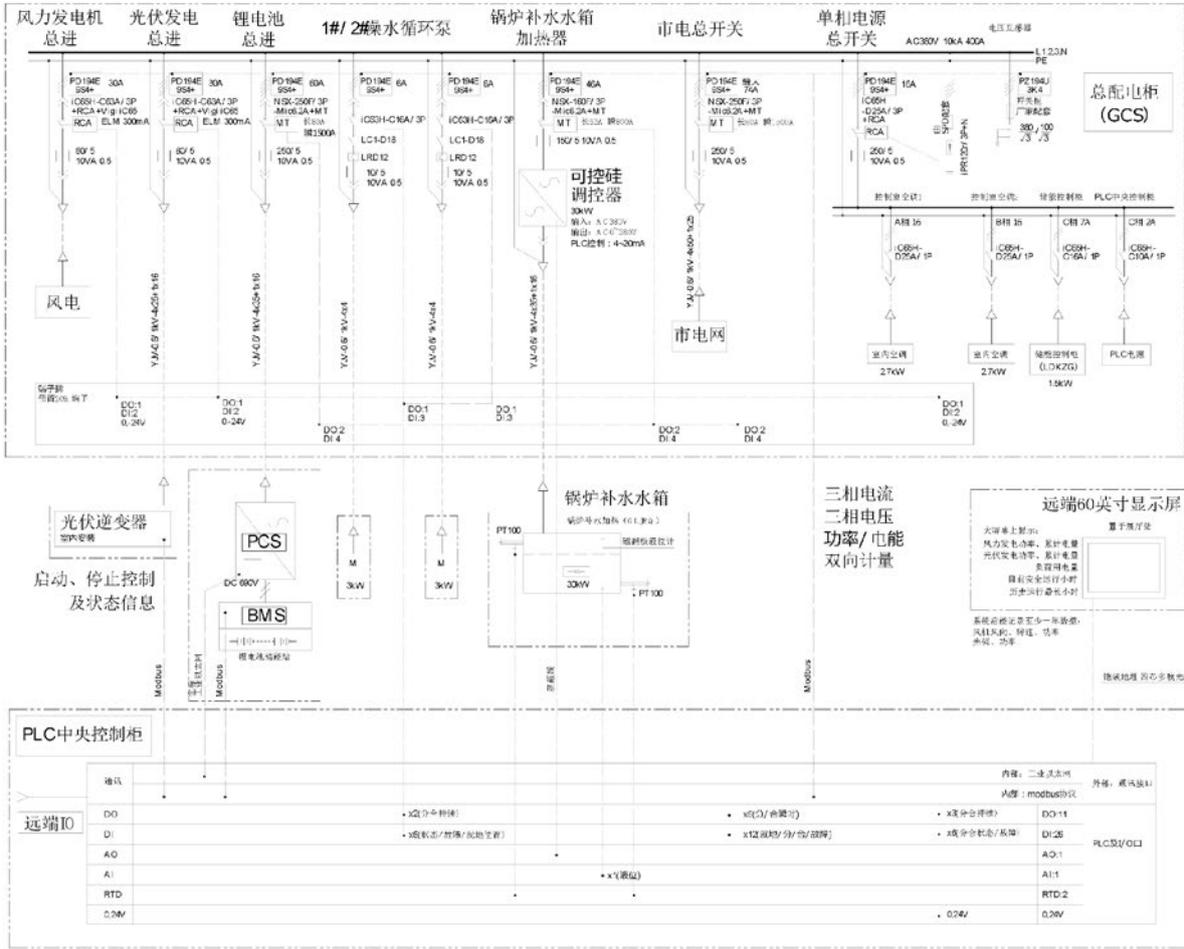


图1 中央PLC架构图

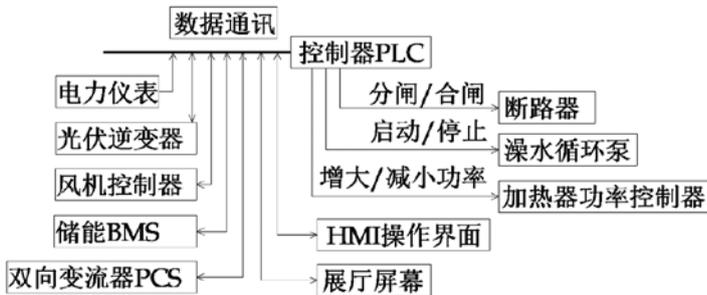


图2 PLC数据交换和信息传递示意图

后，将信息分别展示在中央PLC的HMI和展厅的大屏幕上。

(1) 中央PLC通过Modbus-TCP与储能系统的PCS (GES-85) 模块相连，通过Modbus与BMS模块和光伏逆变器相连，远端IO通过Modbus与风力发电机的控制器相连，通过通信方式实现数据交换。

(2) 中央PLC通过硬接线与总配电柜的断路器、接触器控制回路相连，远端IO通过硬接线与风机汇电柜的微型断路器控制回路相连，从而实现对主电路和澡水循环泵的启停控制。

(3) 中央PLC和远端IO通过Modbus与风机汇电柜、总配电柜的多功能仪表进行通讯，对电流、电压、功率、电量进行采集。

### 1.2 光伏逆变器和风机控制器的控制

图1中的光伏逆变器的直流输入端由直流输入，输出端连接至交流电网。光伏逆变器并网发电并网过程如下：

- (1) 合上交流侧断路器和直流侧断路器，逆变器进入启动中状态。
- (2) 当直流输入电压超过220V维持1min，逆变器准备并网。
- (3) 逆变器进行并网前的自检，不断检测光

伏阵列是否有足够的能量进行并网发电等，直到确认满足并网工作所需的所有条件后，开始连接电网，进入并网发电状态。

(4) 并网发电过程中，逆变器以最大功率跟踪 (MPPT) 方式使光伏阵列输出的能量最大。

并网逆变器的脱离电网过程与并网发电过程一样，都是自动完成的。光伏逆变器发现并网运行条件不满足时，则进入离网状态。

### 1.3 储能系统PCS的控制

双向变流器 (PCS) 是实现交直流电能双向变换连接的装置，在微电网当中扮演重要角色。当在微电网能量管控下时，能实现对电网负荷的“削峰填谷”和快速的二次调频；当电网需要补充无功时，能作为配网静止无功发生器使用，提供无功功率支撑；当与就地负荷和间歇式分布式能源 (风电、光伏) 组成微电网时，能够为微电网内的负荷提供稳定的电压和频率。双向变流器 (PCS) 具备保护变流器及电池安全的功能、具备自检功能、具备通信接口便于接入监控系统或者外部的控制系统；提供调试软件能完成故障录波、定值整定、开入开出测试。

参照图3所示的PCS双向变流原理图，说明PCS并网、孤网和并网与孤网切换的过程。

#### (1) PCS并网运行

第1步，遥控合闸交流断路器，如电池状态正常，继续下步操作；

第2步，遥控“信号复归”，无“故障指示”；

第3步，遥控“变流器”的功率设定，下发需要的功率值，正为放电、负为充电；

第4步，遥控“变流器待机 (热备)”，15s后，遥测查看，接触器是否在合位，如在合位，继续下一步；

第5步，遥控“变流器并网启动”，PCS按第3步下发的功率值进行并充放电；

第6步，此时如需改变功率大小及充放电方

式，只需执行第3步即可。

#### (2) PCS孤网运行

第1步，遥控合闸交流断路器，如电池状态正常，继续下步操作；

第2步，遥控“信号复归”，无“故障指示”；

第3步，遥控“变流器待机 (热备)”，15s后，遥测查看，接触器是否在合位，如在合位，继续下一步；

第4步，遥控“变流器离网启动”；

第5步，检查PCS电压三相电压是否正常，如正常，PCS离网启动正常；

第6步，随后PCS根据孤网能够带载情况，对电池进行充放电，功率根据孤网的负载而定。

#### (3) PCS并网与离网的转换

第1步，遥控“变流器待机 (热备)”，此时PCS停止工作；

第2步，遥控“变流器并网启动”或者“变流器离网启动”；

第3步，如果此时为变流器并网运行，则遥控功率设定，下发需要的功率值，正为放电、负为充电；

#### (4) PCS停机

第1种，当系统运行正常，只停止对电池充放电操作或孤网运行操作，可遥控“变流器待机”，此时PCS停止工作，但断路器仍处于合位；

第2种，遥控“变流器停机”进行PCS停机操作，PCS停止运行，所有断路器进行分操作，要5min后再进行PCS相关操作；

第3种，如发生紧急情况，遥控“急停”，PCS停止运行，所有断路器进行分操作，停机后，要5min后再进行PCS相关操作。

### 1.4 断路器和接触器的控制

总配电柜和风力发电机汇电柜的塑壳断路器和微型断路器，分别采用MT模块和RCA模块实现PLC的常保持信号实现断路器的分合闸操作，控

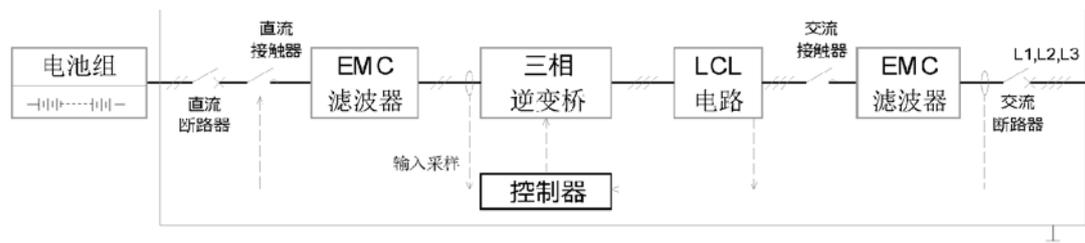
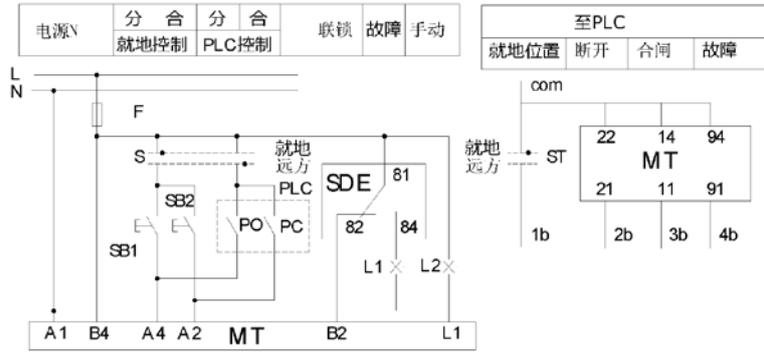


图3 PCS双向变流与原理图

制原理图见图5和图6。

RCA和MT的控制回路，均采用的是220V交流控制。为了保证主电路失去电力的情况，仍然能够对主电路进行监视和控制，控制回路最好采用UPS供电或直流蓄电池进行供电。

相对于断路器的远方操控，电动机控制原理相对比较传统，也同样采用PLC的常保持触点实现电动机的启停控制。



说明：  
1. 转换开关S、按钮SB1、2、信号灯L1、2、熔断器F，由厂家配套，S、SB1、SB2、L1、L2安装于柜门上。2. 开关柜内配端子排，用于外接PLC系统的控制电缆。

图5 MT控制原理图

## 2 微电网的控制策略和逻辑

### 2.1 微电网的运行模式

到该微电网以孤网运行为主的特点，控制系统按自动和手动两种模式进行编程，运行时以自动模式为主。

#### (1) 自动模式

1) 孤网运行的条件。当系统处于并网运行模式运行状况变化至“锂电池电量大于等于80% (SOC >= 80%) 且锂电池单体最低电压大于等于3.2V (BMS\_LV >= 3.2V)。”满足此条件，微电网系统切换到孤网模式下运行。

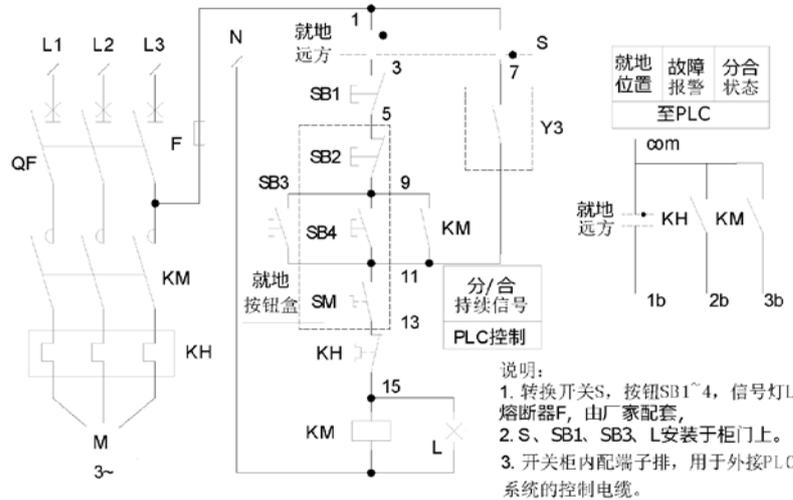


图6 电动机控制原理图

2) 并网运行条件。当系统处于孤网运行模式运行状况变化至以下3种任意状态时，系统切换至并网模式下运行。

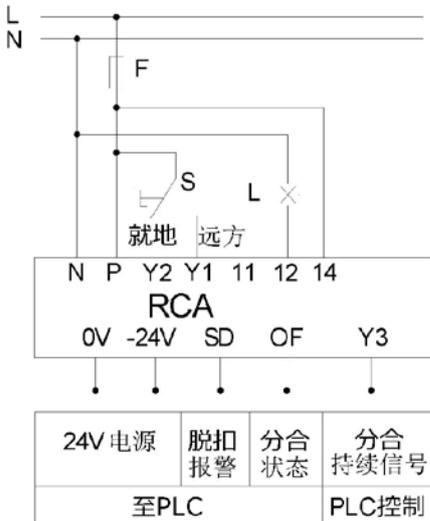
- 第1种状态，锂电池电量小于等于35% (SOC <= 35%) 且发电设备输出功率小于等于3kW；
- 第2种状态，锂电池单体最低电压小于等于2.9v (BMS\_LV <= 2.9V) 且锂电池电量小于等于50% (SOC <= 50%)，状态存在15S；
- 第3种状态，锂电池SOC小于等于30%。

#### (2) 手动模式：

运行模式通过中央PLC控制柜的开关手动转换至手动模式位置时，系统中风机、光伏、电机的断路器、热电阻功率控制器、仪器仪表等均在控制、调节、监视和测量之中。

### 2.2 控制策略和逻辑

控制总策略的基本原则是最大限度利用风光



说明：1. 转换开关S、信号灯L、熔断器F由厂家配套，S、L安装于柜门上。  
2. 开关柜内配端子排，用于外接PLC系统的控制电缆。

图4 RCA控制原理图

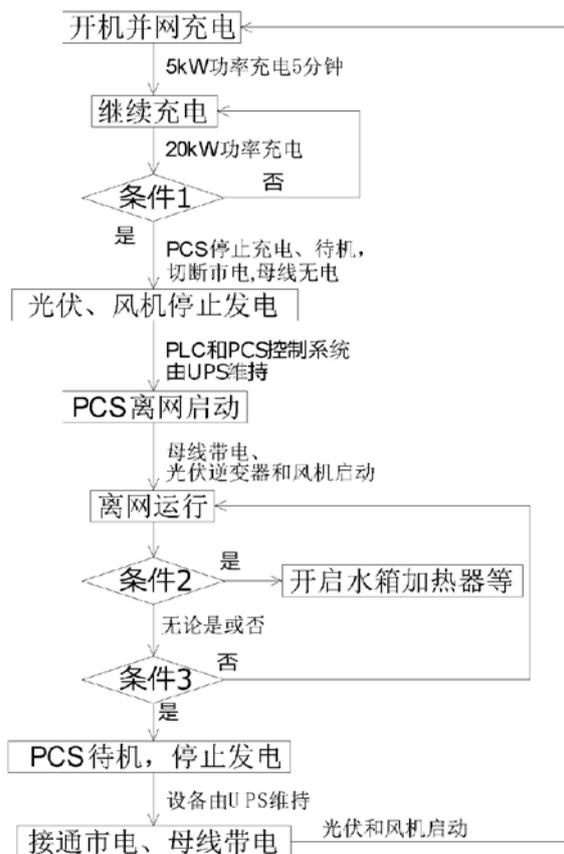
的绿色能源，具体是：系统开始启动时，先给锂电池系统充电。充满后，切断市电。当风光条件好时，风力发电系统和光伏发电系统先后同期并入微电网，向基本负载供电，同时向锂电池充电储能；锂电池充满时，由发电系统向可调负载供电。当风光条件不好时，切断发电系统或保持发电系统处于离网状态，锂电池放电向基本负载供电。当放电至电池下限时，将基本负载转由大电网供电。

根据微电网的运行模式以及控制总策略，该系统整个发电控制流程如图8所示。

(1) 开机后自动运行并网充电，先以5kW功率充5min，然后以20kW功率充电；

(2) 充电到电池电量到80%且单体最低电压达到3.2V后，PCS停止充电，待机，切断市电，母线无电，光伏和风机停止发电，PLC和PCS控制系统靠储能系统中的小容量UPS维持；

(3) PCS离网运行启动，母线带电，光伏逆



注：

条件1=电池电量是否到80%且单体最低电压是否达到3.2V

条件2=发电量是否充足

条件3=电池电量是否降低30%或单体最低电压是否降到2.9V

图7 控制逻辑方框图

变器和风机启动，系统在离网运行（若发电量充足则开启水箱加热器：电池电量90%时，全开加热器；电量50%时，关加热器；50%~90%之间，减去3kW用于充电，其余开加热器）；

(4) 系统离网运行，电量降低30%或单体最低电压降到2.9V时，PCS待机，母线无电，光伏和风机停止发电，其他设备靠UPS维持；

(5) 接通市电，母线带电，光伏和风机启动，PCS并网启动，自动运行第一步，开始循环。

整个控制方案的具体实现由PLC控制系统完成，PLC系统通过通讯队风力发电机系统、光伏系统、储能系统中的PCS—集负荷侧配电系统进行控制、见识和测量，通过硬接线与风机汇流柜和负荷侧配电柜进行控制和监视。控制系统可以对微电网系统的监测数据进行处理，并将系统的运行信息数据通过大屏幕展示给参观者。

### 3 240h试运行曲线及控制分析

现以阶段2为例，即5月25日中午12时~6月4日中午12时，共计240h，监控通过240h试运行曲线，结合微电网的控制策略：

(1) 试运行中，锂电池储能系统总共两次并入市政电网，分别是在第113个采样点（B点）和第164个采样点（C点）。这两次均是由于锂电池的电池电量小于等于35%且发电设备输出功率小于等于3kW，系统自动切换至并网模式，由市电为储能系统充电并为微电网内的负载供电。当锂电池的电池电量大于等于80%且锂电池单体最低电压大于等于3.1V时，微电网系统再次切换至孤网运行。

(2) 试运行中，锂电池储能能在第1次充电之前，尽管风光发电单元能正常运行，但锂电池储能系统的电量仍呈下降趋势。即使不遇到第90个采样点的阴天，锂电池最终也需要市电进行充电。这说明风光系统为储能系统提供的最低3kW的充电保证偏小或者充电的策略需要改变。

(3) 试运行中，储能系统的单电池温度控制在24℃~27℃之间，单电

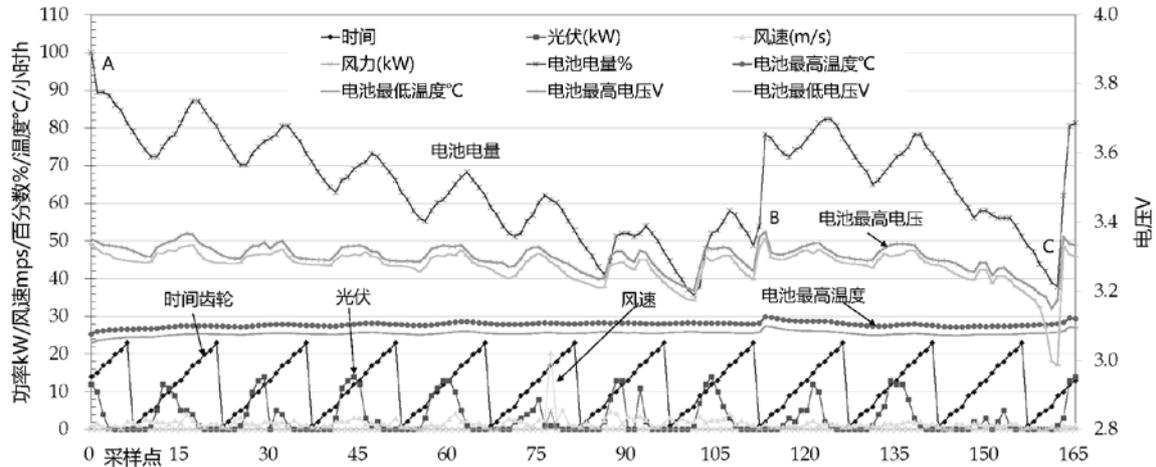


图8 240h试运行期间运行曲线

池的最高和最低电压也在3.4~3.8V之间的充放电状态之中,属于正常工作状态。

#### 4 总结

本文以某集团的微电网示范项目出发,从整体上介绍了该微电网的控制系统的架构,分析了微电网的240h试运行数据,给出了风光储构成的微电网控制策略和控制逻辑。该微电网设计侧重于产品的整合和示范目的,受控单元包括风电控制器、光电逆变器和储能PCS及BMS等重要模块,从运行数据和孤网运行的结果来看,给出的微电网控制原则、策略和逻辑基本满足运行要求。因此该微电网在风力资源和光资源等绿色资源丰富的条件下,能够为用户提供可观的绿色电力,在当前双碳目标的驱动下具有一定的借鉴意义,也为偏远地区的用电提供了一个选项。

#### 参考文献

- [1]黄鹏程,王瑛.风光储柴微电网系统运行控制策略分析[J].勘察设计,2020(5)增刊:242-248.
- [2]王飞林,崔双喜,杜玉婵等.风光储出力波动抑制策略[J].电气传动,2020(Vol.50, No.9):66-71.
- [3]牛瑞杰,郭俊文,李晓博等.风光储联合发电系统储能控制策略[J].热力发电,2020-08(Vol.49 No.8):150-155.
- [4]朱皓斌,徐光福,侯炜等.基于PCS功率越限判据的独立型微电网紧急控制策略.电力工程技术.2020-3(Vol.39 No.2),59-63.
- [5]张文煜,李明,刘宏勇等.基于风机光伏梯

次利用动力电池联合发电的并网功率控制系统设计.全国第三届“智能电网”会议论文[C].2019-10-20:481-485.

[6]王坦坦,孙树敏,王楠等.基于混合储能的微电网控制策略研究.现代电子技术.2020-11(Vol.43 No.21),119-121

[7]段江曼,吴云来,朱亦杰.园区级风光储充多能互补设计方案的应用.太阳能.2020-4(No4, total No312),71-78

[8]邵乔乐,张程翔,贺军.微电网系统综合能源示范工程综述.浙江电力.2020.(第39卷第5期).55-60.

# 澳门都市更新与活化研究 ——以风顺堂区为例

■ 郭梦晓 林资政 [规划]

**摘要:** 在城市化进程中,很多城市的古老片区存在许多问题。本文根据实际情况,研究分析澳门风顺堂区现状形成的原因,并给予相关更新与活化对策,提出从改善居民生活环境和挖掘历史文化价值来吸引游客两个方面入手,尽力维持居民与游客、开发与保护的平衡,使旧城区可以可持续发展。

**关键词:** 澳门城市规划;风顺堂区;都市更新;旧城活化

## 1 前言

澳门是一个历史悠久的国际化都市,经过东西方文明的交融独具魅力,既有葡萄牙殖民时期的城市形态,也有中国的传统文化遗存。第29届联合国教科文组织世界遗产组织委员会的21个成员国一致把澳门历史城区列入《世界文化遗产名录》。澳门的历史城区保护较为完整,但是经过几千年的变化和发展,历史城区中的一些部分开始出现衰落的现象,不能跟上城市化的进程,存在诸多急需解决的问题。

对富有历史文化的旧城区进行活化,不像简单的都市更新。国内旧城改造少有成效的原因是无法平衡经济发展、历史文化保护和居民利益之间的关系(周建梁,2018)。本文选取历史城区中的风顺堂区,简单介绍该区历史与现状,通过对现状成因的分析,提出对风顺堂区更新和活化的相关对策,实现该区域的可持续发展。

## 2 风顺堂区的历史与现状

风顺堂区是澳门的历史老区,处于澳门岛的西南部,三面环水,北至新马路,东侧是与大堂区相邻的一部分商业区,濒临南湾和西湾。风顺堂区区位如图1所示。

风顺堂,译为祈求风调雨顺。澳门渔业是澳门最古老的经济作业之一,由于多面环海,有丰富的深海区域,为渔业发展提供良好的前提(吴志良,杨允中,2005)。出海经常会遇到恶劣天气,为了祈求平安,会在沿海的地方修建教堂,目送家人出海和祈求平安归来(黄鸿剑,1987)。在风顺堂区形成妈阁庙、圣老楞佐教堂、圣诺瑟教堂、圣奥斯定教堂。葡萄牙人在澳门聚居的时期,为了保证城市和居民的安全,在地势高、视野好的地方修筑了大量炮台,例如妈阁炮台。为了组织路网,在交叉口地区形成了前地,也成为了人们休闲活动的场所,包括妈阁庙前地、亚婆井前地、岗顶前地和议事亭前地。该区还有澳督府、圣诺瑟修院等,历史文化遗产丰富,大部分都处于历史城区中。景区位置如图

作者简介:郭梦晓,女,助理工程师,2020年毕业于澳门城市大学城市规划与设计专业,现就职于中航建投综合规划研究院。



图1 风顺堂区区位图 (作者自绘)



图2 景区分布图 (作者自绘)

2所示。

具有关数据记载,1869年,风顺堂区街道有117条,其中前地4个,街31条,斜巷14条,石阶3条,里20条,围21条。由于渔业在经济中所占比重逐年减少,港口的功能逐渐消失,加之工厂和娱乐场的搬离,使这个区域开始衰落(姚敏峰,沈岚,2015)。风顺堂区的福隆新街是古代时期由色情、赌博、鸦片等行业带动,之后,妓院、烟馆、赌档已经消失,福隆新街开始萧条(林广志,吕志鹏,2013)。

现在的风顺堂区以商住混合用地为主,底层

为商业,二层及以上为住宅楼。还有一些公共服务用地、宗教用地和学校用地。西部为内港,滨水区域多物流仓储用地。该区比较好地保留了历史文化建筑和城市肌理,街区之间的通达性高,道路两旁有小商贩摆摊,生活便利,学校、超市、饭馆数量多且分布广泛,公共交通很便捷,按公交站500m的服务范围来计算,可以覆盖大部分区域。问卷调查数据显示,绝大部分居民认为这里生活便利。

但是该区域从人口年龄结构来看,人口老龄化问题严重,大量年轻人选择居住环境更好的区域生活。该区域楼房多为4~7层的老房屋,基础设施较为老旧,出现墙皮脱落、电线凌乱、消防设施破损等现象。部分区域的人流量较少,很多商铺处于废置状态。虽有两个大型停车场,但还是没有满足当地人的停车问题。并且,居民的休闲娱乐空间少。风顺堂区现状如图3所示。

### 3 现状成因分析

#### 3.1 房屋私有且土地匮乏

澳门除宗教设施、公园广场等公共设施外,其余用地和房屋均为私人所有。相关数据表明,澳门已有2/3的楼宇的房龄超过30年,楼宇整体的质量较差。该区域多数居民希望对房屋进行更新,但由于楼宇属于私人所有,居民在维修资金来源、重建后权益等问题上产生分歧。在现实环境下,楼宇的更新需要所有居民的同意才可以进行,使楼宇更新的进程发展缓慢。

澳门建设面积的增长一直都依赖于填海造陆。相较于1840年的2.78km<sup>2</sup>,现已达到32.9km<sup>2</sup>,但依然不能满足澳门的城市发展需求(澳



图3 风顺堂区现状 (作者自摄)

门地图绘制暨地籍局,2021)。并且,近年填海造陆的土地用来兴建赌场酒店、公共服务设施,并没有对现有住宅的更新产生积极影响。土地资源的匮乏对楼宇的新建、搬迁住宿等都带来了极大的挑战。

### 3.2 经济活力不足

官方数据显示,该区域年轻人口所占比重只有11.4%,而老年人口占12.8%(澳门统计暨普查局,2019)。从而导致业态较为传统,消费人群为当地中老年人,缺乏经济活力,虽在福隆新街等街道存在“手信”、“美食”,但整体来看缺少年轻的、吸引游客的产业,且存在大量闲置店铺。该区业态比重如图4所示。

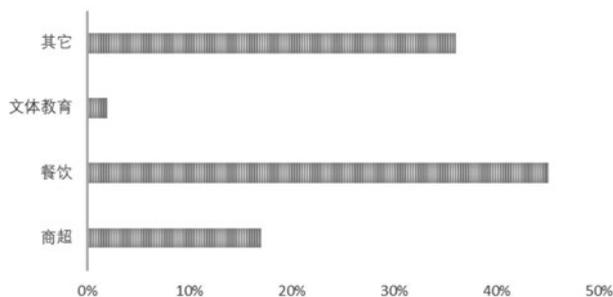


图4 风顺堂区业态图 (作者自绘)

风顺堂区历史文化遗产丰富,但游客量少,较大三巴区域出现衰落趋势。通过问卷调查的数据研究分析,认为该区域人流量较少的原因有:人们对历史文化遗产的认识不够,对赌场奢侈品店更具兴趣;景点有同质性,趣味性较低;地形影响,费时费力;看起来破败而没有游览兴趣等。

## 4 都市更新与活化对策

风顺堂区的更新与活化对策从改善当地居民生活条件和吸引游客两方面入手,同时维持居民生活有序正常和适当吸引游客、活化历史街区的平衡,再利用游客带来的经济利益加速该区居民生活环境的提升。

### 4.1 改善居民生活条件

本人在与当地居民的交谈中,大部分居民表示该区生活便利,现在最大的需求为改善居住环境,其次是增加车位和公共活动空间。居民需求如图5所示。

在改善居民生活条件方面来讲,可以从整建、维护和重建3个方面进行。在增设停车场和绿化方面,需要根据实际需求,通过拆除重建、功能变更、综合整治方式完善配套设施。由于澳门寸土寸金,大规模公园难以实现,只能采取街边绿植、回型楼中间天井增设绿植等方法,小范围、多区域进行。只有改善居住环境才能吸引更多人在该地区居住,引入新的活力。

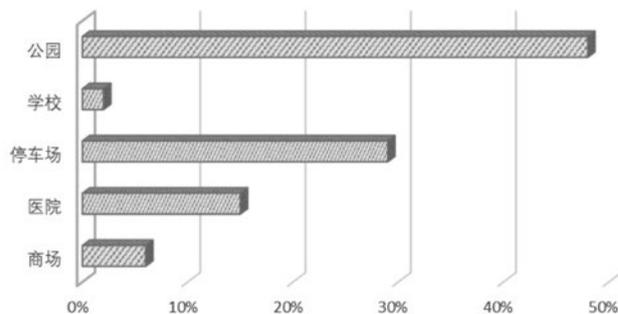


图5 居民需求图 (作者自绘)

对于以整建、维护方式进行的更新,应该组织都市更新委员会。由于在澳门房屋为私人产权,业权人对更新资金来源上存在分歧,建商也会因为获利少而不愿承接。在这种情况下,需要政府出面进行协商和调节,组织都市更新委员会,协调居民意见,并按比例出资进行补贴,减轻居民压力。保证更新资金充足且无财务纠纷。更新完成后,委员会可继续保留但仅作为后续管理维护机构。

对于以重建方式进行的更新,可由开发商主要推进。政府在制定规划条件时,可适当给予较高的容积率,即使居民回迁也能使开发商有一定数量

空房可供销售。同时,可鼓励开发商增加停车场和公共空间。开发商在利益驱动下能更有意愿进行都市更新,使得都市更新顺利进行。

#### 4.2 吸引游客,增加活力

美化沿街建筑立面。从人流量较多的澳督府和议事亭前地进行美化和标志设立,吸引游客深入历史城区。风顺堂区要充分利用好其价值,在保护好自然发展形成的社会肌理的基础上,选择合适的更新手法,避免大拆大建。对一些没有危险只是破旧的房屋进行立面整改,提升城市形象,使整个街区变成艺术品,激发居民生活的热情,也能够吸引更多游客前来感受充满历史气息的街区。

增加景点趣味性。游客对文化遗产的兴趣本身偏低,需要增加其趣味性吸引游客。游客在澳门感受最多的就是博彩和购物,在现代高新技术方面的体验感有所欠缺,所以,可以把现代技术和历史文化进行结合。比如:让游客参与使用3D打印机,打印自己创作的纪念品;或者使用VR技术,让游客亲身体验历史时期目送亲人航海远行和期盼亲人归来而去教堂祈福的场景。还可以在有历史故事的街区,设置线索,“按图索骥”,通过线索加深对澳门历史的了解,增强游客与景点和互动。

增加吸引游客消费的产业形态。结合当地的历史文化特色,结合新的创意和技术做成电影、动画、手工艺品的形式展现给游客。十月初五街因电影《十月初五的月亮》增加了其知名度,不仅可以增加景点的趣味性,吸引更多游客前来打卡,还可以带动新型经济的发展,创造更多的就业岗位,实现可持续发展。

#### 4.3 实现居民与游客的平衡

在旧区更新和活化中首先要保护当地居民的利益,不能让游客影响到本地居民的生活。现景点周围多为住宅区,游客流量不多,暂时没有对当地人的生活造成影响。由景点分布分析图可以看出,这些景点较好的集中在一条线路上,如果后期加大对旅游的开发力度,形成历史文化旅游线,游客增多,只需加强对该路线上的管理,不会对整个区域居民的生活造成过大影响。在调研过程中,居民谈到该区逐渐衰落,很多店铺长期废置,造成资源浪费,虽也有居民对该区引入游客存在质疑,但大部分居民和店商愿意接受游客,为区域带来新的活力。

## 5 结论与建议

经过分析研究发现,澳门风顺堂区历史文化遗产保护完整,生活便利。但随着经济结构的变化,原本繁华的街区开始出现衰落趋势。针对这一现象,根据实际情况,从居民和游客两个方面切入进行旧城更新与活化。首先,要通过整建、维护、重建等方式来改善居民生活条件,再通过增加景点趣味性、引入吸引游客的业态等途径吸引游客,激发该区域的经济活力。同时维护居民与游客的平衡关系,最终实现风顺堂区的活化和可持续发展。

本研究受到收集数据的限制,数据样本较少,统计结果与实际情况可能存在误差,并且无法进行量化研究。后期如可获取城市的相关数据,可以在智慧旅游的方向深入研究,将大三巴、新马路周边的人流量和该区域的人流量进行对比,通过对实时人流、车流的监控,当大三巴附近的人流量超过合理容量时,向历史城区的其他景点疏散人流,不仅可以缓解人流压力还可以带动周边地区,提升街区活力。

#### 参考文献

- [1] 周建梁.旧城更新和历史改造中需要处理好的几个关系[J].上海房地,2018,(01).
- [2] 吴志良,杨允中.澳门百科全书[M].澳门:澳门基金会,2005.
- [3] 黄鸿剑.澳门史[M].福州:福建人民出版社,1987.
- [4] 姚敏峰,沈岚.文化景观设计与旧城区活化——以澳门司打口片区为例[J].中国园林 2015(031),006
- [5] 林广志,吕志鹏.澳门旧街往事[M].北京:中国旅游出版社,2013.
- [6] [https://www.dssc.gov.mo/zh-hans/geo\\_statistic](https://www.dssc.gov.mo/zh-hans/geo_statistic) 澳门地图绘制暨地籍局.
- [7] 澳门统计暨普查局.澳门 2019 年鉴[M].澳门:统计暨普查局,

# 大温差蓄能式地源热泵系统 在项目中的应用研究

■ 赵磊 肖武 [暖通]

**摘要:** 本文结合实际工程,对大温差蓄能式地源热泵系统在项目中的应用进行了全年运行费用以及地埋管热平衡计算。结果表明,大温差蓄能式地源热泵系统的运行费用非常低,节能及经济性效果明显。另外,本项目创新性地设计了冰蓄冷、水蓄热一体复合式蓄能系统,同一设备实现两季蓄能,蓄能效率大幅度提高,节省冷热源系统运行费用,还可以节省蓄能设备占用空间。

**关键词:** 地源热泵;冰蓄冷;水蓄热;热平衡计算;运行费用

## 0 引言

2020年9月22日,习近平总书记提出我国将加大力度应对气候变化,“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”。2018年,建筑运行化石能源消耗相关的碳排放为21亿tCO<sub>2</sub>,占全国总量的1/5左右。建筑部门如何实现深度减排,会对我国应对气候变化目标的实现产生重要影响,也是建筑领域下一阶段的重要发展议题。

在前不久召开的第22届暖通空调制冷学术年会上,中国工程院院士、清华大学教授江亿谈到了“2060年实现碳中和”目标,并坦言这是一个很难实现的挑战。要实现碳中和,就必须彻底改变以化石能源为基础的能源结构,变成以可再生能源和核

能等零碳能源为主的低碳能源结构。他指出:“要大量发展垂直埋管的土壤源热泵。当土壤源热泵间歇运行时,可以按照电力负荷的状况帮电网调峰。热泵停了,但埋管的地底传热过程可没断,根据分析,表明土壤源热泵间歇运行产生的总的热量或冷量跟连续运行是一样的,甚至cop还能高点。”

热泵技术是政府主推的应用可再生能源的重要技术措施之一,该系统利用了地球表面浅层地热资源,以大地为冷、热源对相应建筑进行空气调节,具有清洁、高效、节能的特点<sup>[1]</sup>。而蓄冷空调系统,依据当地电价政策进行优化运行,可实现用电负荷的“移峰填谷”,有利于社会的资源优化配置,并能显著降低用户的空调运行费用<sup>[2-4]</sup>。

## 1 项目概况

本项目位于江苏省无锡市,总建筑面积为17

作者简介:赵磊,男,高级工程师,2007年毕业于天津大学供热、供燃气、通风与空调专业,现就职于航空工业规划总院机载工程事业部。

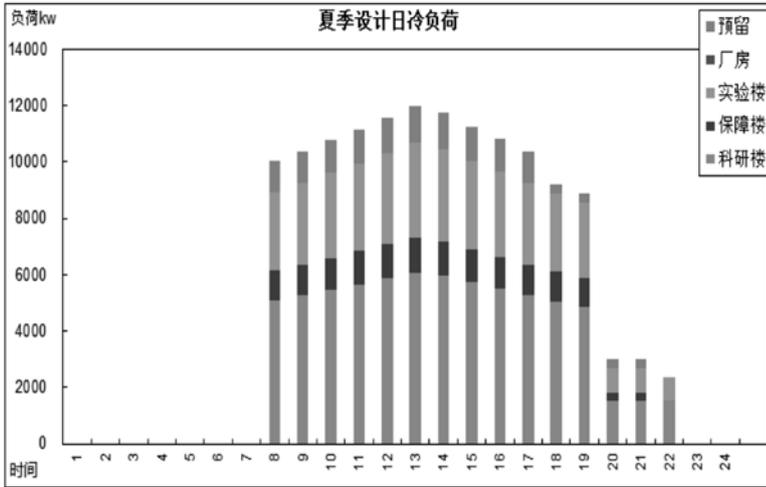


图1 夏季典型日供冷负荷分布图

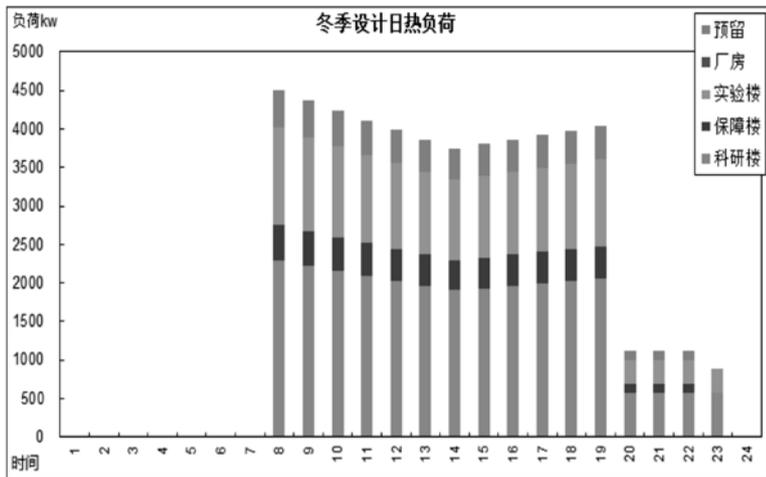


图2 冬季典型日供热负荷分布图

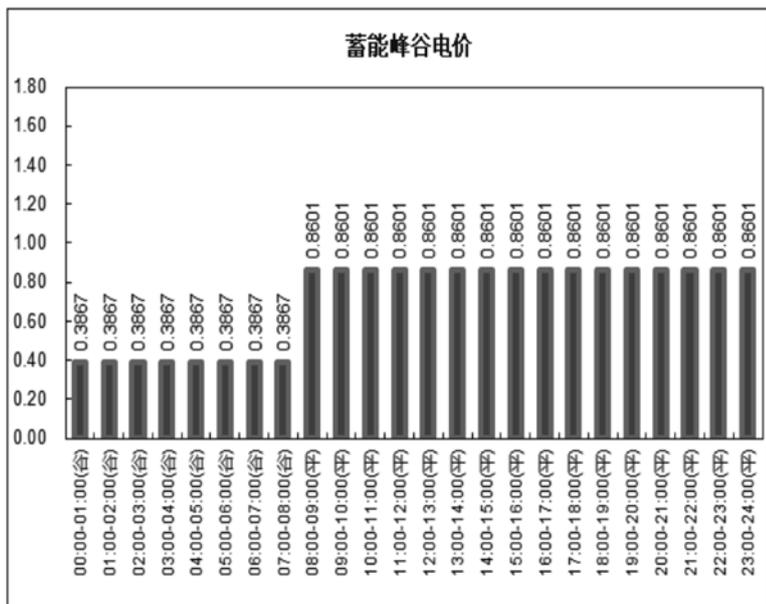


图3 蓄能系统峰谷电价柱状图

万m<sup>2</sup>，其中地上约11万m<sup>2</sup>，地下约6万m<sup>2</sup>。项目建筑功能多样，包括科研、办公、实验、厂房、食堂、会议等多种功能。地下部分为车库。本项目总的冷、热负荷分别为12299kW及5050kW。夏季及冬季典型日冷热负荷分布如图1、图2所示。

本项目建筑用能集中在白天，夜间基本无用能负荷；总配电容量过高会带来配电站建设成本大增，建设方要求整个新区总配电容量不能超过1.2万kVA，所以必须严格控制空调系统对总配电容量的增加。如采用蓄能系统，则本项目电价执行无锡地区电热锅炉(蓄冰制冷)峰谷分时销售电价表电价。采用蓄能系统和不采用蓄能系统对应的电价柱状图分别如图3、图4所示。

## 2 空调冷热源方案的选择与确定

### 2.1 方案确定的总体原则

基于本项目的功能特点及国家相关要求，在设计本项目冷热源时要满足下列原则：

- (1) 保证本项目的供冷、供热安全；
- (2) 充分利用可再生能源；
- (3) 系统投资、运行经济合理；
- (4) 降低能源消耗，减少碳排放；
- (5) 本项目电力供应紧张，方案设计需要降低配电总容量，降低用电需求。

### 2.2 项目可用资源分析

(1) 市政电力接入，电力充足，执行峰谷电价，电价见前述。

(2) 浅层地热资源。

经勘查，地块内地下土壤地埋孔可钻性较好，钻孔成本较低，且经过热物性测试，地下换热较好，冬季取热、夏季排热能力较强，土壤导热性能较好，比较适宜利用浅层地热能。

地源热泵岩土热响应测试报告

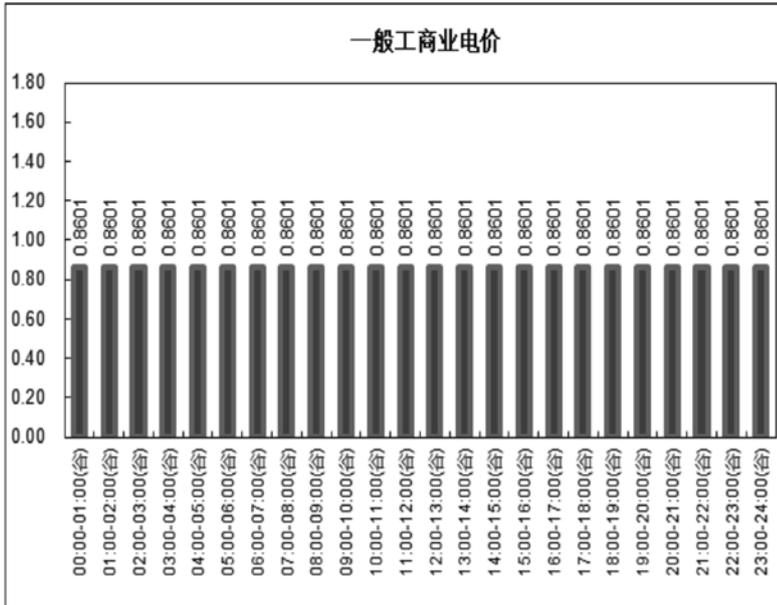


图4 非蓄能系统电价柱状图

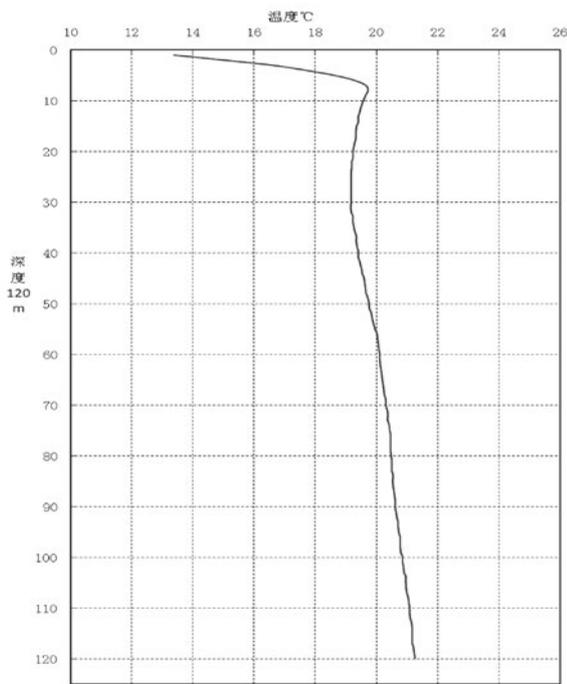


图5 拟建场地地温测试分布图

结论如下：“拟建场地120m处地温平均值为21.2℃；10~105m地温平均值为20.15℃”（如图5所示），“该项目空调系统适宜采用地源热泵系统”。

地源热泵岩土热响应测试报告有关测试孔的热物性数据如表1所示。

### 2.3 大温差蓄能式地源热泵系统

经过分析，地源热泵系统作为一种清洁、可再生能源，在本项目使用是非常适用的。另外，项目所在地有峰谷电价，对蓄冷系统的优惠电价比较好，系统节能、节费潜力较大。因此，本项目空调系统冷热源方案确定为大温差蓄能式地源热泵系统。由于本项目供冷为机组

制冷与融冰供冷的联合供冷方式，且机组制冷所占比例更大，因此考虑到机组制冷时蒸发温度不宜过低，不然会带来冷水机组效率的降低<sup>[5]</sup>。同时，考虑到温差过大会造成末端盘管造价的增加，因此综合考虑下，夏季冷水温度确定为5/13℃，冬季热水温度为37/45℃，系统原理图如图6所示。

根据本项目的建筑特点、占地面积、机房位置规划、埋管换热器冷热平衡需求等因素，确定项目总埋孔钻孔孔数为550孔。地下埋管换热器采用钻孔垂直埋管，呈梅花状布置，相临钻孔间距总体为5m；孔内采用De32×3mmHDPE管，承压1.6MPa，双U连接，钻孔深度为130m。一般系统通常是冰蓄冷、水蓄热分别设置，需要两套设备，本项目创新性的设计为冰蓄冷、水蓄热一体复合式蓄能系统，同一设备实现两季蓄能，蓄能效率大幅度提高，节省冷热源系统运行费用，还可以节省蓄能设备占用空间。

本系统主要设备配置及参数如表2所示。

表1 地源热泵岩土热响应测试热物性数据表

孔号	测试工况	测试日期	孔深(m)	水流量(m <sup>3</sup> /h)	散热功率(kW)	测试时间(h)	稳定段进水平均温度(℃)	稳定段出水平均温度(℃)	地层综合导热系数(w/m·k)	岩土扩散率(mm <sup>2</sup> /s)
K1	散热	2019/3/3~2019/3/5	120	1.39	6.11	48	35.50	31.72	1.85	0.33
K2	散热	2019/3/9~2019/3/11	120	1.39	6.11	48	35.38	31.60	1.85	0.37
K3	散热	2019/3/10~2019/3/12	120	1.43	6.04	48	34.60	31.00	1.86	0.35

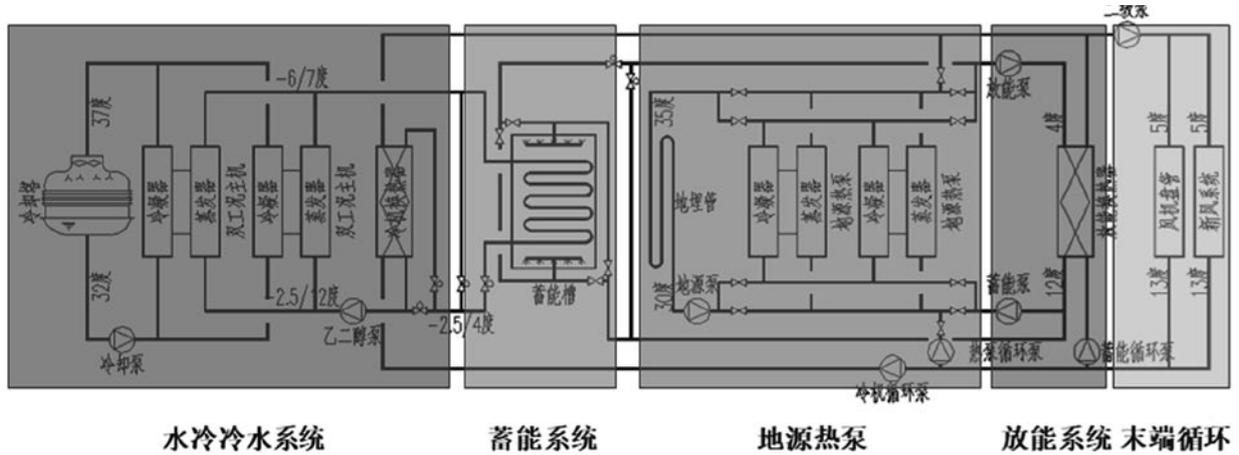


图6 蓄能式地源热泵系统原理图

表2 大温差蓄能式地源热泵系统主要设备表

序号	名称	参数	数量
1	螺杆式地源热泵机组	制冷工况: Q=1267kW, N=241kW, 蒸发器5/13℃, 冷凝器30/35℃ 蓄冷工况: Q=1171kW, N=233kW, 蒸发器4/12℃, 冷凝器30/35℃ 制热工况: Q=1255kW, N=268kW, 蒸发器5/10℃, 冷凝器38/46℃ 蓄热工况1: Q=1255kW, N=268kW, 蒸发器5/10℃, 冷凝器38/46℃ 蓄热工况2: Q=1212kW, N=318kW, 蒸发器5/10℃, 冷凝器46/54℃	2台
2	双工况离心式冷水机组	制冷工况: Q=3484kW, N=653.9kW, 蒸发器5/13℃, 冷凝器32/37℃ 蓄冰工况: Q=2115kW, N=502.7kW, 蒸发器(25%乙二醇溶液)-5.6/-2.95℃, 冷凝器30/33.15℃	2台
3	冷却塔	冷却水量=960m <sup>3</sup> /h, 湿球温度28℃, 冷却水32/37℃	2台
4	蓄能换热器	制冷工况: Q=3040kW, 一次侧4/12℃, 二次侧5/13℃ 制热工况: Q=2812kW, 一次侧38/46℃, 二次侧37/45℃	2台
5	冷机换热器	制冷工况1: Q=5666kW, 一次侧4/12℃, 二次侧5/13℃ 制冷工况2: Q=4355kW, 一次侧4/9℃, 二次侧5/13℃	2台
6	混凝土蓄能槽	体积1075m <sup>3</sup>	1个
7	蓄冰盘管	内外融冰蓄冰盘管, 蓄冰容量10000RTH	1套
8	蓄能泵	Q=149m <sup>3</sup> /h, H=15m, N=11kW	3台
9	放能泵	Q=265m <sup>3</sup> /h, H=15m, N=18.5kW	3台
10	蓄能空调泵	Q=265m <sup>3</sup> /h, H=15m, N=18.5kW	3台
11	冷机循环泵	Q=710m <sup>3</sup> /h, H=15m, N=45kW	3台
12	热泵循环泵	Q=149m <sup>3</sup> /h, H=15m, N=11kW	3台
13	乙二醇循环泵	Q=723m <sup>3</sup> /h, H=35m, N=110kW	3台
14	地源循环泵	Q=284m <sup>3</sup> /h, H=32m, N=37kW	3台
15	冷却循环泵	Q=780m <sup>3</sup> /h, H=32m, N=110kW	3台

### 3 系统运行策略

#### 3.1 夏季制冷

蓄冷系统按两种蓄冷模式运行，一是冰蓄冷，二是水蓄冷。

##### 3.1.1 冰蓄冷系统控制

(1)此种模式主要用于夏季中段负荷较大时段，以双工况冷水机组蓄冰供冷为主、地源热泵供冷为辅；

(2)冰蓄冷系统参与运行的设备有双工况冷水机组、乙二醇泵、冷却泵、冷机循环泵、冷却塔；

(3)冰蓄冷运行工况包括：夜间蓄冰、夜间蓄冰+供冷、白天蓄冰内融冰或者外融冰放冷、水冰放冷+双工况供冷、蓄冰放冷+双工况+热泵供冷；

(4)夜间蓄冰，利用双工况冷水机组进行蓄冰，蓄冷停机温度 $-6^{\circ}\text{C}$ ；

(5)夏季供冷系统设计供回水温度为 $5/13^{\circ}\text{C}$ ，系统回水温度设定为 $13^{\circ}\text{C}$ ；

(6)日间系统运行采用优化控制方式，均衡分配冷源供给，根据末端负荷、电价政策合理确定冷水机组、热泵机组、蓄冷系统的供冷比例；

(7)蓄冷系统放冷优先采用内融冰放冷模式，放冷末期可以采用水蓄冷外融冰模式进行放冷；

(8)根据回水温度确定需要优先开启的冷源，停机顺序与开启顺序相反，逐个冷源按负荷情况（回水温度）逐渐停止。逐个冷源的投入运行温度偏差为 $13^{\circ}\text{C}+0.5^{\circ}\text{C}$ ，允许温度偏差的时间为20min；逐个冷源的停止温度偏差为 $13^{\circ}\text{C}-0.5^{\circ}\text{C}$ ，允许温度偏差的时间为20min；

(9)蓄冷时，系统可根据室外气候条件自动切换冷却塔或者地理管进行散热，以保证系统整体运行能效比最高。

##### 3.1.2 水蓄冷系统控制

(1)此种模式主要用于初夏、夏末负荷较小时

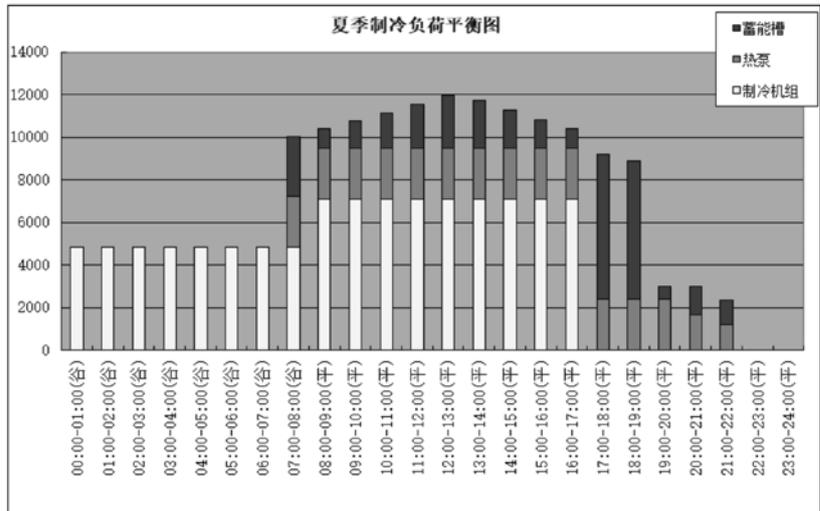


图7 夏季制冷负荷平衡图

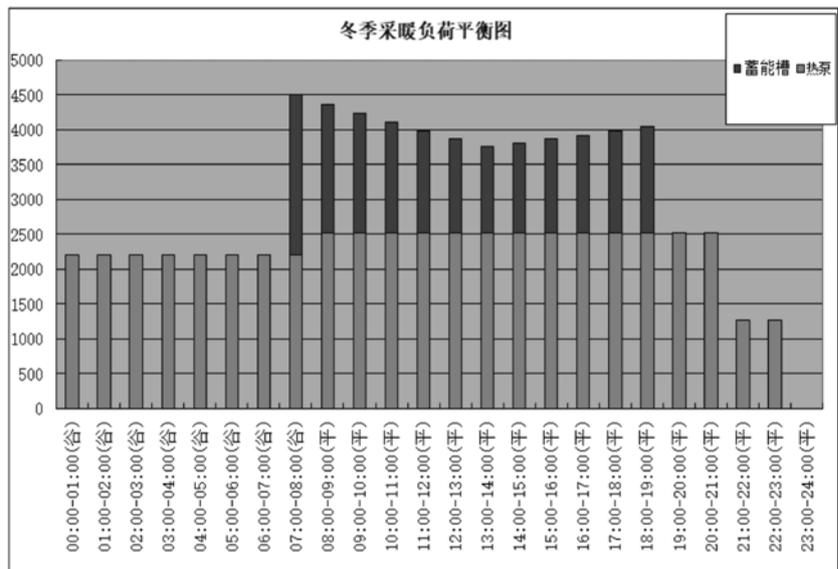


图8 冬季采暖负荷平衡图

段，以地源热泵供冷为主；

(2)水蓄冷系统参与运行的设备有热泵机组、蓄能泵、放能泵、地源水泵、蓄能空调泵；

(3)水蓄冷运行工况包括：夜间热泵水蓄冷、水蓄冷放冷、热泵单独供冷、水蓄冷供冷+热泵+冷机供冷；

(4)夜间蓄冷，利用热泵机组进行蓄冷，开始蓄冷温度 $12^{\circ}\text{C}$ ，蓄冷停机温度 $4^{\circ}\text{C}$ ；

(5)日间系统运行采用优化控制方式，均衡分配冷源供给，根据末端负荷、电价政策合理确定热泵机组、蓄冷系统的供冷比例。

#### 3.2 冬季制热水蓄热系统

(1)水蓄热系统参与运行的设备有热泵机组、

蓄能泵、放能泵、地源水泵、蓄能空调泵；

(2)水蓄热运行工况包括：夜间热泵水蓄热+放热、水蓄热放热、热泵单独供热、水蓄热供热+热泵供热；

(3)夜间蓄热，利用热泵机组进行蓄热，开始蓄热温度38℃，蓄热停机温度46℃；

(4)冬季供热系统设计供回水温度为37/45℃，系统回水温度设定为37℃；

(5)日间系统运行采用优化控制方式，均衡分配热源供给，根据末端负荷、电价政策合理确定热泵机组、蓄热系统的供热比例；

(6)根据回水温度确定需要优先开启的热源，停机顺序与开启顺序相反，逐个热源按负荷情况（回水温度）逐渐停止。逐个热源的投入运行温

度偏差为45℃~0.5℃，允许温度偏差的时间为20min；逐个冷源的停止温度偏差为45℃+0.5℃，允许温度偏差的时间为20min。

#### 4 运行费用及埋管热平衡计算

##### 4.1 夏季制冷运行费用

本项目建筑夏季制冷时间从每年的5月5日~当年10月15日，共计162天，空调冷源运行费用如表3所示。

根据表3大温差蓄能式地源热泵系统夏季制冷运行费用表分析，本项目夏季制冷费用指标为27.63元/m<sup>2</sup>/年。

##### 4.2 冬季供暖运行费用

表3 大温差蓄能式地源热泵系统夏季制冷运行费用表

月份	日历天	工作天数	日耗电	日运行费用	自来水	月运行费用	月耗热量	月耗电量	月耗水量	月主机耗电量	月水泵耗电量	月塔耗电量	备注
月	天	天	kwh	元	吨	元	GJ	kwh	吨	kwh	kwh	kwh	cop
1	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
2	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
3	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
4	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
5	25	25	20063	11729	144.73	268086	5617	458574	3308	354895	91611	12069	3.41
6	30	30	30154	20845	238.37	571739	10785	827085	6538	630862	172689	23534	3.63
7	31	31	36503	26615	301.66	754332	13931	1034592	8550	792551	210241	31801	3.74
8	31	31	30247	20964	246.28	594172	11144	857274	6980	652310	179711	25253	3.61
9	30	30	23770	15071	180.57	413386	8089	651967	4953	494925	139844	17198	3.45
10	15	15	20078	11742	144.73	161033	3370	275355	1985	213148	54967	7241	3.40
11	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
12	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
总计	162				2762749	52936	4104847	32314	3138689	849062	117095	3.59	

本项目建筑供暖时间从每年的11月25日~次年3月5日, 共计100天, 空调热源运行费用如表4所示。

根据表4大温差蓄能式地源热泵系统冬季供暖运行费用表分析, 本项目夏季制冷费用指标为6.76元/m<sup>2</sup>/年。

#### 4.3 地埋管热平衡计算

在中国, 土壤源热泵的应用现状不同于其他国家, 大规模的地下埋管换热器对系统的长期高效运行提出了严峻的考验, 土壤热平衡问题已经成为制约其科学发展的关键因素<sup>[6]</sup>。

经计算, 本项目地埋管冷热负荷的不平衡率  $\mu = \text{排热量} / \text{取热量} = 3335249 / 3011512 = 1.11$ , 不平衡率  $\mu$  在0.8~1.15之间, 因此无需对地埋管系

统进行地下温度场的冷热不平衡处理。

### 5 结语

(1) 对系统运行费用以及地埋管热平衡计算结果表明, 地源热泵系统作为一种清洁、可再生能源, 在本项目使用是非常适用的。

(2) 采用冰蓄冷空调系统的优化设计, 可以移峰填谷、均衡电网负荷、提高电力建设投资效益及为用户节省空调运行费用, 真正使用户获得经济效益。

(3) 本项目创新性的设计为冰蓄冷水蓄热一体复合式蓄能系统, 同一设备实现两季蓄能, 蓄能效率大幅度提高, 节省冷热源系统运行费

表4 大温差蓄能式地源热泵系统冬季供暖运行费用表

月份	日历天数	工作天数	日耗电	日运行费用	自来水	月运行费用	月耗冷量	月耗电量	月耗水	月主机	月泵	月塔	备注
月	天	天	kwh	元	T	元	GJ	kwh	T	kwh	kwh	kwh	cop
1	31	31	14252	10017	20.08	283903	5374	403939	569	313167	90772	0	3.70
2	28	28	10984	7152	11.48	183081	3398	281180	294	205489	75691	0	3.36
3	5	5	7416	4101	11.48	18748	347	33901	52	22818	11083	0	2.84
4	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
5	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
6	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
7	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
8	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
9	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
10	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
11	5	5	6245	3285	11.48	15018	260	28548	52	17808	10740	0	2.53
12	31	31	9839	6167	11.48	174793	3224	278864	325	199121	79743	0	3.21
100	100				675542	12603	1026433	0	268029	0	3.41		

表5 热平衡计算表

月份	天数	制冷							供暖							地下换热					
		日累计		热泵 日累计	冷机 日累计	热泵 排热	天数	理论排 热	热回 收	实际 排热	日累 计	锅炉	热泵 供热	热泵 取热	总取 热	余热	埋地 管热	天数	月热 负荷	取热	排热
		天 数	kWh	kWh	kWh	kWh	天	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	天	kWh	kWh/ 月	kWh/ 月	
1	31	0	0	0	0	0	0	0	0	52667		52819	41770	41770		41770	31	1294869	1294869	0	
2	28	0	0	0	0	0	0	0	0	36867		36943	28916	28916		28916	28	809656	809656	0	
3	31	0	0	0	0	0	0	0	0	21067		21319	16328	16328		16328	5	81638	81638	0	
4	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0		0	0	0	0	0	
5	31	68264	12000	56374	14182	25	354545		354545	0		0	0	0		0	0	0	0	354545	
6	30	109222	15600	93737	18436	30	553091		553091	0		0	0	0		0	0	0	0	553091	
7	31	136528	19200	117454	22691	31	703418		703418	0		0	0	0		0	0	0	0	703418	
8	31	109222	19200	90099	22691	31	703418		703418	0		0	0	0		0	0	0	0	703418	
9	30	81917	19200	62764	22691	30	680727		680727	0		0	0	0		0	0	0	0	680727	
10	31	68264	19181	49097	22670	15	340049		340049	0		0	0	0		0	0	0	0	340049	
11	30	0	0	0	0	0	0		0	15800		15895	11999	11999		11999	5	59997	59997	0	
12	31	0	0	0	0	0	0		0	31600		31714	24689	24689		24689	31	765351	765351	0	
合计	365					162	3335249	0	3335249								100	3011512	3011512	3335249	

用，还可以节省蓄能设备占用空间。

(4) 经过埋地管热平衡计算，本项目埋地管系统冷热基本平衡，无需采取其他措施对埋地管系统进行地下温度场的冷热不平衡处理。

(5) 大温差蓄能式地源热泵系统方案的制定充分考虑了项目的负荷特点，根据不同的负荷情况采取了相对应的运行策略，运行后必将为使用方带来良好的经济和社会效益。

参考文献

[1] 徐伟等.地源热泵工程技术指南[M].北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

[2] 严德隆, 张维君.空调蓄冷应用技术[M].北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[3] 徐健, 许功铎, 郭开华.冰蓄冷系统设计中的节能分析[J].北京工业大学学报, 2002, 28 (3) .

[4] 刘欣彤.冰蓄冷技术在空调冷源中的应用[J].建筑节能, 2012, 40 (9) .

[5] 董晓丽, 赵敬德, 周玉帅. 冷冻水大温差的合理化设计[J]. 建筑节能, 2012,40 (5) :34-35.

[6] 花莉, 潘毅群, 范蕊, 等. 基于TRNSYS的土壤源热泵热平衡问题的影响因素分析[J]. 建筑节能, 2012,40 (3) :23-29.

# 西安某空气源热泵系统运行问题分析

■ 孙亚峰 王乃天 [暖通]

**摘要:** 空气源热泵作为成熟的清洁能源技术, 工程应用已较为普遍, 对其实际运行中易被忽略的问题及解决方法的探究仍是运维工作的重点。本文以西安某空气源热泵能源站为例, 详细论述了其运行策略, 以供设计参考。

**关键词:** 空气源热泵; 运行问题; 运行策略

## 1 引言

空气源热泵具有节能、能源可再生、施工调试周期较短等多项优势<sup>[1-2]</sup>, 其对于冷热双供、建筑面积中等且室外空地较大的改造项目是非常合适的选择。

空气源热泵设备研发已日趋成熟, 但针对建筑本身使用特性制定相应的运行策略仍主要依靠运维人员自身的经验, 因此, 本文针对某项目实际运行策略及运行数据, 提出合理化的建议, 对于以后空气源热泵运行策略有重要的指导意义。

## 2 工程介绍

### (1) 项目概况

本项目位于陕西省西安市, 用户A建筑面积15758m<sup>2</sup>, 主要功能为办公室、会议室; 用户B建筑面积7050m<sup>2</sup>, 主要功能为办公室、库房, 建筑围护均采用50mm厚岩棉保温, 执行节能30%的节能标准。用户A的1~4层空调末端采用全空气系统, 5~15层采用风机盘管+新

风系统; 用户B的空调末端采用全空气系统。原系统冷源采用螺杆制冷机组, 热源来自院区换热站。由于院区新增建筑后上级锅炉房供热能力不足且制冷站超期服役, 用户A、B单独设置冷热源。冷热源改造后采用空气源热泵机组冷热双供。

### (2) 冷、热负荷

系统总冷负荷2049kW, 折合建筑面积冷负荷指标89.8w/m<sup>2</sup>。系统总热负荷1665kW, 折合建筑面积热负荷指标73w/m<sup>2</sup>。本项目供暖季为11月15日~3月15日, 供冷季为5月15日~9月15日, 根据能源站就地气象站气象参数应用鸿业软件计算其逐日冷热负荷。

### (3) 冷热源形式

冷热源主机采用国产一线品牌定频机组, 参

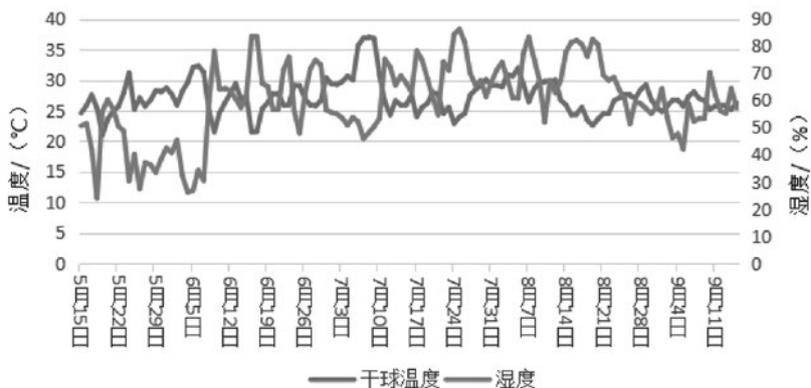


图1 供冷季逐日温湿度

作者简介: 赵磊, 男, 高级工程师, 2007年毕业于天津大学供热、供燃气、通风与空调专业, 现就职于航空工业规划总院机载工程事业部。

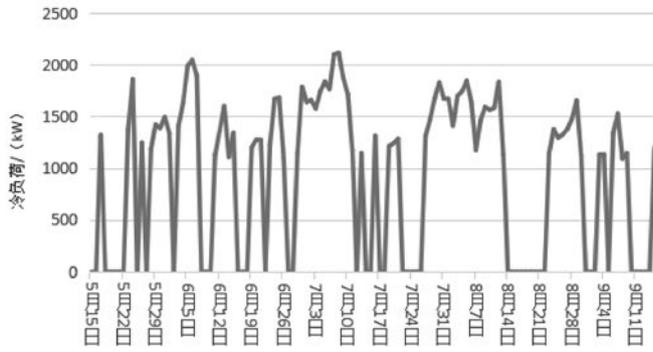


图2 逐日冷负荷

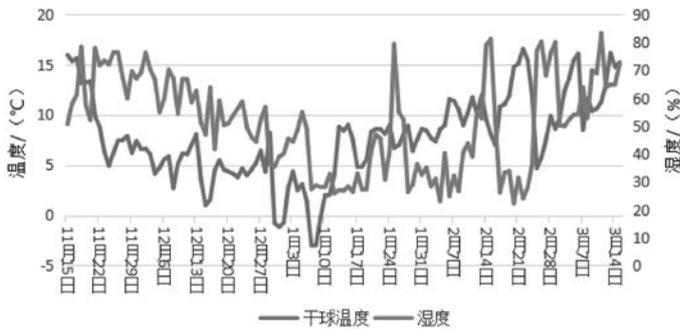


图3 供暖季逐日温湿度

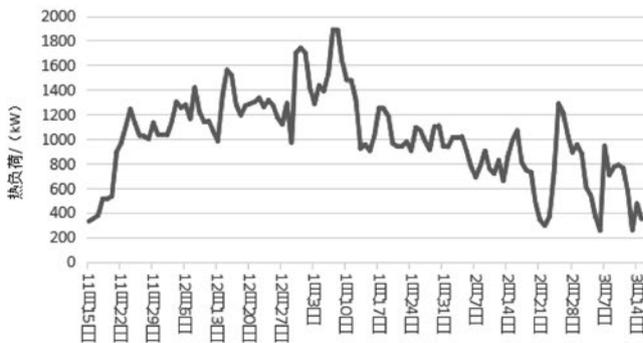


图4 逐日热负荷

表1 空气源热泵机组参数表

技术参数	
制冷量	130kW
制热量	140kW
额定制冷电功率	38.3kW
额定制热电功率	41.5kW

数详见表1。

本项目共选用16台涡旋空气源热泵机组，标况下总冷负荷为2080kW、总热负荷为2240kW。



图5 能源站实景图

### 3 系统运行现状

#### (1) 系统形式

空气源热泵机组采用回水温度启停控制。机组共1个系统，设置1台主机，其余15台为从机。机组布置在条形基础上，全部并联、异程连接，所有机组支管上均设手动密封调节蝶阀。

输配系统采用一次泵定频系统，末端直供，水泵2用1备，额定流量160m<sup>3</sup>/h。

#### (2) 运行时间

用户A、B全年工作时间均为每周一~周五，8~12时、13~17时，无加班负荷。现状运行策略如表2。

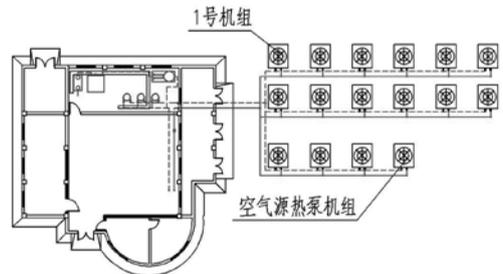


图6 设备布置示意图

表2 现状运行时间

日期	供冷季	供暖季		
	5月15日~9月15日	11月15日~12月13日	12月14日~1月17日	1月18日~3月15日
开机时间	当日7时	当日5时，温度突增大于3℃则当日3时	本周日8时开机	随温度降低推后，周一开机时间由周日18时推后至周一5时，周二至周五每日5时
停机时间	当日17时	当日17时	本周五17时，其他时间不停机	当日17时

## 4 夏、冬季运行情况

### (1) 供冷季运行

供冷季内最低温度 $21.02^{\circ}\text{C}$ 、平均温度 $27.08^{\circ}\text{C}$ 、最高温度 $37.09^{\circ}\text{C}$ ，分别对应5月19日、6月19日和7月8日，选取其作为典型日进行供冷分析。

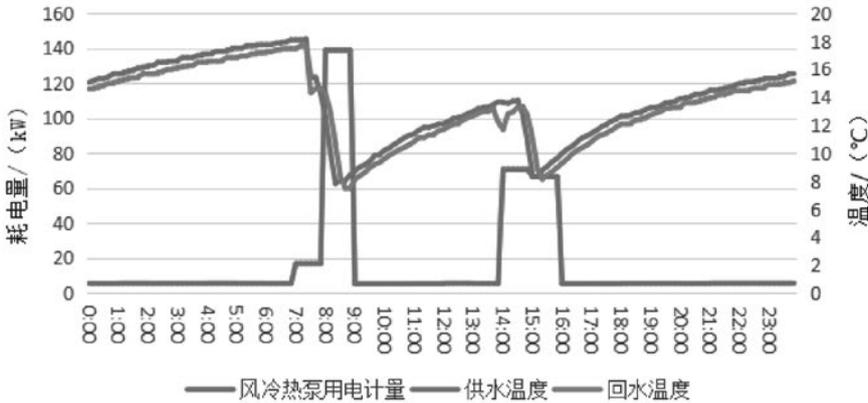


图7 5月19日运行状况

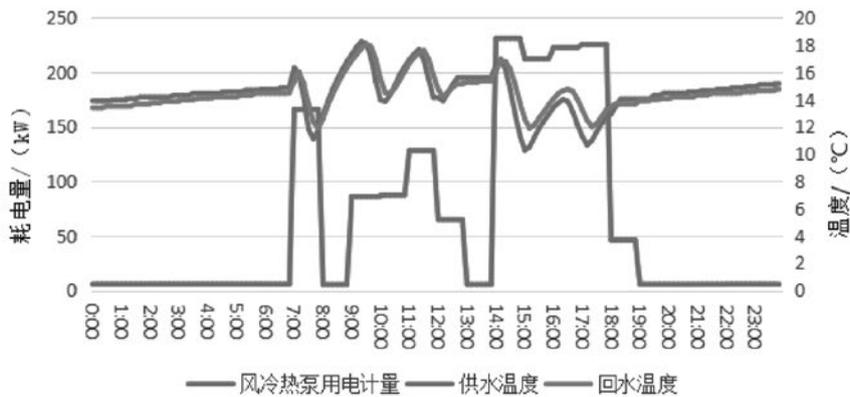


图8 6月19日运行状况

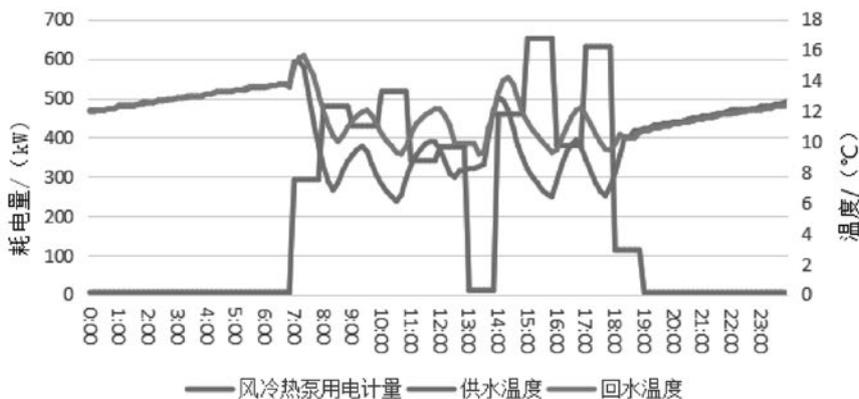


图9 7月8日运行状况

5月19日机组分别在7时和14时启动两次，每次分别运行2h。第一次最大电负荷为 $140\text{kW}$ ，约为总负荷的21%。第二次最大电负荷为 $70\text{kW}$ ，约为总负荷的11%。供回水温差 $1^{\circ}\text{C}$ 以内。

6月19日机组在7时启动后，于8~9时、13~14时间停机，其余时间均为运行状态，最大电负荷为14~18时的 $231.23\text{kW}$ ，约为总负荷的

32%。绝大部分时间供回水温差 $1^{\circ}\text{C}$ 以内，在14~17时供回水温差 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。

7月8日机组在7时启动后于13~14时停机，最大电负荷为 $651.83\text{kW}$ ，约为总负荷的98%，其余时间电负荷均在 $292.2\sim 516.5\text{kW}$ 之间波动，约为总负荷的44%~78%。全天供回水运行温差在 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 内波动。

### (2) 供暖季运行

供暖季内最高温度 $16.58^{\circ}\text{C}$ 、平均温度 $7.75^{\circ}\text{C}$ 、最低温度 $\sim 3.00^{\circ}\text{C}$ ，分别对应2月22日、2月2日和1月7日，选取其作为典型日进行供热分析。

2月22日机组在4时启动后全天持续运行，开机后逐步达到最大电负荷 $607.70\text{kW}$ ，约为总负荷的92%，之后电负荷均在 $200\sim 400\text{kW}$ 之间波动，约为总负荷的30%~60%。除电负荷突增时供回水温差在 $4^{\circ}\text{C}$ 左右，其余时间供回水温差均在 $1^{\circ}\text{C}$ 以内。

2月2日机组在1时启动后全天持续运行，开机后于7时达到最大电负荷 $606.10\text{kW}$ ，约为总负荷的91%，之后电负荷逐步降低至 $200\text{kW}$ ，约为总负荷的30%。全天供回水运行温差在 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 内波动。

1月7日机组提前1天启动后当日全天持续运行，运行

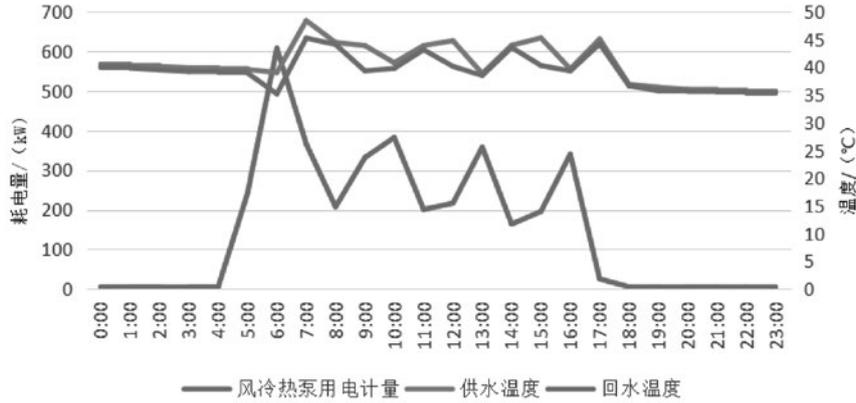


图10 2月22日运行状况

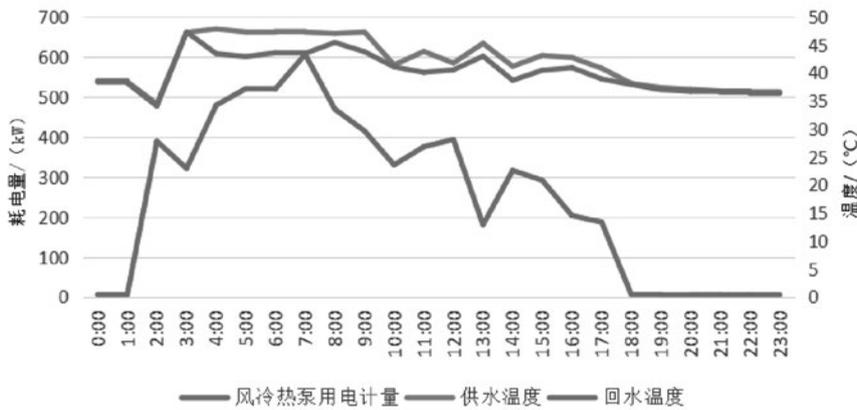


图11 2月2日运行状况

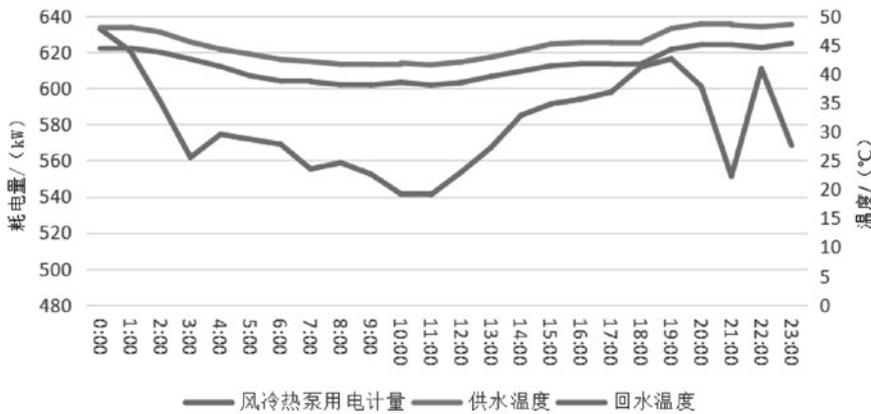


图11 1月7日运行状况

电负荷在540.9~632.6kW之间波动，约为总负荷的81%~95%。全天供回水运行温差在3~4℃内波动。供水温度最低为41℃。

在最低温度天气条件下，机组无法按照需求提供热负荷，导致供回水温度低于设定值，末端用户舒适性无法保证。

#### 4.1 供冷季运行问题

7月6日~7月9日高温天气期间，机组用电负荷可以达到上限。但在整个供冷季气温围绕27℃上下波动较小，用电负荷围绕总负荷40%上下波动，在最低气温当天仅为总负荷的13%便满足需求，并且供回水温差长期在1℃以内，系统处于大流量小温差状态。

分析原因如下：

(1) 设计时建议机组分2个系统运行，低负荷时仅开启1个系统及1台水泵运行，但实际运行时并未参照设计建议，导致整个系统效率较低。

(2) 定频系统调节流量相对较难，一般通过调整机组数量或调整阀门开度控制流量。本项目设计时考虑通过调整阀门开度调整流量，但实际运行中阀门开度调整对流量改变非线性，目前供回水温差较小时，只能通过减少机组台数的方式进行质调节，需要增强量调节进行辅助，目前系统运行较不节能。

#### 4.2 供暖季运行问题

根据供暖季平均气温的2月2日数据推测，整个冬季运行阶段内除最低温度条件下，满负荷运行仅在上午7时出现一次，其他时间电负荷在总负荷的30%~91%之间波动，并且供热阶段也存在供回水温差较小，系统长期处于大流量小温差状态的问题。

分析原因如下：

(1) 实际运行时未参照设计建议将机组分成2个系统运行，导致整个系统效率较低。

(2) 定频系统流量调节效果较差，目前通过调整机组数量的方式进行质调节，需要增强量调节解决回水温差小的问题。

(3) 在室外温度较低且湿度较大的条件下，机组化霜频率会大幅增加，制热效率明显降低，机组无法达到额定热负荷，因此即使计算热负荷小于设备总热负荷，也会存在供热能力不足的问题。

#### 4.3 夏、冬季运行问题对比

夏、冬季由于平均气温与设计气温相差较大，因此均存在运行工况长期处于低效率区间的问题。

夏季极端高温天气下，机组仍可以保证用户负荷需求。在冬季极端低温天气下，系统难以负担用户负荷需求，且将供冷季、供暖季的极端温度条

件、平均温度气候条件下的耗电量进行对比可以发现，供冷季日耗电量均低于供暖季日耗电量。这与根据计算的夏季冷负荷大于冬季热负荷，认为夏季机组数量合适、而冬季机组数量富裕的结论相悖。

现状条件下，冬、夏季均未在合理的工况下运行，因此需要重新调整运行策略。

### 5 运行策略分析

#### (1) 控制同时运行机组数量

统计供冷、供暖季内每日最大电负荷，并根据单台额定电功率计算其对应运行台数，得到全季每日最大运行台数统计图。

供冷季内，每日最大运行台数6台以内的共24

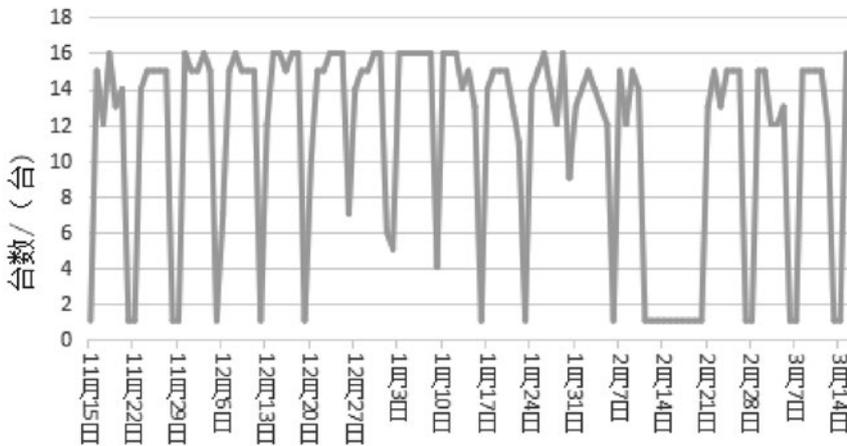


图12 供暖季逐日最大运行台数

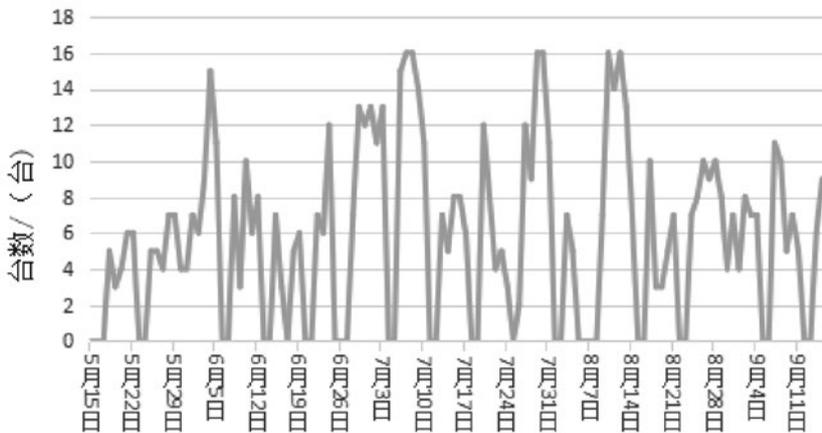


图13 供冷季逐日最大运行台数

天，6~8台的共24天，8~10台的共12天，10~12台的共10天，12台以上的共18天。

可以看到，满负荷运行天数占比较小，且整个供冷季内每日最大运行台数差异较大，但临近各日之间差别不大，因此适合将空气源热泵机组分成几个系统独立供冷，避免在低负荷时满机组运行。

依据0~6台、6~10台、10~16台运行天数相近，结合本项目特点，全部空气源热泵机组分3组并联，共分成3个系统独立运行，其中第一排6台为第一组，第二排6台为第二组，第三排4台为第三组。5月15日~6月15日、8月16日~9月15日，第一组正常运行，其余机组回水温度设定高于第一组3℃备用，6月16日~6月30日、8月1日~8月15日，第一组、第三组正常运行，第二组回水温度设定高3℃备用，7月1日~7月31日，3组均正常运行。

下一供冷季对调第一组和第二组运行顺序,保证磨损平衡。此运行方案可以保证系统长期在高效区运行,节省电能并减少机组开启频率。

供暖季内,每日最大运行台数较频繁,到达峰值,因此维持1个系统运行即可。

### (2) 强化量调节手段,降低输配泵耗

由于经常出现机组在低效区运行和大流量小温差的问题,应考虑增加机组变流量调节手段,现状条件下阀门调节困难,因此可

采用水泵变频。

根据上节供冷季运行建议,6台机组运行时开启1台水泵,10台机组运行时开启2台水泵,16台机组运行时开启2台水泵,水泵均变频运行,当供回水温差小于3℃时降低流量至最小流量。需注意,当适时流量小于机组额定流量的80%时,机组回水口处水流开关自动关闭,因此设定最小流量应大于全部机组均能正常开启运行时的流量,此流量值需根据调试结果确定。

### (3) 供暖季增强除霜

供暖季内室外温度最低日为1月7日,当日最低温度为-3℃,相对湿度为30%~40%,空气源热泵机组供水温度最低41℃。但该日并非供暖季内供水温度最低日,供水温度最低日为11月23日。

该日室外温度5℃左右,远高于1月7日,但相对湿度70%左右,温度不低但湿度较大,为最易结霜气候条件<sup>[3]</sup>。该日机组5时启动,在8时供水温度达到43℃,之后随着用户需热量上升,供水温度再未升至43℃,且最低时温度仅为38℃。

分析原因主要有两点:第一,11月23日为星期一,周末两天用户端积蓄了一定量冷负荷,当日开机较晚,在未完成消除积蓄的冷负荷之前便开始供热,导致用户需热量无法满足;第二,当日空气湿度较大,机组结霜情况严重,频繁除霜导致机组供热能力下降。应对该气候条件,除更早的开启机组外,也应该对除霜方式进行改造。笔者认为,可以在蒸发器前后管路<sup>[4]</sup>及翅片易结霜处增设电伴热<sup>[5]</sup>,西安为低温结霜区,气温低且相对湿度较低,结霜现象并不严重<sup>[6]</sup>,可以考虑仅在极端天气使用,保证极端天气运行稳定。

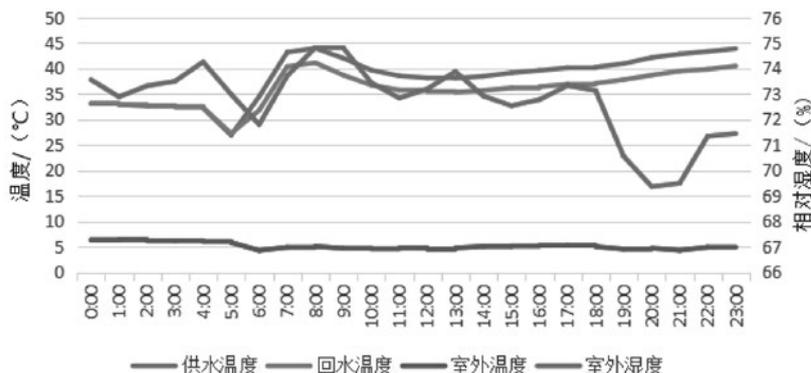


图14 11月23日运行状况

### (4) 强化质调节控制,提高机组能效

中小型能源站项目实际运行中,习惯性忽略通过设定供回水温度辅助调节系统节能,运维人员有时会根据末端室内温度调节供水温度,但并未形成统筹考虑节能及舒适性的运行策略。本项目空气源热泵机组工作原理为通过设定回水温度进而控制供水温度,供冷\供暖季回水温度分别达到设定值后,允许机组继续工作至低于\高于设定值2℃温差后关闭,继续运行至高于\低于设定值2℃温差后机组开启,以此避免机组频繁启闭。本项目空气源热泵机组供冷季允许机组设定回水温度为12~17℃,供暖季允许机组设定回水温度为40~45℃。

根据热量计算公式,计算不同回水温度下负荷值:

$$Q = C_1 \rho_1 V_1 \Delta T_1 \quad (1)$$

$$Q = C_2 \rho_2 V_2 \Delta T_2 \quad (2)$$

式中:Q—为用户侧冷、热负荷,kW;  
 $C_1$ —循环水比热容,kJ/(kg·℃);  
 $C_2$ —为空气比热容,kJ/(kg·℃);  
 $\rho_1$ —为循环水密度,kg/m<sup>3</sup>;  
 $\rho_2$ —为空气密度,kg/m<sup>3</sup>;  
 $V_1$ —循环水体积,m<sup>3</sup>;  
 $V_2$ —空气体积,m<sup>3</sup>;  
 $\Delta T_1$ —供回水温差,℃;  
 $\Delta T_2$ —室内设定温度与风机盘管平均温度差,℃。

供冷季通过最大负荷日负荷Q、供水温度

7℃、回水温度12℃、室内温度26℃及空气、水在该条件下的密度，可以计算得到水泵及风盘流量V1、V2，进而确定设备型号。当负荷需求降低时，回水温度可以提高。通过迭代计算，得到当设定回水温度为17℃时，当日负荷应为峰值的65%。供暖季同理，当设定回水温度为40℃时，当日负荷应为峰值的80%。

实际运行时，需在此方案基础根据项目特点进行调整。供冷季建议根据本项目负荷延续时间图，确定当日负荷情况，再结合台数控制要求，若末端负荷为某个运行周期内最大负荷的65%以下时，对应该周期开启机组的回水温度设置为17℃，其余机组停机。若负荷为65%以上时，采用等差数列公式将65%~100%负荷与回水温度17~12℃成比例对应设置回水温度，其余机组回水温度高3℃备用。若出现阴雨等湿度较大的极

端天气，仍需设置回水温度为12℃，保证消除湿负荷。供暖季同理，若负荷为某个运行周期内最大负荷的80%以下时，所有机组回水温度设置为17℃。若负荷为80%以上时，采用等差数列公式将80%~100%负荷与回水温度40~45℃成比例对应设置回水温度。

## 6 结论

(1)本文针对某空气源热泵供能项目运行现状进行总结，发现供冷季存在机组运行效率较低、供回水温差较小的问题。供暖季存在供回水温差较小、极端天气无法保证末端需求的问题。

(2)空气源热泵机组采用1台主机，多台从机的群控模式。本项目初期采用1主15从的控制模式，机组启机、关机时间较长，尤其是在系统调

表3 供冷季运行策略

供冷季	开机时间	停机时间	运行机组	热备用机组	水泵运行台数	运行机组回水温度设置	热备用机组回水温度设置
5月15日~6月4日	当日7时	当日17时	第1组	第2、3组	1台	17℃	停机
6月5日~6月11日	当日7时	当日17时	第1组	第2、3组	1台	14℃	17℃
6月12日~6月18日	当日7时	当日17时	第1组	第2、3组	1台	12℃	15℃
6月19日~6月25日	当日7时	当日17时	第1、3组	第2组	2台	14℃	17℃
6月26日~7月2日	当日7时	当日17时	第1、3组	第2组	2台	12℃	15℃
7月3日~7月9日	当日7时	当日17时	第1、2、3组	无	2台	14℃	无
7月10日~7月23日	当日7时	当日17时	第1、2、3组	无	2台	12℃	无
7月24日~7月30日	当日7时	当日17时	第1、2、3组	无	2台	14℃	无
7月31日~8月6日	当日7时	当日17时	第1、3组	第2组	2台	12℃	15℃
8月7日~8月14日	当日7时	当日17时	第1、3组	第2组	2台	14℃	17℃
8月15日~8月21日	当日7时	当日17时	第1组	第2、3组	1台	12℃	15℃
8月22日~8月27日	当日7时	当日17时	第1组	第2、3组	1台	14℃	17℃
8月28日~9月15日	当日7时	当日17时	第1组	第2、3组	1台	17℃	停机

表4 供暖季运行策略

供暖季	开机	停机	回水温度设置	电除霜运行
11月15日~12月12日	当日5时	当日17时	40℃	阴雨及极端低温天气开启
12月13日~12月26日	本周日8时	当日17时	43℃	
12月27日~1月30日	本周日8时	本周五17时, 其他时间不停机	45℃	
1月31日~2月13日	本周日8时	当日17时	43℃	
2月14日~3月15日	当日5时	当日17时	40℃	

节过程中, 机组动作需时较长, 出现很大程度的滞后。在冬季后期运行中增加1台控制器, 设置两台从机, 该问题得到改善。建议在新项目设计时增加主机台数, 每台主机的从机不超过7台。

(3) 供冷季将空气源热泵机组分成3个系统, 随着末端负荷需求上升, 逐步增加开启系统数量, 保证整个系统在高效区运行。

(4) 水泵改为变频运行, 供回水温差小于3℃时降低流量至设定的最小流量, 用以增大温差。水泵变频设置其根据空气源热泵机组开启台数进行变频控制, 以防止系统流量降低, 但是台数尚未来得及变化, 部分机组流量不足导致系统报障。

(5) 供暖季系统间歇运行时, 应根据气象调节调整运行时间, 周六、周日休息时, 系统不仅要保温运行, 还需要在周一前提前运行机组, 尤其是在雨雪天气。

(6) 增加高效除霜措施, 解决机组频繁化霜效率低下的问题。

(7) 通过在不同负荷需求日期内, 调整其供回水平均温度, 提高机组COP。根据运行策略, 建议调整运行方案如表3、表4所示。

参考文献

[1] James Brodrick. Energy Consumption Characteristics of Commercial Building HVAC Systems Volume III: Energy Savings Potential [R]. Washington: DOE, 2002.

[2] 姚春妮, 刘幼农. 空气热能纳入可再生能源的建筑应用技术研究[J]. 建设科技, 2016(2): 12-16.

[3] 井上宇市. 空气调节手册[M]. 范存养, 译. 北

京: 中国建筑工业出版社, 1986: 154-167.

[4] Jincheng Tang, Guangcai Gong, Huan Su, et al. Performance evaluation of a novel method of frost prevention and retardation for air source heat pumps using the orthogonal experiment design method[J]. Applied Energy, 2016, 169: 696-708.

[5] 姜益强, 姚杨, 马最良. 空气源热泵结霜除霜损失系数的计算[J]. 暖通空调, 2000, 30(5): 24-26.

[6] 蒋爽, 杜伟, 姜红晓. 低环境温度空气源热泵的设计及其在我国寒冷地区的应用[J]. 制冷与空调, 2012, 12(5): 39-44.

# 超高、低温实验室 非稳态负荷计算方法的研究

■ 申剑 傅建勋 刘银萍 [暖通]

**摘要:** 超高、低温实验室属于特殊建筑,具有室内温度随着工艺要求随时变化且变化跨度大的特点,所以常规稳态负荷计算方法和依据室外环境规律变化的动态负荷计算方法均不适用。本文通过研究工艺需求和送风量、送风温度模拟室内空气温度、围护结构温度变化,计算出每个时刻围护结构热流密度,从而得出瞬态非稳态负荷的计算方法,以供参考。

**关键词:** 低温实验室;热流密度;非稳态负荷

## 0 引言

负荷计算是暖通设计的基础,常规建筑的冷热负荷计算都是基于稳态进行的,而对于温度实验室类项目并不适用。温度实验室的工艺要求通常是在指定时间里室内温度达到某个值,在这个过程中,围护结构无法达到稳态,因此,瞬间负荷计算无法按照常规的稳态计算方法进行。

对于非稳态负荷计算,已有多篇文章进行过阐述,如:《优化的有限体积法计算方法》<sup>[1]</sup>、《针对多孔介质内的热湿耦合传递进行了非稳态模拟》<sup>[2]</sup>、《试算法进行非稳态导热计算》<sup>[3]</sup>、《非稳态传热计算的发展过程和新的计算方法》<sup>[4][5]</sup>等,但上述文章大都基于室外温度、太阳辐射强度等变化进行的非稳态负荷计算,或分析对于非稳态计算中各种参数的影响因素等,均为从外部条件变化分析对负荷变化的影响和计算,而未对整体工程进行分析,缺乏实际工程的应用和定量的研究,且不适用于高低温变化的实验室类建筑,本文针对建筑物本体进行非稳态计算研究。

## 1 室内空气温度、围护结构内表面温度模拟

本文以实际工程为依托,进行非稳态计算的研究,并应用于工程之中,经过1年的运行,完全满足使用要求。

根据工艺要求,对于低温工况,要求空态24h,室温由30℃降至工作温度-55℃,并维持该工作温度72h;对于高温工况,要求空态8h,室温由10℃升至工作温度74℃,并保温12h。

研究是针对冷、热负荷分别进行的,因受篇幅限制,本文仅对冷负荷进行分析。研究思路为:首先采用CFD模拟得到室内温度场的变化情况,再根据计算结果对墙体、吊顶、大门以及地板采用有限元分析方法进行非稳态温度场分析,最终得到围护结构每个时刻的热流密度,从而计算出各时刻的瞬间冷热负荷。

本工程温度实验室为房中房,实验舱尺寸为61m×79.2m×22.8m(h),墙体和吊顶采用200mm厚聚氨酯保温材料,密度30kg/m<sup>3</sup>,导热系数为0.033W/(m.k),比热容为1.38kJ/(kg.k),大门保温材料为400mm厚岩棉,密度80kg/m<sup>3</sup>,导热系数为0.05W/(m.k),比热容为1.22kJ/(kg.k),地面采用300mm厚混凝土+300mm厚挤塑聚

作者简介:申剑,男,高级工程师,2000年毕业于天津大学供热通风与空调工程专业,现就职于航空工业规划院飞机工程事业部。

苯板+300mm厚混凝土的结构形式，混凝土密度 $2500\text{kg}/\text{m}^3$ ，导热系数为 $1.74\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ ，比热容为 $0.92\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{k})$ 。空调系统采用上送风、侧下回风的气流组织，在上部均匀布置喷口，在距地 $0.2\text{m}$ 处布置2个回风口，详见图1。

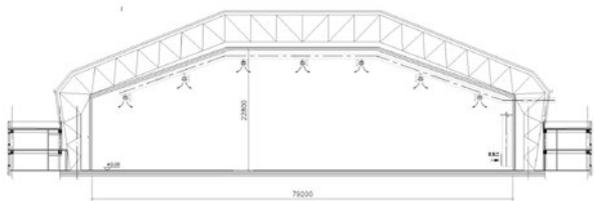


图1 剖面图

为便于计算，将弧形吊顶简化为折线形，建模见图2。

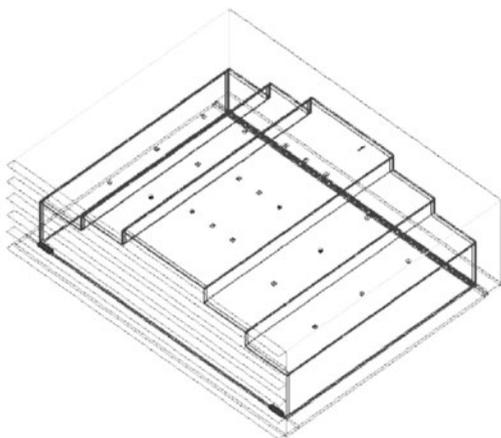


图2 建模图形

以低温工况为例：室外条件按夏季设置，分3个阶段送风，第一阶段送风温度为 $5^\circ\text{C}$ ，2h后进入第二阶段，此时送风温度为 $-32^\circ\text{C}$ ，第二阶段送风2h后进入第三阶段，第三阶段送风温度为 $-70^\circ\text{C}$ 。总送风时间为24h。

第一阶段送风温度设定为 $5^\circ\text{C}$ ，是考虑到在降温至冰点之前，将空气中的水分除去，避免在送冷风时出现结冰现象而影响工作效率或损坏制冷设备。

为了得到较好的室内温度场、速度场，分别按 $200000\text{m}^3/\text{h}$ 、 $250000\text{m}^3/\text{h}$ 、 $300000\text{m}^3/\text{h}$ 循环风量进行模拟，再选取较合理的风量进行计算。

根据模拟结果，送风量为 $200000\text{m}^3/\text{h}$ 时，工作区温度无法在规定时间内达到 $-55^\circ\text{C}$ ，送风量为

$250000\text{m}^3/\text{h}$ 、 $300000\text{m}^3/\text{h}$ 时，室内温度分别达到 $-55^\circ\text{C}$ 和 $-56^\circ\text{C}$ ，现以 $300000\text{m}^3/\text{h}$ 风量为例进行模拟，结果见图3。

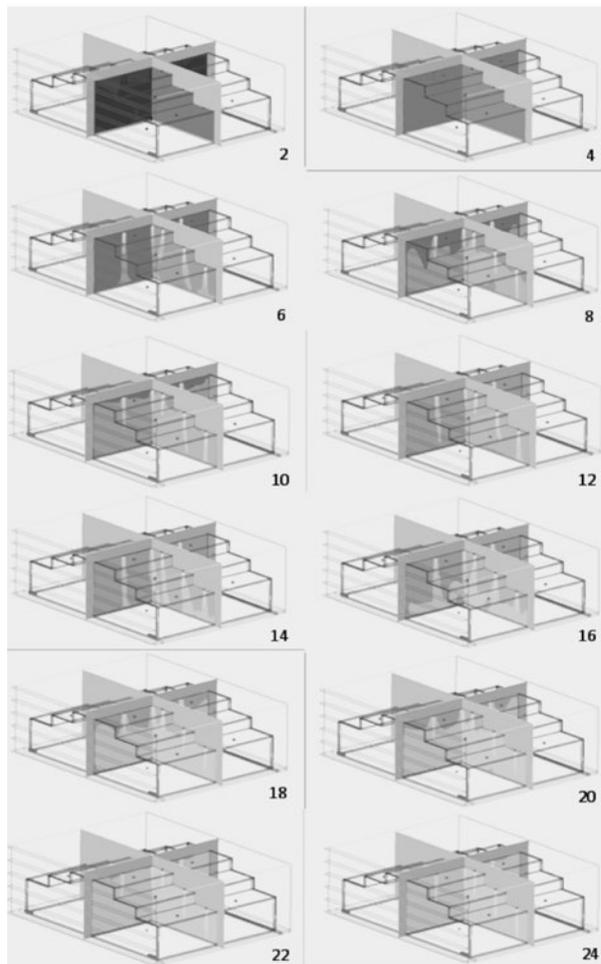


图3 温度场分时截图(竖向，风口处) (图中数字为时间h)

在室内工作区选定两个有代表性的空间点位进行温度跟踪，其温度变化情况见图4。

同时，模拟送风口下方和实验室中心地带温度随高度的变化情况见图5、图6。

从模拟结果可以看出，在各送风阶段前期室内空气温度迅速降低，大约30min后降温变缓，然后逐渐趋近送风温度，在各送风阶段末，室内空气温度场基本均匀一致。

接下来，根据模拟得出的室内温度变化作为输入条件，再进行围护结构内表面温度模拟。围护结构按照墙体（包括吊顶）、大门、地面分别模拟出各内表面温度变化情况，结果见图7~图9。

从模拟结果可以看出，围护结构内表面温度在5.5h内变化较大，之后放缓，现将各送风阶段

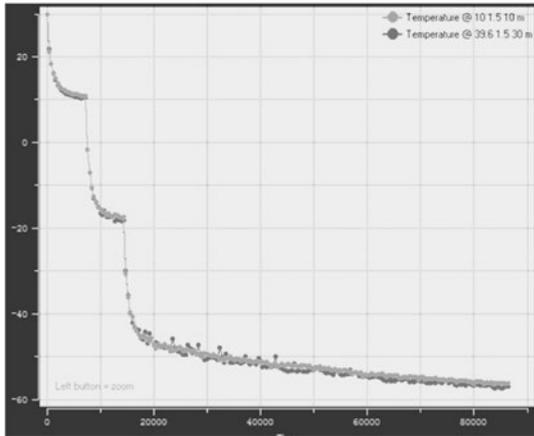


图4 工作区两选定点温度随时间变化曲线  
(横坐标为时间s, 纵坐标为温度°C)

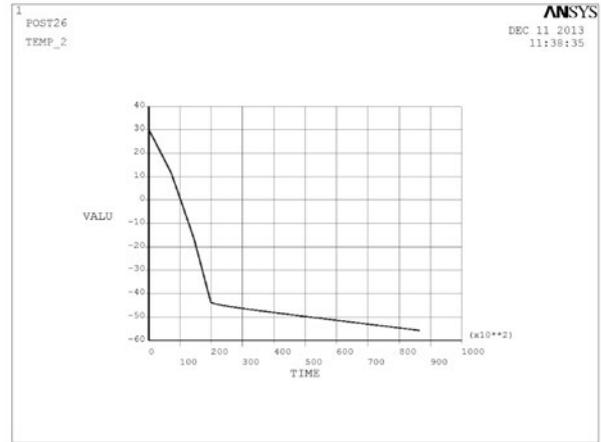


图7 墙体内部表面温度随时间变化曲线

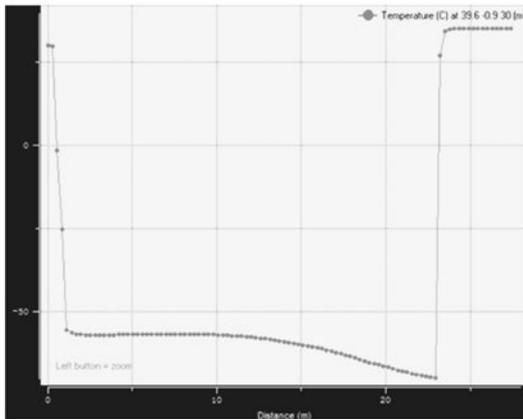


图5 送风时段末试验室中心风口下温度随高度变化曲线  
(横坐标为垂直高度m, 纵坐标为温度°C)

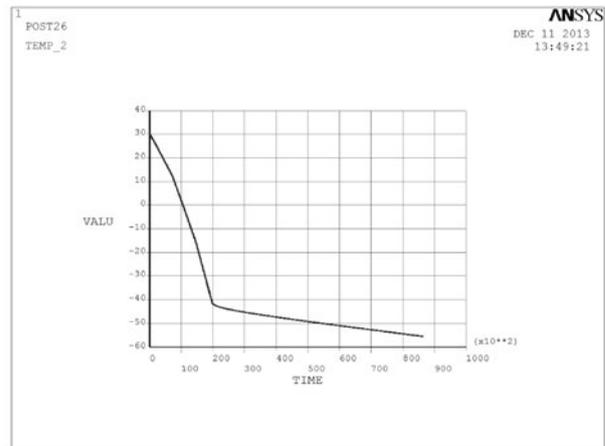


图8 大门内表面温度随时间变化曲线

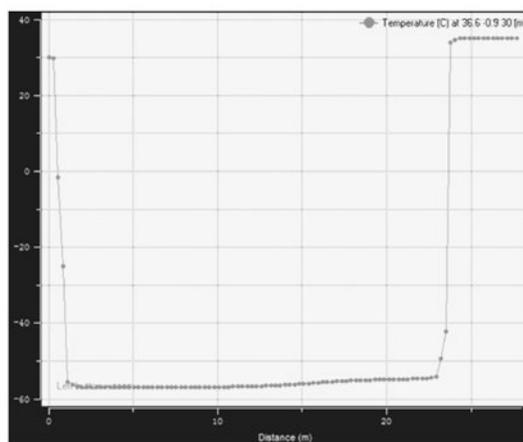


图6 送风时段末试验室中心附近部位温度随高度变化曲线  
(横坐标为垂直高度m, 纵坐标为温度°C)

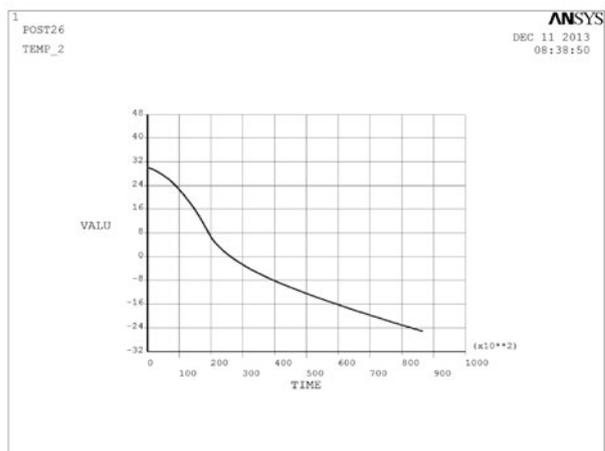


图9 地板内表面温度随时间变化曲线

末围护结构内表面温度统计见表1。

## 2 非稳态负荷计算

根据围护结构内表面温度的变化情况, 依据有限元软件进行热流密度计算, 结果见图10~图12。

表1 各送风阶段末围护结构内表面温度 (°C)

阶段时刻 围护结构	第一阶段送风 结束时刻	第二阶段送风 结束时刻	第三阶段开始1.5h	第三阶段送风 结束时刻
墙体内部表面温度	11.4	-16.3	-43.5	-55.7
大门内表面温度	12.2	-14.8	-41.4	-55.5
地板上表面温度	25.7	16.7	7.0	-25.1

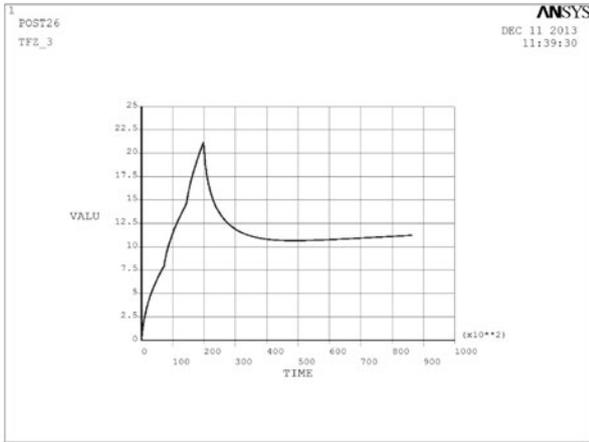


图10 墙体热流密度随时间变化

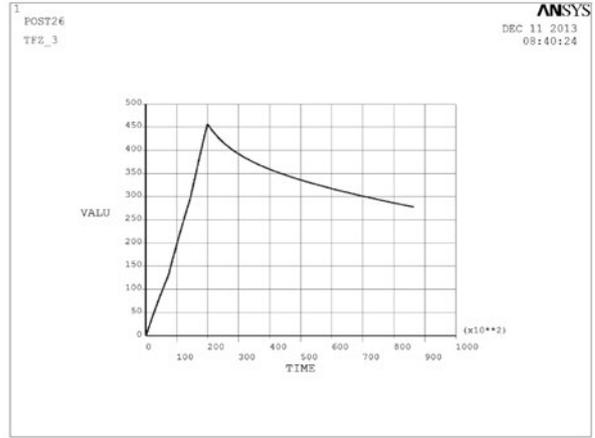


图12 地板热流密度随时间变化曲线

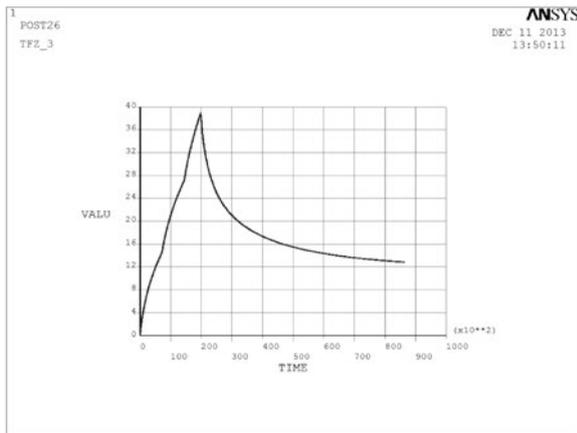


图11 大门热流密度随时间变化

因围护结构热阻的存在, 导致其内部温度变化较慢, 所以各围护结构热流密度呈先增大, 到5.5h达到峰值, 然后开始下降直至趋于稳定。墙

体(吊顶)、大门的主要材料是热容很小的聚氨酯保温材料或岩棉, 所以其热流密度不大, 且达到峰值后迅速下降而后平稳, 而地板是热容较大的钢筋混凝土, 所以其热流密度非常大, 且达到峰值后下降平缓, 在计算时段末还处于下降阶段。现将各阶段围护结构热流密度典型时刻数值统计, 见表2。

以上模拟主要是针对围护结构进行的, 在计算整体负荷时, 还需要考虑室内空气的负荷。在计算过程中发现, 随着温度的降低, 空气密度会增大, 体积会变小。为了维持实验室内压力平衡, 需要向室内补充新风。所以空气负荷包含两部分, 室内原有空气的降温负荷和补充的新风负荷。

第一阶段结束时, 空气状态参数: 干球温度 10.5°C, 含湿量  $d = 0.01 \text{ g/kg}$ 。本系统采用转轮除湿, 因此按照表冷器不承担潜热负荷进行分析, 第一阶段的空气焓差为:

表2 各送风阶段围护结构热流密度典型时刻数值 (W/m²)

阶段时刻 围护结构	第一阶段送风 结束时刻	第二阶段送风 结束时刻	第三阶段送风1.5h	第三阶段送风 结束时刻
墙体	8	14.8	21	11.25
大门	14.5	27	39	13
地板	128	298	450	280

表3 各阶段所需的最大负荷 (kW)

送风阶段 位置	第一阶段 (送风温度5℃)	第二阶段 (送风温度-32℃)	第三阶段 (送风温度-70℃)
地板	562	1440	2174
墙体及吊顶	75	139	198
大门	26	49	70
空气负荷	374	523	94
总负荷	1037	2151	2535

$$\Delta i_1 = (1.01 + 1.84 \times 10^{-5}) \times (35.1 - 10.5) = 24.8 \text{ kJ/kg} \quad (1)$$

第二阶段结束时, 空气状态参数: 干球温度为-18℃, 含湿量不变。第二阶段的空气焓差为:

$$\Delta i_2 = 1.01 \times (10.5 + 18) = 28.8 \text{ kJ/kg} \quad (2)$$

第三阶段结束时, 空气状态参数: 干球温度为-57℃, 含湿量不变。第三阶段的空气焓差为:

$$\Delta i_3 = 1.01 \times (57 - 18) = 39.4 \text{ kJ/kg} \quad (3)$$

初始室内的空气质量为:

$$m_0 = \rho V = 1.09 \times 92070 = 100356 \text{ kg} \quad (4)$$

第一阶段结束时, 室内空气质量:

$$m_1 = \rho V = 1.18 \times 92070 = 108642 \text{ kg} \quad (5)$$

所需的负荷为:

$$q = m_1 \times \Delta i_1 / 7200 = 374 \text{ kW} \quad (6)$$

第二阶段结束时, 室内空气质量:

$$m_2 = \rho V = 1.31 \times 92070 = 120611 \text{ kg} \quad (7)$$

所需的负荷为:

$$q = (m_1 \times \Delta i_2 + (m_2 - m_1) \times (\Delta i_1 + \Delta i_2)) / 7200 = 523 \text{ kW} \quad (8)$$

第三阶段结束时, 室内空气质量:

$$m_3 = \rho V = 1.55 \times 92070 = 142708 \text{ kg} \quad (9)$$

所需负荷为:

$$q = (m_2 \times \Delta i_3 + (m_3 - m_2) \times (\Delta i_1 + \Delta i_2 + \Delta i_3)) / 7200 = 94 \text{ kW} \quad (10)$$

根据以上数据计算各阶段最大瞬时动态负荷见表3。

热负荷计算方法同冷负荷, 各围护结构负荷比例与冷类似, 这里不再赘述。与冷负荷不同的是空气负荷室内空气因温度升高、密度下降, 试验过程中一直处于向外排风(泄压)状态, 故空气负荷略有下降。

### 3 结语

从以上计算可以看出, 地板就像一块巨大的吸水海绵, 其最大负荷占到了总负荷的85%, 因此地坪对负荷的影响最大, 对其需重点考虑。另外, 空气会因为温度变化而引起密度变化, 从而导致体积变化, 在制冷工况时, 需要考虑因补充空气所带来的冷负荷, 同时, 要考虑空气体积变化对围护结构带来的压强变化, 采取相应的压力平衡措施。

### 参考文献

- [1] 秦跃平. 非稳态导热问题有限体积法. 辽宁工程技术大学学报. 2013, 32 (5)
- [2] 刘向伟. 墙体热、湿及空气耦合传递非稳态模型及验证. 湖南大学学报. 2016, 43 (1)
- [3] 陈艳华. 试算法在多维非稳态导热问题中的应用. 建筑节能. 2010. 38(1)
- [4] 李向前. 墙体非稳态传热计算方法适应性及地下结构传热特性分析与研究. 博士学位论文. 2011
- [5] 周娟. 建筑围护结构动态传热模拟方法的研究. 博士学位论文. 2012

# 《航空工程建设》2021年第1~6期文章索引

## 2021年第1期 总第153期

- |                              |     |     |     |     |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 02 着眼智能作战装备需求, 优化国防科技工业能力布局  |     |     |     | 佟京昊 |
| 06 成都淮州新城国际会展中心抗震性能化设计       | 谢 军 | 贾雨萌 | 樊钦鑫 | 刘宇轩 |
| 14 垃圾焚烧项目污泥干化除臭系统设计研究        |     |     | 徐佳佳 | 陆新生 |
| 18 基于EPC视角的锂离子电池建设项目施工管理策划研究 |     |     |     | 张运锋 |
| 24 机场水泥混凝土加铺层设计              |     |     | 杨 博 | 殷小棠 |
| 28 低压柴油发电机应急备用供电系统典型方案探讨     |     |     |     | 蓝 娟 |
| 34 火炸药爆炸危险场所防雷设计             |     |     |     | 郝鹏超 |
| 39 A级数据中心供电电源的计算选型探讨         |     |     | 王 烨 | 李 茜 |
| 43 排气扩压器开孔率对试车台气动性能的影响研究     |     | 梁 靓 | 孙正伟 | 曹海峰 |
| 47 涡轮动力模拟器总体性能计算分析           |     |     | 赵云洋 | 刘 睿 |
| 51 行星轮系振动特性分析                | 高兆庆 | 李 威 | 高玉峰 | 高如超 |
| 55 基于EXCEL的真空计算程序开发的实例应用     |     |     |     | 王晓东 |
| 60 某援外疾控中心PCR实验室通风空调系统设计     |     |     | 安玉双 | 孟凡兵 |

## 2021年第2期 总第154期

- |                         |     |     |     |     |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 02 复杂电磁环境下雷达隐身测试技术分析与发展 | 王纪尧 | 代月松 |     | 陈琼琼 |
| 05 某单位二次配电系统装配车间单元化设计分析 |     |     | 田 昊 | 高 放 |
| 13 CAR-T细胞治疗产品车间工艺设计分析  |     |     | 张晓彤 | 李锦秀 |

18	未进行抗震设计的某高层框架 ——核心筒结构抗震性能评估	刘远之	张晓光	闫 军
23	某航站楼登机桥结构设计	丰 灿	韩 川	
27	北京某填埋场渗沥液处理设施升级改造及工程设计研究	李 珂	阎 露	
33	高原机场助航灯光工程设备选型	贾广政	张 琪	
37	某高校科研实验楼照明设计探讨	郭金茹	张 琪	
42	快速确定机场盖被设计高程的计算方法	何 培	朱翼军	
47	沥青道面热物性质对道面及近地表温度场影响研究	李雪倩	朱翼军	
61	项目管理中全过程工程咨询的应用研究	张 琪	李锐娟	

## 2021年第3期 总第155期

02	智能飞机维修车间体系架构研究	闫 慧	张立峰	杨益嘉	杨 通
07	某机场大型储油罐不均匀沉降后的静力分析	王 帅	周 青		
11	动荷载作用下某拱形机库结构设计	马 祎	王敬仁		
14	不均匀地基下地服维修楼基础选型分析	宋宜濛	周 青		
18	水位变化对地下室抗浮设计经济性的影响 ——以货运站附楼为例	王悦洋	周方杰		
23	某机场飞行区围界安防系统设计	韩 枫	邱冬莉		
27	智慧养老系统探析	佟乐琪	邱冬莉		
30	生物医药实验动物房的供配电及照明设计探究	王 鹏	张永林		

# 《航空工程建设》2021年第1~6期文章索引

- |                              |     |     |
|------------------------------|-----|-----|
| 33 BIM电气设计交付深度的研究与思考         | 曲嘉琦 | 赵亮亮 |
| 36 EPC模式下垃圾焚烧发电项目设备采购管理探讨    | 蔡旻祺 | 朱志明 |
| 39 土建深基坑工程的支护施工及管理           |     | 于海侠 |
| 42 循环经济产业园综合评价体系研究           | 陈彦希 | 朱时岩 |
| 49 垃圾焚烧发电厂工程设计中基于EHS的支吊架设计应用 | 胡晓天 | 王双成 |
| 53 复合材料铺叠间室内正压度的设计与分析        |     | 赵雷昌 |
| 56 某研发大楼空调系统设计               | 徐秋阳 | 张明玉 |
| 60 影响安徽某药厂项目空调系统能耗重点因素分析     | 李树一 | 杨尚一 |

## 2021年第4期 总第156期

- |                                |     |     |     |
|--------------------------------|-----|-----|-----|
| 02 飞机维修机库机位规划模式分析              | 闫慧  | 周方杰 | 张立峰 |
| 05 航天装配并联机构的工作空间特点及优化设计        | 白萌  | 高放  | 王宁  |
| 10 气源系统中空气压缩机组选型方案分析           | 裴一哲 | 余振中 | 涂强  |
| 13 价值流程图在产能提升中的案例分析            |     | 田昊  | 高放  |
| 17 中国馆藏文物一体化防震技术研究进展           |     | 葛家琪 | 马伯涛 |
| 25 泉州市博物馆馆藏文物一体化防震技术应用         | 覃杰  | 蒋树卿 | 马伯涛 |
| 31 结构试验中材料强度、弹性模量及荷载取值等问题探讨    | 邹剑强 | 张庆亮 | 李慧成 |
| 39 某双向张弦屋顶与索网幕墙整体预应力张拉施工仿真分析研究 | 谷鹏  | 张庆亮 | 贾洁  |
| 43 流感疫苗车间工艺布局设计分析              |     | 张晓彤 | 李文杰 |

47 区域应急救援航空体系的核心要素与架构探索	常秀娟	于芷婧
52 区域航空应急救援基础设施网络布局优化建议	曹琪琰	王天璞
57 400Hz航空地面电源供电系统分析		王 焯
60 海南地区游泳馆空调设计	姚俊彬	张明玉

#### 2021年第5期 总第157期

02 新型举国体制下“一体化”的国防科技工业建设思考				佟京昊
06 预应力装配式高耸风电塔架受力性能研究	张国军	张曼生	黄威振	葛家琪
16 粘滞阻尼器支撑墙受剪状态分析		郑帅群	郭 骛	贾 洁
20 某理化实验室楼面活荷载分析			马若辰	王 辰
24 基于政策规定下的建设工程合同付款约定分析及优化建议				邵 飞
34 锂离子电池厂房的真空系统设计探讨		齐 心	赵 磊	孟凡兵
39 包含工艺设备的工程总承包项目二次配工程管控技术研究				詹 翔
42 房屋建筑工程大体积混凝土的施工技术分析				于海侠
45 暖通施工中常见问题质量控制				程小良
48 基于事故灾害类型的航空应急救援机型适用性分析				杨 沫
51 某危险废物处置园通风净化设计	孙亚峰	肖 武		王乃天
57 南方某机场三期扩建工程空调冷源方案分析			梁乃正	孟凡兵
62 航食配餐楼暖通节能设计的一些思考	申 剑	卢 洪		朱 巍

# 《航空工程建设》2021年第1~6期文章索引

2021年第6期 总第158期

- |    |                                                 |     |     |     |     |     |
|----|-------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 02 | 深刻认识基于共识主动性的美军第三代武器装备体系，<br>加紧构建中国特色武器装备现代化管理体系 |     |     |     |     | 佟京昊 |
| 08 | 索球管桁架机库屋盖结构体系及应用                                | 赵伯友 | 周方杰 | 韦恒  | 郭鹏  |     |
| 13 | 大跨度机库球管大门桁架节点转动刚度研究                             | 韩奇昊 | 赵伯友 | 金来建 | 郭鹏  |     |
| 23 | 某民用机场油库消防设计实例                                   |     |     | 郝岩  | 陈洁如 |     |
| 29 | 微电网示范案例的控制策略                                    | 赵亮亮 | 赵瑞霞 | 滕飞  | 李江  |     |
| 35 | 澳门都市更新与活化研究<br>——以风顺堂区为例                        |     |     | 郭梦晓 | 林资政 |     |
| 39 | 大温差蓄能式地源热泵系统在项目中的应用研究                           |     |     | 赵磊  | 肖武  |     |
| 47 | 西安某空气源热泵系统运行问题分析                                |     |     | 孙亚峰 | 王乃天 |     |
| 55 | 超高、低温实验室非稳态负荷计算方法的研究                            |     |     | 申剑  | 傅建勋 | 刘银萍 |
| 60 | 总目录                                             |     |     |     |     |     |

## 医药工程设计研究院

中国航空规划设计研究总院有限公司医药工程设计研究院（以下简称“医药院”）自上世纪70年代后期开始涉足医药工程领域。作为公司民用工业领域的重要组成部分，主营业务涉及生物制药、药物制剂、研发和中试实验室、中成药、医疗器械、保健品及医院等多个领域，业务范围涵盖规划咨询、项目建议书、可行性研究、方案设计、初步设计、施工图设计、工程预算编制、工程管理、工程监理、工程总承包等固定资产投资活动全过程。医药院现为医药设计协会副理事长级单位，在医药工程建筑等领域具有较强的技术实力和丰富的设计经验。按中国GMP标准、世界卫生组织WHO GMP标准、欧盟GMP标准及美国FDA标准，已经设计完成医药工程项目600余项，其中包括一大批代表我国医药领域先进水平的工程项目，并不断斩获国家级、省部级和集团级的各类奖项。

上海莱士血液制品有限公司产业基地项目是国内最具有影响力的血液制品生产企业，荣获2016年度全国医药优秀工程设计一等奖。

北京天坛生物制品股份有限公司疫苗产业基地项目是按照欧盟标准设计的国内规模最大的疫苗生产基地，荣获2012年度北京市优秀工程咨询一等奖；2019年度全国医药优秀工程设计二等奖；其OPV产品已列入美国盖茨基金会国际采购清单。

上海生研所奉贤生物医药产业化基地开发项目获2017年航空工业优秀工程设计一等奖。

全球健康药物研发中心装修工程设计项目获2019年全国医药优秀工程设计三等奖。

同仁堂中药提取、液体制剂建设项目获2020年河北省工程勘察设计项目二等奖。

北京亚宝生物药业产业基地项目是按照美国cGMP标准设计的具有国际一流水平的制剂生产基地，已经通过FDA认证，荣获2011年度全国医药优秀工程设计三等奖。

2021年，国际新冠疫情的持续发展使我国的疫情防控形势面临严峻考验。为了扩大新冠疫苗的产能，满足疫苗的接种速度和接种率，医药院攻坚克难、持续创新，在巨大的工作压力下相继完成了一批新冠疫苗的研发和扩能项目，为抗击疫情贡献出了一份力量。与此同时，医药院还走出国门，承接了海外新冠疫苗厂房项目，为中国医药走向世界付出了绵薄之力。



2021年第6期（总第158期）  
2021年12月出版



天府生物城成都蓉生药业有限责任公司重组凝血因子生产车间