

航空工程建设

AERO-INDUSTRY ENGINEERING CONSTRUCTION

2019年第4期 总第144期



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

内部资料 免费交流
准印证号：京内资准字9919-L0337号

海南文昌国际航天城起步区系列规划项目

项目名称：海南文昌国际航天城起步区系列规划项目

建设单位：文昌市自然资源和规划局

设计单位：中航建投综合规划研究院 中国航天系统科学与工程研究院 中国信息通信研究院综合规划研究院

设计亮点：

海南省文昌市是中国首个低纬度滨海发射基地所在地，海南文昌国际航天城是在海南自贸区（港）的建立背景下，在航天领域的重大科技创新基地和空间科技创新战略高地，也是海南省三大科技城之一。

本项目位于海南省文昌市八门湾西侧，是海南文昌国际航天城的起步片区，规划范围约12km²。规划成果体现了公司在航天领域及科技新城领域的技术实力，同时实现了对先进城市规划理念的前沿探索。

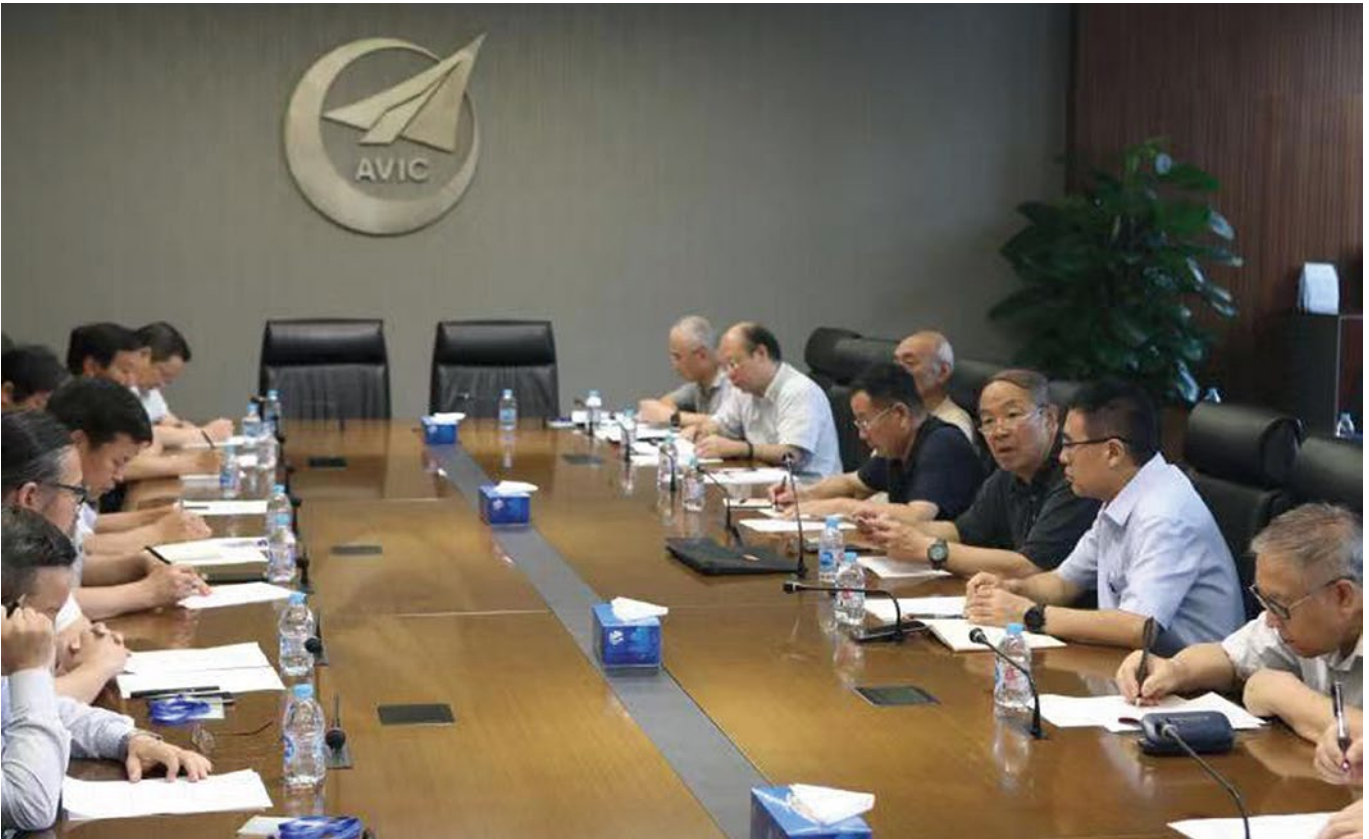
控规在用地布局、路网设计等方面进行了创新性设计。在用地布局方面，规划尊重自然，相地理水，组团自生，并根据产业发展规律提出扁平生长、有机迭代的空间发展模式，还提出基于生产性服务和生活性服务的双向驱动产业空间布局模式。在路网设计方面，规划结合航天科研院所的用地规模需求划定窄路密网，探索无人驾驶在空间的落实。

城市设计和导则充分结合系列规划各项成果，基于项目特质和文化内涵，提出“生态航天城、创新航天城、文化航天城、幸福航天城、智慧航天城”五位一体的设计策略。设计挖掘蓝绿空间价值，融入航天文化，将绿谷天路中央公园设计成展现中国文化自信的窗口。

为保证设计的有效落实，城市设计导则通过“总则+重点内容控制+图则控制”形式，形成对建设管理的有效管控。



中国航空工业建设协会2019年度工程勘察、建筑设计行业和市政公用工程 优秀勘察设计奖初评工作会议在北京举行



为积极推动航空工业基本建设发展，进一步提高航空工业建设工程的勘察、设计质量和水平，鼓励工程勘察设计人员创作出更多的质量优、水平高、效益好的优秀工程勘察设计项目，中国航空工业建设协会受中国航空工业集团公司的委托，于2019年7月8日~7月9日在北京召开了2019年度工程勘察、建筑设计行业和市政公用工程优秀勘察设计奖初评工作会议。

按照评审规定和要求，协会组织并邀请行业专家对航空工业系统的勘察设计单位推荐上报的41个项目进行了评审。经专家评审委员会评定，集团公司审定，共评出33项获奖项目，其中优秀工程设计、勘察一等奖11项、二等奖13项、三等奖9项。

（来源：中国航空工业建设协会）

合肥空港经济示范区总体发展规划项目

建设地点：安徽省合肥市

设计单位：中航建投综合规划研究院

设计亮点

本项目是为发挥空港经济示范区产业、交通和开放的优势，强化支撑引领作用，以及扩大空间辐射范围进行编制的。合肥空港经济示范区以新桥机场为核心，规划面积约805km²。

本项目以“国际智港·生态航城”为规划愿景，从港、产、城3个维度出发，将建设成为长三角西翼门户枢纽、知识绿洲的交往磁极、青和宜居的精英航城。

规划提出协作省内资源、构建航线网络、提升货运集散能力、引入航空公司、提升保障能力五大策略，将空港经济示范区打造成为长三角西翼门户枢纽。

规划遵循航空经济发展规律，按照“双轮驱动，聚焦科创门户”的总体思路，提出构建以战略核心型航空经济为基底、以智力开放型服务经济为特色、以动能提升型创新经济为支柱的产业体系，将空港经济示范区打造成为知识绿洲的交往磁极。

规划在充分分析用地现状要素的基础上，搭建三级廊道网络化生态体系，构建蓝绿交织的组团发展格局，形成空港核心引领、组团圈层布局、蓝绿空间共生的“一核心、多组团”的总体空间结构，将空港经济示范区打造成为青和宜居的精英航城。





中国空间技术研究院怀来航天产业园区系列设计项目——规划及景观

建设地点：河北省张家口市

设计单位：中航建投综合规划研究院

设计亮点

怀来新兴产业示范区是京北重点产业聚集区，是新兴产业示范区航天产业发展的核心引擎。怀来航天城承担着我国卫星研制领域的原始创新向成果转化的重要职能，是实现中国航天梦的重要践行者。怀来新兴产业园区近期将建设为航天技术应用产业生产、制造、示范应用和产业化发展基地；远期将成为国家空间技术创新基地。园区位于张家口市怀来县，距离北京城区65km，占地2km²，总体绿化面积为24ha。设计涵盖园区规划及景

观规划两阶段内容，充分发挥综规院“整合规划”的技术优势。

景观规划设计延续了上位规划“一纵、两横、一带、六组团”的格局，以“航腾星河”作为园区景观设计理念。园区的景观设计在南北“一纵”的空间上以航天重要里程碑为线索，形成航天文化探索主题走廊。园区6个组团以“星”为主题，讲述了中国航天发展的不同阶段，形成“星启、星问、星创、星腾、星耀、星途”6个组团绿地空间。

设计注重以人为本，采用光照、风压、风速等分析软件对场地进行环境模拟。根据模拟的结论进行空间布局，将人们的活动空间布局在风速适宜的地方。对风速较大的区域通过布置植物的方式进行遮挡，降低风速对景观空间的影响。人性化场景的营造为研发工作人员提供了舒适、优美、生态的创新交流空间。

武汉城市圈航空港经济综合实验区总体发展规划项目

建设地点：湖北省武汉市

设计单位：中航建投综合规划研究院

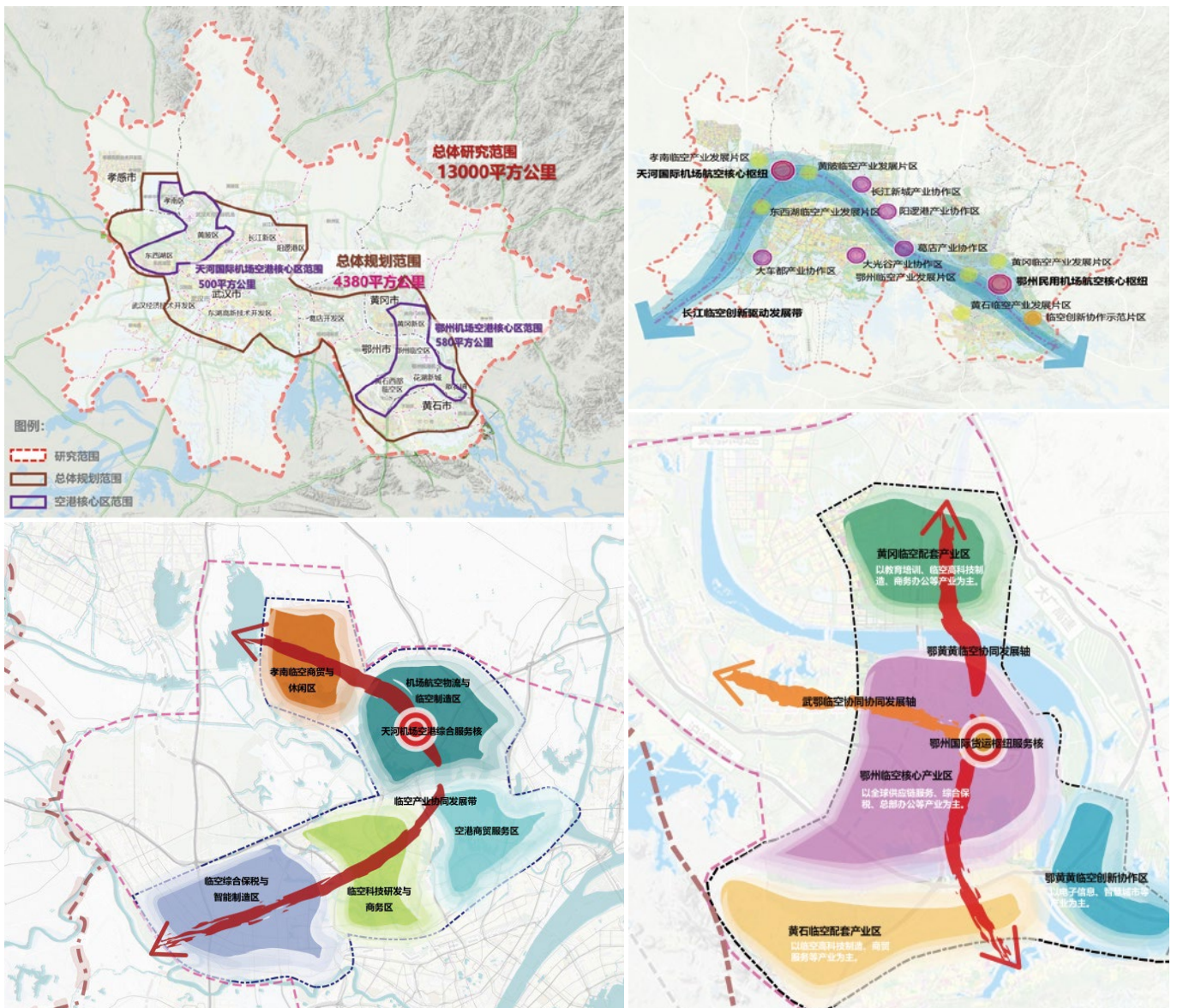
设计亮点

由湖北省发改委委托开展的《武汉城市圈航空港经济综合实验区总体发展规划》是综规院2019年的重点项目之一，项目具有规划面积广，规划层级高，规划探索性强等特点。

规划总体研究范围涉及武汉城市圈武汉、孝感、鄂州、黄冈、黄石5个城市中的1.3万km²，重点解决产业

协同、交通衔接、生态环保等问题；总体规划范围为4380km²，重点解决落实产业谋划与空间战略问题；空港核心区范围面积为1080km²，重点解决基础设施建设、产业落地、产业布局和机制体制创新等问题。

规划提出“流通增效、共享互惠、开放创新、绿色保护”的发展理念，制定“强核（空港核心）、强带（空港经济创新带）、强城（国际航空城）”产业体系，打造“一带、两核、十二区、多节点”空间格局，最终为实现“引领中部开放的国际航空客货双枢纽、构建长江经济带国际战略通道的新引擎、推动湖北省新型经济高质量发展的动力源、实现城市圈智慧生态发展的航空都市引领区”发展定位制定保障措施与政策体系。项目工作历时6个月，目前已通过专家评审会议，规划发布审定稿正在紧张编制过程中。





中国印尼经贸合作区二期 规划设计项目

建设地点：印度尼西亚雅加达

设计单位：中航建投综合规划研究院

设计亮点

项目地处印度尼西亚首都雅加达，是印尼绿壤国家工业园区的重要组成部分，规划总面积约265ha。中国印尼经贸合作区是国家商务部批准的印尼第一个国家级工业示范园区，该项目二期的落地将为我深入推进“一带一路”建设和国际经贸合作、促进与沿线国家经济深度融合和互利

共赢提供重要支撑。

本次规划创新性地提出了中印经贸合作区“多维度5I发展模式”，制定了新时代“合作区2.0”的产业发展方向，通过有序空间布局实现产业精准落位与空间衔接，解决合作区二期产业升级与整体品质和活力的问题。合作区目前已完成一期205ha土地平整、道路、给排水、排污、供电、通讯等基础设施、行政办公楼及标准厂房的建设并已投入使用，具备企业入驻建设生产条件。目前，已有来自中国、印尼、日本、法国、新西兰、芬兰等国家和地区的37家中外企业入园。合作区二期目前已进入规划设计阶段，预计年底前进行土地平整、基础设施建设及企业招商工作，全力打造智慧型、科技型、环保型海外经贸合作园区。

住房和城乡建设部关于发布行业标准《温和地区居住建筑节能设计标准》的公告

现批准《温和地区居住建筑节能设计标准》为行业标准，编号为JGJ475-2019，自2019年10月1日起实施。其中，第4.2.1、4.2.2、4.3.6、4.4.3条为强制性条文，必须严格执行。本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

住房和城乡建设部关于发布国家标准《近零能耗建筑技术标准》的公告

现批准《近零能耗建筑技术标准》为国家标准，编号为GB/T51350-2019，自2019年9月1日起实施。本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

住房和城乡建设部关于发布国家标准《加油站在役油罐防渗漏改造工程技术标准》的公告

现批准《加油站在役油罐防渗漏改造工程技术标准》为国家标准，编号为GB/T51344-2019，自2019年10月1日起实施。本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

住房和城乡建设部关于发布国家标准《建筑边坡工程施工质量验收标准》的公告

现批准《建筑边坡工程施工质量验收标准》为国家标准，编号为GB/T51351-2019，自2019年9月1日起实施。本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

住房和城乡建设部关于发布行业标准《金属面夹芯板应用技术标准》的公告

现批准《金属面夹芯板应用技术标准》为行业标准，编号为JGJ/T453-2019，自2019年6月1日起实施。本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公

开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

住房和城乡建设部关于发布国家标准《既有混凝土结构耐久性评定标准》的公告

现批准《既有混凝土结构耐久性评定标准》为国家标准，编号为GB/T51355-2019，自2019年8月1日起实施。本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

住房和城乡建设部关于发布国家标准《岩土工程勘察安全标准》的公告

现批准《岩土工程勘察安全标准》为国家标准，编号为GB/T50585-2019，自2019年8月1日起实施。原国家标准《岩土工程勘察安全规范》（GB50585-2010）同时废止。本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

住房和城乡建设部关于发布国家标准《城市地下综合管廊运行维护及安全技术标准》的公告

现批准《城市地下综合管廊运行维护及安全技术标准》为国家标准，编号为GB51354-2019，自2019年8月1日起实施。其中，第1.0.4、6.4.3、6.4.6、6.4.14条为强制性条文，必须严格执行。本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

住房和城乡建设部关于发布国家标准《灾区过渡安置点防火标准》的公告

现批准《灾区过渡安置点防火标准》为国家标准，编号为GB51324-2019，自2019年9月1日起实施。其中，第3.0.2、4.1.2、5.1.3、5.2.4、5.2.5、5.2.9、5.3.1、5.3.6、5.3.7条为强制性条文，必须严格执行。本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

（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)
 丁杰 卜国磊 王玉平
 王锋 王笃礼 刘景灏
 李纲 李中强 肖武
 张卫才 张立峰 陈阳
 陈丹璐 金来建 黄春晖
 贺宏斌 傅绍辉 葛家琪

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 北京奇麒麟印刷有限责任公司分公司
 发送对象 公司内部及本系统内部
 印刷日期 2019年8月
 印数 1500册
 电话 (010)62038235
 传真 (010)62038297
 封面 海南文昌国际航天城起步区系列规划项目

CONTENTS

目录 2019年第4期 总第144期

航空能力建设

- 02 飞机维修机库机位规划模式分析 闫慧 周方杰 张立峰
- 06 航空线束三维全信息模型数据集组织方法 王春阳 丁蕾
- 11 建立健全民用航空发动机基础研究能力体系
刘亚 岳南 刘珺
- 14 发动机装配过程关键参数的检测与溯源
张勤 田恺 杨阔
- 16 军民融合背景下区域产业结构调整与升级研究——以安顺地区为例 岳南 刘亚

研究与探讨

- 19 基于TMD的大跨楼盖振动测试与分析 王明珠
- 27 某172m跨度拱形煤场封闭罩棚设计研究
刘邦宁 王明珠 王树 刘鑫刚 张奇铭
- 36 发动机试车厂房测控间振动控制研究
谷鹏 黄银莹 张庆亮 贾洁 付桂宏 杨维国
- 42 某螺旋桨滑流气源系统控制方法 史金春
- 46 预装式变电站设计及应用要点 郭翔 王世忠 赵亮亮
- 52 某医药工业洁净厂房给排水设计探讨 李晨峥 王艳
- 58 数据机房循环冷却水补水量及其影响因素分析 李力军 陈达
- 62 垃圾焚烧发电项目给排水设计要点分析 尹建鹏 陆新生

飞机维修机库机位规划模式分析

■ 闫慧 周方杰 张立峰 [工艺]

摘要: 飞机维修机库机位的合理规划对维修企业的投入、运营及发展具有重要意义。本文阐述了建立飞机维修机库机位规划影响因素,从生产流程、生产管理、工艺设备共用性、结构用钢量、建筑效果、用地集约性方面进行分析,并对机位规划方案给出比选结论。

关键词: 飞机维修机库;机位规划;影响因素

1 绪论

纵观国内维修企业机库机位规划,最常见的不外乎单机位、两机位、三机位和四机位几种模式。机位规划形式需要根据维修业务量、维修习惯、建设用地情况等综合考虑。

国内几家大型维修企业,如Ameco、Gameco、上海波音机库,由于自身初始业务量足够大,因此从集群发展以及发挥设施效率、提高设施利用率等方面考虑,均采用了四机位的建设模式。

除上述几家维修企业外,国内的一些其他维修企业大多采用双机位建设模式,通过逐步发展的方式充分利用设施功效,避免了设施建设后利用率过低而造成企业发展困境。如东航西安维修基地、STARCO浦东大修基地、广州新科宇航、海航海口维修基地等。

对于宽体机位采用双机位、三机位还是四机位建设模式,取决因素很多,包括企业的业务量、土地情况、企业的管理模式、维修习惯等,不存在单纯的选择某种模式更优的问题,须因地制宜确定。本论文重点分析两方面的内容,一是对宽体机位建设模式给出分析;二是对4个宽体机位如何组合达到最优给出定性分析。

2 机位规划形式

常见的多机位的宽体机库规划主要有3种:

两宽体机位并排停放,同时穿插窄体;三宽体机位并排停放,同时穿插窄体;四宽体机位并排停放,同时穿插窄体。

3 机位规划影响因素

机位规划需要考虑众多因素的影响,对其建立一个完整、精确、统一的影响因素体系具有相当的复杂性和困难度。本文对影响因素做初步研究,目的是对机位规划提供一定的依据和准则。

在参考大量国内外的资料和文献,通过调查分析,结合国内维修企业运作流程,本文从生产流程、生产管理、工艺设备共用、结构选型及投资、建筑效果、用地集约性6个主要方面来综合分析,如表1所示。

表1 影响因素指标

影响因素	含义
生产流程	反映工艺流程的便捷高效性
生产管理	反映企业管理和组织的便利性
工艺设备共用	反映工艺设备的共用性和投资额度
结构选型及投资	反应不同机位布置形式的结构性能
建筑效果	反应不同机位布置形式的建筑外立面
用地集约性	反映用地的紧凑合理性

4 机位规划方案比选

机位规划方案比选的前期是维修基地需要设

作者简介:闫慧,女,高级工程师,2013年毕业于北京理工大学管理科学与工程专业,现就职于中航建设民航工程设计研究院。

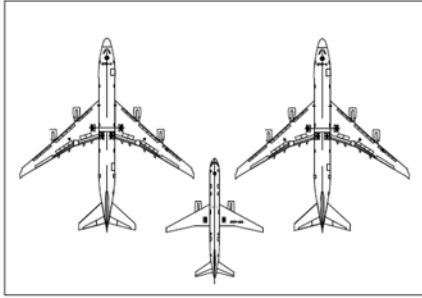


图1 两机位规划（不加柱子）

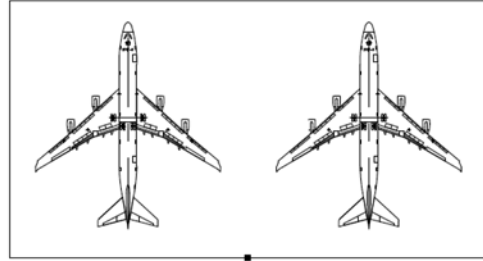


图2 两机位规划（加柱子）

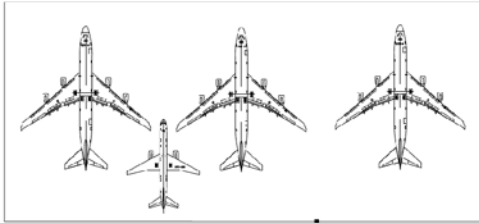


图3 三机位规划（不加柱子）

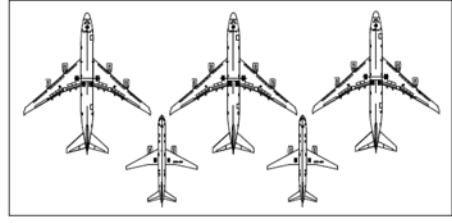


图4 三机位规划（加柱子）

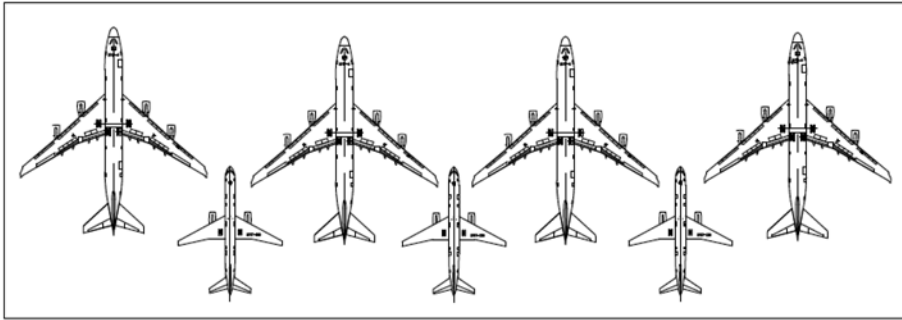


图5 四机位规划（不加柱子）

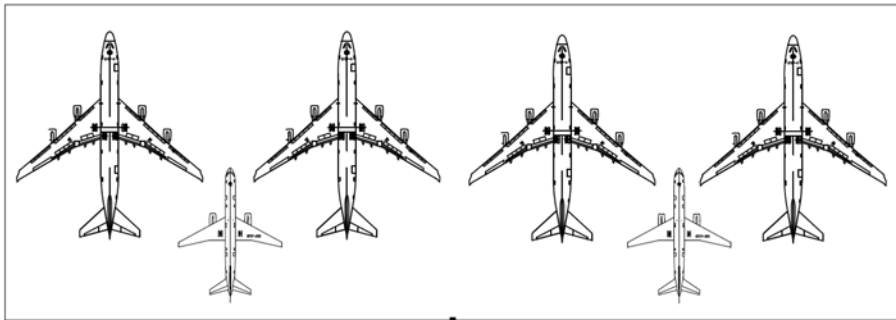


图6 四机位规划（加柱子）

置4个机位，重点分析4个机位如何组合达到综合最优。

(1) 生产流程

生产流程是反映机位规划方案在物料运输、车辆运行及人员流动等方面的顺畅程度。

机位布置越集中，一方面飞机零部件、航材件在车间之间的运输更快捷，另一方面附楼车间的共享程度越高，车间使用更为高效经济。如果

一个基地需要4个宽体机位，可分析建设2座两机位机库、1座三机位机库及1座单机位机库、1座四机位机库。如图7所示，两机位机库之间的物流运输包含2座机库大厅的物流、机库大厅与附楼的物流、两机库附楼之间的物流联系，物流运输路径长，运输高峰时期存在交叉；或者两机位机库所有的物流运输集中在本机库内部解决，由此带来的是每座机库均需要重复建设同样的所有设施，

设施的综合利用和集成度不高。图8为三机位与单机位机库生产流程图，原理同图7。图9为四机位机库物流运输示意，附楼设置一条物流通道，服务大厅与附楼以及附楼内部车间物流联系，所有物流活动均在本建筑物内完成，生产效率高。

(2) 生产管理

在通常情况下，机库的生产管理与飞机维修深度、组织形式等有关。不同的维修企业生产管理模式不尽相同，有按照飞机维修生产线进行管理、按照机库编号管理、按照机库大厅和附楼车间分别管理等几种不同形式。通过调研分析，不论哪种管理模式，机位相对集中，管理越便利，所需的管理人员也越少，一些共用设施所需投入的人力也越少。

(3) 工艺设备共用性

机库大厅工艺设备主要有吊车、地井、修理坞等。对于修理坞，通常按照机位进行设置。在

深度维修时，考虑每个机位设机头修理坞、机身修理坞和机尾修理坞，因此不同的机位规划形式对修理坞布置影响不大。而吊车通常根据服务距离的长短和工作地需要的吊运繁忙程度确定其数量。地井主要根据机位布置形式配置。

总之，机位布置集中，可以有效减少吊车数量，同时可以更为合理的布置地井以服务各个机位。

附楼维修车间采用集中建设方式，一方面避免了工艺生产设备重复投资，减少了工艺设备数量，如钣金车间剪板机等通用设备、喷漆间喷漆干燥设备、内饰件打磨设备等可以共享，提高设备利用率。另一方面将相应的技术人员适当集中，更有利于维修水平的提高和发挥，为企业技术竞争力的提升创造条件。

(4) 结构用钢量

机库作为大空间建筑，可供选择的结构形式

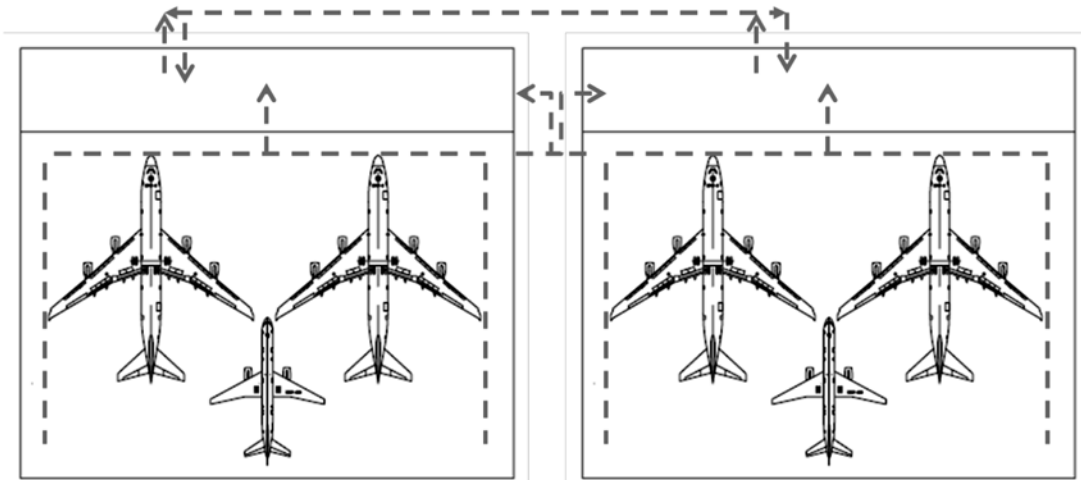


图7 两机位机库之间生产流线示意图

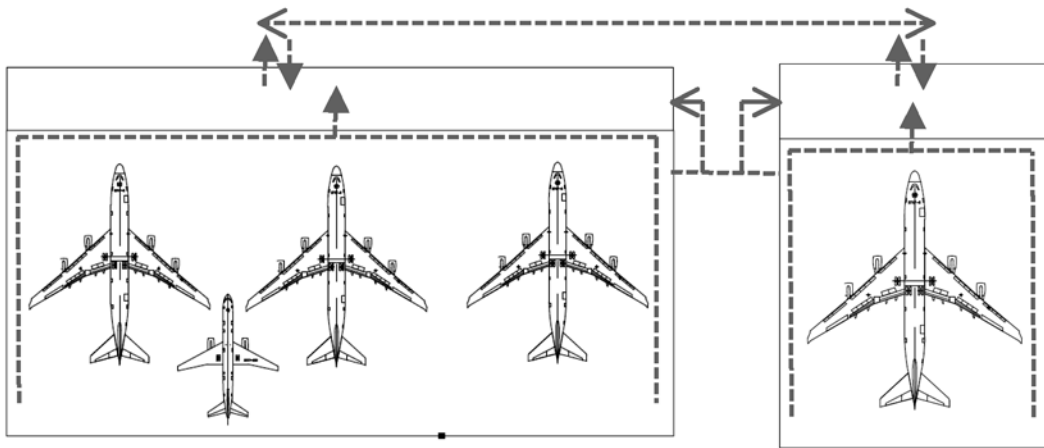


图8 三机位机库与单机位机库之间生产流线示意图

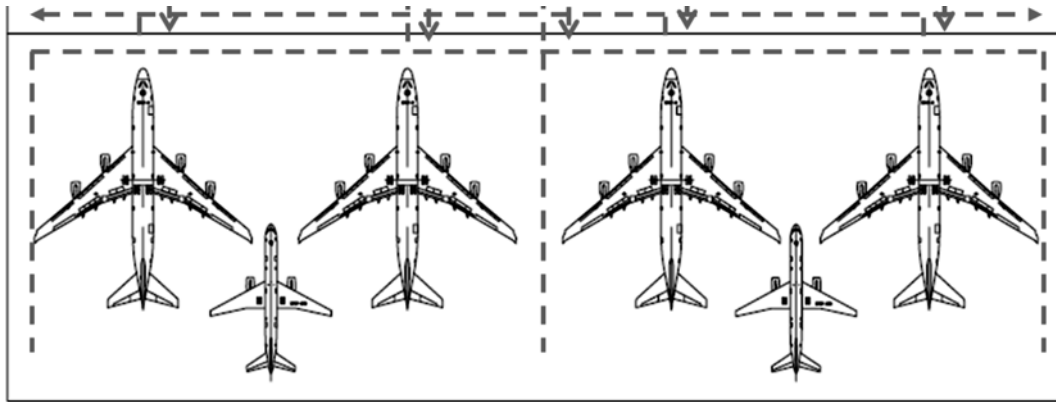


图9 四机位机库生产流线示意图

表2 不同机位规划形式—结构分析

机位规划	两机位 (跨度160m~170m)		三机位 (跨度230m~240m)			四机位 (跨度320m~330m)	
	不设中柱	设中柱	不设中柱	设偏柱	不设中柱	设中柱	设两个柱子
用钢量估算	110~120 kg/m ²	70~80 kg/m ²	170~180kg/m ²	100~110 kg/m ²	200kg/m ²	105~120 kg/m ²	100~115 kg/m ²
建筑高度	不高于40m	不高于40m	高于45m	不高于40m	高于50m	不高于40m	不高于40m
结论	用钢量一般	用钢量最少	可能不满足机场限高, 方案有局限性	用钢量较少	可能不满足机场限高, 方案有局限性	用钢量一般	用钢量较少

有多种, 如空间网架、桁架(包括悬臂桁架)、预应力钢结构、拱架结构等。本论文分析的前提是机库采用空间网架结构, 机库大厅按照B747-8及以下机型考虑, 大厅屋盖按常规设置悬挂吊车、悬挂机坞或悬挂升降平台, 且屋盖活荷载按照 0.5kN/m^2 计算。

对于两机位、三机位或四机位, 在机位规划中均考虑增加柱子或不设柱子两种形式, 分析如表2。

1) 不加柱子的三机位和四机位机库, 建筑高度可能无法满足机场区域限高的要求, 方案有局限性。

2) 相比单跨结构, 连跨结构内力峰值更小, 内力分布更均匀, 从而可以实现屋盖用钢量减小的技术优势, 在不影响机库功能的前提下, 设置柱子的方案经济性更优。

(5) 建筑效果

从整体建筑效果而言, 三机位机库在 $1/3$ 跨设置中柱会影响整体建筑立面效果, 四机位机库则在建筑立面还是整体气势上都要更有优势。两机位机库则相对简约。

(6) 用地集约性

不同的机位规划形式占地面积不同, 机位布置集中, 可以有效节省建设用地, 减少由于物理分隔而带来的土地浪费。

5 结论

根据上述分析, 针对基地所需4个宽体机位的规划, 对不同机位规划方案的比选分析见表3。

表3 机位规划方案比选

	生产流程	生产管理	工艺设备共用性	结构用钢量	建筑效果	用地集约性
两机位+两机位规划	较好	较好	较好	较好	较好	较好
三机位+单机位规划	较好	较好	较好	好	一般	较好
四机位规划	好	好	好	较好	好	好

从表中各项影响因素可以看出, 对于业务量饱满的维修企业来说, 确需建设4个机位时, 四机位建设方案相比两机位+两机位、三机位+单机位的建设方案, 具有更多优势。

航空线束三维全信息模型 数据集组织方法

■ 王春阳 丁蕾 (工艺)

摘要: 在航空线束的设计制造一体化进程中, 三维全信息模型作为唯一数据源, 其数据集组织方法直接影响信息模型的性能, 是建模的基础和核心。本文以物料表(BOM)作为方法载体, 通过设计、制造等阶段数据模型的演化, 实现对三维全信息模型的数据组织, 为航空线束三维全信息模型的数据表达与应用提供了基础支撑。

关键词: 航空线束; 设计制造一体化; 三维全信息模型; 数据集组织方法

随着装备向电子化、信息化发展, 线束的复杂程度和重要性越来越得以提升, 在客运飞机、航天器、高速铁路等大型复杂装备中的地位日益重要, 线束的互联可靠性直接影响到产品性能和安全性。我国航空线缆的数字化制造水平还停留在较低的层次。研制过程中的产品信息缺乏良好的集成方式和表达方式, 数据定义未规范化, 不能将设计信息、制造信息高效、直接地展现给使用者。研究航空线束设计信息、工艺信息、维修信息等各阶段的信息内容, 构建面向全生命周期的线束产品三维全信息模型并研究信息的集成表达方式是十分必要的。

本文基于飞机线束的产品特点、工艺规范的现状和所面临问题, 提出基于物料表(Bill of Materials, BOM)作为信息的组织方法, 将多领域信息与三维模型进行集成, 实现MBD模型下线束多领域信息集成。线束的三维全信息模型由设计阶段模型、制造阶段模型、维修阶段模型等多

个子阶段模型相互演化、彼此融合组成。

1 线束产品EBOM组织方法

EBOM组织结构的逻辑可以使用层次结构树来表达。线束装配体作为根结点, 其EBOM中包含GBOM和LBOM两部分。GBOM中包含具有三维几何信息的零件, 如电连接器、死接头、接线柄、线束段、标志牌、各类防护套管、卡箍等。在层次结构树中, GBOM的结点下包含各类零件的子结点, 如电连接器子结点, 子结点下列举了模型中包含的此类零件的所有实例。LBOM包含线束装配体中的全部导线。LBOM的结点下包含始—终端子间的线束段的子结点, 线束段子结点中包含导线实例。在EBOM中, 实际上是将GBOM、LBOM作为虚拟部件以实现对线束零件的区分, 这种划分在实际的线束中并不存在。在EBOM结构树中, 所有的线束零件都只定义一次就可以随时随地被调用, 由此降低了EBOM的数据冗余度, 提高了其一致性。线束装配体EBOM

作者简介: 王春阳, 男, 工程师, 2017年毕业于北京理工大学工业工程专业, 现就职于航空工业规划电子工程设计研究院。

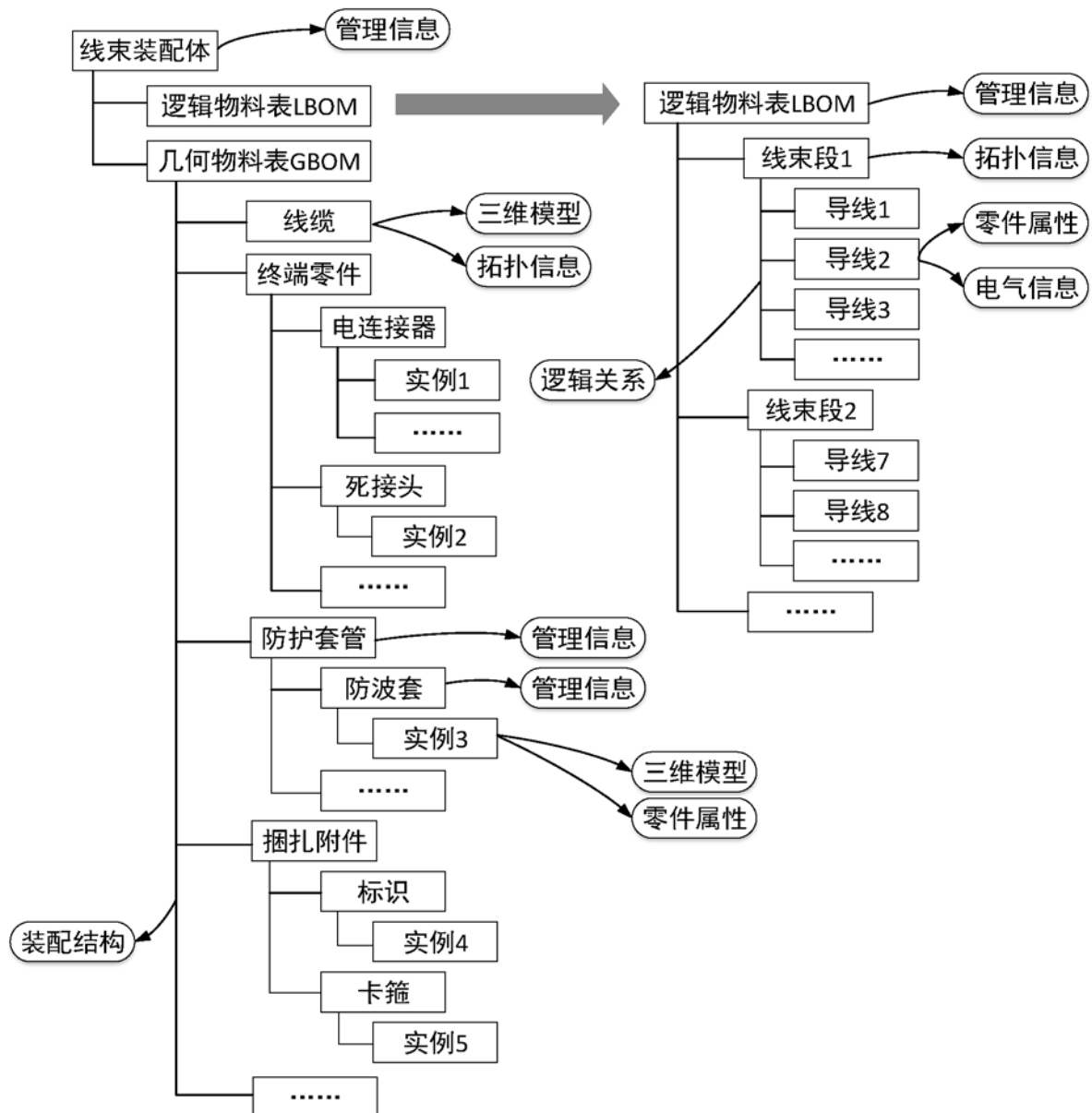


图1 线束EBOM层次结构树组织形式

的层次结构树组织形式如图1所示。

2 EBOM向PBOM、MBOM的演化方法

EBOM、PBOM、MBOM是线束产品研制过程中分别用于原型设计、工艺设计、指导制造过程的BOM。线束研制过程中的工艺编制直接面向制造过程，其PBOM和MBOM的界限模糊，可以将二者等同。从EBOM向PBOM/MBOM演化时，首先要确定制造的工艺过程，针对不同的工艺过程，划分装配单元。据此进行产品的结构调整，重组BOM层次结构，并添加工艺信息。PBOM/

MBOM要进行数据一致性检查，与EBOM进行信息比对，确认数据一致后，形成最终的PBOM/MBOM。线束产品BOM的演化流程如图2所示。

3 线束产品PBOM组织方法

在线束的工艺准备阶段，工艺部门在EBOM的基础上，按照制造要求重新定义线束的装配关系、增加工艺约束信息、兼顾表达典型工艺过程，最终演化形成工艺物料表（Process BOM，PBOM）。在工艺设计中，需要添加剥线、端接、接触偶装配、屏蔽处理、死接头处理的工艺

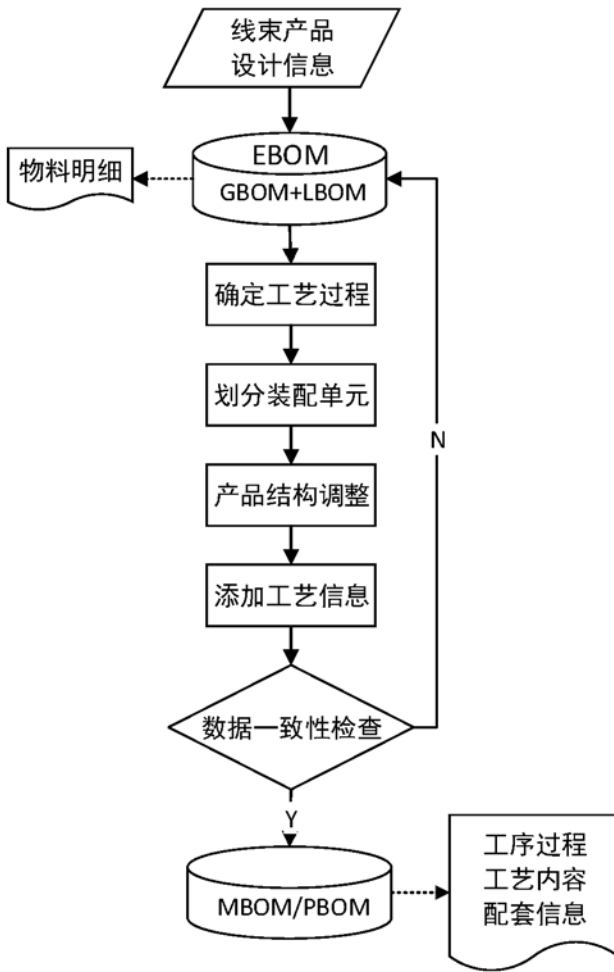


图2 线束产品BOM的演化流程

约束信息，而这些工艺过程在线束中发生的部位都集中在导线的端头与终端零件的连接处，围绕终端零件组成装配单元。在构建PBOM时，应当重构层次结构树，重点体现导线与终端零件的连接关系。

线束由EBOM到PBOM的演化要求如下：

(1) PBOM中根结点仍然为线束装配体，二级结点继承于EBOM的GBOM结点，取消对GBOM和LBOM的虚设部件的划分。

(2) 终端零件的节点下包含电连接器、死接头、接线柄等三级结点，各结点下包含本类零件的实例，各零件实例下包含导线子结点。原LBOM中的导线实例重构在与之相连接的终端零件的导线子结点下。

(3) 导线的两端各接一终端零件，因此在PBOM中必定会出现导线被两个终端零件引用两次的情况。由于导线实例的数据源来源于

LBOM，PBOM中只对其进行引用，因此工艺人员在给同一导线实例的任意一次引用添加工艺信息时，这种改动都会反馈在LBOM的导线实例中。

(4) PBOM的层次结构关系与工艺设计的联系是：

1) 剥线、端接工艺的作用对象是导线，工艺约束信息集成在导线实例中，工艺人员以终端零件为目录索引，依次编制各终端零件的导线工艺，直至遍历所有导线。

2) 接触偶装配、屏蔽处理的作用对象是接在同一电连接器端的全部导线。在工艺编制时，工艺人员以各电连接器及其关联的导线为作业单元，依次添加屏蔽处理的工艺信息，直至遍历所有电连接器。

3) 死接头处理的作用对象是死接头及与之连接的导线。在工艺编制时，工艺人员以各死接头为作业单元，添加死接头工艺约束信息，直至遍历所有死接头。

三维工艺模型中PBOM的层次结构树的组织形式如图3所示。

4 线束产品MBOM组织方法

线束制造过程以装配为主，工艺设计围绕着典型装配工艺过程展开，其结果直接为制造现场所使用，故线束中的工艺物料表包含在制造物料表中。MBOM面向制造过程，体现的是线束产品装配的层次结构和装配路线。PBOM到MBOM的演化过程如下：

(1) 线束装配体作为根结点，取消对终端零件的分类表述，将线束段的作为二级结点，线束段包含终端零件和导线两个三级结点，并在下面集成零件实例。

(2) 线束段作为布线、导通测试制造过程的虚拟部件，在实际的线束装配体中不包含这样的定义，这样的划分是为了方便表述装配的工艺过程。

(3) 该MBOM的层次结构关系与制造过程的联系是：

1) 对于布线环节，需要通过始—终端电连接器实现对导线路径的索引。MBOM中将导线和与之相连的电连接器组织在一起，正体现布线过程的信息组织需求。

2) 对于导通测试环节，需要通过导线与电连

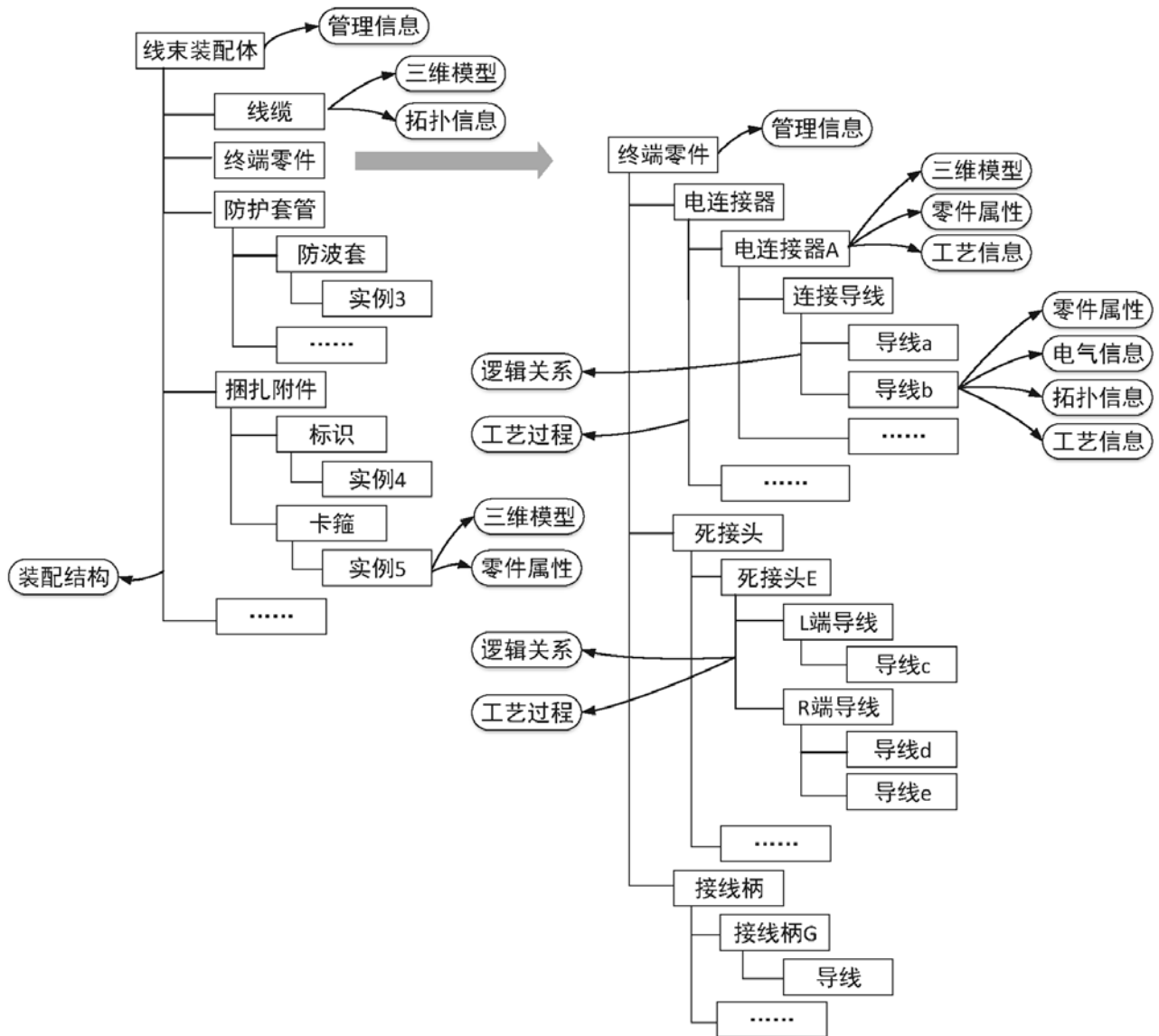


图3 线束PBOM层次结构树组织形式

接器的接线关系，明确始——终端电连接器中哪些接触偶彼此连通，应进行导通测试。

面向布线、导通测试的MBOM的层次结构树的组织形式如图4所示。

5 总结

本文以BOM作为载体提出了航空线束三维全信息模型数据集的组织方法，结合机械产品的BOM演化理论和线束产品的特点，提出了三维环

境下面向线束的BOM组织方法。EBOM作为线束三维数字化定义的初始阶段，为后续BOM的演化提供了基础，线束的MBOM表达了面向制造过程的产品组织结构，为达到这一目的，本文依照工艺过程将MBOM划分为面向剥线、端接、接触偶装配、屏蔽处理、死接头处理的PBOM和面向布线、导通测试的MBOM两部分，并引入虚拟部件以在MBOM中体现各工艺过程的装配单元。此方法为航空线束三维全信息模型的数据表达与应用提供了基础支撑。

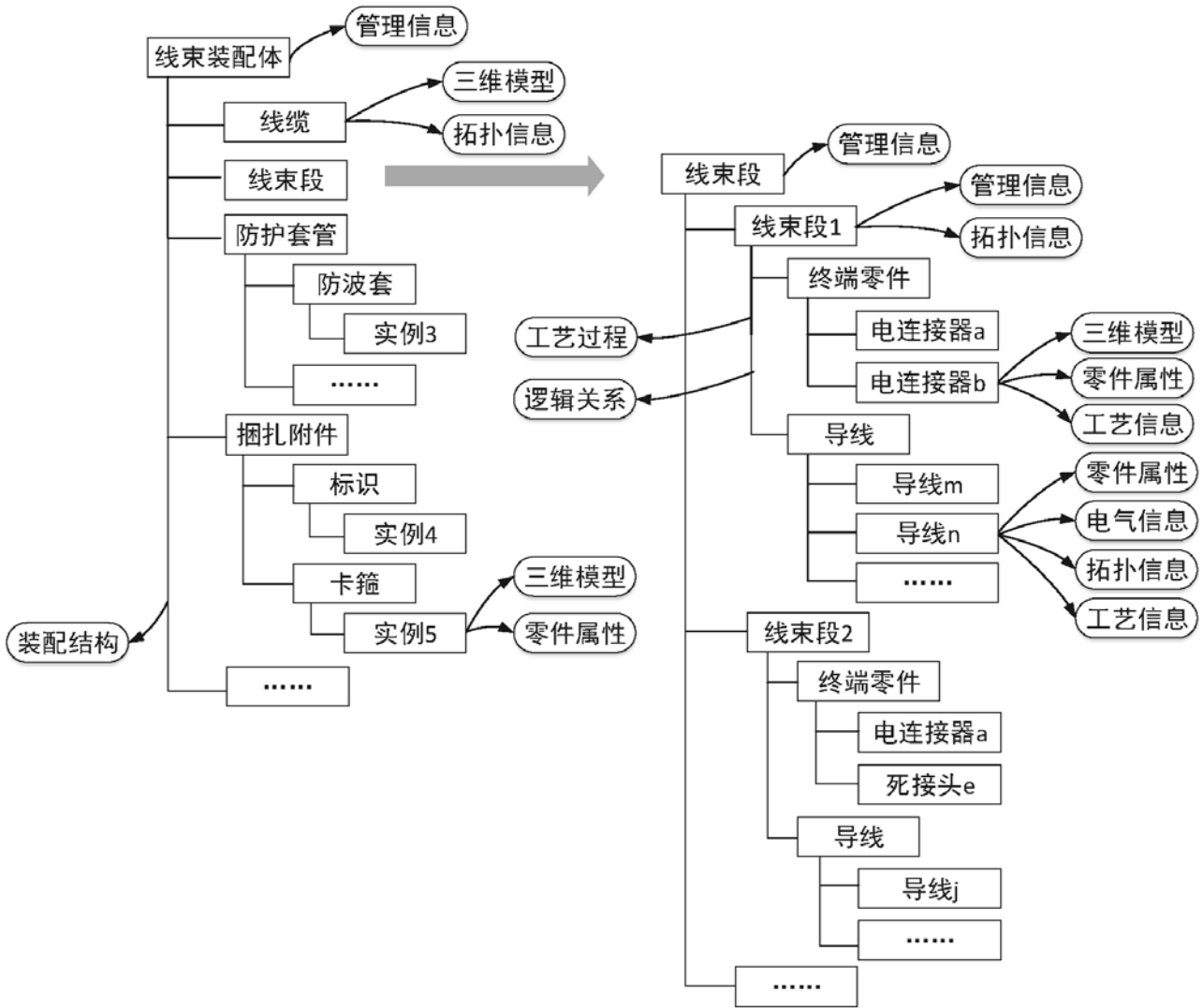


图4 面向布线、导通测试的MBOM层次结构树组织形式

参考文献

[1] 范玉青,梅中义,陶剑. 大型飞机数字化制造工程[M]. 航空工业出版社,2011.
 [2] 范玉青. 现代飞机制造技术[M]. 北京航空航天大学出版社,2001.
 [3] M.Alemani F. Destefanis E. Vezzetti. Model-based definition design in the product lifecycle management scenario [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology.2011,1-4:1-14.
 [4] DEF STAN 05-10 part2. Digital product definition information, GLASGOW, 2006: 7 April 2006.
 [5] 唐林. 全三维环境下的设计制造集成技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2011.

[6] 张伟. 面向生命周期的复杂产品数字样机建模方法的研究[D]. 天津大学,2007.
 [7] 王占富,孙世峰,丁来军,等. 基于MBD的发射装置全生命周期数字化定义应用[J]. 制造业自动化,2013(16):131-133.

建立健全民用航空发动机 基础研究能力体系

■ 刘亚 岳南 刘琨 (工艺)

摘要: 基础研究能力是航空发动机不断发展的根基,国内基础研究能力比较薄弱,需借鉴国外发展的成功经验,尊重科学发展的客观规律。本文总结归纳了国外航空发动机的特点,以建设健全的基础研究能力体系。

关键词: 基础研究;压气机;

1 概述

航空发动机是复杂的系统工程,需要集成从基础研究、工程验证、使用发展全过程的系统研究成果,而其中基础研究是航空发动机技术梯次推进和不断发展的根基,是航空发动机不可逾越的发展阶段,脱离了基础研究,航空发动机发展就是无本之木,无源之水。

航空发动机基础研究主要包括航空发动机系统科学、气动力学、声学、结构与振动力学、传热学、燃烧学、控制科学、机械传动与摩擦学、材料学、制造工艺学等众多学科和试验与测试、数值仿真等基础技术以及它们之间交叉融合而成的新兴学科,技术成熟度为1~3级为主,贯穿发动机基础研究、工程验证、使用发展等全过程,是形成航空发动机研制能力体系的基础。

2 国外航空发动机建立了完善的基础研究能力

法国发动机研发体系由大学技术研发中心、法宇航等专业研究机构和斯奈克玛公司(简称SNECMA)等发动机研发单位共同组成。其中大学技术研发中心主要承担技术成熟度1~2级的基础研究,对应图1中的机理研究;法宇航等专业研究机构主要承担技术成熟度3~6级的技术发展及验证,提高技术成熟度,提供设计研发工具支持;大学技术研发中心和法宇航共同构成了发动机公司的技术基础,完成从机理研究、应用研究和技术验证的技术发展过程,斯奈克玛公司等发动机研发单位则采用经过验证的成熟设计技术、工具,解决型号研制中的工程问题,完成产品研发过程。

在试验能力方面,法宇航建有平面叶栅、压气机等实验设备,可系统开展航空发动机叶轮机械气动研究,为斯奈克玛公司等发动机公司提供技术支持及验证,同时发展如非接触测量等先进

作者简介:刘亚,男,工程师,2010年毕业于北京航空航天大学规划咨询评估专业,现就职于航空工业规划航空业务部。

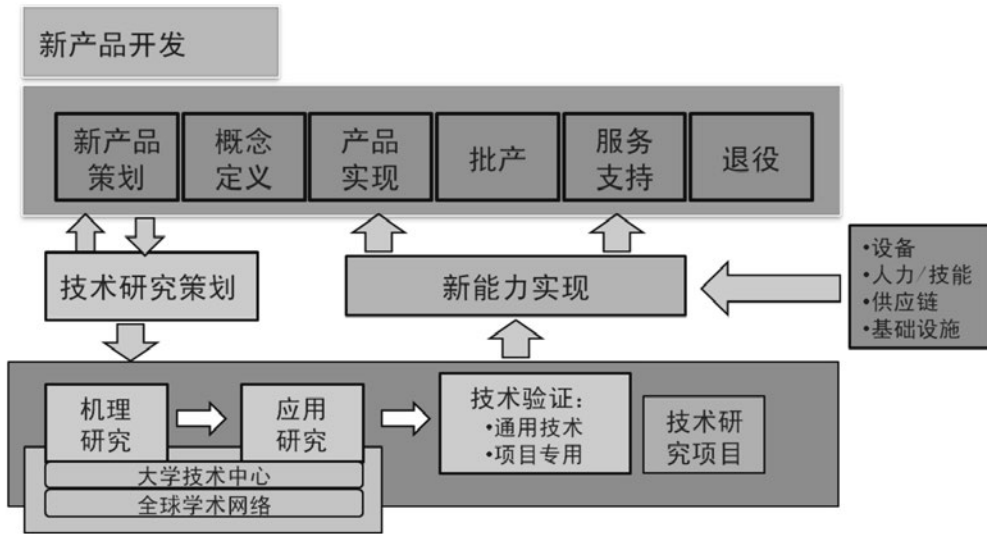


图1 斯奈克玛公司新产品开发流程

NASA研究范围为技术成熟度1~6

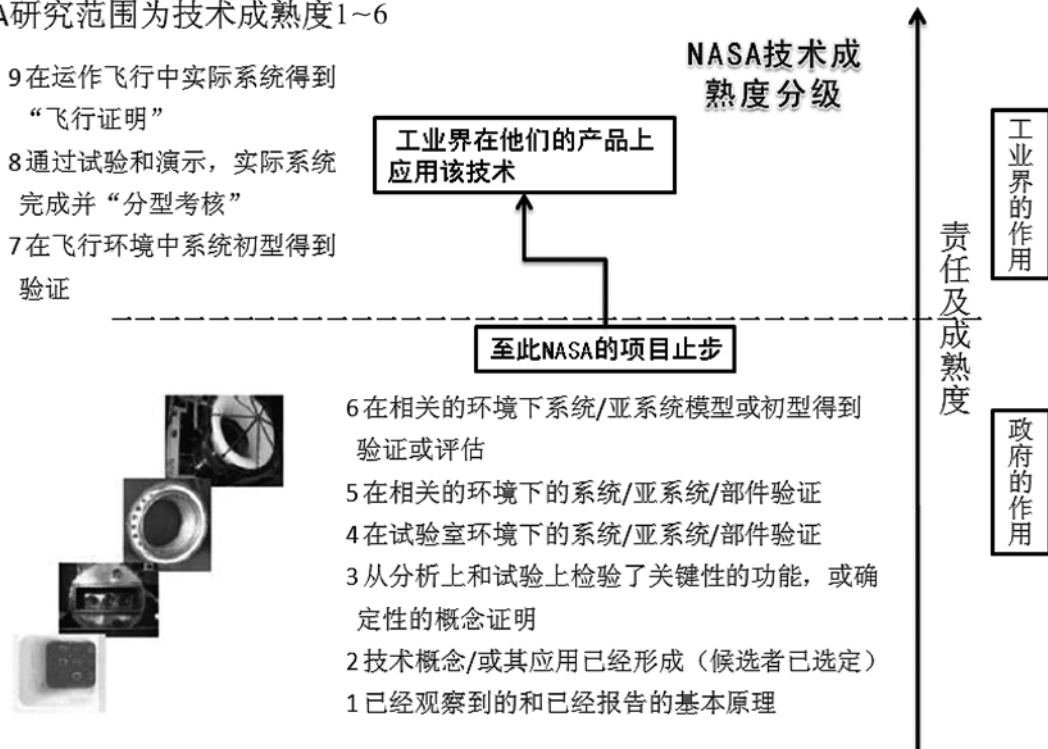


图2 NASA技术成熟度分级

叶轮机械测试技术；在大量实验数据的支持下，开发并验证以三维非定常流动数值模拟计算代码为代表的叶轮机械数值计算程序和方法，为工程研制服务。

美国发动机研制体系由高校、研究机构和发动机公司组成，格林中心致力于飞行器及发动机的气动力问题研究，并将革新技术转化成工程应

用提供给通用、普惠等工程应用公司，用于未来美国军、民领域，如图2为美国国家航空航天局（简称NASA）技术成熟度分级。格林研究中心在NASA主导的许多航空发动机研究计划中都发挥了举足轻重的作用，取得了很多成果。如格林中心领导了“高效能源发动机计划（EERP）”，用于开发和验证喷气飞机有效减少排放和提高燃

油经济性的先进技术。这些技术使波音777装配的GE90发动机成为当时世界上最好、最强大的发动机。为支持NASA 1975—1985的“高效能源发动机(EEE)”和“发动机部件改善(ECI)”研究计划,格林开发了第一代用于发动机气动设计的计算机程序,利用这些计算机程序设计的压气机具有更小的叶尖和端壁压力损失,更高的工作压比,更少的叶片数量。

在试验能力方面,格林研究中心建有8座流体物理研究实验设备,开展激波、边界层、分离流、传热、冷却和稳定性等方面的流动现象及原理研究,并建有11座叶轮机械实验设备,包括低速压气机、多级压气机/风扇、单级轴向压气机、小型引擎部件压气机等实验台,开展先进航空发动机压气机和涡轮部件的基础研究及应用研究,还建有15座侧重功能不同的燃烧室实验设备,用于支持低排放燃烧室的研究以及发展先进的燃烧测试技术。在众多实验设施的基础上,格林研制验证了先进的光学流动和温度测量技术,包括激光测速、瑞利散射等,用于收集发动机叶轮机和燃烧部件以及湍流排气射流等方面的流动信息。同时,格林于1998年还开发了国家燃烧室代码(简称NCC),与叶轮机性能预测程序(简称APNASA)联合使用,能预测整个燃气涡轮发动机的性能。

3 结语

归纳国外航空发动机的研究能力有如下特点:

(1) 研制能力体系由高校、研究机构和发动机公司组成,高校负责基础研究,法宇航、格林研究中心等专业研究机构负责应用研究,斯奈克玛、通用、普惠等发动机公司主导产品开发,三者密切结合,共同发展;

(2) 从基础研究,到应用基础,再到验证实验台,覆盖了发动机研制过程的各个环节;

(3) 对发动机的工作环境的模拟能力非常强,能够实现部件多学科耦合的试验和测试需求,实验得到的理论模型和方法更适合于发动机;

(4) 测试能力非常强,从纳观,到微观,再到宏观的各个尺度的物理量,都能有很好、高精度的测试。

我国应充分借鉴国外航空发动机发展的成功经验,认真总结我国航空发动机发展的经验和教

训,尊重科学发展的客观规律,大力加强基础研究,夯实基础,建立健全基础研究能力体系。

参考文献

- [1] 方昌德.航空发动机的发展研究.航空工业出版社,2009年7月1日版.
- [2] 刘大响,陈光.航空发动机飞机的心脏.航空工业出版社,2015年5月第2版.
- [3] 李建榕,弓志强,李博.航空发动机基础研究体系建设的思考.航空动力,2018年8月.

发动机装配过程 关键参数的检测与溯源

■ 张勤 田恺 杨阔 [工艺]

摘要: 航空发动机装配过程复杂,中间贯穿着各种工艺参数的检测,关键工艺参数的准确测量是保证发动机装配质量的关键。本文提出了基于发动机装配流程的关键参数体系建立方法,通过梳理发动机装配过程中的关键检测设备和校准设备,建立从装配工艺参数、关键检测设备、校准设备到计量标准的量值溯源体系。

关键词: 发动机装配;关键参数;检测设备;量值溯源

0 引言

航空发动机装配过程是将发动机零件按照装配工艺确定的组合顺序,采用相应的工艺手段和装备,逐步形成零件、组件、单元体、整机发动机的过程。航空发动机装配过程包含检测、调整、连接、安装、再检测,直至达到装配目标的工作过程,自始至终贯穿着各种工艺参数的检测活动。发动机装配的过程中大量应用着各种复杂的装配工装、设备,而工装与设备的准确度、可靠性直接决定了发动机产品的装配质量和性能。

本文基于航空发动机装配工艺过程,提出装配过程关键参数体系的建立方法,通过梳理装配过程关键检测设备和校准设备,探讨建立面向发动机装配过程关键参数的量值溯源体系。

1 发动机装配过程关键参数

建立发动机装配过程关键参数体系是研究发动机装配过程参数量值溯源体系的基础,考虑到参数的种类繁多、数据量庞大,并且贯穿发动机装配的整个过程。本文拟按照发动机装配关系建立关键参数体系,既体现了参数的层级关系,又便于后续建立数据库查询。

1.1 发动机装配工艺流程

典型航空发动机装配工艺流程:首先进行维修单元体装配,即将零组件按照正确的相对位置、规定的配合精度,通过可靠的联接装配成中

介机匣、高压压气机、燃烧室、高压涡轮、低压涡轮转子等维修单元体;其次是主单元体装配,即将维修单元体进行组装,形成完成风扇/增压级、核心机、低压涡轮和附件传动装置等主单元体;最后进行整机装配,即主单元体之间的组装,以及外部管路的安装^[1]。

1.2 关键参数体系

按照发动机装配关系,发动机装配过程关键参数体系分为维修单元体装配过程参数、主单元体装配过程、整机装配过程3个层级。通常为了保证发动机的性能,发动机装配过程参数不仅包括零组件尺寸或配合尺寸的检测,同时也包括工艺过程参数的检测,如螺母拧紧力矩等。发动机装配过程关键参数体系如表1所示。

表1 装配过程关键参数体系表

装配级别	装配过程	关键参数
整机装配	整机	拧紧力矩
		内外径间隙
主单元体装配	核心机	拧紧力矩
		叶尖间隙
		安装边厚度

维修单元体装配	中介机匣	拧紧力矩
		端面跳动
		柱面跳动
		安装边厚度
		安装边跳动

	高压压气机	外径
		内径
		转子不平衡量
		螺栓重量差
...	...	
...

2 关键检测设备与校准设备

梳理分析发动机装配过程关键检测设备和校准设备是研究发动机装配过程参数量值溯源体系的基本条件。装配过程参数特殊、复杂,装配

作者简介:张勤,女,工程师,2012年毕业于西北工业大学航空宇航制造工程专业,现就职于航空工业规划动力工程设计研究院。

过程需要用到大量的检测设备,包括专用和通用设备。下文以某型涡扇航空发动机为例,梳理发动机装配过程中用到的关键检测设备以及校准设备^[2]。

2.1 关键检测设备

精密转台:用于机匣、鼓筒、盘、轴等零件的跳动量的检测。例如维修单元体装配中的机匣、盘等的端面跳动、柱面跳动、安装边跳动,主要技术指标如下所示:径向回转误差 $\leq 0.0002\text{mm}$;平面度 $\leq 0.015\text{mm}$;台面跳动 $\leq 0.020\text{mm}$ 。

三坐标测量机:用于零部件的几何要素尺寸、形状、位置精度的测量,例如机匣内外径、安装边厚度等,主要技术指标如下所示:测量范围 $1500\text{mm} \times 2200\text{mm} \times 1000\text{mm}$;最大允许示值误差为 $\pm (1.9+L/375) \mu\text{m}$ 。

平衡机:用于航空发动机压气机及高压涡轮转子的平衡,用于转子不平衡量的测量主要技术指标如下所示:最大回转直径 $\Phi 800\text{mm}$;剩余不平衡量 $\leq 10\text{g}\cdot\text{mm}$ 。

高速叶尖磨床:用于航空发动机压气机和涡轮转子叶片的叶尖磨削,去除叶片叶尖毛刺,并实现发动机转子叶尖外径的测量,主要技术指标如下:叶片半径测量范围(150~750)mm;最大允许误差为 $\pm 0.012\text{mm}$ 。

电子天平:用于物体质量的精密称重,在航空发动机装配中工艺中,一般用于非常精密的小零件的称重测量。例如低压涡轮转子装配过程中螺栓重量差的测量,主要技术指标如下:测量范围(0~420)g;准确度等级为II级。

扭矩扳手:用于螺栓的紧固,例如装配中所有螺栓的连接,主要技术指标如下:测量范围(2~200)Nm;最大允许误差为 $\pm 3\%$ 。

塞尺:用于间隙尺寸的测量,例如涡轮转子叶尖间隙,主要技术指标:测量范围(0.02~3)mm;最大允许误差为 $\pm (5\sim 28) \mu\text{m}$ 。

2.2 校准/检定设备

量块:用于千分表、塞尺、三坐标测量机等检定,主要技术指标为:测量范围(5.12~500)mm;准确度等级:3等、4等、5等。

扭矩扳手校准装置:用于扭力扳手等的校准,主要技术指标为:测量范围(0~2000)Nm;最大允许误差为 $\pm 0.1\%$ 。

电子水平仪:用于精密转台台面平面度的检定或校准,主要技术指标:测量范围(0~50) μm ;最大允许误差为 $\pm (1+A \times 2\%) \mu\text{m}$ 。

万能测长仪:用于塞尺等的校准,主要技术指标:测量范围为(0~1000)mm;最大允许误差为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

标准砝码组:用于各类电子秤、电子天平、吊秤等的检定或校准,主要技术指标:测量范围为1mg~1000kg;准确度等级为E2等、F1等、F2等、M1等、M2等。

3 关键参数检测与量值溯源体系

目前量值溯源工作突出的问题是仍停留在校准设备上,缺乏针对发动机装配工艺过程参数检测需求所开展的参数量值溯源体系。梳理分析检测设备的量值溯源性,是建立发动机装配过程参数量值溯源体系的重要内容。基于梳理的发动机装配过程关键参数体系,建立从装配工艺参数—检测设备—校准设备—计量标准的参数溯源链。具体过程是:根据关键参数体系,梳理参数对应的检测设备、检测设备的校准设备、以及溯源至计量标准的对应关系。以核心机装配过程为例,关键参数溯源体系如表2所示。

表2 关键参数检测与量值溯源体系表

装配过程	装配工艺参数	检测设备	校准设备	计量标准
核心机 装配	拧紧力矩	扭矩扳手		扭矩扳手 校准装置
	叶尖间隙	塞尺	万能测长仪	三等量块
	安装边厚度	三坐标测量机		三等量块
	...			

4 结束语

航空发动机装配具有涉及零件多,装配关系复杂,装配工艺要求严格等特点,本文通过梳理航空发动机装配过程关键参数体系,建立了从装配工艺参数、关键检测设备、校准设备到计量标准的量值溯源体系,能够指导发现发动机装配过程参数溯源体系中的不足,明确发动机装配质量体系建设方向。

参考文献

- [1] 于宏军,朱瑾. 基于单元体设计的航空涡扇发动机装配标准研究[J]. 标准化研究, 2016, (8): 4-6.
- [2] 姜伟等. 装配试车技术. 北京: 科学出版社, 2002.

军民融合背景下 区域产业结构调整与升级研究 ——以安顺地区为例

■ 岳南 刘亚 [工艺]

摘要：军民融合已上升为国家战略，军民融合产业发展是传统军工产业区域实现产业结构调整与升级的关键路径。文章以安顺地区为例，分析在当地军民融合产业发展现状基础上，根据军民融合战略发展指引和航空产业发展规律，构建军民融合产业体系，以期对安顺地区的产业结构调整与升级提供指导。

关键词：军民融合；产业；结构调整与升级

1 背景分析

安顺是我国航空产业重点布局区域之一，拥有多家国有大型航空企业、研究所，航空工业领域基础雄厚。如何实现依托现有优势资源，盘活存量资产，吸引各种渠道资源进入国防安全领域，解决现有军工资产的效率问题，促进军工产业创新升级，为本地产业输入新鲜血液，有效促进本地制造产业发展升级，提升安顺市的战略地位成为亟待解决的问题，因此，在军民融合背景下进行科学的产业选择，对安顺地区产业结构调整与升级具有突出意义。

2 产业发展现状

安顺市目前已经形成装备制造业、能源原材料工业、现代药业、特色食品加工等优势产业加快发展的产业格局，其中装备制造业是安顺市的主导产业之一。2018年，全市装备制造业军民融合产值89.4亿元，同比增长19.5%，对全市工业增加值贡献率为11.5%。安顺军工资源优势突出，

航空积淀深厚，集聚了贵州省航空产业的主要力量，目前已经形成了完整的科研、生产、服务航空产业链，综合实力强，处于国内先进水平。随着国家军民融合发展战略不断推进，安顺市军工企业与民营企业合作逐步加强，民营企业积极参与军民融合建设，军工企业在完成军品业务的同时，积极探索军民结合道路，“军转民”、“民参军”融合发展步伐加快。

但是安顺军民融合产业发展也存在着一些问题，主要包括：军工企业相对封闭状况还没有根本改观，优势民企“参军”的大门仍未打开；航空产业链条后端的通航运营、文化创意、衍生服务等产业能力不足，整个产业链条发展缺乏活力；由于各政府部门缺乏对行业情况的准确把握，导致优惠政策存在盲点；面临国内其他航空产业园的竞争。

3 面临机遇

安顺军民融合产业面临的机遇主要是四个方面，即军民融合进入政策机遇期、通航产业迎来快速发展期、全域旅游面临发展新机遇和临空经济提供发展新路径。

作者简介：岳南，男，工程师，2014年毕业于北京航空航天大学规划咨询评估专业，现就职于航空工业规划航空业务部。

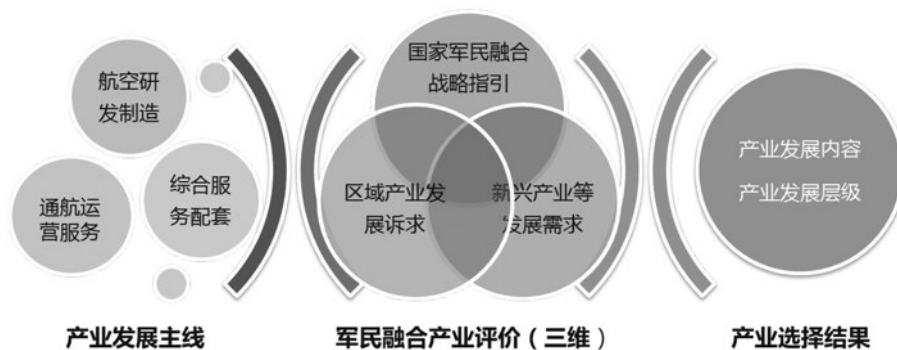


图1 安顺军民融合核心区产业体系构建流程

军民融合进入政策机遇期。中共中央、国务院、中央军委发布的《关于经济建设和国防建设融合发展的意见》标志着军民融合上升到国家战略层面。各级政府高度重视并逐步加快出台政策推进以航空为主的军民融合产业发展，加快构建安顺军民融合产业布局。

通航产业迎来快速发展期。通航产业政策逐步深化，市场潜力将转化为消费能力。全国通用航空器在册总数从2011年的1154架增长至2017年的2595架，增长率达到125%。随着国家对通航发展的高度重视以及低空空域的不断开放，通用航空产业各领域逐渐得到快速的发展，市场潜力即将释放。

全域旅游面临发展新机遇。当前传统旅游开始向文化创意方向发展，中国旅游方式已从初级观光旅游、名山大川游览，逐渐转为休闲体验、文化创意式旅游。安顺作为贵州西线旅游的中心城市，拥有黄果树、龙宫等著名旅游资源，新的旅游发展模式、产业、产品将给安顺旅游发展带来新的市场机遇。

临空经济提供发展新路径。目前，我国已经形成了以北京、上海、广州为中心，以成都、昆明、重庆等省会或重点城市为骨干，其他城市相继跟进的基本格局，覆盖了干支线运输及配套服务、临空高科技产业以及生物医药产业等领域。黄果树机场作为区域支线机场，将逐步带动周边地区临空产业发展。

4 产业体系构建

4.1 构建原则

安顺军民融合核心区产业体系的构建，需要综合考虑产业发展的效益性、匹配性、可持续

性，在航空研发制造、通航运营服务、综合服务配套3条发展主线基础上，一是分析国家军民融合产业战略指引，二是分析区域产业发展诉求，三是考虑新兴产业等发展需求，进行产业发展与地区条件的匹配度分析，得到既有核心竞争力，又符合实际发展条件的产业体系，具体产业体系构建步骤如图1所示。

(1) 军民融合产业战略指引

国家及地方政府已经根据国内外发展形势，颁布了一系列军民融合相关政策措施，诸如中央军委融合发展委员会发布的《军民融合发展战略纲要》、国务院发布的《关于经济建设和国防建设融合发展的意见》以及国防科工局发布的《军民融合专项行动计划2015、2016》，明确了新形势下军民融合发展的总体思路、重点任务、政策措施，为军民融合产业快速发展铺平了道路。在国家政策的引导下，包括军工科研院所改制、军工体系结构改革、资产证券化加速等在内的重大举措有望加速推进，军民融合产业发展趋势一片大好。

(2) 区域发展诉求

随着机场人流量和货运吞吐量的逐年增长，黄果树机场及周边的临空产业发展诉求日益增加，特别是以航空物流为主的临空服务业将借助机场得到大力发展，临空制造业、临空会展和临空商务等产业也将形成有效发展规模；通航运营方面，短途运输是解决西部城市交通发展瓶颈的重要方式之一，依托黄果树机场的通用跑道，提升安顺在西南地区综合交通中的地位，方便地区群众出行。此外，随着经济社会的发展，通航作业因其安全、快捷、方便等诸多属性，在生产和生活领域中应用越来越广泛，安顺在通航作业、城市综合管理等方面有大量的应用诉求。

表1 产业体系匹配度分析

产业门类	具体分项	产业发展前景	地区产业基础	区域资源要素	区域配套设施	匹配度
航空研发制造	军机研制	优	良	优	优	★★★★★
	试验试飞	优	良	优	优	★★★★★
	通用飞机研制	优	良	良	良	★★★★★
	航空零部件	优	良	优	优	★★★★★
	航空机载设备	优	良	优	优	★★★★★
	航空专业化	优	良	优	优	★★★★★
	航空材料	优	良	良	良	★★★★★
	汽车及零部件	良	良	良	良	★★★★★
	临空高科技	良	良	中	良	★★★
通航运营服务	医疗健康	良	良	良	良	★★★★★
	通航旅游	优	优	优	良	★★★★★
	短途运输	优	中	中	良	★★★★★
	私人飞行	优	中	良	中	★★★★★
	通航作业	良	中	中	中	★★★
综合服务配套	通航服务保障	良	中	中	中	★★★
	文化创意	优	中	中	中	★★★★★
	航空物流	优	中	中	中	★★★★★
	临空会展	中	中	合格	中	★★
	临空服务	良	中	合格	中	★★
	综合配套	中	中	中	合格	★★

(3) 新兴产业等发展需求

军民融合产业作为发展载体，与其他产业融合发展能够衍生出众多新兴业态。安顺市依托优质的山水资源和良好的产业发展基础，军民融合产业与新兴创意经济相结合将成为未来重点打造的目标。因此，新兴产业选择成为安顺市军民融合产业

表2 产业体系及细分领域

产业体系		细分领域	匹配指数
1大核心产业	军民融合航空研发制造	军机研发制造	★★★★★
		试验试飞	★★★★★
		通用飞机研发制造	★★★★★
		航空零部件	★★★★★
		航空机载设备	★★★★★
		航空专业化	★★★★★
		航空材料	★★★★★
2大支撑产业	军民融合衍生产业	汽车及零部件	★★★★★
		临空高科技制造	★★★
		医疗健康	★★★★★
	通航运营服务	通航旅游	★★★★★
		短途运输	★★★★★
		私人飞行	★★★★★
		通航作业	★★★
	通航服务保障	★★★	
3大延伸产业	文化创意	航空文化体验	★★★★★
		航空会议会展	★★★★★
	临空服务业	航空物流	★★★★★
		临空会展	★★
		临空商务	★★
	综合配套	生产和生活性配套	★★

选择的重点，需要对各细分产业着重甄别考虑。

4.2 构建过程

产业地区匹配度分析是指各军民融合产业内容本身所需要的资源和发展前提与安顺当地的发展条件相契合的程度。评价指标分为4种类型。

——产业发展前景的匹配程度，所选择的产业与当地主导产业发展方向是否一致。

——产业发展基础的匹配程度，当地产业基础、产业实体、产业规模对产业发展的支撑以及未来延伸发展的可能。

——产业发展内容与当地区位优势条件的匹配程度，当地区位优势、产业布局趋势、产业集聚态势对产业的支撑作用；土地资源需求

与当地土地资源供应的匹配程度；人力资源需求与当地教育资源条件的匹配程度。

——配套基础设施的匹配度：产业与安顺当地机场、交通、市政及其他基础配套的匹配程度。

4.3 构建结果

通过产业匹配度分析，立足安顺军民融合产业基础、资源禀赋和比较优势，突出发展以航空制造为主的军民融合研发制造产业，加快发展军民融合衍生和通航运营两大支撑产业，积极培育文化创意、临空服务业和综合配套三大延伸产业，形成“1+2+3”军民融合产业体系。

参考文献

- [1] 胡红安, 李洋. 我国军民融合产业集群竞争力提升因素分析——以西部航空航天制造业集群为例[J]. 科技进步与对策. 2014(4): 90-124.
- [2] 边慧敏. 积极探索军民融合创新驱动发展新路径[N]. 四川日报. 2018-5-2(02).
- [3] 杜人准, 马宇飞. 国防工业军民融合水平测度与对策研究[J]. 科技进步与对策. 2016, 33(9): 102-116.
- [4] 丁德科, 刘敏, 张兴先. 军民融合: 西部产业结构优化升级的战略选择[J]. 西安交通大学学报(社会科学版). 2011, 31(1): 51-56.

基于TMD的大跨楼盖振动测试与分析

■ 王明珠 (结构)

摘要: 以采用调谐质量阻尼器(TMD)进行振动控制的北京大学附属小学体育管工程为背景,在面层施工前、面层施工后以及装修后等3个施工阶段对大跨楼盖进行详细的现场振动测试,研究了其自振特性的变化情况,同时,在建筑装修完成以后,进行正常使用状态下(学生体育课活动)的现场振动测试,最后,利用Midas Gen有限元软件对TMD的减振效率进行了讨论。结果表明,大跨楼盖的自振频率随着铺设面层以及楼面质量的增加而减小,舒适度设计时应按使用阶段的实际最大荷载考虑;采用有限元软件对楼盖舒适度进行计算时,应考虑面层对楼板刚度的影响;当外部激励的频率与楼盖的自振频率接近时,TMD对楼盖的减振效果最为显著。

关键词: 大跨楼盖; 振动测试; 调谐质量阻尼器; 有限元

近年来,大跨度楼盖结构以隔墙少、空间布置灵活等独特的优势,在大跨空间结构等公共建筑中的使用已日渐普及,如伊金霍洛旗全民健身中心^[1]、北京大学附属小学等多层体育建筑。但是,大跨度楼盖结构竖向自振频率较低,阻尼较小,在人正常活动下就会产生较大的振动,这会产生舒适度问题。为了解决这一问题,可以通过调整楼盖体系的质量和刚度,使楼盖的自振频率尽可能远离行人的步频率^[2],但这种方法会造成经济、美观和空间利用等方面的不合理性,也可以通过增加结构阻尼^[3],使楼盖已经产生的振动较快衰减或者只产生较小的振幅,但是实现难度较大。而调谐质量阻尼器(TMD)具有较好的经济性、合理性,也相对容易实现,它的吸振原理是:当主结构受激励而振动时,质量块随之产生惯性运动,通过质量块的惯性运动将主结构的能量转移到TMD。

本文以北京大学附属小学体育馆工程为背景,对大跨度楼盖在不同施工阶段的自振特性以及装修完成后人群激励荷载下的动力特性进行了现场实测,同时,通过测试对TMD安装前后的减振效果进行了对比,最后,利用Midas Gen有限元

软件研究了装修完成后的TMD减振效果及调频的影响。

1 工程概况

北京大学附属小学体育馆工程(图1)位于北京市海淀区北京大学附属小学内,建筑高度18m,主体结构地下2层、地上2层,局部夹层。其中,6.9m、15m标高楼层均为大跨度楼盖,中心跨度 $36\text{m} \times 36\text{m}$,地上1层和2层顶均采用钢梁—混凝土楼盖组合结构体系。地上2层为篮球馆及室内运动场,层高8.1m,屋顶为室外运动场,TMD分别安装于2层楼盖和3层楼盖处,布置方式如图2所示。



图1 北京大学附属小学体育馆工程

作者简介:王明珠,男,高级工程师,2007年毕业于中国航空工业规划设计研究院结构工程,现就职于航空工业规划工程创新研究院。

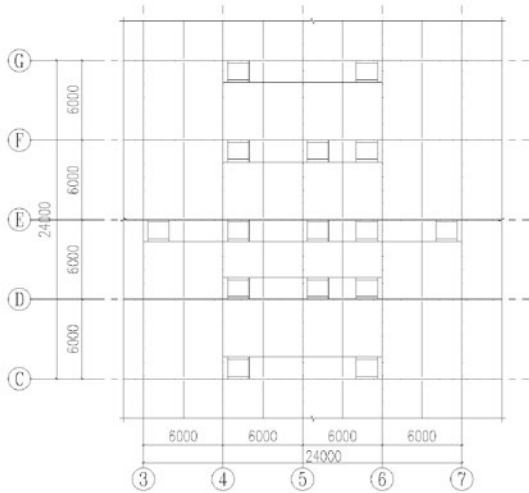


图2 TMD布置图

2 现场测试

为充分了解大跨楼盖振动特性, 并对该建筑物的实际使用舒适度进行预测评价, 针对北京大学附属小学体育馆工程地上2层体育馆和3层室外运动场, 采用多个测试点位, 布置方式如图3所示, 对楼盖的自振特性、人群荷载激励下的动力特性以及TMD的减振效果进行了现场测试分析。

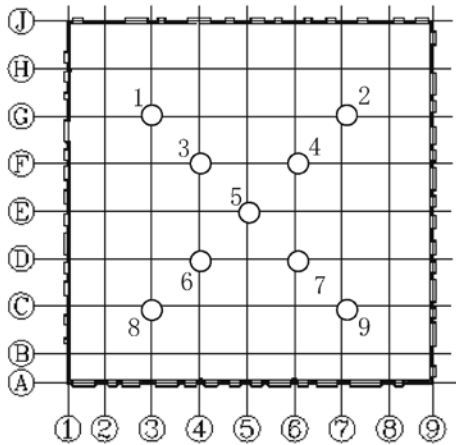


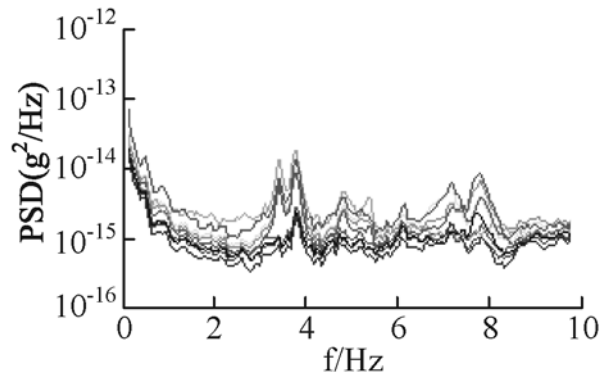
图3 现场测点布置图

2.1 楼盖自振特性测试

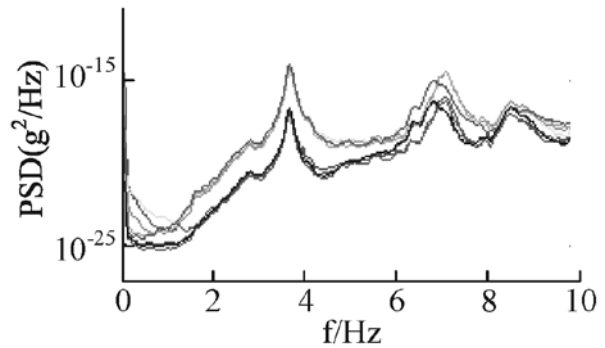
为了明确不同施工阶段对大跨楼盖自振特性的影响, 在无显著外界激励的条件下, 分别对2层楼盖和3层楼盖的自振特性进行现场实测, 测试主要包括3个施工阶段:

- (1) 未铺设面层, 此时TMD锁死;
- (2) 铺设面层后, 此时TMD锁死;
- (3) 装修完成后, 此时TMD打开。

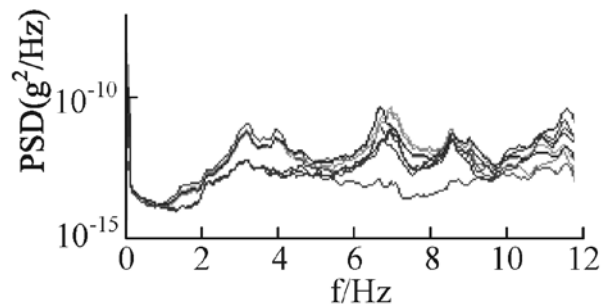
通过现场测试并对数据进行分析, 分别得到了2层楼盖和3层楼盖在3个施工阶段的功率谱密度曲线, 如图4、5所示。采用频域分解法对楼盖进行识别, 由此可知, 2层楼盖在未铺设面层施工阶段的自振频率为3.79Hz, 铺设面层后楼盖的自振频率减小到3.7Hz, 装修完成后楼盖的自振频率再次减小为3.15Hz。而3层楼盖在未铺设面层的自振频率为3.42Hz, 铺设面层后楼盖的自振频率减小到3.33Hz, 装修完成后楼盖的自振频率再次减小为3.05Hz, 具体数值见表1所示。



(a) 未铺设面层

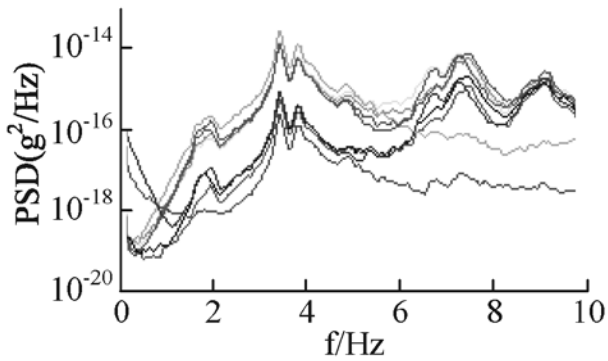


(b) 铺设面层后

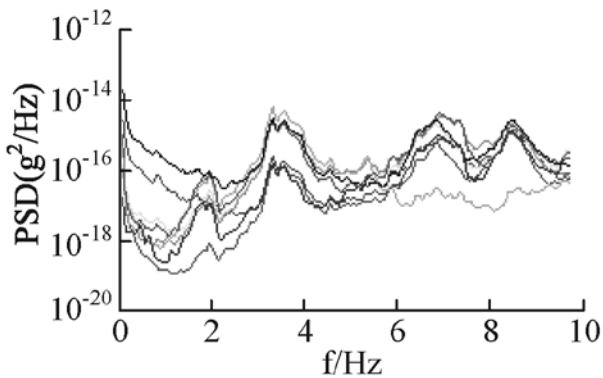


(c) 装修完成后

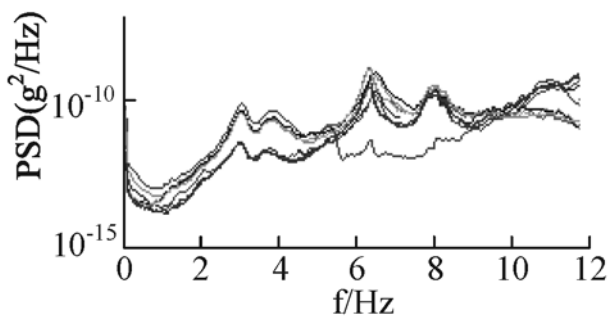
图4 2层楼盖在不同施工阶段的功率谱曲线



(a) 未铺设面层



(b) 铺设面层后



(c) 装修完成后

图5 3层楼盖在不同施工阶段的功率谱曲线

通过表1可以看出,在不同的施工阶段,大跨楼盖的自振频率也不相同,2层和3层大跨度楼盖的自振频率均随着铺设面层和楼面质量的增加而减小,因此,建议设计阶段计算人体舒适度时,楼面活荷载应按使用阶段的实际最大人员荷载考虑。

2.2 人群激励下的楼盖振动特性测试

在室内装修完成以后,选取3个班级的小学生,共计90人,充分考虑了学生在上课时可能出现的各种真实运动荷载,对2层楼盖的振动特性进行了测试,测试工况主要包括:

(1) 整体队列绕篮球场跑步,人员站位及跑

表1 楼盖在不同施工阶段的自振频率

施工阶段	频率/Hz	
	2层楼盖	3层楼盖
未铺设面层	3.79	3.42
铺设面层后	3.7	3.33
装修完成后	3.15	3.05

步路径见图6(a)所示;

(2) 整齐队列跑步,见图6(b)所示;

(3) 学生取篮球并返回,如图6(c)所示;

(4) 楼板跨中位置等间距分散后,有节奏的拍球,拍球区见图6(d);

(5) 学生分散在投篮区进行自由投篮,见图6(d)所示。

选择图3中的2、3、4、5、6、7等测点进行现场测试,通过测试可知2层楼盖各测点在人群激励荷载作用下的加速度峰值,见表2。

表2 2层楼盖的加速度峰值/(m·s⁻²)

工况	测点					
	2	3	4	5	6	7
工况1	0.12	0.11	0.13	0.12	0.11	0.10
工况2	0.08	0.17	0.15	0.23	0.18	0.15
工况3	0.14	0.18	0.14	0.11	0.09	0.08
工况4	0.11	0.16	0.25	0.10	0.10	0.10
工况5	0.17	0.19	0.23	0.08	0.11	0.06

由表2可知,在各工况作用下,楼盖中心5测点的加速度峰值并不是所有测点中最大的,如工况4、5作用下,测点4的峰值加速度显著大于测点13的数值,但是,所有测点的加速度峰值均小于节奏性荷载下振动加速度限值0.5m/s²。

3层体育场属于室外体育场,基于学生安全考虑,未设置篮球架等设施且不进行篮球体育活动,因此,在对3层楼盖进行现场测试时,主要考虑学生的跑、跳等工况,选取4个班级的小学生,共计120人,测试主要包括:

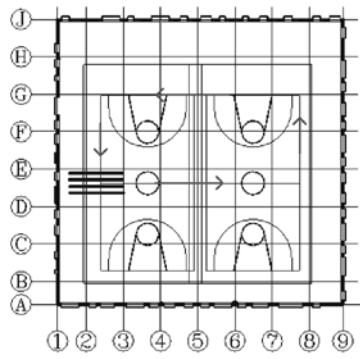
(1) 整齐队列原地踏步,站位如图7(a)所示;

(2) 等间距分散踏步,站位如图7(b)所示;

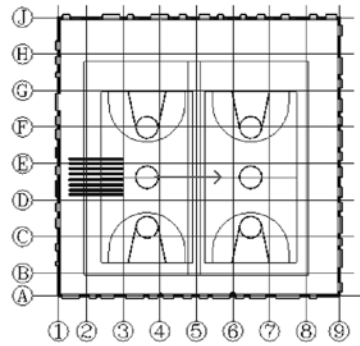
(3) 等间距分散跳绳,站位如图7(b)所示;

(4) 整齐队列跑步,站位如图7(c)所示;

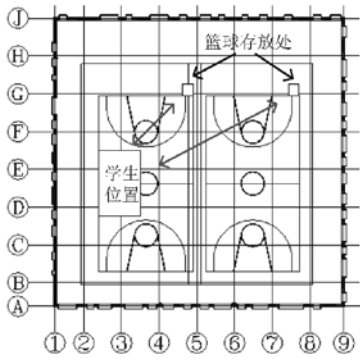
(5) 整齐队列先踏步后跑步,站位如图7(c)所示。



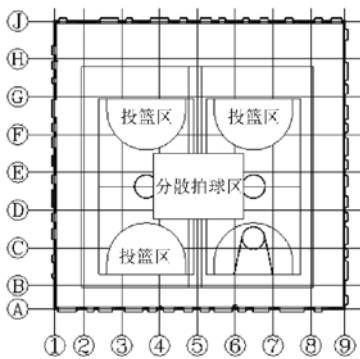
(a) 工况1



(b) 工况2

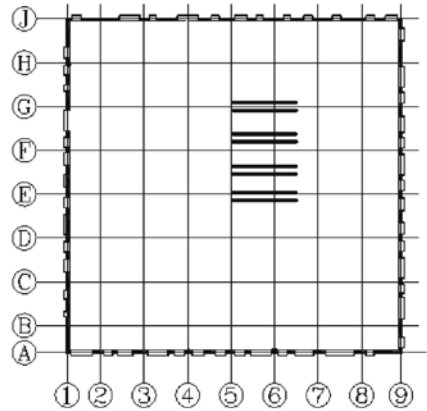


(c) 工况3

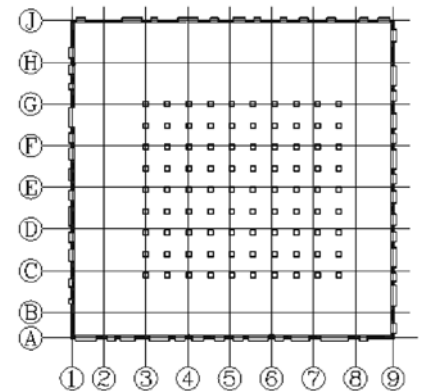


(d) 工况4、5

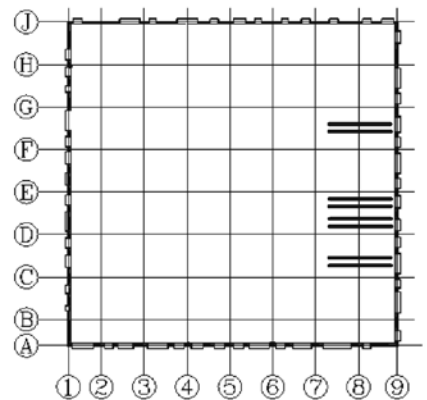
图6 2层楼盖现场测试工况



(a) 工况1



(b) 工况2、3



(c) 工况4、5

图7 3层楼盖3层测试工况

采用图3中的2、3、4、5、6、7等测点进行现场测试，测得3层楼盖各测点在人群激励荷载作用下的加速度峰值，见表3，可见在整齐队列先踏步后跑步的工况下，即工况5作用下楼盖各点的振动最大，其中，测点5的响应最为突出。所有工况作用下各测点的加速度峰值范围为 $0.04 \sim 0.4 \text{ m/s}^2$ ，均小于节奏性荷载下振动加速度限值 0.5 m/s^2 。

表3 3层楼盖的加速度峰值/($m \cdot s^{-2}$)

工况	测点					
	2	3	4	5	6	7
工况1	0.06	0.04	0.07	0.06	0.06	0.04
工况2	0.05	0.06	0.1	0.07	0.06	0.06
工况3	0.11	0.18	0.16	0.15	0.17	0.16
工况4	0.07	0.15	0.17	0.24	0.17	0.19
工况5	0.09	0.32	0.27	0.4	0.29	0.35

2.3 减振率振动测试

2层大跨楼盖采用TMD进行振动控制，其中质量为1000kg的TMD6个，质量为2000kg的TMD9个。根据设计阶段的计算结果，TMD的固有频率设置为3.65Hz，阻尼比0.085。

在面层施工完成阶段，采用跨中测点5，通过对比TMD锁死状态和打开状态下2层楼盖的峰值加速度，以考察TMD对大跨楼盖的减振效果。测试工况包括：

- (1) 1人以1.83Hz行走；
- (2) 2人以3.65Hz往返奔跑；
- (3) 4人以3.65Hz往返奔跑；
- (4) 2人以3.65Hz跳跃；
- (5) 4人以3.65Hz跳跃；
- (6) 多人随意行走。

在测得TMD不同状态下的峰值加速度后，经过计算可以得出TMD减振效率，见表4所示。从表可以看出，打开TMD以后，楼盖的加速度峰值均有不同程度的下降，其中，工况3作用时TMD的减振效率最大为74.3%，而工况4作用时减振效率仅有20%，是因为实际测试过程中激励频率存在误差，激励不同步，从而导致部分工况下TMD减振率不高。

表4 TMD锁死与打开时楼盖振动加速度峰值/($m \cdot s^{-2}$)

	楼盖振动加速度峰值/ ms^{-2}		减振效率
	TMD锁死	TMD打开	
工况1	0.01	0.004	60.0%
工况2	0.075	0.045	40.0%
工况3	0.175	0.045	74.3%
工况4	0.075	0.06	20.0%
工况5	0.15	0.07	53.3%
工况6	0.015	0.01	33.3%

3 有限元模拟

3.1 基频模拟

采用Midas Gen分析软件，建立有限元的分

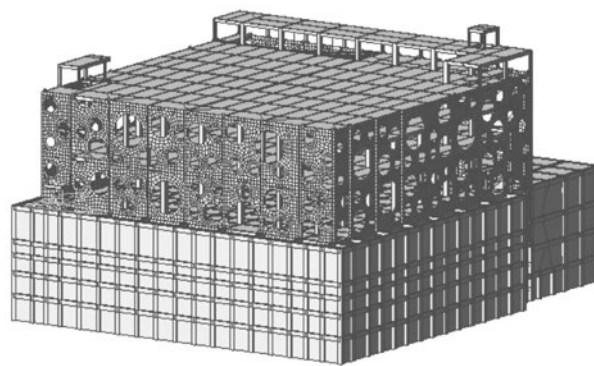


图8 有限元模型

析模型，如图8所示。梁、柱采用梁单元，其余部分采用板单元进行模拟，TMD采用粘弹性消能器进行模拟。

在对不同的施工阶段进行有限元模拟时，由于面层的铺设以及装修工程必然会对楼板刚度及荷载取值产生影响，因此，采用刚度等代方法对楼板厚度进行修正，并重新计算楼面和屋面的荷载取值。在测试时，楼盖上没有人员运动，故不考虑楼面活荷载的影响。

在未铺设面层阶段，2层和3层楼板的厚度均取初始厚度150mm，楼面恒载均为 $3.75kN/m^2$ 。在铺设面层后，2层楼板厚度由150mm等代刚度改为210mm，楼面恒载由 $3.75kN/m^2$ 改为 $5.6kN/m^2$ ，3层楼板厚度改为200mm，楼面恒载改为 $5.95kN/m^2$ 。在装修完成后，由于装修材料仅增加了荷载，不影响楼板的刚度，因此不需要修正楼板厚度，将2层和3层楼面恒载分别改为 $6.2kN/m^2$ 和 $6.5kN/m^2$ ，见表5所示。

表5 楼板厚度及荷载取值

施工阶段	2层楼盖		3层楼盖	
	板厚 /mm	恒载 /kN/m ²	板厚 /mm	恒载 /kN/m ²
未铺设面层	150	3.75	150	3.75
铺设面层后	210	5.6	200	5.95
装修完成后	210	6.2	200	6.5

通过对不同施工阶段进行有限元模拟，得到2层楼盖在3个施工阶段的自振频率，分别为3.6Hz、3.3Hz、3.22Hz，以及3层楼盖在3个施工阶段的自振频率，分别为3.66Hz、3.29Hz、3.18Hz，2层楼盖的一阶振型见图9，3层楼盖的一阶振型见图10。将有限元模拟结果和现场实测结

果进行对比,如表6所示。

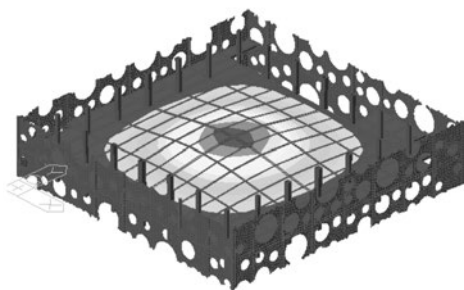
表6 现场测试与有限元对比/Hz

施工阶段	2层楼盖		3层楼盖	
	测试	有限元	测试	有限元
未铺设面层	3.79	3.6	3.42	3.66
铺设面层后	3.7	3.36	3.33	3.29
装修完成后	3.15	3.22	3.05	3.18

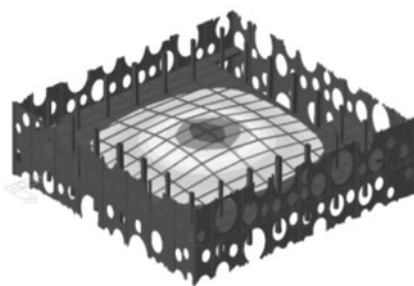
从表6可以看出,模拟和实测的结果最大仅相差0.34,说明有限元模拟和现场实测拟合较好,验证了有限元计算模型的准确性。

3.2 减振效率及调频的影响

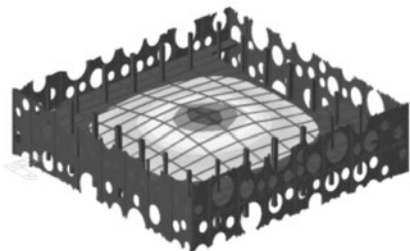
为了研究正常使用状态TMD的减振效率,以装修完成施工阶段的2层大跨楼盖为研究对象,对



未铺设面层3.6Hz

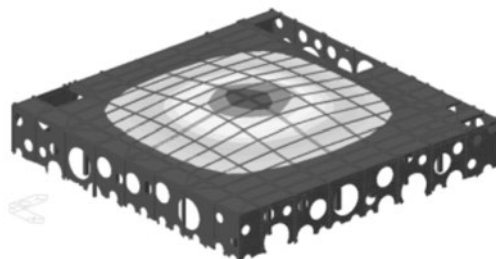


铺设面层后3.36Hz

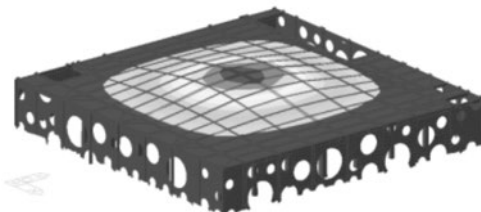


装修完成后3.22Hz

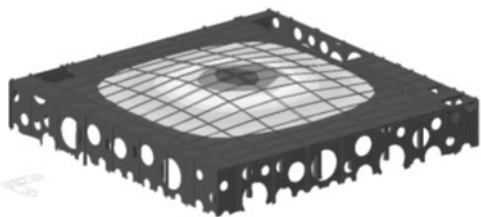
图9 2层楼盖的一阶振型



未铺设面层3.66Hz



铺设面层后3.29Hz



装修完成后3.18Hz

图10 3层楼盖的一阶振型

比TMD锁死和打开情况下跨中的竖向加速度峰值变化情况,对比工况主要包括:

- (1) 楼板跨中处2人原地行走;
- (2) 楼板跨中处2人原地跑动;
- (3) 楼板跨中处18m²内30人同时原地行走;
- (4) 楼板跨中处18m²内30人同时原地跑动。

计算采用的人行激励时程曲线为国际桥梁与结构工程协会(IABSE)所给定的连续步行荷载模式,人员自重均为75kg。根据杨维国、马伯涛等^[2-4]对人员各类运动典型荷载的研究成果,将行走频率取1.83Hz,跑动频率取3.3Hz。工况1、2以点荷载的形式作用在楼面上,工况3、4以面荷载的形式作用在楼面上,荷载激励时程曲线见图11、12。

经过测试,得到了TMD分别在锁死和打开状态下的竖向加速度时程曲线,见图13~图16。

经过计算,可知TMD的减振效率,如表7所示。根据表中结果可知,对于远离楼盖一阶

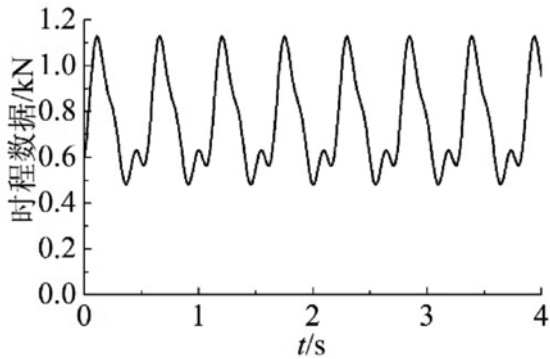


图11 行走时程激励曲线

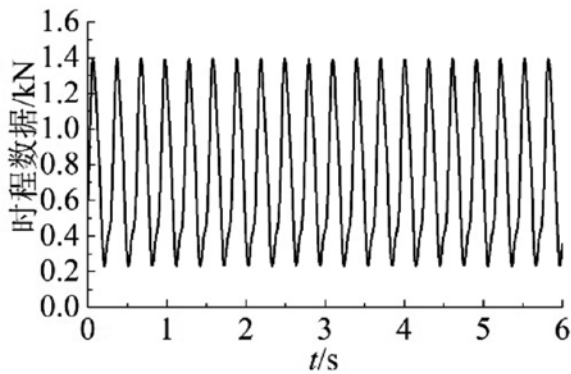


图12 跑步时程激励曲线

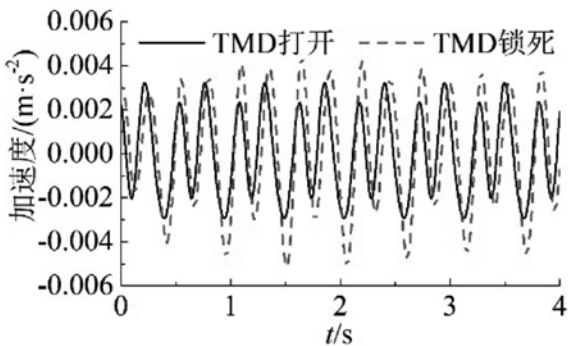


图13 楼板跨中2人同时原地行走

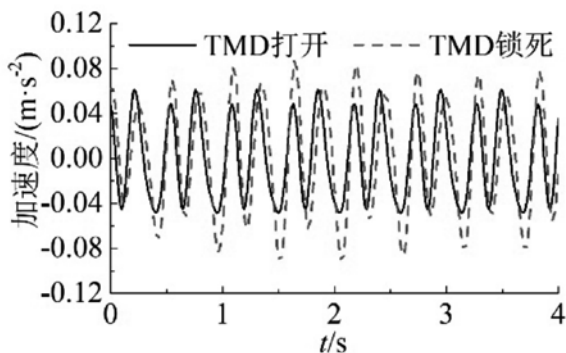


图14 楼板跨中2人同时原地跑动

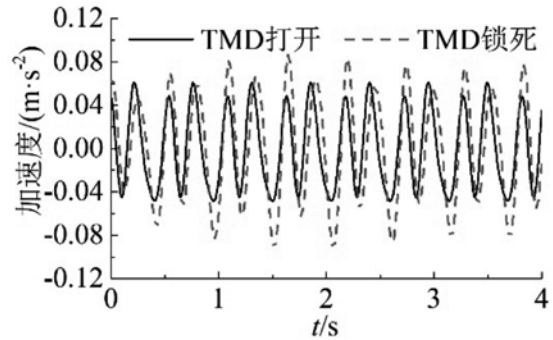


图15 楼板跨中18m²内30人同时原地行走

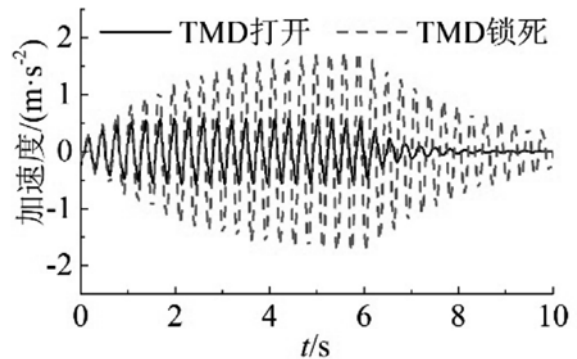


图16 楼板跨中18m²内30人同时原地跑动

自振频率的外激励，其跨中加速度响应时程曲线呈明显的瞬时冲击—稳态，TMD减振率达到30%~45%。而对于接近楼盖一阶自振频率的外部激励，其跨中加速度响应时程曲线为明显的共振放大曲线，TMD减振效率可达到60%以上。

表7 TMD的减振效率

工况	加速度峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		减振效率
	TMD锁死	TMD打开	
2人原地行走	0.00517	0.00294	43.13%
2人原地跑动	0.0997	0.0358	64.09%
30人原地行走	0.0918	0.0610	33.55%
30人原地跑动	1.74	0.581	66.61%

考虑到TMD在共振频率附近时减振率远不止60%，本工程在初步设计时将TMD的频率设置为3.65Hz，与楼盖自振频率相差较多，因此，对TMD的频率进行调整为3.2Hz，并更改相应的刚度与阻尼数值，再次进行18m²内30人同时原地跑

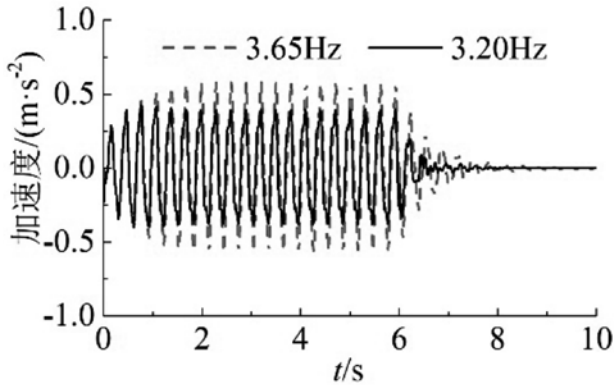


图17 TMD调整频率

动的模拟。TMD调频前后的竖向加速度时程曲线如图17所示。

经过计算,可知TMD调频前后的减振效率变化情况参考表8,从表中可知,在TMD调整频率后,加速度峰值由 0.581m/s^2 超限降低至 0.425m/s^2 ,符合规范要求,并且减振效率得到明显提高,由调频前的66.61%提高到75.57%,说明当TMD调频至结构自振频率时,减振效果最优。

表8 调频后的TMD减振效率

加速度峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)			调频前 减振效率	调频后 减振效率
TMD 锁死	TMD 3.65 Hz	TMD 3.20 Hz		
1.74	0.581	0.425	66.61%	75.57%

4 结论

通过对北京大学附属小学体育管的现场测量和数值模拟,得出以下结论和建议:

(1) 随着铺设面层、装修,楼盖的自振频率逐渐减小,即随着楼面荷载(质量)的增加而减小。因此,建议设计阶段计算人体舒适度时楼面活荷载应按使用阶段的实际最大人员荷载考虑。

(2) 采用有限元软件对楼盖舒适度进行计算时,应考虑面层对楼板刚度的影响,以及装修等建筑材料对楼面荷载的影响,经过修正后的有限元楼盖模型与实测结果拟合较好。

(3) 当外部激励的频率与楼盖的自振频率接近时,TMD对楼盖的减振效果显著,且将TMD调

频至结构自振频率时,才能充分发挥TMD的减振效果。

参考文献

- [1] 王树,王明珠,张国军,等. 多层大悬挑钢结构体系静力与抗震性能设计[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(4): 77-86.
- [2] Al-Hulwah K I, Kashani R. Floor Vibration Control Using Three-Degree-of-Freedom Tuned Mass Dampers[C]. ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2004:509-515.
- [3] Law S S, Wu Z M, Chan S L. Vibration control study of a suspension footbridge using hybrid slotted bolted connection elements[J]. Engineering Structures, 2004, 26(1):107-116.
- [4] 杨维国,马伯涛,宋毛毛,等. 大跨度楼盖结构在运动荷载下的振动性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(6)
- [5] 马伯涛,杨国莉,庞玉涛等. 大跨度及长悬挑楼层钢结构运动场人员舒适度分析研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 34(4): 95-103.
- [6] 马伯涛,张楠,宋毛毛等. 大跨度楼盖运动场内人员舒适度实测分析研究[J]. 振动与冲击, 2015, 24(4): 164-170.

某172m跨度拱形煤场封闭罩棚设计研究

■ 刘邦宁 王明珠 王树 刘鑫刚 张奇铭 [结构]

摘要: 本煤场封闭改造工程采用跨中不设支承柱的拱形结构。钢结构纵向长度351m, 跨度172m, 高度53m, 主桁架在跨中110m范围内设置预应力张弦索, 通过V型撑杆与主桁架连接。从结构选型、风荷载体型系数取值、预应力张弦索设置等方面论述本结构体系的力学特征, 对结构进行动静力分析、多荷载工况下的承载力全过程分析以及结构抗倒塌分析, 多方面论证结构的安全性能, 最后得出结构各项指标均满足规范要求, 并具有良好的抗倒塌性能, 结构选型合理。

关键词: 大跨度拱形; 预应力张弦索; 风荷载体型系数; 动静力分析; 承载力全过程分析; 抗倒塌性能

0 引言

火力发电厂煤炭需求持续增长, 储煤场带来的大气环境污染问题日益严重, 为切实改善这一现状, 国家各级环保部门均要求电厂将储煤场进行全封闭, 解决煤炭扬尘污染。全封闭煤场建设对推进煤炭清洁利用、削减煤尘排放量、改善大气环境质量、推动治污降霾工作落实起到关键作用。由于储煤场储煤量大, 为保证煤场储运煤系统正常运行, 单跨大跨度封闭储煤罩棚成为很多煤场封闭工程的首选。

预应力钢结构已广泛应用于大跨度体育场馆以及无吊重的大跨度工业建筑领域。^[1]国内广西国投钦州电厂(199m跨); 内蒙古托克托五期(188m跨); 神华蒙西煤化股份公司精料场(188m); 大唐雷州电厂料场封闭(188m), 均为张弦梁结构, 即预应力张弦桁架结构。预应力张弦钢结构通过科学合理引入自平衡的预应力构件, 将上弦刚性受压构件通过撑杆与下弦拉索组合在一起形成自平衡的受力体系, 充分发挥材

料的力学性能, 创建出结构力学高效、安全、经济、造型美观的现代建筑结构体系。

结合江阴苏龙热电有限公司#2斗轮机煤场封闭改造工程, 针对大跨度拱形预应力钢结构特征, 开展结构承载力全过程力学性能分析研究, 为该类新型结构设计提供参考。结合江阴苏龙热电有限公司#2斗轮机煤场封闭改造工程, 针对大跨度拱形预应力钢结构特征, 开展结构承载力全过程力学性能分析研究, 为该类新型结构设计提供参考。

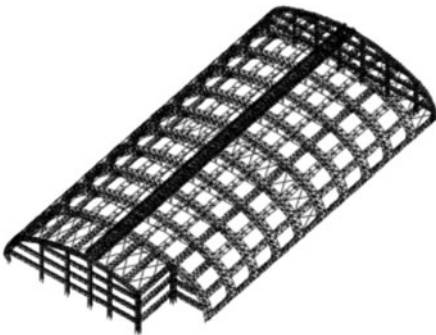
1 工程概况

本项目为煤场封闭改造项目, 煤场内有2#斗轮机, 煤场内堆煤高度最高为25m。建设场地约59600m²。如图1所示, 本工程建设规模为: 纵向长度351m×跨度172m, 煤场南北轴线之间距离172m; 东西长度: 北侧为351m, 南侧为305m。封闭煤厂建筑总高度及室内净空应满足斗轮机安全正常运行, 同时满足及煤堆上推煤机和臂长10m的挖掘机的使用要求, 煤棚结构距离挖掘机最远悬臂端部不小于2m。水泵房套建于半封闭煤场内

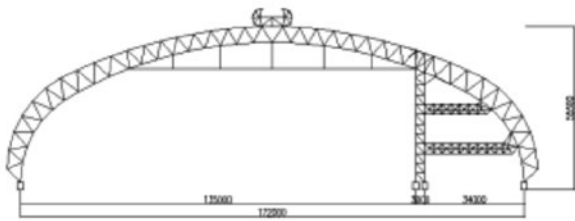
作者简介: 刘邦宁, 男, 助理工程师, 2017年毕业于中国航空规划设计研究总院有限公司结构工程专业, 现就职于航空工业规划工程创新研究院。

西南角, 占地面积 58.5m^2 , 建筑面积 58.5m^2 。

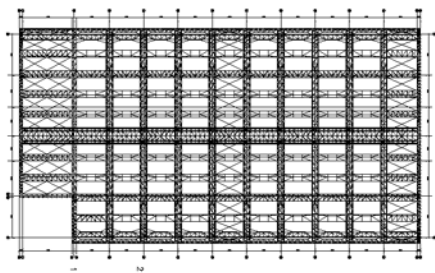
煤场封闭拟采用沿纵向长度方向两边落地, 跨中不设支承柱的大跨度拱形金属屋面建筑, 拱形钢结构屋盖采用大跨度拱形预应力钢结构型式。封闭煤场主结构形状为柱面拱形, 封闭煤场室内不设柱。主结构采用四边形拱型桁架共11榀, 主桁架最薄处厚度为 5.9m , 最厚处厚度为 8.3m , 桁架上为 6m , 下弦宽度为 4m 。主桁架在跨中 110m 范围内设置预应力张弦索, 索采用高强度Galfan索, 直径 80mm , 初拉力为 1400kN , 通过V型撑杆与主桁架连接, 张弦索最大垂高 11.8m , 张弦索与钢桁架共同作用, 形成多阶次预应力结构体系。两端山墙结构采用空间钢管相贯桁架结构。



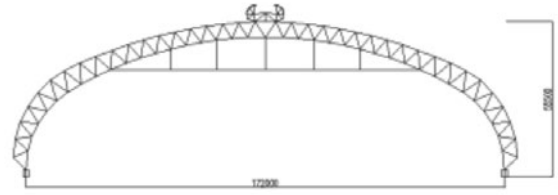
(a) 结构三维示意图



(b) 结构平面示意图



(c) 主桁架1剖面示意图



(d) 主桁架2剖面示意图

图1 #2斗轮机煤场封闭改造工程

2 结构形式

拱按其在某种荷载作用下, 使拱各截面均处于弯矩 $M=0$ 状态的拱轴曲线, 称为拱的理想轴线。^[2]不同的结构形式、不同的荷载作用, 其理想轴线不同。

对给定竖向荷载作用的拱, 令:

$$M=M^0-F_{Hy}=0$$

可得到合理拱轴为:

$$y=M^0/F_H$$

式中: 如图2所示, M 为弯矩; M^0 为将拱等代梁的弯矩, F_H 为拱支座水平推力, y 为截面处矢高。

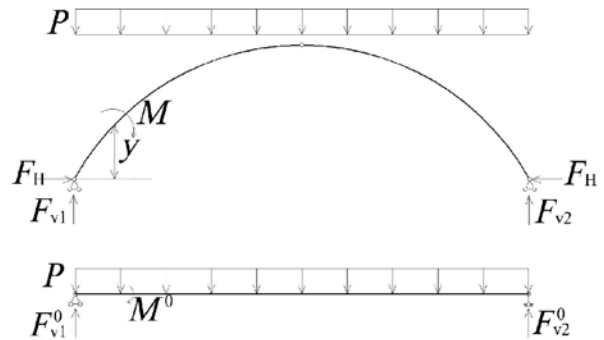


图2 三铰拱受力

上式表明与代梁弯矩图成比例的轴线为理想拱轴, 对于满跨均布荷载, 合理拱轴应为二次抛物线。但实际上, 结构形式受到建筑空间限制, 而且荷载工况多样, 并不存在能够同时适应各种荷载的理想拱轴线。本工程结构主桁架立面形状以三心圆为基础, 进行适当微调, 以使整体立面形状平滑过渡。三心圆形状接近于设计荷载标准组合值(即 1.0 恒荷载+ 1.0 活荷载+自重)作用下

的理想拱轴，且建筑空间可满足煤场对于建筑净空的要求。

通过预应力张弦索作用，使压弯构件和抗拉构件协同工作，达到自平衡，降低钢结构内力峰值，调整结构内力分布，增加结构刚度，节省钢材用量；同时拱结构支座反力大幅减少，减小基础材料用量。主桁架榀与榀间距30m，可减小由于大面积的堆载产生的基础沉降不均匀对支座附近的节点和杆件的影响，且有利于温度应力的释放。

本工程跨度较大，主桁架下弦两点落地，释放支座跨度方向弯矩。落地点采用万向球铰支座（抗拉球型钢支座），使主桁架与基础铰接。

3 结构设计

3.1 荷载作用

(1) 恒荷载

a. 结构自重，放大1.1（桁架考虑节点重量）。

b. 屋面钢结构围护结构采用彩钢板，次檩条共计 $0.3\text{kN}/\text{m}^2$ 。

c. 灯具、机电设备等下弦局部恒荷载： $0.4\text{kN}/\text{m}^2$ 。

(2) 活荷载

a. 屋面活荷载： $0.5\text{kN}/\text{m}^2$ 。

b. 马道活荷载： $1.0\text{kN}/\text{m}^2$ 。

(3) 温度作用

温度荷载根据年均温度，并考虑年极限温度、钢结构施工合拢时间适当调整，采用 $+27\sim-27^\circ\text{C}$ 。

(4) 雪荷载

50年一遇基本雪压为 $0.4\text{kN}/\text{m}^2$ ，本工程为雪荷载的敏感结构，采用100年重现期雪压为 $0.45\text{kN}/\text{m}^2$ 。积雪分布情况分别按全跨积雪的均匀分布和半跨积雪的均匀分布按最不利情况采用。

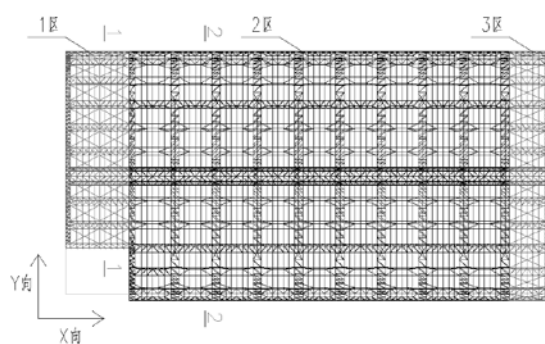
(5) 风荷载

a. 基本风压：本工程桁架结构设计按50年一遇基本风压： $0.45\text{kN}/\text{m}^2$ ，地面粗糙类别B类。考虑到本工程为超大跨度钢结构工程为风荷载敏感建筑，因此，对基本风压进行适当放大，按100年一遇基本风压： $0.50\text{kN}/\text{m}^2$ 取值。

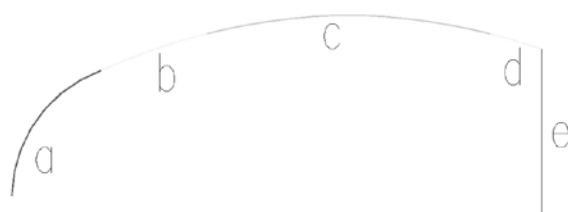
b. 高度系数：风荷载高度系数根据《建筑结构荷载规范》（GB50009-2012）^[3]表8.2.1进行计算选取。

c. 风振系数：由于本工程跨度较大达到172m，虽然结构体系变形较小、计算风振系数可以考虑蒙皮效应的影响，考虑蒙皮后刚度较大，根据随机振动理论分析风振系数取1.4。

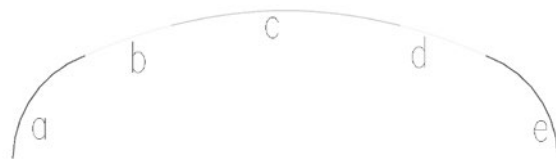
d. 体型系数：风荷载体型系数选取根据《建筑结构荷载规范》（GB50009-2012）^[3]表8.3.1，并综合考虑已建和在建的煤场项目风洞实验报告：《国投钦州二期煤场封闭工程风洞实验报告》^[4]、《大唐雷州煤场封闭风洞实验报告》^[5]、《神华亿利煤场封闭项目风洞实验报告》^[6]等综合考虑，选取风荷载体型系数，将平面分为3个区域，纵向上封闭煤棚两端风荷载体型系数比中间部位风荷载体型系数略大，考虑在立面上风荷载体型系数的不均匀性，因此将立面分为5个区域，如图3，各分区体型系数表见表1。



(a) 平面分区



(b) 1-1立面分区



(c) 2-2立面分区

图3 平面与立面分区

表1 体型系数表

	分区	a	b	c	d	e
X+ 向风	1区	-0.8	-1	-1	-1	—
	2区	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6
	3区	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6
X- 向风	1区	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	—
	2区	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6
	3区	-0.8	-1	-1	-1	-0.8
Y+ 向风	1区	-0.7	-0.7	-0.8	-0.5	—
	2区	-0.5	-0.5	-0.8	-0.5	0.5
	3区	-0.7	-0.7	-0.8	-0.5	0.5
Y- 向风	1区	0.5	-0.5	-0.8	-0.7	—
	2区	0.5	-0.5	-0.8	-0.5	-0.5
	3区	0.5	-0.5	-0.8	-0.7	-0.7

(6) 地震作用及相关参数

a. 本工程所在地区抗震设防烈度为6度，设计基本地震加速度值0.05g，设计地震分组第二组，建筑场地类别为Ⅲ类。

b. 抗震设防分类：根据《建筑工程抗震设防分类标准》(GB50223-2008)^[7]，由于本工程存储煤炭属于易燃物质，具有火灾危险性，因此抗震设防类别划为重点设防类。

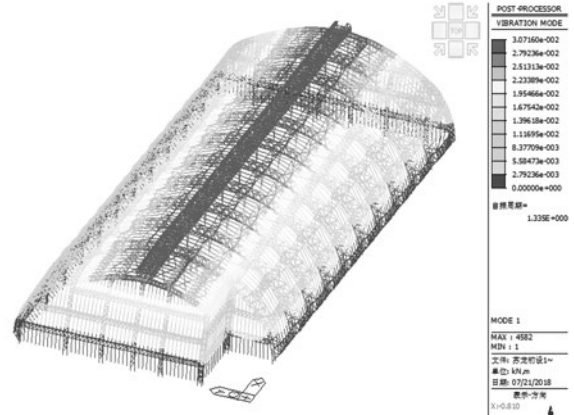
3.2 设计控制参数

- (1) 屋面钢结构桁架竖向挠度 $\leq 1/300$ ；
- (2) 风荷载整体水平位移 $\leq H/150$ (H结构高度)；
- (3) 一般构件强度、稳定应力比 ≤ 0.90 、与支座相连钢构件应力比 ≤ 0.85 ；
- (4) 考虑几何非线性整体稳定系数 ≥ 4.2 ；
- (5) 考虑几何非线性及材料非线性整体稳定系数 ≥ 2.0 ；
- (6) 预应力拉索应力比 ≤ 0.4 ，且不松弛；
- (7) 杆件压杆长细比 ≤ 150 (弦杆)、 ≤ 180 (腹杆)；
- (8) 桁架拉杆长细比 ≤ 250 ；
- (9) 结构体系在失稳时的变形延性性能：考虑几何材料双非线性失稳时变形 $< 1/50L$ ，L为结构跨度；
- (10) 抗倒塌设计目标：在意外情况下局部发生破坏，考察钢结构的防倒塌能力，取消一榀主桁架的一根落地弦杆、张弦索及一根斜索，进

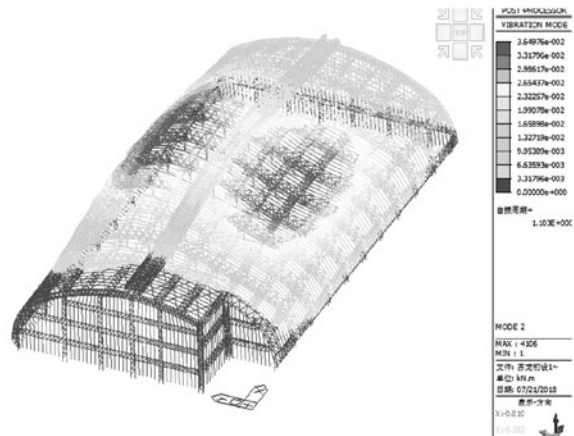
行结构整体大变形抗倒塌分析，考虑几何材料双非线性失稳时变形 $< 1/50L$ ，L为结构跨度。

3.3 结构动力性能

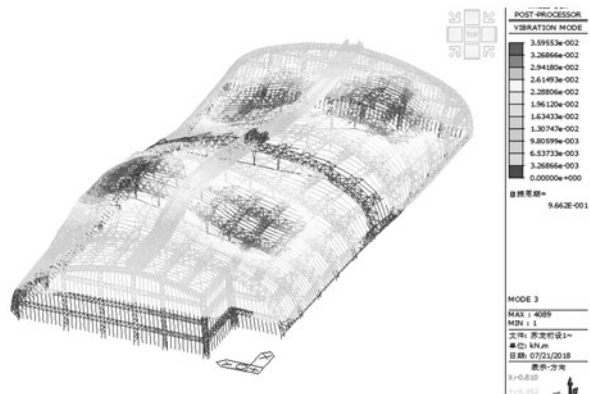
采用Midas软件进行模态分析，计算结果如图4所示。



a) 第一阶振型 T1=1.335s



b) 第二阶振型 T2=1.103s



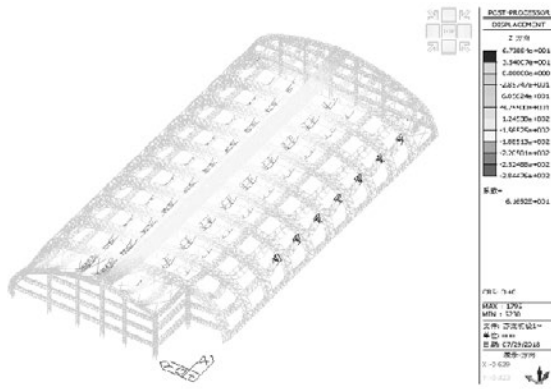
c) 第三阶振型 T3=0.966s

图4 结构动力性能

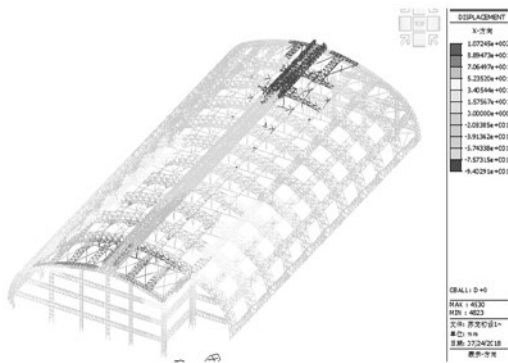
通过图4可以得出：整体结构第一阶振型为X方向水平震动，整体结构第二阶振型为Y方向水平震动，整体结构第三阶振型为绕Z轴扭转振动。

3.4多遇地震作用下结构响应

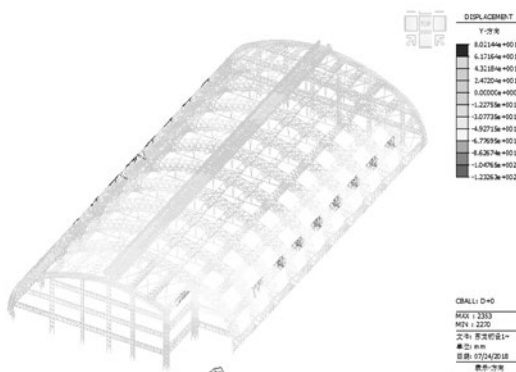
采用Midas软件进行结构多遇地震反应谱分析以分析，计算结果如图5所示。



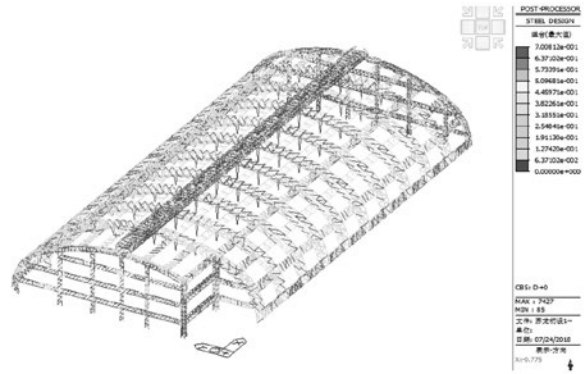
a) 重力荷载代表值+竖向地震工况结构竖向位移 (284mm)



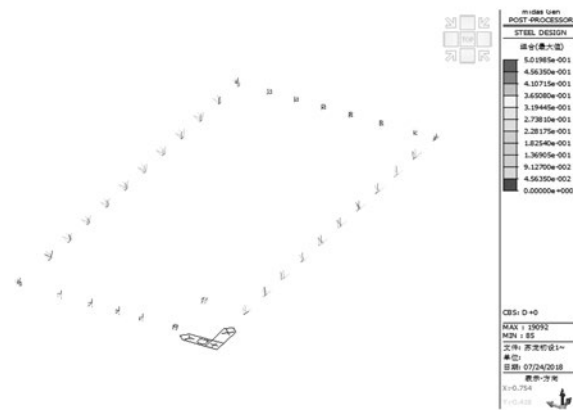
b) 多遇地震作用下X向水平变形 (107mm)



c) 多遇地震作用下Y向水平变形 (123mm)



d) 多遇地震作用下一般杆件应力比<0.70



e) 多遇地震作用下支座附近杆件应力比<0.50

图5 结构动力性能

通过图5可以得出：

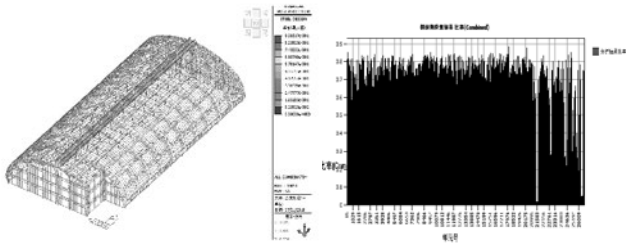
(1) 多遇地震作用，重力荷载代表值+竖向地震作用标准组合，钢结构最大竖向变形为284mm，为 $284/172000=1/606 < 1/300$ ，水平向地震作用下结构X、Y水平变形分别为107mm、123mm，分别为高度的 $107/55200=1/519$ 、 $123/55200=1/451$ ，满足规范要求。

(2) 在多遇地震作用下，结构的一般杆件应力比在0.70以下，支座附近杆件应力比在0.50以下，结构处于弹性状态。

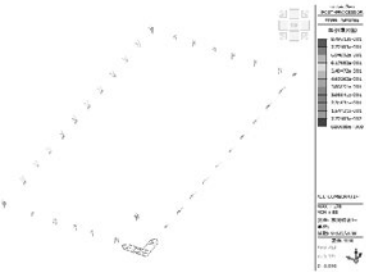
3.5 结构静力分析结果

3.5.1 结构构件强度及稳定性计算

采用Midas Gen软件进行结构计算分析，考虑结构几何非线性，对结构进行各荷载工况作用下的强度及稳定性计算。静力计算结果见图6。



a) 钢结构一般构件应力比 (<0.90) b) 钢结构构件应力比柱状图



c) 钢结构支座附近杆件应力比云图 (<0.85)



d) 预应力索最大应力 (<1670x0.4=668MPa)



e) 预应力索最小应力0.48MPa

图6 结构强度计算结果

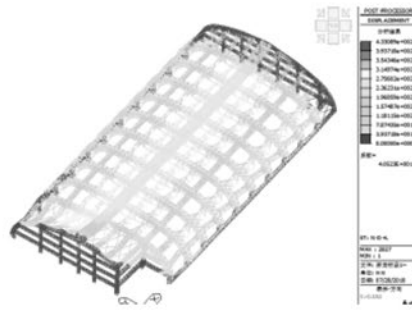
通过图6可以得出：

(1) 在各荷载组合作用下，钢结构构件强度及稳定应力比均小于0.9，结构构件有足够的强度；

(2) 在各荷载组合作用下，预应力索最大应力为600MPa，小于预应力索极限应力的40%（668MPa），预应力索最小应力为0.48MPa，预应力索没有松弛。

3.5.2 结构位移计算

设计采用Midas Gen程序在使用荷载（1.0恒载+1.0活载+1.0预应力）、风荷载作用下，进行结构体系变形计算分析，力学模型考虑结构几何非线性。结构位移计算结果见图7。



a) D+L工况结构竖向位移 (433mm)



b) 沿跨度向风工况结构水平位移 (286mm)



c) 沿纵向风工况结构水平位移 (301mm)

图7 结构位移计算结果

由图7可知，在使用荷载（1.0恒载+1.0活载+1.0预应力）作用下结构最大变形发生在跨中部位，其最大竖向为433mm，为跨度的

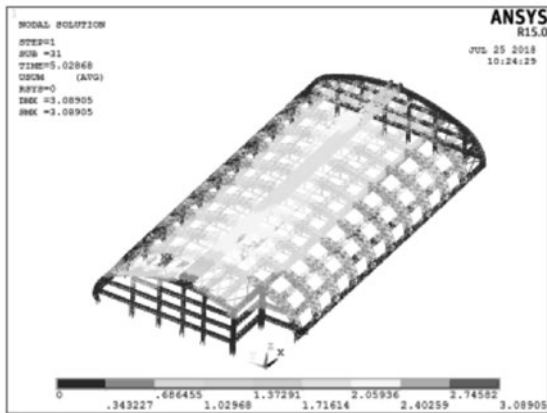
$433/172000=1/397<1/300$ ；钢结构在沿跨度向风荷载作用下最大水平变形为286mm，为结构高度的 $286/55200=1/194<1/150$ 。钢结构在沿纵向风荷载作用下最大水平变形为301mm，为结构高度的 $301/55200=1/184<1/150$ 。

4 结构整体稳定分析

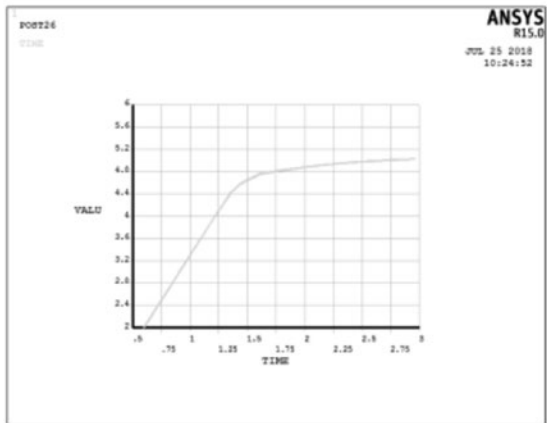
整体稳定屈曲值控制标准：参照《空间网格结构技术规程》JGJ7-2010^[8]，当按弹性全过程分析时，结构稳定承载力安全系数应不小于4.2，当按弹塑性全过程分析时，结构稳定承载力安全系数应不小于2.0。

4.1 使用荷载作用下结构整体稳定分析

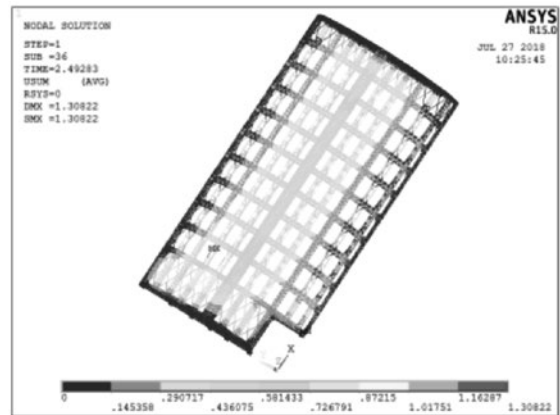
采用ANSYS软件，考虑初始几何缺陷的影响，采用结构最低阶屈曲模态，取跨度的1/300作为缺陷最大计算值^[8]，进行仅考虑结构几何非线性与综合考虑结构几何非线性、材料非线性的计算分析。弹性、弹塑性全过程分析的结构失稳形态与结构荷载变形曲线见图8。



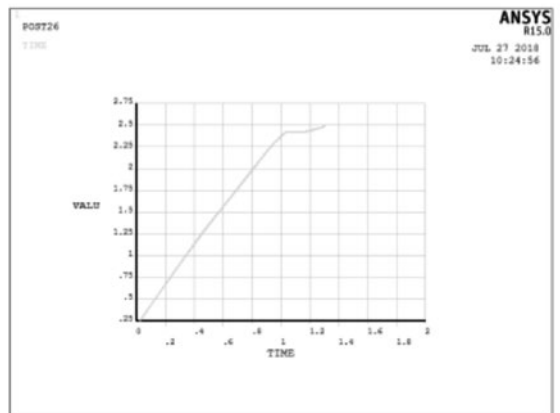
a) 几何非线性结构失稳变形形态



b) 几何非线性结构荷载变形曲线



c) 双非线性结构失稳变形形态



d) 双非线性结构荷载变形曲线

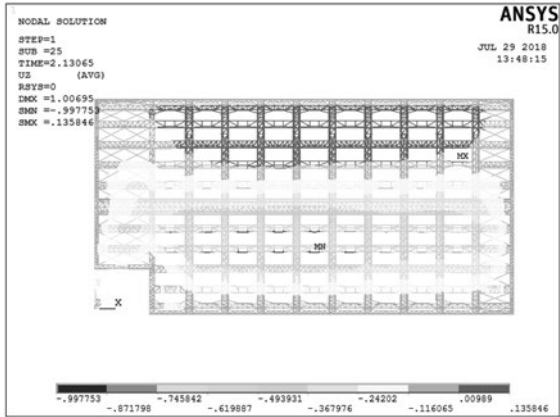
图8 使用荷载作用下结构整体稳定分析结果

由图8可知，在几何非线性全过程分析下，结构稳定承载力系数为： $4.8>4.2$ ；在几何和材料双非线性弹塑性全过程分析下，结构稳定承载力系数为： $2.4>2.0$ ，且大变形失稳状态时的变形为跨度的 $1/132<1/50$ ，满足规范及性能化设计目标要求。

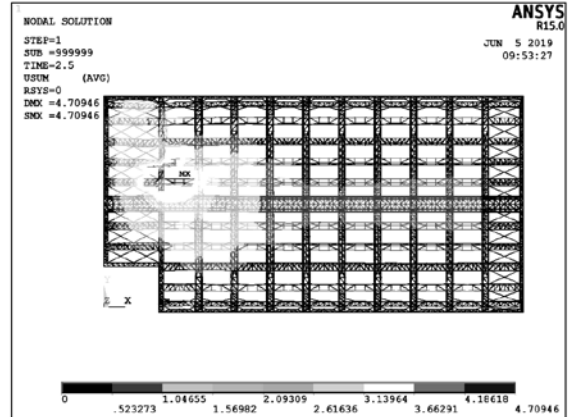
4.2 半跨雪作用下结构整体稳定分析

按《空间网格技术规程》JGJ-2010^[8]，稳定性承载力应按恒荷载+活载（包括半跨活荷载）的标准组合计算，考虑在半跨雪荷载作用下分析结构承载全过程性能。采用ANSYS软件，在1.0恒荷载+1.0半跨雪荷载作用下，对整体结构进行几何、材料双非线性承载力全过程分析。失稳变形形态及荷载变形曲线见图9。

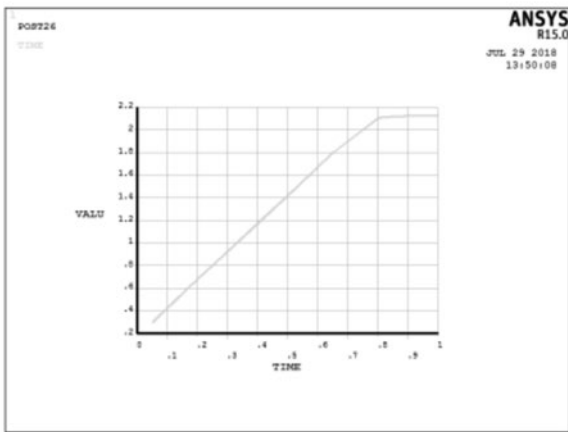
由图9可知，在半跨雪荷载作用下，整体结构失稳时，雪荷载承载能力系数为2.14，结构竖向变形为1m，为跨度的 $1.0/172=1/172<1/50$ ，说明结构在2.14倍的雪荷载作用，且变形未达到倒塌极限。



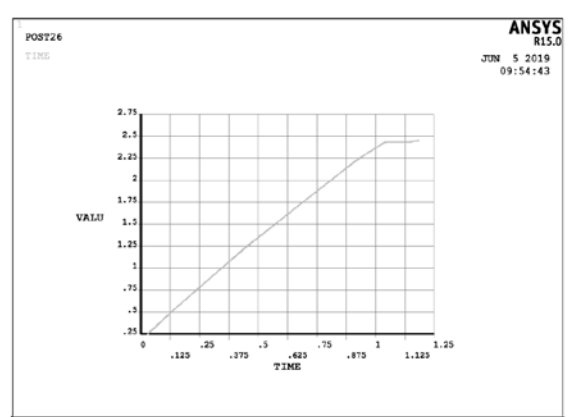
a) 半跨雪荷载作用结构失稳变形形态



b) 张弦索破断结构失稳变形形态



b) 半跨雪荷载作用结构荷载变形曲线



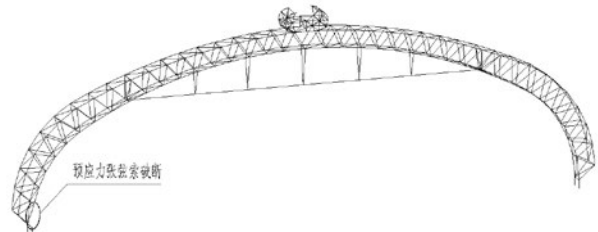
c) 设计荷载作用下荷载变形曲线

图9 半跨雪作用下结构整体稳定分析结果

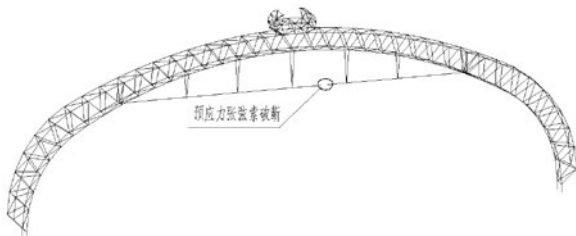
图10 预应力张弦索破断结构整体稳定分析结果

4.3 基于稳定性能的抗连续倒塌分析

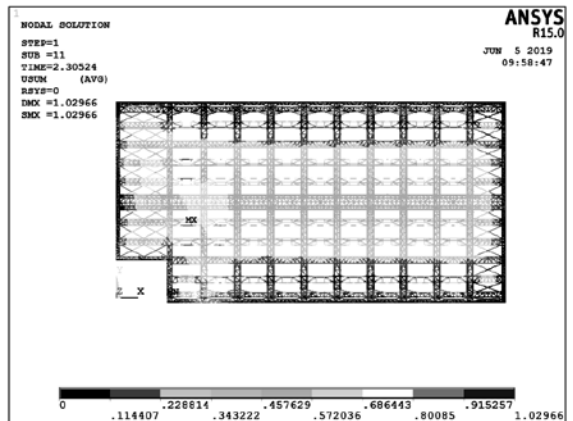
本工程为大跨度预应力钢桁架结构体系跨度达到172m，结构中预应力拉索及主桁架弦杆落地点为关键部位构件。采用拆杆法，假设上述预应力张弦索及落地点主桁架弦杆破断失效，对整体结构是否会出现连续性倒塌进行考虑几何、材料双非线性的结构承载力全过程分析，计算结果见图10、图11。



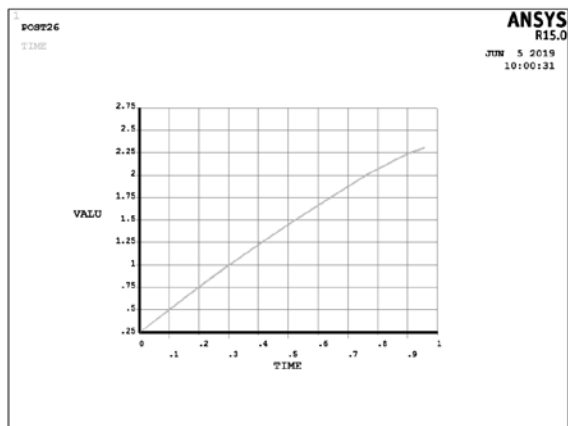
a) 主桁架弦杆破断示意图



a) 预应力张弦索破断示意图



b) 主桁架弦杆破断结构失稳变形形态



c) 设计荷载作用下荷载变形曲线

图11 主桁架弦杆破断结构整体稳定分析结果

由图10、图11可知,经分析,当张弦索、落地弦杆分别破断,在使用荷载(1.0恒载+1.0活载+1.0预应力)作用下,整体结构稳定系数分别为2.4、2.3,失稳变形分别为跨度的1/146、1/169,说明当张弦索、落地弦杆破断后,整体结构仍具有2.0~2.5倍的继续承载能力,失稳变形值远小于1/50的倒塌极限。因此,当关键部位构件出现破断,整体结构不会出现连续性倒塌,且具有较强的抗倒塌能力。

5 结论与建议

(1) 结构选型:结构选型受建筑条件、工艺要求、荷载条件等多种因素影响。三心圆拱结构由于其曲率平滑、空间浪费少,且形状较接近于合理拱轴,因此在煤场结构中应用较多。在拱上部净空区段设置预应力拉索,平衡部分拱结构水平推力,形成自平衡体系。使结构构件以轴向拉压受力为主,充分发挥材料的承载能力。

(2) 结构强度与刚度:考虑几何非线性,结构在各荷载工况作用下各构件应力比均满足规范要求,预应力拉索的最大应力比小于0.4,且在各荷载工况作用下均未松弛。在使用荷载(1.0恒载+1.0活载+1.0预应力)和在风荷载作用下,结构最大变形均满足规范要求。

(3) 结构整体稳定性:对结构进行考虑初始缺陷的整体稳定分析,在使用荷载作用下、半跨雪荷载作用下,考虑结构几何非线性与材料非线性,结构的稳定承载力系数K均大于2.0,满足《空间网格结构技术规程》JGJ7-2010^[8]要求。比

较分析结果发现,在半跨雪荷载作用下,结构的稳定承载力系数K较小,在设计时应充分考虑。

(4) 结构抗倒塌性能:当张弦索、落地弦杆分别破断,在标准组合荷载作用下,当张弦索、落地弦杆破断后,整体结构仍具有2.0~2.5倍的继续承载能力,失稳变形值远小于1/50的倒塌极限。整体结构具有较强的抗倒塌能力。

参考文献

- [1] 董石麟.空间结构的发展历史、创新、形式分类与实践应用[J].空间结构,2009,15(3):22-43.
- [2] 吴碧野,孙寅健.某电厂200m跨度煤场封闭钢结构设计与分析[J].建筑结构,2016,46(增刊):514-518.
- [3] GB50009-2012 建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [4] 杨维国等,《国投钦州二期煤场封闭工程风洞实验报告》[R].北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2015.
- [5] 杨维国等,《大唐雷州煤场封闭风洞实验报告》[R].北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2017.
- [6] 杨维国等,《神华亿利煤场封闭项目风洞实验报告》[R].北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2017.
- [7] GB50223-2008 建筑工程抗震设防分类标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [8] JGJ7-2010 空间网格结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

发动机试车厂房 测控间振动控制研究

■ 谷鹏 黄银莹 张庆亮 贾洁 付桂宏 杨维国 [结构]

摘要: 由于发动机试车时存在多个振源, 导致测控间楼面振感强烈, 甚至引起测试工作人员不适。为采取更为有效的减振措施, 在5个试车厂房内进行了振动测试, 并使用振动测试数据进行有限元分析。结合实测数据和有限元分析, 结果可知, 测控间振动是由试车间内振动、测控间下方油泵振动、排气塔振动、引射筒等地的管道振动等多振源引起的振动, 试车间内振动对于测控间振动的影响并没有占主导作用, 建议采用试车间与测控楼基础脱开、测控间油泵隔振等方法来减小测控间楼板的振动。

关键词: 振源特性; 数值模拟; 动力响应; 有限元分析

发动机试车厂房对于发动机的研制和生产有着重要意义。试车厂房一般由准备待试间、进气塔、试车间、引射筒间、排气塔、测控楼及通道等各部分组成, 厂房内设有多种试车设备^[1], 厂房平面布置见图1。一般进气塔、试车间、引射筒间及排气塔为钢筋混凝土剪力墙结构; 测控楼一般为多层钢筋混凝土框架结构, 一层地面设有油泵及其配套设备, 二层为试车时工作人员观测及获取数据的测试间, 因二层测控间有大量仪器及管线, 故测控间楼面通常铺有静电地板。发动机试车时振动复杂^[2], 试车间、引射筒间、排气塔及测控楼油泵均有振动源, 测试间工作人员在试车时振感强烈, 甚至引起不适。鉴于未来试车厂房建设将越来越多, 人员对工作环境舒适度要求越来越高, 而在

以往设计中对此问题从未关注过, 因此有必要全面调查各地试车厂房使用情况, 重点是测控间的振动情况, 有针对性地进行分析并研究应对措施。本文从振源特性、厂房结构形式、厂房地基情况、试车间与测控楼基础是否断开等几方面入手, 从已建车台项目中选取不同的类型进行振动测试, 对各厂房的实测数据进行归纳整理, 并结合基础形式进行有限元分析总结, 在实测、有限元分析总结的基础上提出测控间减振方案。

1 振动检测

本次振动检测内容是测量发动机从静止到最大推力试车过程中试车厂房主要部位的振动加速

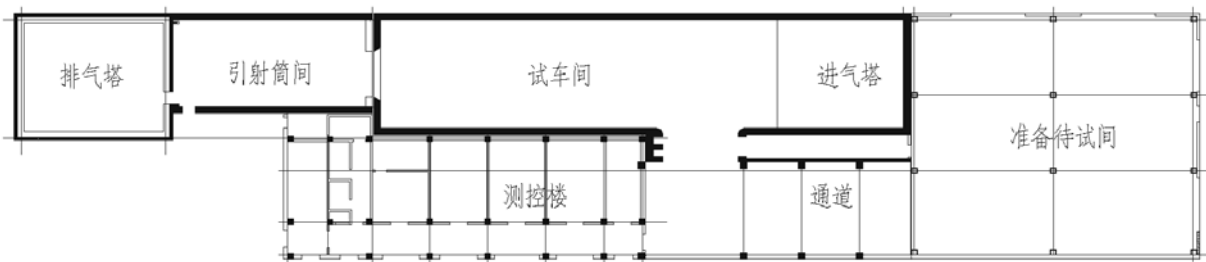


图1 发动机试车厂房平面布置图

作者简介: 谷鹏, 女, 工程师, 2011年毕业于北京航空航天大学结构工程专业, 现就职于航空工业规划动力工程设计研究院。

表1 测试厂房基本情况

测试厂房	发动机类型	厂房结构型式	地基型式	基础措施	地点
一号	X型	砖混	砂卵石	未断	A
二号	X型	钢筋砼框架	砂卵石	断开	A
三号	X型	钢筋砼框架	桩	未断	B
四号	X型	钢筋砼框架	桩	断开	B
五号	Y型	钢筋砼框架	灰土换填	断开	C

度、振幅数据，主要以低频振动测量为主，中、高频振动测量为辅。

1.1 检测厂房

从振源特性、厂房结构形式、厂房地基情况、试车间与测控楼基础是否断开等几方面入手，选取共5个试车厂房，见表1。

1.2 检测仪器

试验采用北京东方振动和噪声技术研究所生产的INV3018CT型采集分析仪及中国地震局工程力学研究所生产的941B型超低频测振仪。所有测试采样频率均为256Hz，采样时长为试车时长，为

1200~2500s。

1.3 厂房振动测试

厂房开最大加力试车时，进行试车厂房关键测点的现场振动测试，各厂房试车推力基本相同，试车厂房测点主要包括：测控楼一层供油室测点；测控间楼板中心测点；测控间大梁中心测点；测控间静电地板测点；试车间房顶大梁中心测点；试车间房顶楼板中心测点；试车间台架上方钢梁测点；排气塔外地面竖向；排气塔墙角测点。其中，一层供油室测点及测控间静电地板测点仅测试了竖向振动，其余点均测试三向振动。但因为仪器布置、试车要求等影响，部分试车厂房的部分测点未进行测试。测试所得5个厂房各阶段加速度峰值见表2。

由表2可知：

(1) 各厂房试车间屋面板中心竖向加速度峰值均大于厂房屋面大梁中心竖向加速度峰值，因这5个试车间的发动机均挂于试车间屋面板上，且屋面板刚度小于大梁刚度，导致楼板振幅较大。

表2 厂房振动测试时各阶段加速峰值

测点编号及描述	加速度峰值(mm/s ²)									
	1号环境振动	1号最大加力	2号环境振动	2号最大加力	3号环境振动	3号最大加力	4号环境振动	4号最大加力	5号环境振动	5号最大加力
1. 试车间台架上方钢梁长轴(沿发动机方向)	-	-	1.4	-	52.88	987.7	11.4	546.1	11.6	215.7
2. 试车间台架上方钢梁短轴	-	-	1.1	-	60.53	1041.8	8.8	446.8	8.0	71.4
3. 试车间台架上方钢梁竖向	-	-	2.1	-	62.92	1038.6	6.9	644.4	19.6	151.6
4. 试车间房顶大梁长轴(沿发动机方向)	1.8	716.2	1.3	1004.0	20.2	395.8	3.4	343.9	20.2	80.9
5. 试车间房顶大梁短轴	1.2	234.8	1.2	822.4	19.1	282.9	4.3	224.8	7.6	49.8
6. 试车间房顶大梁竖向	1.3	1093.1	2.0	749.1	19.6	566.9	5.7	509.4	22.0	119.0
7. 试车间房顶楼板长轴	0.6	567.9	-	-	20.4	429.8	3.2	287.2	10.2	108.3
8. 试车间房顶楼板短轴	2.8	236.2	-	-	17.3	493.9	-	-	9.8	69.3
9. 试车间房顶楼板竖向	0.9	1409.2	-	-	19.5	1342.5	7.7	642.7	20.9	146.4
10. 试车间外墙中部长轴	1.2	501.2	11.7	1004.0	-	-	6.1	411.6	-	-
11. 试车间外墙中部竖向	-	-	-	-	-	-	4.4	304.6	-	-
12. 测控间楼板长轴	5.5	244.7	0.7	337.8	18.0	243.1	12.1	224.4	2.7	17.5
13. 测控间楼板短轴	5.0	344.8	1.2	407.1	19.3	382.1	10.8	567.0	3.0	29.1
14. 测控间楼板竖向	16.0	870.4	2.6	788.7	84.5	830.9	10.1	1107.6	14.0	117.1
15. 测控间地板竖向	111.7	4903.0	-	-	142.7	886.0	18.5	1341.8	33.1	285.0
16. 测控间静电地板竖向	-	-	-	-	-	-	-	-	30.1	272.1
17. 测控间大梁长轴	4.9	315.9	4.6	335.8	20.5	248.2	11.0	1254.6	-	-
18. 测控间大梁短轴	3.0	320.2	10.5	284.9	33.8	286.6	12.3	329.7	-	-
19. 测控间大梁竖向	14.4	684.6	11.7	730.4	88.3	557.2	8.9	946.0	2.4	22.3
20. 测控楼一层油泵地面竖向	18.0	1778.2	-	-	-	-	-	-	-	-
21. 测控楼一层柱边竖向	2.4	445.3	3.0	312.7	-	-	-	-	-	-
22. 排气塔外地面竖向	1.7	306.6	-	-	-	-	-	-	-	-
23. 排气塔墙角竖向	13.3	818.2	-	-	-	-	-	-	-	-
各测点最大值	111.7	4903.0	11.7	1004.0	142.7	1342.5	18.5	1341.8	33.1	285.0

(2) 各厂房试车间屋面板中心竖向加速度峰值均大于水平向加速度峰值, 且基本上沿发动机方向的加速度峰值大于垂直于发动机方向的加速度峰值。

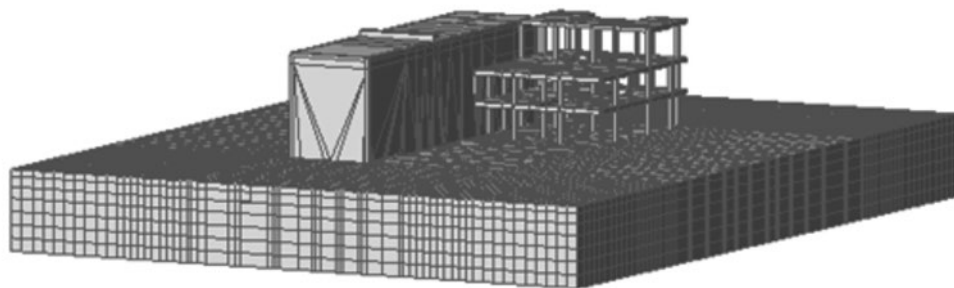


图2 试车间、测控楼及下部土体整体模型

(3) 各测控间楼板中心竖向加速度峰值均大于主梁中心的竖向加速度峰值。因测控间大梁刚度远大于楼板刚度, 故楼板振动比大梁强烈。

(4) 各次测试的测控间楼板中心竖向加速度峰值均大于垂直发动机方向的水平加速度峰值, 又大于沿发动机方向的水平加速度峰值。

(5) 各次测控间静电地板竖向加速度峰值均明显大于其对应的楼板竖向加速度峰值。静电地板测点上无压重, 对楼板振动有一定放大作用。

(6) 各次厂房测点在加最大推力时的加速度峰值明显大于环境振动的加速度峰值。

(7) 试车间内振动与发动机类型直接相关, 在同样最大加力情况下, X型发动机试车厂房的振动明显小于Y型发动机试车厂房的振动。

(8) 对比1号厂房的测点20及测点21, 一层供油室竖向振动加速度是柱边竖向振动加速度的4倍, 说明供油室油泵引起的竖向振动非常大。

(9) 1号厂房测点23排气塔墙体竖向振动加速度峰值明显大于其附近外墙地面的竖向振动加速度, 说明排气塔墙体所测振动主要由自身振动引起, 且排气塔振动明显, 其振动值与测点14测控间楼板竖向振动值接近, 说明排气塔振动对测控间振动的影响不可忽视。

2 振动有限元分析

在以往的试车厂房设计中, 针对减小测控间振动的问题, 都是概念性的采取措施, 如将测控楼与试车间的基础脱开、加大测控间楼板厚度, 但是从未进行过实测和量化分析, 对于这些措施的有效性不得而知。因此本次在实测数据的基础上, 建立了土体—结构基础—上部结构的整体有限元分析模型, 求解发动机试车振动作用下试车间及燃油测控间全过程时域动力响应。通过对试

车间及测控间振动实测, 对全过程性能化分析结果进行对比, 对测控间是否满足振动安全控制标准进行评价, 并通过计算, 提出经济可行的测控间减振方案。

2.1 有限元分析模型

本次分析采用MIDAS GEN进行分析, 选取四号试车厂房进行计算分析。因试车厂房振动非常复杂, 测试时主要测试了试车间及测控间的结构构件振动情况, 故计算模拟时只取试车间及测控间部分进行计算, 旨在分析试车间内振动对测控间振动的影响。

2.1.1 土体动力学参数

土体动力学参数参考地勘报告并进行简化, 详见表3, 等效剪切波速估算值为250~500m/s左右, 根据王田友^[3]阻尼比取值的相关研究, 本文取土体材料阻尼比为5%^[4]。

表3 土体动力学参数

土质	重度 KN/m ³	弹性模量 MPa	泊松比 Vs
粉质粘土	19.1	522	0.40
圆砾	20.0	1000	0.32

2.1.2 分析模型和单元参数

基础及土体均使用8节点三维实体单元模拟, 基础与土体实体单元进行节点耦合。

结构模型的柱和梁采用梁单元模拟, 墙采用板单元模拟, 每个节点有3个平动自由度和3个旋转自由度。

根据现场条件及以上相关参数, 采用MIDAS软件建立“土体—基础—上部结构”整体有限元分析模型。

2.1.3 有限元网格尺寸及划分依据

用于动力分析的有限元网格可模拟振动波的形状, 以获得较准确的结果。根据杨永斌^[5]以半

无限域自由面上受一单位简谐荷载为例，进行的有限元网格尺寸分析，主要结论如下：

(1) 单元网格的范围宜取 $2\lambda s \sim 3\lambda s$ (λs 为土层中剪切波长)；

(2) 单元网格的长度宜取 $\lambda s/6 \sim \lambda s/12$ ，在振源附近宜不大于 $\lambda s/12$ 。

为使因虚拟边界产生反射波的影响减至最小，模型尺寸取为80m(X向) \times 100m(Y向) \times 10m(Z向)，在振源附近网格划分较密，随着距离的增加网格逐渐稀疏。

2.1.4 土体边界条件处理

采用有限元法模拟半无限介质的波动问题时，在截断边界处会引起应力波的反射，使得计算失真。为了避免产生此影响，可在模型四周设置弹簧阻尼吸收边界，底部全部固结^[6]。模型中边界设置弹簧单元，用于计算模型内波动的黏弹性人工边界条件为：

$$C_b = \rho c \quad (\text{式1})$$

$$K_b = \alpha G/R \quad (\text{式2})$$

式中： C_b 和 K_b 分别为施加于人工边界上的黏性阻尼和弹簧刚度； ρ 为土体质量密度； c 为波速(分纵向和横向)；参数 α 按纵向(Z向)和横向(X或Y向)分别取2.0和1.5； R 为振源到人工边界计算点的距离， G 为土体剪切模量。

2.2 试车间内振动对测控间振动影响

将实测台架上方钢梁的振动加速度时程曲线(包括X/Y/Z三向振动)作为振源作用在试车间楼板及大梁处，分析试车间及测控间的振动情况。台架上方钢梁Y向及Z向加速度时程见图3。

因整体试车时间约2000s，如果全过程模拟，计算量过大且意义不大，故取最大加力区段1850~1950s，共100s进行计算分析。

计算分析所得试车间房顶楼板振动加速度最大区段(1920~1930s)，试车间楼板、大梁、墙体振动加速度与实测值对比见表4。

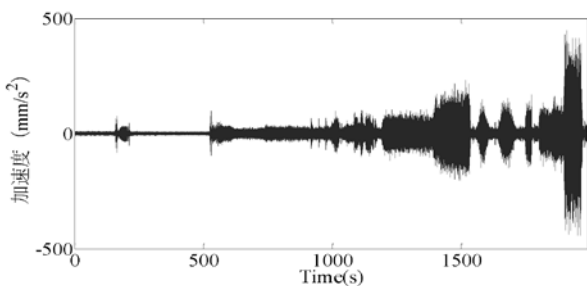


图3-a 台架钢梁X向加速度时程

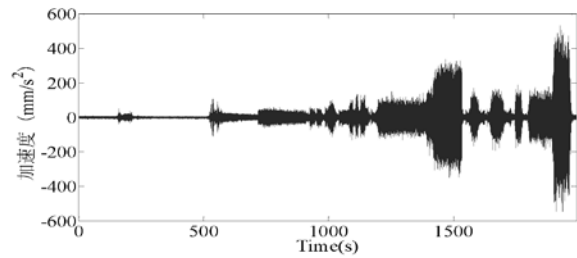


图3-b 台架上方钢梁Y向加速度时程

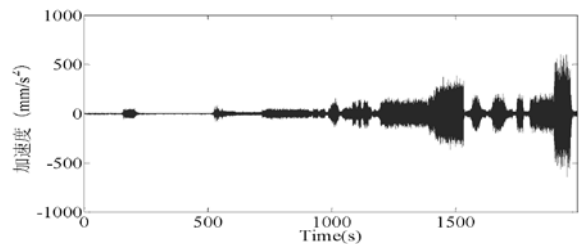


图3-c 台架上方钢梁Z向加速度时程曲线

表4 试车间各构件加速度计算值与实测值对比

测点编号及描述	计算加速度最大值(mm/s ²)	实测加速度最大值(mm/s ²)
1. 试车间房顶楼板Y向(沿发动机方向)	290.71	287.16
2. 试车间房顶楼板Z向	616.35	642.69
3. 试车间房顶大梁X向	220.56	224.71
4. 试车间房顶大梁Y向	295.63	343.87
5. 试车间房顶大梁Z向	508.66	509.35
6. 试车间外墙Y向	207.73	411.57
7. 试车间外墙Z向	297.44	304.53

通过表4可知，试车间房顶楼板、大梁及墙体振动的计算值基本比实测值略低，其中，试车间外墙Y向振动实测值比计算时大较多，经分析认为，是因外墙测点设在外墙挑板尽量贴近外墙处，其Y向振动会有放大。以上可以说明，分析采用的有限元模型、计算参数和计算假定可反映实际情况，用于后续分析是可行且准确的。

下面继续分析试车间内振动对测控间振动的影响。本模型基础脱开，试车间内振动通过土体传到测控间，经计算，测控间楼板振动加速度最大值出现在靠近试车间的柱边大梁，计算分析所得测控间楼板、大梁加速度与实测大梁振动加速度对比见表5。

表5 试车间各构件加速度计算值与实测值对比

测点编号及描述	计算加速度最大值(mm/s ²)	实测加速度最大值(mm/s ²)
1.测控间楼板X向	46	566.96
2.测控间楼板Y向	95.6	224.32
3.测控间楼板Z向	246.74	1107.57
4.测控间大梁X向	31.95	329.64
5.测控间大梁Y向	77.1	1254.54
6.测控间大梁Z向	217.23	945.98

由表5计算结果可知,试车间内振动对测控间振动影响主要以竖向振动为主,测控间大梁由试车间内振动引起的竖向振动占总振动值约23%。此结果说明测控间振动是一个由多震源引起的振动,试车间内振动对于测控间的振动的影响并没有占决定性作用,试车间内振动引起的测控间的水平振动值较小。

2.3 供油室内油泵振动对测控间振动影响

将测控楼一层控油室油泵附近地面振动(Z向)作为振源作用在测控间地面处,分析测控间的振动情况。一层控油室柱边竖向加速度时程曲线见图4,取最大加力区段1350~1450s,共100s进行计算分析。

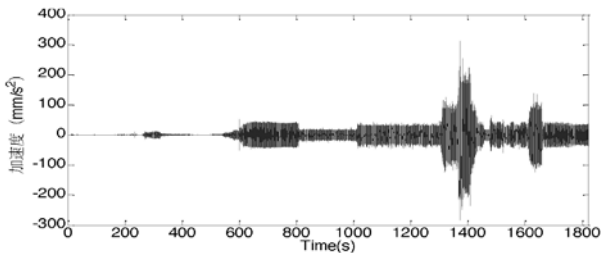


图4 一层控油室柱边竖向加速度时程

计算分析所得测控间大梁及楼板加速度与实测值对比见表6。由计算结果可知,一楼油泵振动对测控间楼板振动有明显影响,由油泵引起的竖向振动占测控间楼板总振动值的26%,建议工程设计中对油泵基础进行有效的隔振处理。

2.4 试车间与测控楼基础是否脱开对测控间振动影响

将实测台架上方钢梁的振动加速度时程曲线(图3)作为振源作用在试车间楼板及大梁处。在上部结构、振源等其他参数都相同的情况下,计算基础脱开与否两个模型,所得测控间楼板、大

表6 测控间各构件加速度计算值与实测值对比

测点编号及描述	计算加速度最大值(mm/s ²)	实测加速度最大值(mm/s ²)
1.测控间楼板X向	52.6	566.96
2.测控间楼板Y向	25.4	224.32
3.测控间楼板Z向	245.97	1107.57
4.测控间大梁X向	43.5	329.64
5.测控间大梁Y向	22.32	1254.54
6.测控间大梁Z向	244.14	945.98

表7 测控间加速度计算值与实测值对比

测点编号及描述	基础脱开模型加速度最大值(mm/s ²)	基础相连模型加速度最大值(mm/s ²)
1.测控间楼板X向	46	67.7
2.测控间楼板Y向	95.6	136.71
3.测控间楼板Z向	246.74	380.30
4.测控间大梁X向	31.95	46.58
5.测控间大梁Y向	77.1	109.8
6.测控间大梁Z向	217.23	354.87

梁加速度对比见表7。

由计算结果可知,基础脱开模型的测控间楼板振动明显小于基础不脱开的模型,基础不脱开模型振动加速度约是基础脱开模型振动值的1.5倍,通过计算可知,基础脱开的做法可有效减小测控间楼板的振动。

2.5 测控间楼板刚度对测控间振动的影响

将实测台架上方钢梁的振动加速度时程曲线(图3)作为振源作用在试车间楼板及大梁处。通过调整测控间楼板厚度,分析测控间楼板刚度对振动的影响,分别取板厚120mm、130mm、150mm,对比结果见表8。

由计算分析可知,楼板厚度对测控间楼板及

表8 测控间加速度计算值与实测值对比

测点编号及描述	加速度最大值(mm/s ²)		
	120mm	130mm	150mm
1.测控间楼板X向	46.00	45.6	44.40
2.测控间楼板Y向	95.60	94.4	92.4
3.测控间楼板Z向	246.74	258.26	268.2
4.测控间大梁X向	31.95	31.05	29.70
5.测控间大梁Y向	77.1	76.2	74.85
6.测控间大梁Z向	217.23	216.26	214.56

大梁振动影响很小,单纯通过加大楼板厚度的方法减小楼板振动的方法行不通,主要是因为测控楼梁柱刚度对测控间振动值的影响更大。

3 结论

3.1 振动检测结论

(1) 根据试车厂房的实测数据可知,试车间在进行试车试验时,测控间楼板振动为三向振动,以竖向振动为主。

(2) 试车间内振动与发动机类型直接相关,在同样最大加力情况下,Y型飞机试车台的振动加速度明显小于X型飞机试车台的振动加速度。

(3) 测控间设置的静电地板放大了楼面的振动影响,在无压重时尤其明显,应采购刚度好的产品并采取增设压重、铺设橡胶垫等措施减小楼面振动。

3.2 振动分析结论

(1) 测控间大梁由试车间内振动引起的竖向振动加速度占总振动加速度的23%左右,此结果说明测控间振动是一个由多震源引起的振动,试车间的振动对于测控间的振动影响并没有占决定性作用。

(2) 测控间下方油泵振动对测控间楼板振动有明显影响,测控间大梁由油泵引起的竖向振动加速度占大梁总振动加速度值的26%左右,建议工程设计中对油泵基础采取隔振措施,并与相邻建筑物基础隔离。

(3) 基础脱开模型的测控间楼板振动加速度明显小于基础不脱开的模型,基础脱开模型比基础不脱开模型的竖向振动加速度值减小33%左右,通过此计算可知,基础脱开的做法是有效的。

(4) 通过加大测控间楼板厚度来减小楼板振动这个方法效果欠佳,后续设计不建议采取单纯加厚楼板的方法减小测控间振动。

(5) 上述试车间内振动和测控间下方油泵振动这两个振源对测控间楼板振动的影响仅占50%左右,排气塔振动、引射筒等地的管道振动对测控间楼板振动均有影响,有条件时可采取相应措施。

参考文献

[1] 史今春,王宏伟. 航空发动机试车台厂房计算负荷分析[J]. 智能建筑电气技术, 2014, 2(8): 27-29.

SHI Jin-chun, WANG Hong-wei. Computational load analysis of aeroengine test stand factory[J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2014, 2(8): 27-29.

[2] 艾延延,周海仑,孙丹,等. 航空发动机整机振动分析与控制[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32(5): 1-25.

AI Yan-yan, ZHOU Hai-lun, SUN Dan, et al. Study on the control of the whole aero-engine vibration[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2015, 32(5): 1-25.

[3] 王田友. 地铁运行所致环境振动与建筑物隔震方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007: 64-65.
WANG Tian-you. Environmental vibration and vibration isolation method research about building caused by the subway operation [D]. Shanghai: Tongji University, 2007: 64-65.

[4] 杨维国,李明斌,顾世奇,等. 地铁所致成都博物馆振动振源减振研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 1(1): 102-108.

YANG Wei-guo, LI Ming-bin, GU Shi-qi, et al. Research on the Source reduction of vibration of Chengdu Museum induced by metro running [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 1(1): 102-108.

[5] 杨永斌. 高速列车所导致之土壤振动分析[R]. 台北: 中兴工程顾问社, 1996.

YANG Yong-bin. Analysis of soil caused by the vibration of high-speed train [R]. Taipei: Sinotech Engineering Consultants Inc., 1996.

[6] 葛家琪,王毅,张玲,等. 地铁所致成都博物馆振动全过程性能化分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(2): 27-34.

GE Jia-qi, WANG Yi, ZHANG Ling, et al. Performance-based study on whole process of metro induced vibration of the Chengdu Museum [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(2): 27-34.

某螺旋桨滑流气源系统 控制方法

■ 史金春 [电气]

摘要: 对于螺旋桨滑流气源控制系统而言,国内尚无成熟应用,传统的滑流气源系统通过自力式减压装置手动实现气体和流量的稳定控制,此方式仅可在小压力低流量情况下进行,无法满足高压、大流量的现实需要,同时无法监视和自动控制压缩气体及加热设备的能源消耗情况,产生了极大的能源浪费。本文结合实际工程情况,根据滑流气源系统特点、用户需求、工作流程,详细叙述了一种螺旋桨滑流气源系统新的控制方法,解决了全过程自动控制,实现气流压力、温度快速稳定技术关键点。

关键词: 滑流气源; 压力温度; 控制方法

0 引言

螺旋桨飞机是靠螺旋桨旋转将发动机的功率转变成拉力使飞机向前运动的,螺旋桨对飞机的影响主要包括直接影响和间接影响,直接影响主要是它产生的拉力、扭矩和法向力,拉力和扭矩可以用理论计算方法得到,但在多数情况下,要想获得螺旋桨的法向力随气流偏角的变化数据却是很困难的。虽说也有经验公式可提供估算其产生的影响,但光凭估算是远远不够的。而目前解决这一问题的有效途径仍然是地面试验,滑流试验系统的开发为螺旋桨滑流试验提供了实验设备和技术保障。

作者简介:史金春,男,工程师,2012年毕业于中国矿业大学(北京)电力系统及其自动化专业,现就职于航空工业规划飞机工程设计研究院。

1 滑流气源系统工作原理

地面螺旋桨滑流气源试验系统用于为地面螺旋桨提供一个稳定的温度、压力、流量气源,通过改变螺旋桨进口进气量而使螺旋桨有不同转速,经过数据采集系统采集螺旋桨转速、受力等参数进行分析的一种地面模拟试验。本文仅对滑流气源系统进行阐述,不涉及螺旋桨数据采集和分析系统。

1.1 螺旋桨滑流气源系统组成

螺旋桨滑流气源系统原理示意图如图1所示。

滑流气源系统主要有室外储气罐、保温高压管路、气动截止阀、一级/二级大小流量气动调压阀、初级/次级电加热、温度、压力传感器及控制系统等组成。控制系统主要由上位机、PLC控制器、UPS、交换机等设备组成,用于滑流气源系统

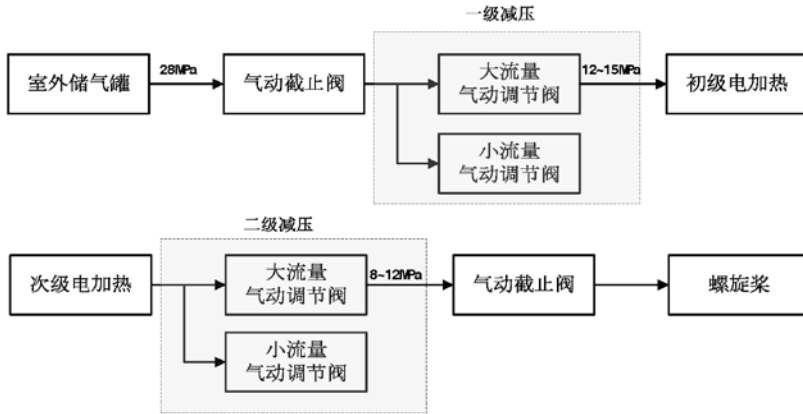


图1 螺旋桨滑流气源系统原理示意图

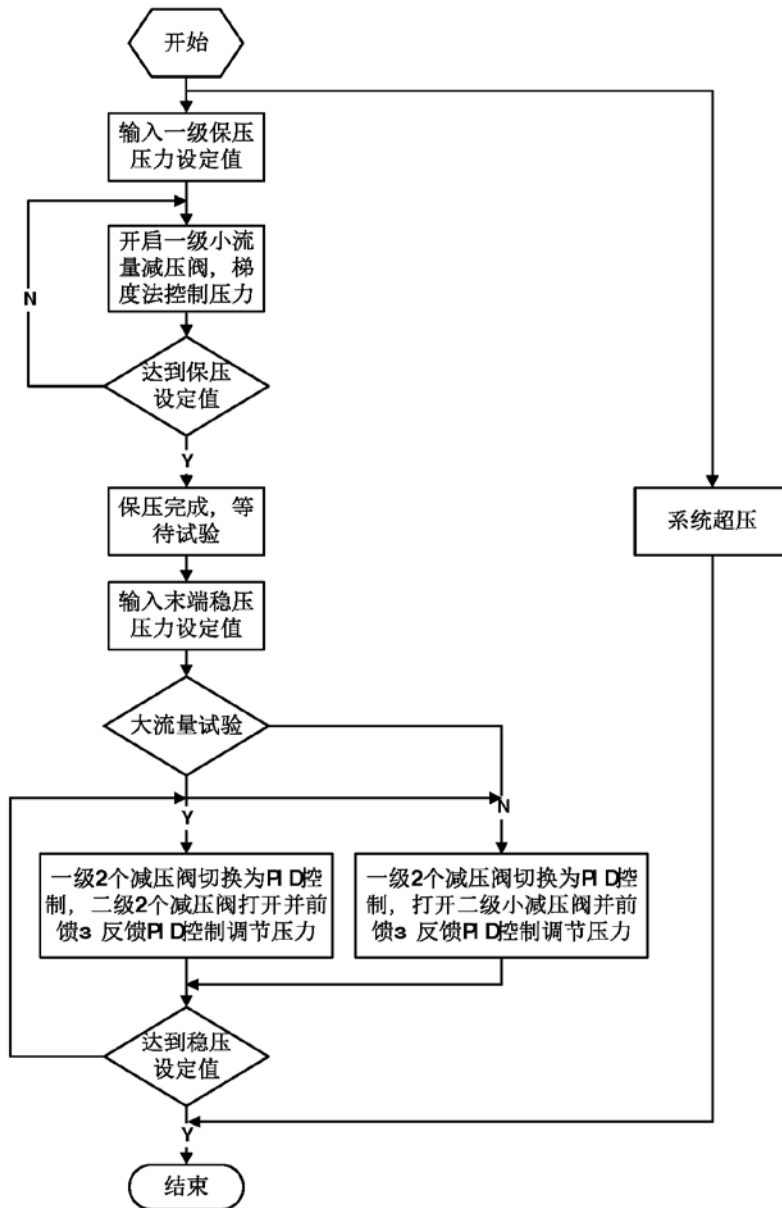


图2 滑流气源压力控制流程图

远程监视和自动控制。

1.2 螺旋桨滑流气源系统工作原理

室外气罐存储最高28MPa高压气体，高压气体经过一级大小流量减压阀后压力降到12~15MPa，经过二级大小流量减压阀后压力降到8~12MPa，然后高压气流吹动螺旋桨转动，进行数据采集和分析。

如图1所示，螺旋桨滑流气源系统一级、二级减压各有两个气动调压阀并联组成，两个调压阀协调工作保证出口处压力和流量满足要求，气体流量在小流量范围时小减压阀参与控制，气体流量在大流量范围时大、小减压阀联合工作。在一级减压后主管路设压力传感器，作为一级减压系统控制目标，二级减压后设压力传感器，作为末端螺旋桨压力控制目标。

1.3 滑流气源系统特性及控制关键点

螺旋桨滑流气源系统控制对象为温度、压力、流量3个参数，控制变量有一级大小减压阀、二级大小减压阀4个变量，系统有着控制变量多，控制对象存在耦合的特性。同时在螺旋桨大流量实验模式下，实验持续时间仅为几分钟，气罐每次充气时间却耗几个小时，若不能快速建立末端稳定气流，将直接影响正常试验同时会造成人力和经济成本浪费。

2 滑流气源系统控制方法

螺旋桨滑流气源系统控制参数为压力、流量和温度。经过调试发现压力和流量存在一

定关系，根据调试生成曲线可推导出压力—流量对应函数关系式。同时高压空气通过水—气换热器进行热量交换，由于循环水量较大，降压过程空气温度降低较难对循环水系统温度产生影响，试验前通过电加热器将水罐内水加热到预热温度，试验中通过调节冷热水三通比例阀较容易实现温度控制，系统运行发现温度与压力耦合性不明显，因此系统关键在于高压气流压力控制，本文主要阐述滑流气源压力控制方法。

2.1 滑流气流压力控制

根据系统特点，采用将一级和二级减压分别控制思路，一级减压分保压和稳压两种模式，二级减压分大流量、小流量两种模式，先控制一级减压后压力达到保压设定值后一级二级减压联合控制，最终达到螺旋桨前端压力设定值，气流压力控制流程如图2所示。

首先，设定一级减压后保压压力值，由于此过程对时间和过程要求不高，用一级小流量减压阀即可满足要求。具体采用梯度压力控制法，即比较设定值和反馈值之差，差值较大时直接向小减压阀发送开度命令，再实时比较差值，不断减小减压阀开度直至压力稳定。如监测到设定值比反馈值大2MPa，直接将一级小减压阀开度至50%，设定值比反馈值大1Mpa时，将一级小减压阀开度置20%。随着室外高压气罐气体不断进入管道，设定值与反馈值之差不断减小，一级小减压阀开度也不断减小，直至设定值与反馈值之差为0。

其次，保压完成后根据螺旋桨试验需求选择大流量或者小流量模式并输入二级末端稳压压力设定值。选择大流量模式时一级两个小减压阀控制模

式切换为PID控制模式，控制对象为二级减压前压力。二级两个减压阀切换为前馈—反馈PID控制模式。小流量模式时，同样一级两个减压阀切换为PID模式，二级大减压阀关闭，小减压阀为前馈—反馈PID控制。

2.2 压力前馈—反馈PID控制

二级减压阀门开度值为前馈和反馈输出叠加值，前馈起到快速预置作用，反馈起到精调作用，由于不存在前馈反馈控制切换，可以防止切换带来的压力波动，由于前馈算法存在，系统的抗干扰性也大大提高。

前馈—反馈PID控制原理如图3所示。

1) 阀门开度Cv值计算公式如下所示：

$$C_v = k1.167 \cdot Q_v \sqrt{\frac{\rho \cdot \Delta P_0}{\rho_0 \cdot \Delta P}} \quad (1)$$

式中：CV—阀门开度；

k—流量系数；

Q_v—气体体积流量，m³/h；

ρ—高压空气气体密度，kg/m³；

ρ₀—水的密度，1000kg/m³；

ΔP—阀门前后压差，Mpa；

ΔP₀—0.1Mpa。

2) 压缩空气体积流量计算公式：

$$Q_v = \frac{3600 \cdot Q_m}{\rho} \quad (2)$$

式中：Q_v—气体体积流量，m³/h；

Q_m—气体质量流量，kg/s；

ρ—高压空气气体密度，kg/m³。

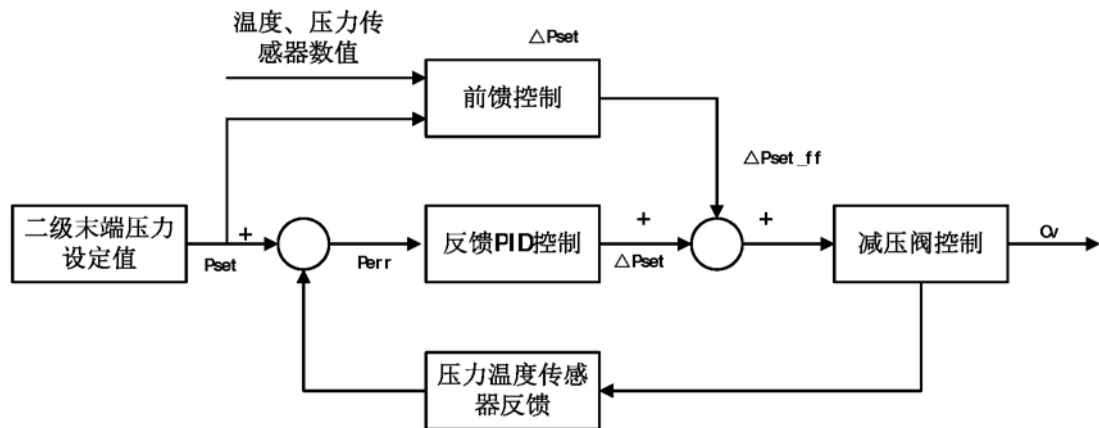


图3 滑流气源二级压力前馈—反馈PID控制原理图

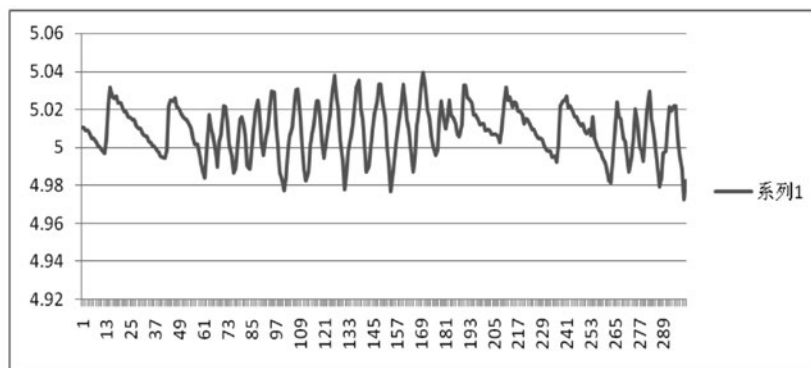


图4 滑流气源二级减压压力曲线

3) 压缩空气密度计算公式:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (3)$$

式中: ρ —高压空气气体密度, kg/m^3 ;

P —阀前气体压力, Pa;

T —阀前气体温度, K;

R —气体常数, $287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

阀门开度前馈值计算如下:

1) 先通过式 (3) 计算得到所处阀门处的气体密度;

2) 通过式 (2) 计算得到体积流量 Q_v ;

3) 通过公式 (1) 计算得到阀门开度 C_v 。

压力数值为传感器测得和上位机输入设定值, 温度数值为传感器测得数值, 计算得到的阀门开度与PID输出代数叠加后通过PLC模拟量输出模块发送二级减压阀定位器, 可直接将阀门开至预定开度然后精确调节, 实现快速稳压控制, 该系统经过反复调试得到 C_v 值系数 k 为1.05。

试验记录的二级减压压力曲线如图4所示。

上图为地面螺旋桨一组实验的压力曲线, 横坐标为采集时间, 纵坐标为螺旋桨末端压力, 采样速率1次/S, 螺旋桨入口压力设定值5Mpa。通过上图可知末端压力稳定在4.98~5.04Mpa之间, 即 $\pm 0.03\text{Mpa}$, 满足技术指标, 同样其他不同压力设定值也满足技术参数要求。

3 结语

按本文设计的控制系统和控制方法可对地面螺旋桨滑流气源的气体压力、温度、流量的控制及状态实时监视, 快速实现螺旋桨所需高压气体压

力、温度稳定, 属于一种应用于地面的对螺旋桨进行测试的自动化控制技术。

根据试验过程和系统特点, 通过对一级、二级减压采用梯度压力控制——经典PID控制——前馈—反馈PID控制相结合的方式, 实现了对螺旋桨滑流气源的压力和流量的快速稳定控制, 满足试验要求。

该系统投入一年半来运行良好, 相较传统气源控制灵活性、稳定性大大提高, 为螺旋桨地面试验提供了多种组合模式, 无缝衔接螺旋桨数据采集系统, 填补了国内地面螺旋桨自动控制领域空白。

预装式变电站设计及应用要点

■ 郭翔 王世忠 赵亮亮 [电气]

摘要: 本文结合某预装式变电站项目,探讨预装式变电站设计及应用过程中的要点和难点。预装式变电站作为综合性预装式建筑物,应由各专业合作完成设计,要合理划分功能区域、布置配电装置及分舱,达到施工周期短、生产及安装可控、维护方便等目标。

关键词: 预装式变电站; E-House; E-house外部系统

0 引言

随着社会经济飞速发展,现场工人将会迅速减少,用工成本极大提高。随着我国扶贫事业的发展,贫困偏远地区用电需求急速提高;“一带一路”的宏伟蓝图逐渐展开,沿途各国基础设施的援建速度进一步加快,预装式变电站的应用愈加广泛。本文将结合某液化天然气工厂项目为例,从电气设计人员应用预装式变电站的角度,探讨预装式变电站设计及应用过程中的要点及难点。

1 项目概况

本项目建设在内蒙古自治区包头市,总处理能力 $10\text{万m}^3/\text{天}$,属中小型液化天然气项目。本项目体量适中,存在现场施工成本较高、施工工期紧等问题。

本项目占地面积较大,但施工周期长,当地冻土期较早,且项目规划须当年供暖开始前投入生产,故从设计初期便将所有能够预装的设备设施等

进入预装式设计。

2 预装式变电站简介

预装式变电站是指将电气设备安装在特制机械结构的钢结构箱体,组成完整的变配电系统。它是一种在工厂系统预装的,并通过系统调试的,完整的大型成套设备,主要包括中压开关柜、变压器、低压开关柜、UPS、直流屏、电气监控及通讯系统等设备和相应的内部设备的电缆及母线连接,以及消防报警灭火, HVAC空调通风,室内照明等其他辅助设备,组成的功能齐全的预装式变电站,存在着现场施工周期短,生产安装品质可控,维护方便等优点。

预装式变电站起源于20世纪90年代模块化工厂的概念,即整个工厂规划成不同的模块,如生产模块、工艺模块、电气模块等,其中预装式变电站就是在电气模块化的需求下应运而生,被广泛运用在工业领域的工艺配电中。关于预装式变电站,美国市场称其为PDC (Power Distribution Center),澳大利亚市场称其为Power House,欧洲市场称其为E-House (图2)。

作者简介:郭翔,男,助理工程师,2014年毕业于华北电力大学(保定)电气工程及其自动化专业,现就职于航空工业规划市政工程设计研究院。

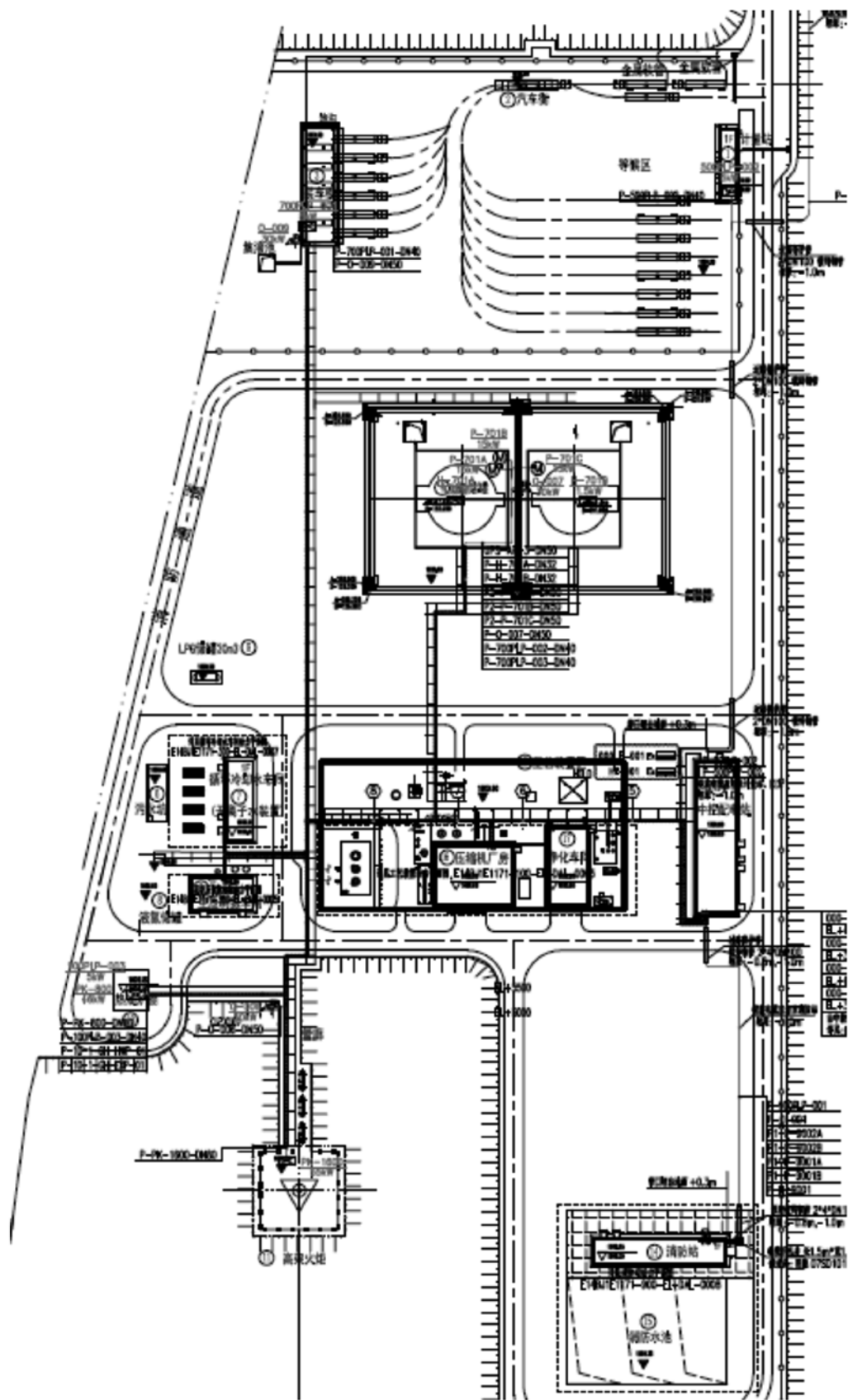


图1 总平面图

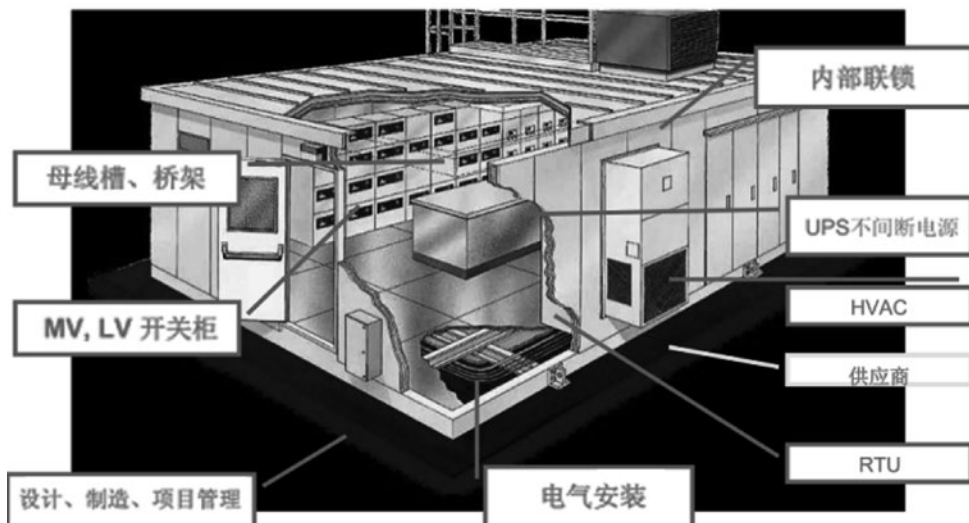


图2 预装式变电站典型结构

3 设计及应用要点浅析

本节将从电气设计人员在设计时遇到的关键节点出发，详细分析电气设计人员在应用、设计预装式变电站时遇到的要点及难点。

3.1 成本对比

电气专业应在设计初期积极配合技术经济专业对比传统土建式变电站与预装式变电站的营建成本。其中，预装式变电站应将运输、包装及其他费用同时计入以准确核算成本。在前文中提到的项目中，其存在着可施工工期短，整体施工周期短等问

题，且项目现场地处内蒙古平原地区，运输成本及难度较低，故综合考虑采用预装式变电站。

3.2 合理划分功能区域

预装式变电站在设计应用初期，应确定其都应具有哪些功能。因预装式变电站与一般的箱式变压器不同点在于预装式变电站为独立的建筑物，其可以承担与一般土建式建筑物相同的功能，如：控制室、监控室、办公室等。因此，电气专业应协同控制专业、建筑专业等一同确认功能区域。

3.3 合理布置及分舱

3.3.1 合理的配电装置布置

预装式变电站E-House单位面积造价较高，在电气设计时应尽量紧凑布置。对于一般土建式变电站，其配电装置布置应满足GB50053-2013《20kV及以下变电所设计规范》、GB50054-2011《低压配电设计规范》及GB17467-2010《高压低压预装式变电站》中的相关规定。其中影响设计的有关难点要点及解决方案如下：

(1) 预装式变电站单台变压器的容量不宜大于800kVA；

本条规定主要出于因预装式变电站空间狭窄，变压器难以散热考虑。电气专业应与暖通专业



图3 预装式变电站外形

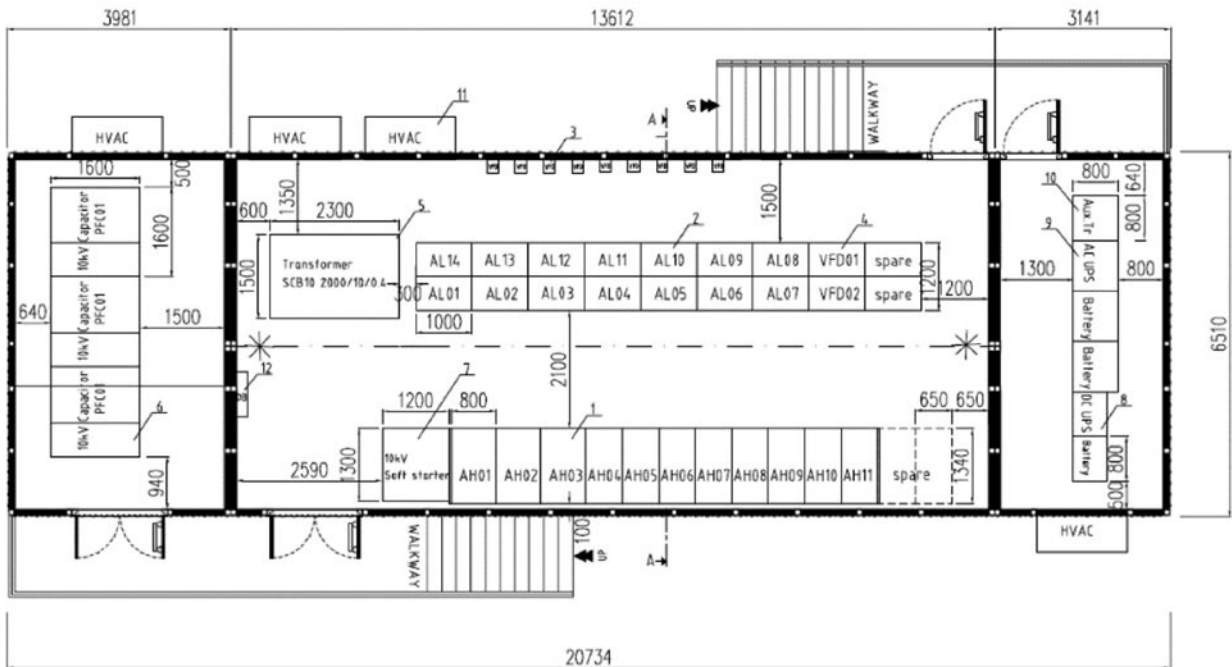


图4预装式变电站E-House布置图

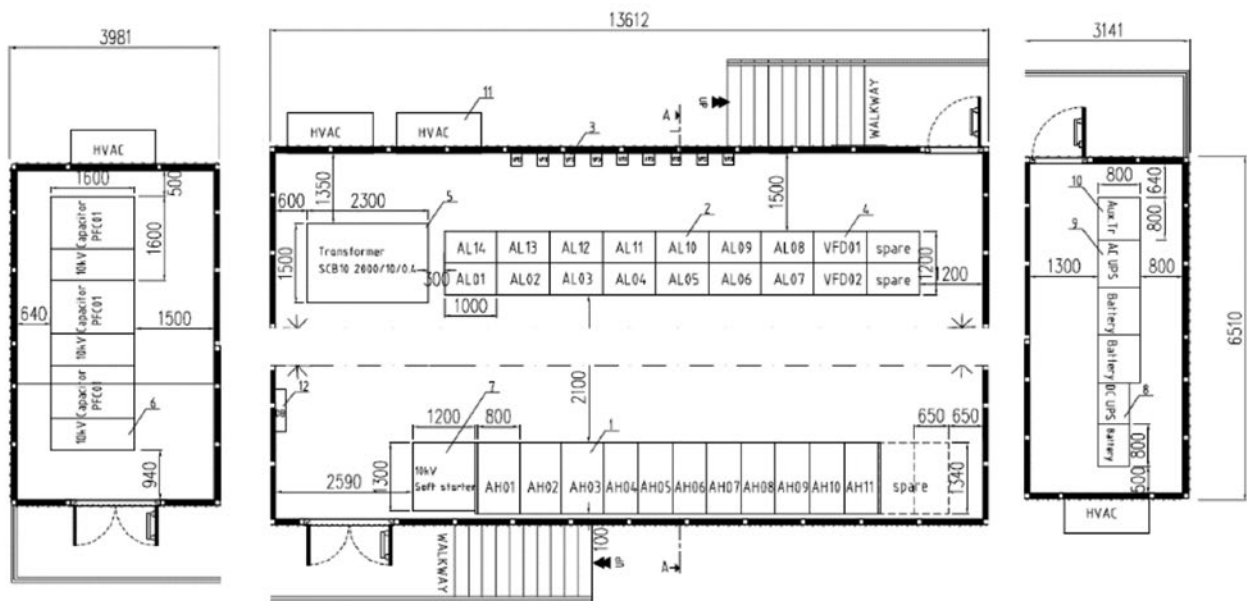


图5 预装式变电站E-House分仓示意图

协作，对散热量大的设备做好散热工作，如提高制冷量等做法。

(2) 高压配电柜单排布置柜后维护通道宽度不应小于800mm；

高压配电柜应选用全绝缘密封式的配电装置，按厂家的说明书减少通道宽度。图4中的高压柜均为柜后无需维护通道的选型，面对面布置时柜

前通道宽度不小于2000mm。

(3) 成排布置的低压配电屏双排背对背布置时柜后维护通道宽度不小于1m；

低压配电屏选型时应选用单面操作、单面维护柜型，无需设置屏后维修、操作通道。双排背对背布置时，屏前通道宽度不小于1.5m。

如图4中所示，为前文项目中的布置方案。其

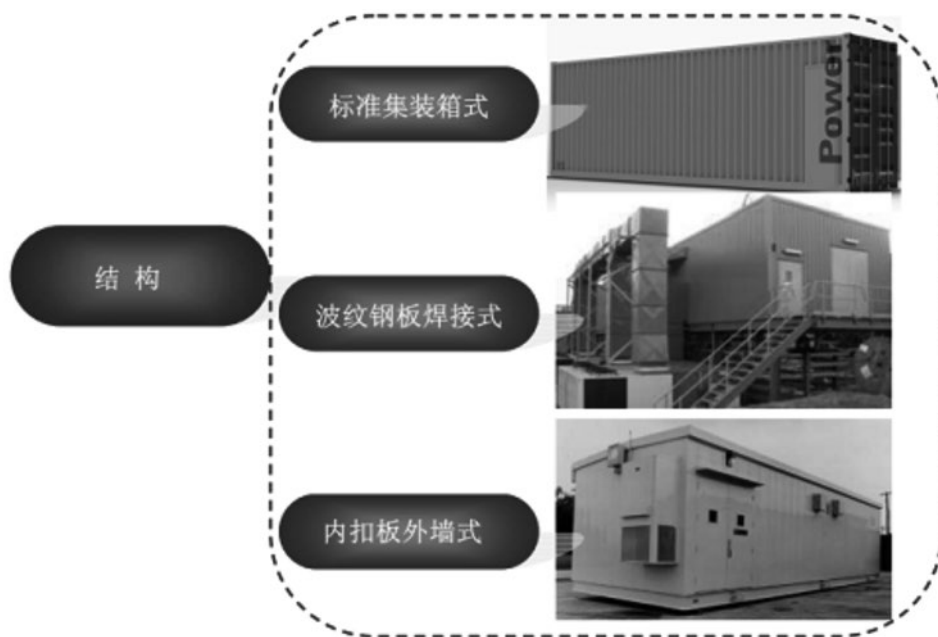


图6 预装式变电站E-House常见结构形式

中高压柜选用全绝缘封闭式设备，低压配电柜选用单面操作、单面维护柜型，采取背靠背式布置。

3.3.2 确认分舱方案

预装式变电站E-House与土建式建筑不同点在于不同房间内侧开门难度较高，故应通过分舱的方式隔离各个功能区域，如电容器柜室应独立分舱，并与其它区域贴建。

在图5中可以看到，此方案中的预装式变电站E-House被分为4个舱室，包括：1个电容器室，1个直流屏UPS室，2个高低压配电室。所有舱室的门均向预装式变电站外侧开启，尽量将两个舱室的门靠近设置，通过同一个外挂的钢平台及钢梯相连。高低压配电室采用“单舱分舱”式设计，将过宽、过长的单一舱室分为两个舱室，便于运输。

3.4 确认运输方案

因预装式变电站E-House基本都为定制产品，其外形特殊，且大部分均偏大，故应该结合项目实际情况确定运输方案。为节约成本，市面上多

表1 各结构形式简单对比

结构形式	设计难度	应用范围	生产成本	运输成本
标准集装箱式	高	小型无人值守工厂	高	低
波纹钢板焊接式	中	广泛用于工业民用各个领域	中	中
内扣板外墙式	低	海边、码头等区域，特殊区域	低	高

为以下3种产品。

3.4.1 标准集装箱式

标准集装箱尺寸相对固定，其中最大的应为45HC高柜，内部尺寸为13.556m（长）×2.352m（宽）×2.698m（高）。对于变电站来说，这个尺寸在宽、高两个方向上难以适用于一般的配电柜。但对于运输方面来说，极便于运输，集装箱半挂车即可运输，无需封路，公路、铁路、水运均适用，运输成本最低，

主要应用于小型无人值守式工厂。

3.4.2 波纹钢板焊接式

波纹钢板焊接式尺寸可定制，可根据不同项目生产不同的外形，分舱灵活，适用范围广泛。可进行如图5中高低压配电室内的“单舱分舱”设计，是现在使用最广泛的预装式变电站E-House结构形式。但其造价较高，经过分舱后的舱室大部分为非标准箱体，运输时须提前进行路勘，必要时还需封路、征地拆迁等，适用于公路、水运的运输方式。

3.4.3 内扣板外墙式

内扣板外墙式尺寸可定制，但内扣板外墙式无法进行“单舱分舱”设计，其生产出后的单舱室为一整体，相较于波纹钢板焊接式其具有结构简单、成本低廉的优势。同时，内扣板外墙式的保温、隔热、抗震等性能往往高于其他结构形式，适用于许多极端环境。但其单舱室往往过大，只能通过水运运输。同时项目须建在海边，甚至于码头内，可直接吊装完成。曾有项目先例建于阿拉斯加区域，内扣板外墙式的预装式变电站E-House通过破冰散货船运至冰盖附近，通过雪橇承载E-House后由冰上工程机械拖拽至项目现场，进行安装，但此事例过于极端，在此提及仅

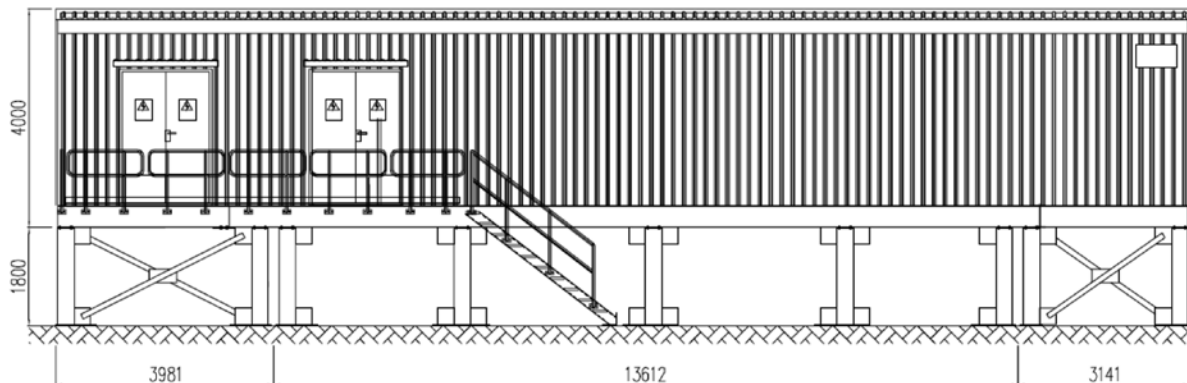


图7 预装式变电站E-House电缆夹层示意图

作为参考。

3.5 电缆夹层

因选用预装式变电站E-House主要考虑节约现场施工的成本及工期,故应根据现场实际情况选用电缆夹层。电气专业应将预装式变电站E-House的结构负荷提供给结构专业,进行结构设计。电缆夹层中的桥架宜与电缆沟相连。

3.6 消防灭火系统

预装式变电站E-House内应设置电气火灾监控系统,应与消防专业或水专业配合设置灭火装置。其中在设置FM200或氮气灭火系统时,应考虑设置气体灭火警示灯,气体灭火压力钢瓶在运输时应拆除,单独运输,节省运输成本。

3.6.1 暖通空调

在选用预装式变电站E-House时,电气专业应与暖通专业配合,提醒暖通专业选用工业一体式空调,无需设置风管,且应分舱设置,避免空间狭窄引起热量聚集。

3.6.2 电气系统

照明系统设计时应参考分舱情况,遵循最少穿越分舱区域的原则进行照明系统设计,未穿越分舱区域的柜间连接电缆可预先埋设于预装式变电站下层的夹层中。穿越分舱区域的电缆应预留,待预装式变电站在现场组装完成后再行连接。进线处可采用快插头的方式,直接连接至进线柜处。所有出线也可在预装式变电站下方预留快插头,节省现场接线工期。

4 结论

虽然预装式变电站主要由电气专业使用,但

其作为综合性的预装式建筑物,仍应由各专业合作完成设计。随着预装式变电站的广泛应用,其行业发展愈发迅猛。希望本文的分析能为应用预装式变电站的电气设计人员提供有价值的参考。

参考文献

- [1] GB50053-2013《20kV及以下变电所设计规范》.
- [2] GB50054-2011《低压配电设计规范》.
- [3] GB17467-2010《高压低压预装式变电站》.
- [4] 李奕杉.预装式变电站E-house的探索与实践[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(11):129-131.
- [5] 林冬生.预装式箱式变电站设计技术要点探讨[J].科学技术创新,2018(14):182-183.
- [6] 白世军,王莉,张玉荣,刘浩峰,杜涛.预装式变电站在电力行业的应用[J].电器工业,2017(08):72-75.

某医药工业洁净厂房给排水设计探讨

■ 李晨峥 王艳 [给排水]

摘要: 本文以某医药工业洁净厂房给排水设计为例进行探讨,结合医药工业洁净厂房的特点,介绍医药洁净工业厂房设计的给排水系统及消防系统设计,为相同建筑类型设计以参考与借鉴。

关键词: 医药工业洁净厂房;生产生活给水系统;生产生活热水系统

0 前言

近年来,随着国内经济的快速发展,人民生活水平的不断提高,健康已成为广大人民群众的基本需求,受到人民群众的普遍关注,促进了我国医药市场的规模不断扩大,医药工业厂房的设计与施工逐渐增多。

1 工程概况

该药厂位于云南省昆明市某高新技术产业基地,一期工程包括1-A#制剂生产厂房、1-B#原料药精制生产厂房、1-C#接待大厅、2#原料药粗品生产厂房、3#办公楼及后勤保障楼、4#化学品库、5#原料药回收厂房、6#锅炉房、7#门房、8#门房。

本论文针对1-B#原料药精制生产厂房的给排水及消防设计进行探讨。建筑类别为多层丙类厂房,总建筑面积约6249.97m²,建筑占地面积5133.37m²,地上1层,局部2层,地上一层层高为8m,局部二层层高均为4m,局部出屋面部分4.6m。

2 给排水设计

(1) 生产、生活给水系统

1) 给水水源及供水状况

本厂房水源为市政自来水,市政供水管网在厂区周围成环状布置,由市政给水管向厂区引入一

根DN200的给水管,供全厂区生产、生活给水及消防用水,厂区入口处供水压力0.25MPa,水质符合生活饮用水卫生标准。由于市政供水压力能够满足供水需求,因此厂房生产、生活用水由市政自来水直接供给。

2) 设计用水量的确定

本厂房用水分为生活用水、工艺用水及生产生活热水,其中,工艺用水量根据工艺专业提供的用水点水量通过计算确定。

厂房总人数70人,根据《建筑给水排水设计规范》(GB50015-2003)第3.1.12条规定,生活用水定额取50L/人·班,用水时间取8h,小时变化系数取1.5,详细计算表格见表1。

表1 生活用水量表

用水分类	人数	用水标准	用水时间	最高日用水量	平均时水量	K	最大时水量
	人	L/人·班	h	m ³ /d	m ³ /h		m ³ /h
自来水	70	50	8	3.5	0.44	1.5	0.66

本厂房为医药工业洁净厂房,为保证给水管道内水质不被污染,厂区内洁净区外的给水支管均设有倒流防止器。经计算,生活用水最高日用水量为3.5 m³/d。

工艺用水由设备生产用水及制取纯化水两部分组成。经计算,工艺用水最高日用水量为70.8 m³/d。

(2) 生产、生活热水系统

根据工艺条件,生产热水用水点每天需12h持续供应热水,而生活热水每天只需1h持续供水,因此,本厂房分别设置了生活热水系统和生产热水系统。

1) 生活热水系统

生活热水主要用于淋浴。参照《建筑给水排

作者简介:李晨峥,男,助理工程师,2013年毕业于北京工业大学给排水专业,现就职于航空工业规划医药工程设计研究院。

水设计规范》(GB50015-2003)表5.1.1-1,生活热水定额40L/人·次,本厂房人数70人,经计算,最高日用水量 $2.8\text{m}^3/\text{d}$ 。

结合云南气象资料,本厂房位置处于夏热冬暖地区,生活热水系统采用空气源热泵。

在屋面设置热泵主机,在夹层热水机房设置储热水箱、加热水箱、配套热水循环泵及配套回水循环泵。

2) 生产热水系统

生产热水主要用于厂房内三合一(过滤、洗涤、干燥)、CIP等工艺设备。

根据工艺专业提供的水量表,生产热水最高日用水量 $17.21\text{m}^3/\text{d}$ 。本厂房生产热水采用循环热水系统,热源为,工业蒸汽。

设备设置在厂房一层热水机房。循环水泵采用温度控制,在换热器出水管设置温度调节装置,设计温度可以根据生产要求设定,在生产运行前1h开始循环加热,启动循环泵,直到系统回水温度达到设计摄氏度后投入使用。

(3) 生产、生活排水系统

医药工业洁净厂房排水与一般工业厂房排水不同,不仅有生活污水和生产给水,还有许多特殊水质的排水。

厂房污、废水排放系统采用分质分流的方式,污废水重力自流排入室外污水管;生活污水经化粪池处理后排至厂区

污水管道;高温废水先排入室外降温池,再排入厂区污水管道;酸碱废水单独排入厂区污水站的中和池内处理后再排至厂区;防爆区排水在室外设置水封井,经水封井后再排入厂区污水管道。以上所有污废水均通过厂区自建污水处理站处理达标后排入市政排水管网。

(4) 纯化水系统

1) 设计用水量的确定

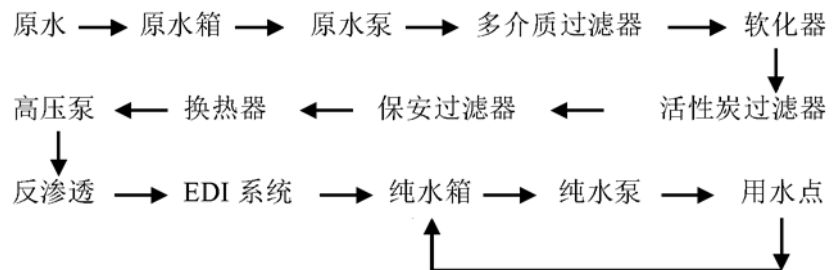
本厂房工艺用水主要为纯化水,主要用于洁净区工艺设备用水及清洗。根据《医药工艺用水系统设计规范》(GB50913-2013),纯化水水质应符合如下规定和药品生产要求。

根据工艺专业提供过的水量表,经计算纯化水用水量 $29\text{m}^3/\text{d}$,选用纯化水制水设备产水量: $q=4.00\text{m}^3/\text{h}$ 。

2) 制备流程

制备纯化水的原水应达到饮用水标准,如果原水达不到饮用水标准,应先将原水进行处理达到饮用水标准。

纯化水制备的工艺流程如下:



经以上工艺流程处理后,出水水质电阻率大于 $5\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$,管道设计为循环方式。

纯化水设备出水与储罐之间的管道应采用循环管路,降低微生物污染的风险。

根据《医药工艺用水系统设计规范》(GB50913-2013)第4.3.4.1条,纯水罐应采用无毒、耐腐蚀材料制造,本厂房采用SS316L不锈钢。

3) 系统方案的确定

根据《医药工艺用水系统设计规范》(GB50913-2013)中的规定,纯化水循环输送管路长度通常不超过400m,尽量采用单管

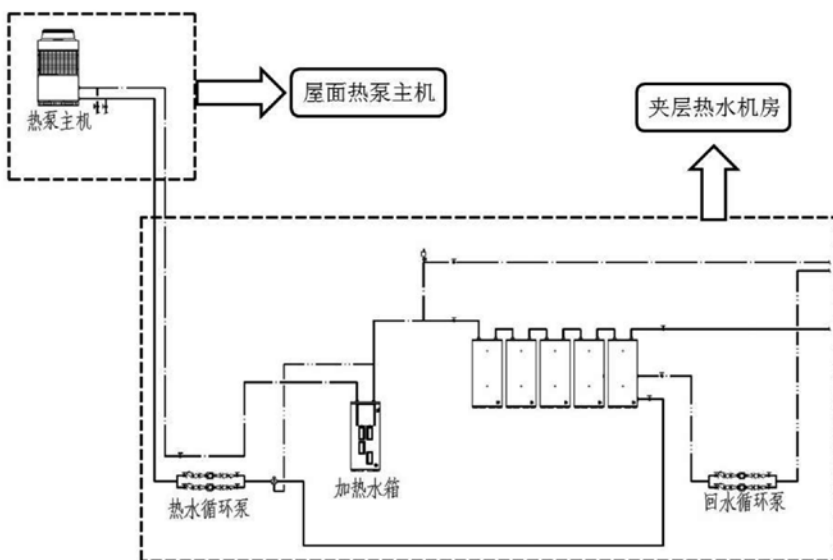


图1 空气源热泵热水系统原理图

表2 纯化水质量标准

检查项目	纯化水水质
性状	无色澄清液体，无臭，无味
酸碱度	符合规定
pH	未作规定
硝酸盐 (%)	<0.000006
亚硝酸盐 (%)	<0.000002
氨 (%)	<0.00003
电导率 (μs/cm)	符合规定，不同温度下有不同的规定值，25° C时，<5.1
总有机碳TOC (mg/L)	<0.5
易氧化物	符合规定
不挥发物	≤1mg/100ml
重金属 (%)	<0.00001
细菌内毒素	未作规定
微生物限度	≤100个/1ml

循环输送；若总长度大于400m或循环供水管路的直径DN大于65mm，需采用双管循环输送或二次分配系统循环输送。

本厂房占地面积较大且用水点较多，为采用单管循环输送，设计两套分配系统，使本厂房循环输送管路长度不超过400m且管径不大于65mm。

两套分配系统分别包括：精致区一、精致区二和QC、研发区。

4) 清洗、消毒及灭菌

根据《医药工艺用水系统设计规范》(GB50913—2013)第4.5.2条，纯化水储罐和输送系统应设置清洗、消毒设施。

多介质过滤器在运行一段时间后，由于表层截留了大量悬浮杂质，甚至造成滤料结成泥球，流经的水的压力损失将增大，并且部分截留物质可能透过滤层，污染出水水质，因此，多介质过滤器需定期反冲洗，以除去截留物。

活性炭过滤器经过一段时间的使用后，拦截在过滤器上流侧的有机物，会使活性炭使用后的水中微生物的指标超过处理前的进水指标，因此，活性炭过滤器应定期反冲和消毒，以降低活性炭过滤器上流侧的生物负荷。

经长时间运行后，即使预处理方法适当，反渗透膜仍不可避免地逐渐被浓水中的无机物、微生物、金属氢氧化物、胶体和不可溶性有机物所污染。当膜表面污染物聚集到一定程度后，压差逐渐提高，产水量和脱盐率下降，因此，反渗透水处理装置需定期进行化学清洗及消毒，以保持正常运行和防止微生物滋生。

本厂房反渗透膜具有承受80°C以上的巴氏消毒的性能，因此采用巴氏消毒进行消毒和灭菌。

每个循环管路配备一台双端板结构卫生型壳管式换热器，用于管路巴氏消毒，系统进行消毒

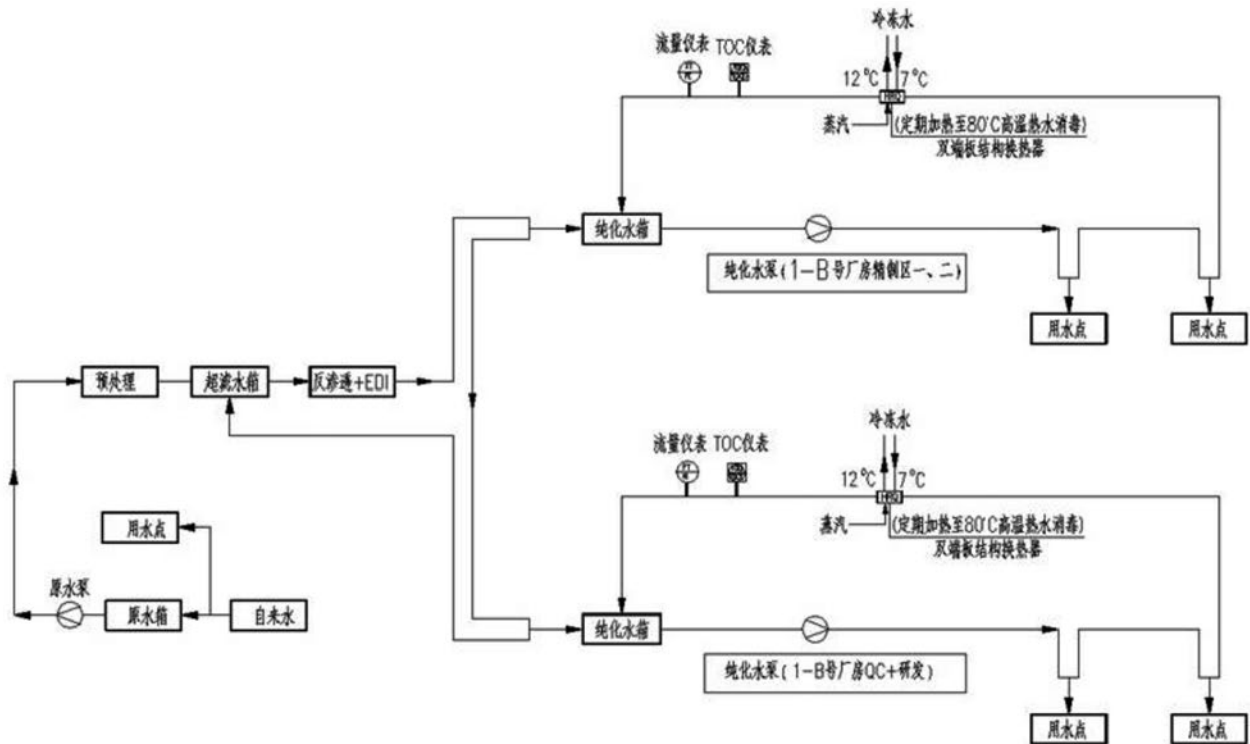


图2 纯化水系统划分图

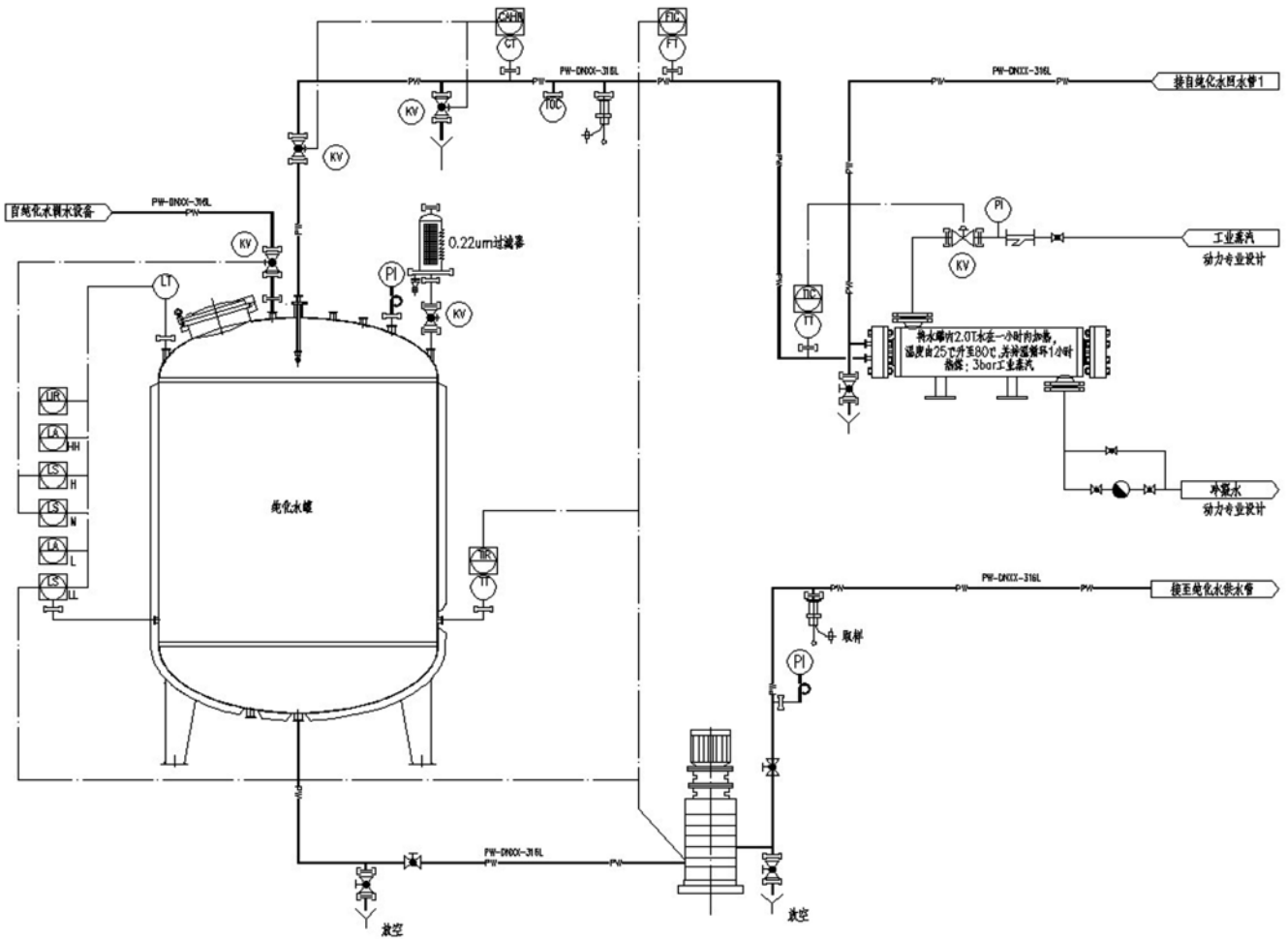


图3 纯化水管道仪表流程图

时，纯水罐内存水为储罐有效容积的25%，在1h内用蒸汽将水升温至80℃。并在系统内循环运行1h，保证系统所有温度传感器监测点温度不低于80℃。消毒完成后再由冷却水将储罐内水降至40℃排放。

5) 检测和控制

根据《医药工艺用水系统设计规范》(GB50913-2013)第4.6.3条，纯化水系统的工艺参数应进行监控，并按取样标准操作程序规定设置取样口检测水质。出划水在线检测系统应具备水质超标时程序报警功能。

本厂房在纯化水分配系统设置了在线电导率、在线PH值、温度、压力、流速、流量、液位等监测装置并有显示、控制、记录的功能。在纯化水设备预处理设备了设置在线TOC、余氯、浊度、PH、电导率检测装置。

(5) 雨水排水系统

根据《建筑给水排水设计规范》(GB50015-2003)第4.9.2条雨水流量根据下式计算：

$$q_y = \frac{q_j \Psi F_w}{10000}$$

式中： q_y ——设计雨水流量 (L/s)；
 q_j ——设计暴雨强度 (L/s·hm²)；
 Ψ ——径流系数；
 F_w ——汇水面积 (m²)。

云南暴雨强度公式：

$$q = \frac{(12.74 + 35.94 \lg P)}{(t + 22.31)^{0.873}}$$

设计暴雨重现期5年，设计降雨历时t=5min，屋面径流系数为0.9，降雨强度q=3.45L/s.100m²。

因建筑美观及幕墙原因，雨水不允许在室内设置立管，本次设计采用外排，将DN150雨水管设置在建筑幕墙内。

本厂房因屋面造型无法设置溢流口，所以设置溢流雨水管作为溢流设施，确保总排水能力满足10年重现期的雨水量。

3 消防设计

医药工业洁净厂房是一个相对密闭的建筑物，室内房间分隔多，通道狭窄而曲折，使人员的疏散和救火都比较困难，因此，消防设施就成为医药洁净工业厂房的一个重要组成部分。

本厂房建筑高度小于24m，地上1层，局部2层，为多层丙类工业厂房，设置了室内、外消火栓系统、自动喷水灭火系统、建筑灭火器及七氟丙烷气体灭火系统。

(1) 消火栓系统设计

1) 给水水源及供水状况

本工程水源为市政自来水，厂区周围供水管网成环状布置，拟从厂区市政引入一根DN200的给水管供本地块使用，市政压力0.25MPa。水质符合生活饮用水卫生标准。

2) 室外消火栓系统

本厂房按多层丙类工业厂房设计，根据《消防给水及消火栓系统技术规范》（GB50974-2014）第3.3.2条规定，室外消防水量30L/S，火灾延续时间3h。

3) 室内消火栓系统

室内消火栓系统采用临时高压给水系统。本厂房按多层丙类工业厂房设计，根据《消防给水及消火栓系统技术规范》（GB50974-2014）第3.5.2条规定，室内消火栓系统水量为20L/s，火灾延续时间3h。消火栓的布置应保证室内任何一处均有两支水枪同时到达，水枪的充实水柱不小于13m，栓口动压不小于0.35MPa。

本厂房为医药洁净工业厂房，消火栓尽可能设置在非洁净区内，洁净区内的消火栓采用嵌入式安装。

(2) 自动喷水灭火系统

根据《医药工业洁净厂房设计规范》GB50457-2008规定，医药洁净室（区）及其可通过的技术夹层和技术夹道内，应同时设置灭火设置和消防给水系统。因此，本厂房设置自动喷水灭火系统。

1) 保护范围

本厂房按规范《自动喷水灭火系统设计规范》GB 50084-2017设计。除水专业设备机房及不宜用水扑救的场所外，均设置自动喷水喷头。

2) 系统设置

因医药洁净工业厂房造价高，设备仪器贵

表3 自动喷水灭火系统设计参数表

作用场所	厂房
系统类型	预作用系统
危险等级	中危险Ⅱ级
净空高度 (m)	≤8
喷水强度 (L/min·m ²)	8
作用面积 (m ²)	160
喷头流量系数	80
喷头动作温度 (°C)	68
最不利喷头出口压力 (MPa)	0.1
系统流量 (L/s)	36
持续喷水时间 (h)	1

表4 消防用水量表

编号	消防系统	供水流量 (L/s)	火灾延续时间 (h)	供水量 (m ³)
1	室外消火栓系统	30	3	324
2	室内消火栓系统	20	3	216
3	自动喷水灭火系统	36	1	129.6
4	合计			669.6

重，药品附加价值高，为防止管道泄漏或误喷，本厂房采用预作用式自动喷水灭火系统，在一层设有预作用报警阀，厂房设有两根DN150自喷管道入口管，报警阀前设有Y型过滤器。在每个报警阀组的供水最不利点处设置末端试水装置；其他防火分区与楼层在供水最不利点处装设试水阀。

3) 设计参数

系统设有3套DN150的SQS150型地上式消防水泵接合器，与室外自动喷水管网相连，每个水泵接合器流量为15L/S。

厂房一层下喷设置减压孔板，减压孔板孔径计算方法采用《自动喷水灭火系统设计规范》GB50084-2017第9.3.3条计算：

$$H_k = \xi \frac{V_k^2}{2g}$$

式中： H_k —减压孔板的水头损失（ 10^{-2} MPa）；
 V_k —减压孔板后管道内水的平均流速（m/s）；

ξ —加压孔板的局部阻力系数。

经计算，减压孔板的孔径为 $d=67\text{mm}$ 。

(3) 屋面消防水箱

在厂区6#锅炉房屋面设有屋顶消防水箱间，内设消防水箱1座，贮存火灾初期消防用水

表5 气体灭火防护区参数表

防护区	防护区体积 (m ³)	设计浓度 (%)	喷放时间 (s)	灭火剂设计用 量 (kg)	使用储瓶数 (个)	泄压口面积 (m ²)	泄压口尺寸、 数量
一层总监控室	300	8	8	152.15	70L×1 (双瓶组装置)	0.082	670×325
一层变配电站	648.8	9	10	374.26	90L×2 (双瓶组装 置)	0.162	670×325 2个

量, 根据《消防给水及消火栓系统技术规范》(GB50974-2014)第5.2.1.5条规定, 有效容积为18m³, 设有消火栓系统和自喷系统用增压稳压设备各1套, 每套稳压泵参数: Q=3L/S H=20m N=1.1KW (一用一备), 气压罐有效容积220L。

(4) 消防水池及水泵房

在厂区1-A#厂房地下1层设置消防水池及消防水泵房。

厂区消防水池有效容积1730m³ (考虑二期预留), 能够满足本厂房的设计要求。

(5) 移动式灭火器

本厂房按《建筑灭火器配置设计规范》(GB50140-2005)的要求设置移动式灭火器。

厂房全部选用磷酸铵盐干粉灭火器, 每个消火栓箱处设置两具MF/ABC4手提式磷酸铵盐干粉灭火器。

配置灭火器按照以下原则:

空调机房、强弱电间适当位置设置MF/ABC4手提式磷酸铵盐干粉灭火器两具。变配电站设置MF/ABC20推车式磷酸铵盐干粉灭火器两辆。

灭火器设置在位置明显和便于取用的地点, 且不得影响安全疏散。

(6) 七氟丙烷气体灭火系统

1) 气体保护区域

本厂房中1层总监控室及变配电站设置七氟丙烷全淹没气体灭火系统。

2) 灭火方式

采用无管网组合分配全淹没灭火方式, 即在规定的时间内, 喷射一定浓度的药剂, 使其均匀地充满整个保护区, 能将任一位置的火灾扑灭。

3) 设计参数

根据《气体灭火系统设计规范》(GB50370-2005)第3.3.4及3.3.5条规定, 变配电站灭火设计浓度为9%, 总监控室灭火设计浓度为8%。

根据《气体灭火系统设计规范》(GB50370-2005)第3.3.7条规定, 变配电站设计喷放时间为10s, 总监控室设计喷放时间为8s。

4 小结

以上是针对某医药工业洁净厂房给排水及消防设计进行的探讨, 其中, 给水设计需保证生产给水和纯化水的水质质量; 排水设计需根据排水水质的不同, 采取不同的方式先进行处理后集中排放; 消防设计需根据厂房性质和房间用途选用适合的消防系统进行保护。

医药工业洁净厂房由于其产品和建筑的特殊性, 一旦发生事故将产生巨大的经济损失和人员伤亡, 因此, 对医药工业洁净厂房的给排水及消防设计时, 一定要严格遵守《建筑给水排水设计规范》

(GB50015-2003)、《医药工艺用水系统设计规范》(GB50913-2013)、《医药工业洁净厂房设计规范》(GB50457-2008)、《建筑设计防火规范》(GB50016-2014)等国家明确规定的相关条文, 以确保厂房的生产安全。

参考文献

- [1] 建筑给水排水设计规范GB50015-2003 (2009年版) 中国计划出版社.
- [2] 医药工业洁净厂房设计规范GB50457-2008 中国计划出版社.
- [3] 医药工艺用水系统设计规范GB50913-2013 中国计划出版社.
- [4] 建筑设计防火规范GB50016-2014 (2018年版) 中国计划出版社.
- [5] 消防给水及消火栓系统技术规范GB50974-2014 中国计划出版社.
- [6] 自动喷水灭火系统设计规范GB50084-2017 中国计划出版社.
- [7] 气体灭火系统设计规范GB50370-2005 中国计划出版社.
- [8] 建筑灭火器配置设计规范GB50140-2005 中国计划出版社.
- [9] 建筑给排水排水设计手册 (第二册) 中国建筑出版社, 2008年版.

数据机房循环冷却水补水量及其影响因素分析

■ 李力军 陈达 [给排水]

摘要: 数据机房持续发热量大,要求空调制冷系统全年不间断运行,水冷式空调制冷系统的循环冷却水补水量巨大。本文详细计算了循环冷却水的水量损失,分析了循环冷却水的耗水量影响因素,总结了数据机房循环冷却水的节水减排措施,最终达到节水目的。

关键词: 数据机房;补水量;影响因素;节水减排

0 引言

信息化时代,社会的发展和运转高度依赖数据处理技术。通用市政设施、基础科学研究以及高速发展的互联网企业等都需要数据中心来存储和处理运行数据,数据机房得以迅速发展。数据机房是计算机设备及其配套设施的高度集合体,其能耗大、发热量高,运行中断可能造成重要数据丢失和重大经济损失,因此,要求机房空调系统全年不间断提供足够冷量。

数据机房空调系统常采用水冷式制冷系统,以冷水机组和开式冷却塔作为冷源提供冷水的形式最为常见,在冬季和过渡季还可以部分或全部停运冷水机组,充分利用室外低温环境进行(部分)自然冷却,本文以此为基础进行讨论。由于数据机房空调系统需要全年不间断提供高额冷量,循环冷却水的补水量巨大,在水资源日益短缺、环保意识不断增强的当下,采取有效措施减少数据机房循环冷却水的水量损失,以节约水资源、

源、打造“绿色”数据机房,具有重要的环保意义和经济效益。

1 数据机房空调制冷系统运行原理

水冷式制冷系统一般采用 $15\sim 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ (可调整)的高温冷水为末端供冷。根据室外环境温度、湿度的变化,制冷系统的供冷模式可分为3种工况,即制冷机组供冷模式、部分自然冷却供冷模式、完全自然冷却供冷模式。这3种工况切换可由空调设备自控系统实现,其运行原理见图1。自然冷却供冷模式可以充分利用室外天然冷源,节省制冷机组运行能耗,具体运行方式如下:

(1) 制冷机组供冷模式

当室外湿球温度高于 $13.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,由制冷机组直接为末端供冷;

(2) 部分自然冷却供冷模式

当室外湿球温度稳定在 $13.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时(超过7个自然日),制冷系统进入部分自然冷却模式:冷却塔的冷却水出水先进入板式换热器,将冷冻水回水预冷至 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,再进入制冷机组将冷冻水回水

作者简介:李力军,女,研究员,1993年毕业于北京工业大学给排水专业,现就职于中航建设建筑设计研究院。

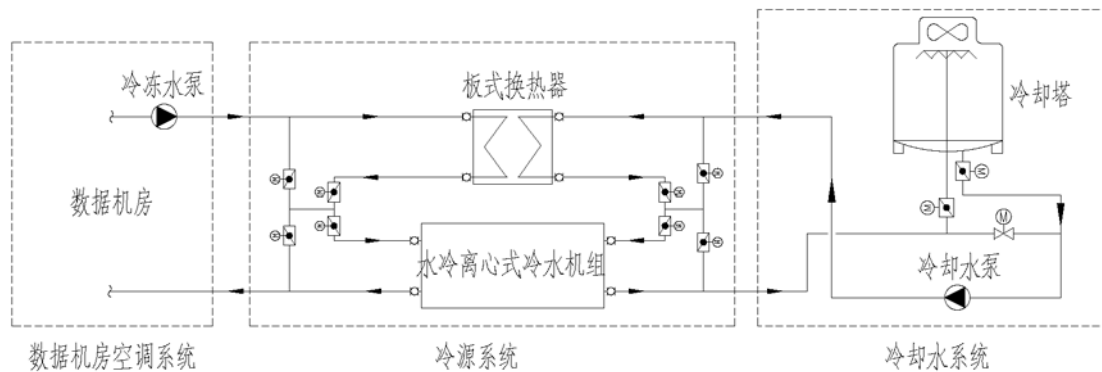


图1 水冷冷水型机房空调制冷系统运行原理示意图

二次降温至设计工况 15°C 后送入末端供冷；

(3) 完全自然冷却供冷模式

当室外湿球温度稳定在 7.5°C 及以下时（超过7个自然日），制冷系统进入完全自然冷却模式：制冷机组停止运行，冷却塔的冷却水出水只进入板式换热器，将冷冻水回水直接降温至设计工况 15°C 后送入末端供冷。

2 循环冷却水补水量计算

在开式循环冷却水系统里，冷却主要是靠水的蒸发，蒸发损失水量约占循环水量的 $0.75\% \sim 1\%$ ，加上风吹和排污等损失水量，总损失水量约占循环水量的 $1.5\% \sim 2.5\%$ 。为维持循环冷却水正常运行，需不断对系统进行补水。

《建筑给水排水设计规范》GB50015—2003（2009年版）第3.10.11款规定：“对于建筑物空调、冷冻设备的补充水量，应按冷却水循环水量的 $1\% \sim 2\%$ 确定”。如果仅简单的按上述系数计算，补水量相差两倍，且数据机房循环冷却水系统需全年不间断运行，其补水量在不同季节差异很大，需要进行精细化计算。

循环冷却水补水量应满足其蒸发损失率 P_1 、风吹损失率 P_2 和排污损失率 P_3 ，计算如下。

2.1 蒸发损失率 P_1

$$P_1 = K \times \Delta T \quad (1)$$

P_1 ——蒸发损失率，%；

ΔT ——冷却塔进水出水温差， $^{\circ}\text{C}$ ；

K ——系数（ $1/^{\circ}\text{C}$ ），根据干球空气温度取值，见表1。

全年运行的循环冷却水系统，不同季节的蒸发损失率 P_1 可根据干球空气温度和冷却塔进

出水温差（电动压缩式冷水机组一般为 5°C ）计算如下：夏季按平均空气温度 33.5°C 计算 $P_1 = 0.154 \times 5 = 0.77\%$ ；过渡季按平均空气温度 15°C 计算 $P_1 = 0.13 \times 5 = 0.65\%$ ；冬季按平均空气温度 -9.9°C 计算 $P_1 = 0.08 \times 5 = 0.40\%$ 。

表1 系数K

干球空气温度 ($^{\circ}\text{C}$)	-10	0	10	20	30	40
K (%)	0.08	0.10	0.12	0.14	0.15	0.16

2.2 风吹损失率 P_2

循环冷却水的风吹损失与冷却塔的通风方式、收水器的形式、收水效率、塔内风速等因素有关。一般冷却塔的飘水率允许为 0.005% ，但实际机械通风冷却塔风吹损失率要比此值大，可按表2规定取值。循环冷却水系统一般采用机械通风冷却塔且有收水器，取风吹损失率 $P_2 = 0.10\%$ 。

表2 风吹损失率 (%)

冷却塔通风方式	机械通风冷却塔	自然通风冷却塔
有收水器	0.10	0.05
无收水器	1.20	0.80

2.3 排污损失率 P_3

$$P_3 = P_1 / (N-1) - P_2 \quad (2)$$

N ——浓缩倍数。

从公式(2)可知，增大浓缩倍数，可降低排污损失。从节水角度考虑，浓缩倍数不宜小于3，

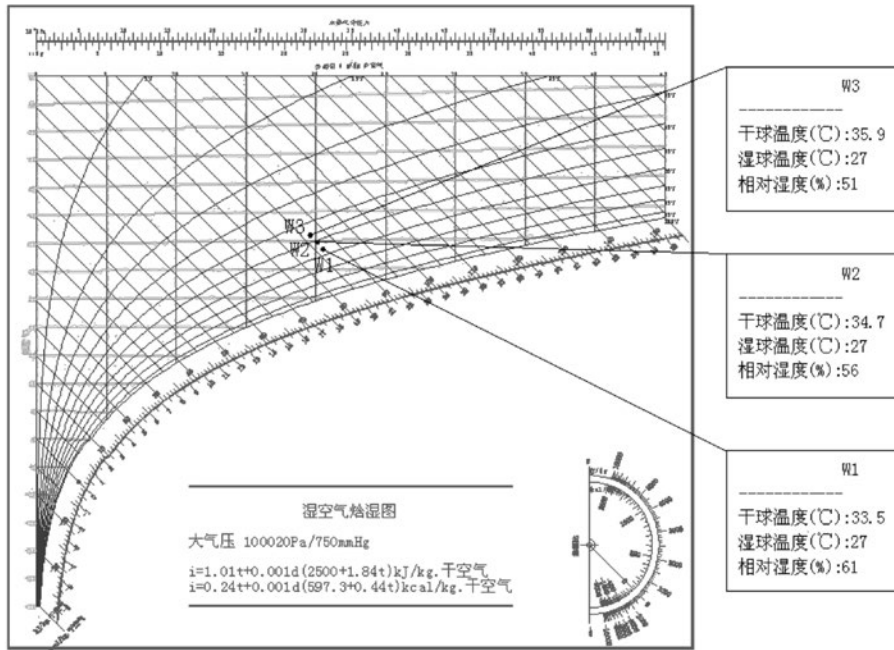


图2 湿空气焓湿图

且数据机房循环冷却水系统需全年不间断运行，耗水量巨大，应尽可能增大浓缩倍数。随着水处理技术的发展，目前已有通过施加静电场使水中离子定向移动并吸附去除的水处理设备，其处理量不小于排污量，能去除80%以上的离子，浓缩倍数能提升至5，节水效果明显。

按循环冷却水浓缩倍数 $N=5$ 计算如下：
夏季 $P_1=0.77\%/4-0.10\%=0.0925\%$ ；过渡季 $P_1=0.65\%/4-0.10\%=0.0625\%$ ；冬季 $P_1=0.40\%/4-0.10\%=0\%$ 。

2.4 冷却塔总损失率 P

$$P=P_1+P_2+P_3 \quad (3)$$

根据公式(3)计算循环冷却水总损失率：
夏季 $P=0.77\%+0.10\%+0.0925\%=0.9625\%$ ；过渡季 $P=0.65\%+0.10\%+0.0625\%=0.8125\%$ ；冬季 $P=0.40\%+0.10\%+0\%=0.50\%$ 。

3 冷却塔耗水量影响因素分析

影响冷却塔耗水量的主要因素有室外温度、室外湿度、浓缩倍数及冷却塔选型。

3.1 室外温度对冷却塔耗水量的影响

冷却水的冷却主要是由蒸发散热和对流散热两个过程共同完成：夏季及过渡季室外气温较高，蒸发散热起主要作用，蒸发损失水量最大，耗水量最大；冬季气温降低，对流散热作用明显

增大，蒸发散热作用显著减小，故蒸发损失水量减少，耗水量也随之降低。根据公式(1)可知，环境温度越高冷却塔蒸发损失量越高，冬季蒸发损失量约为夏季蒸发损失量的50%。

3.2 室外湿度对冷却塔耗水量的影响

以北京夏季室外设计参数为例，干球温度 33.5°C ，湿度61%，浓缩倍数为5，根据图2计算得出W1点湿球温度 $\tau=27^\circ\text{C}$ ，根据公式(1)~(3)可以计算出冷却塔总损失水率 $P=0.9625\%$ ；当湿球温度 τ 不变，湿度降为56%时，W2点干球温度为 34.7°C ，冷却塔总损失水率 $P=0.9688\%$ ；湿度降为51%时，W3点干球温度为 35.9°C ，冷却塔总损失水率 $P=0.9750\%$ 。由上可知，在相同湿球温度下，冷却塔的耗水量随室外空气相对湿度降低而增加。

冷却塔的冷却效率与空气的湿球温度密切相关，其冷却效率系数 η 可用公式(4)表示，当冷却塔进塔和出塔水温确定时，出塔水温越接近湿球温度，冷却塔的冷却效率越高。

$$\eta = (t_1 - t_2) / (t_1 - \tau) \quad (4)$$

η ——冷却效率系数；

t_1 ——冷却塔进水温度($^\circ\text{C}$)；

t_2 ——冷却塔出水温度($^\circ\text{C}$)；

τ ——湿球温度($^\circ\text{C}$)。

3.3 浓缩倍数对冷却塔耗水量的影响

浓缩倍数指循环冷却水的含盐浓度与补充水

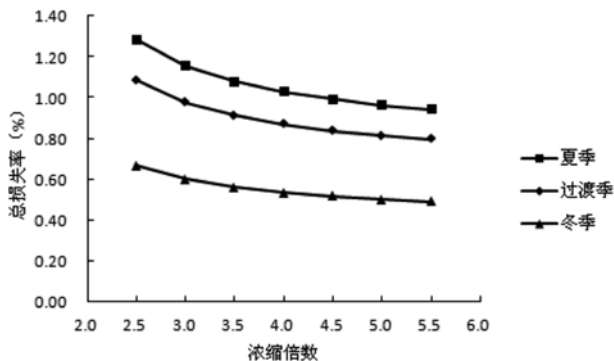


图3 循环冷却水总损失率

的含盐浓度的比值，即补水量与排污量的比值，提高浓缩倍数可降低排污量，从而减少补水量，节约水资源，但过高的浓缩倍数会使循环水中的硬度、碱度过高，增加结垢倾向。因此，为了在节约循环水补水量的同时保证循环冷却水系统安全高效运行，必须控制好浓缩倍数，通常控制在4~5为佳。

循环冷却水总损失率随浓缩倍数的变化趋势见图3。可知，冷却塔在全年不同季节运行时，循环冷却水总损失率均随浓缩倍数的增加而降低，适当增加浓缩倍数能有效节约循环水补水量。但在实际工程中，循环冷却水系统实际排污量会根据管理水平及设备负荷量有所差异。操作人员往往根据季节不同每周或不定时将冷却塔水盘和管道里的水排放一部分，在冷却塔初次投入使用时，管道冲洗及预膜也需要消耗水量。

3.4 冷却塔选型对冷却塔耗水量的影响

数据机房运行中断可能造成重要数据丢失和重大经济损失，要求机房空调系统全年不间断提供足够冷量。因此，数据机房冷却塔选型应考虑极端天气条件，确保在极端高温天气仍能可靠运行，按极端天气条件选择的冷却塔比按常规空调设计温度选择的冷却塔耗水耗能更高。

湿球温度是选择冷却塔的重要参数。根据冷却塔厂商提供的产品选型数据，湿球温度每增加1℃，冷却塔的实际冷却水量降低约20%，对冷却塔选型影响非常大，所以数据机房冷却塔选型要充分考虑到极端高温天气时的湿球温度，并设置备用塔。

数据机房冷却塔需要在冬季运行，为了降低运行费用，常采用（部分）自然冷却供冷，因此数据机房冷却塔选型时还要考虑（部分）自然冷

却运行对冷却塔的要求。

4 小结

数据机房空调制冷系统需全年不间断运行，冷却塔的选型要考虑全年运行工况，包括夏季极端高温天气工况和冬季自然冷却运行工况，还应考虑补水水源的可靠性，设置循环冷却水补水储存装置。

数据机房持续发热量大，水冷式空调制冷系统的循环冷却水补水量和耗水量巨大，而浓缩倍数是降低循环冷却水耗水量的人为可控的关键参数，可以从优选冷却塔型号、确定合理的浓缩倍数、采用高效水处理器并实时监测水质等方面降低循环冷却水补水量。在条件允许时，还可以考虑利用再生水作为循环冷却水补水水源，能显著减少自来水用量，达到节水降费的目的。

参考文献

- [1] GB 50736—2012 民用建筑供暖与通风空调设计规范 [S].
- [2] GB 50015—2003 (2009年版) 建筑给水排水设计规范 [S].
- [3] GB/T 50102—2014 工业循环水冷却设计规范 [S].
- [4] GB 50174—2017 数据中心设计规范 [S].
- [5] 黄晓家, 姜文源. 建筑给水排水工程技术与设计手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

垃圾焚烧发电项目 给排水设计要点分析

■ 尹建鹏 陆新生 [给排水]

摘要: 本文简要介绍了生活垃圾焚烧发电项目给排水系统设计要点,以污、废水全部回用为目标,提高水的重复利用率,合理规划给排水系统,实现水务管理及水量平衡,并不断探索研究水处理新工艺。

关键词: 垃圾焚烧发电项目;给水系统;排水系统;重复利用;水务管理

0 前言

生活垃圾焚烧发电项目(以下简称“垃圾电厂”)是解决目前城市生活垃圾的重要途径之一,既能解决垃圾处理难的问题,又能将垃圾自身热值转换为电能,真正实现生活垃圾的资源化利用。

在垃圾电厂的设计中,给排水系统设计既要保证其满足生活、工艺生产、消防的要求,又要满足将各种污、废水进行分类处理使其达到中水回用的目的。本文从原水、给水、排水、海绵城市、水务管理及节水措施等方面对垃圾电厂给排水设计要点进行简单分析。

1 原水系统

根据垃圾电厂的用水需求,应选择合理、可靠的原水水源。目前,垃圾电厂常用的原水水源有市政自来水、市政中水、河水、水库水、江水等,应根据原水水源及水质资料合理确定取水形式及原水处理工艺,处理后的原水水质达到《工业循环冷却水处理设计规范》(GB 50050-2017)中相应标准。

2 给水系统

垃圾电厂给水系统从用途可分为生活用水、消防给水、工业水以及循环冷却水等。

2.1 生活给水

主要提供垃圾电厂综合楼、宿舍、食堂、办公场所等所需的生活用水。生活给水系统应采用独立的管网,其水量、水质、水压等需满足要求。当垃

圾电厂无市政自来水时,可采用井水或经处理后的其他水源。为满足用水需求,可在综合泵房或主厂房设置生活水箱及变频给水机组,采用恒压变流量方式供水。生活用水宜采用紫外线或加氯消毒,水质应满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)标准。

2.2 消防给水系统

垃圾电厂属于小型火力发电厂,应按照《生活垃圾焚烧处理工程技术规范》(CJJ90-2009)、《小型火力发电厂设计规范》(GB 50049-2017)及《建筑设计防火规范》(GB 50016-2014(2018年版))规定设置消火栓系统、消防炮系统或自动喷水灭火系统,其水量、水压须满足《消防给水及消火栓系统技术规范》(GB 50974-2014)、《固定消防炮灭火系统设计规范》(GB 50338-2003)及《自动喷水灭火设计规范》(GB 50084-2017)的相关要求。

消防水池可与生产清水池合用,但需采取消防水量不做他用的技术措施。垃圾电厂应设置高位消防水箱,水箱的容积应满足火灾初期的消防水量,稳压设施应根据情况可设置在高位消防水箱间,也可设置在消防泵房内。

2.3 工业水系统

经处理后的原水进入消防、生产合用清水池,综合泵房内的工业水泵将生产用水供至各个工艺用水处。垃圾电厂工业水主要供除盐水制备用水、冷却塔补水、焚烧炉辅机设备冷却用水、尾气处理用水等其他用水。工业水的水质、水压根据工艺生产需求确定,工业水泵的扬程一般为0.4~0.5MPa。

综合泵房内一般设置有工业水泵、消火栓给水泵、消防炮给水泵、自喷给水泵及消防稳压设备,水泵应设置备用泵;水泵应采用自灌式吸水,

作者简介:尹建鹏,男,助理工程师,2012年毕业于华中科技大学给排水科学与工程专业,现就职于航空工业规划市政工程设计研究院。

吸水管采用管顶平接或超出管顶平接；消防、生产合用水池的除消防泵之外的其他水泵应在吸水管上设置真空破坏孔或其他措施，防止消防水量被占用；采用地下或半地下式的综合泵房应采取泵房不被淹没的措施。常规做法是设置集水坑及排水沟，集水坑内配置潜污泵，潜污泵采用自动液位控制，潜污泵流量不小于10L/s；综合泵房应设置便于水泵检修、安装用的电动起吊装置。

2.4 循环冷却水系统

汽机凝汽器、发电机空冷器以及冷油器等宜采用循环冷却水供水方式，应根据当地气候、水量、水温等确定合理规模的逆流式机械通风冷却塔或双曲线自然通风冷却塔。对于水资源匮乏的地区，宜采用直接空冷或者间接空冷的方式，采用机械通风冷却塔的应根据厂址及环评要求采取消声降噪措施，一般执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB 12348—2008）2类噪声标准。

循环水泵房应采用根据地质条件和经济性选择地上式或半地下式。循环水泵的配置根据汽轮机数量确定，一般采用“1机+2台循环水泵（2用）”或“2机+3台循环水泵（3用）”或“2机+4台循环水泵（3用1备或4用）”。循环水泵的扬程应根据冷却设备确定，一般为0.18~0.25MPa。季节循环水量一般通过循环水泵的最佳运行台数进行选择，运行循环水泵占总循环水量的百分数可根据《火力发电厂水工设计规范》（DLT 5339—2006）表5.2.4—2执行。

表1 《火力发电厂水工设计规范》
（DLT 5339—2006）表5.2.4—2

水泵配置台数	水量百分数%			
	运行1台	运行2台	运行3台	运行4台
2	60	100	—	—
3	40	75	100	—
4	30	60	85	100

为保证循环冷却水水质，一般在循环泵房内设置加药间，主要投加杀菌灭藻剂和缓蚀阻垢剂，加药系统根据循环水质在线监测情况采用自动化加药装置，循环冷却水监测的指标主要包括PH、氧化还原电位、电导率等。

垃圾电厂为提高循环冷却水浓缩倍数，节约用水，常采取旁滤水处理措施，一般采用重力式无阀滤池，处理水量约为循环水量的1%~3%。

3 排水系统

垃圾电厂排水采用分流制排水，排水从清洁程度可分为洁净废水、雨水、生活污水、渗沥液等。为提高水的重复利用率及节约用水，垃圾电厂根据用水项目对水质要求，分质、分类对排水进行回收利用，不能直接回收利用的则经过处理达标后回用。

3.1 洁净废水

锅炉排污水和冷却塔排污水作为洁净废水直接回用于飞灰固化、烟气净化等用水；除盐水制备浓水及反洗水、一体化净水器排水、旁滤系统排水、车间地面冲洗等排水排至洁净废水处理系统。卸料大厅冲洗排水集中收集后排至渗沥液沟道内的渗沥液收集池。

洁净废水根据水质及水量特点，常规采用“调节池+澄清池+机械过滤器+活性炭过滤器+超滤+反渗透”工艺，出水水质达到《城市污水再生利用 工业用水水质》（GB/T19923—2005）中敞开式循环冷却水系统补充水水质标准后回用于冷却塔补水，系统产生的浓水回用于除渣机冷却或石灰浆制备用水等。

3.2 雨水

（1）初期雨水

垃圾运输坡道、地磅区域等垃圾运输车运行路线上的初期雨水收集于初期雨水收集池，提升至渗沥液处理系统进行处理。

初期雨水量常规计算方式有两种。第一种按降雨强度计算，通常按15min内汇水面积内的降雨量；第二种按降雨深度计算，通常取15mm~30mm汇水面积内的降雨量。

初期雨水收集池容积可根据初期雨水量适当乘以一定富余系数，系数一般取1.1~1.3。

超过初期雨水收集池收集能力外的雨水溢流至厂区雨水管网或直接外排。

（2）厂区雨水

主厂房屋面及厂区其他道路上的雨水应根据当地海绵城市建设要求设置雨水收集池，经处理达到《城市污水再生利用 城市杂用水水质》（GB/T18920—2002）的车辆冲洗水质要求后于厂区绿化、道路浇洒、景观、洗车等用水。雨水收集池的容积应结合海绵城市建设措施综合考虑。

3.3 生活污水

垃圾电厂卫生间生活污水及食堂污水产生量较少，单独设置处理系统运行和维护管理等不便。因此，该部分污水分别经化粪池和隔油池预处理后

表2 焚烧厂渗沥液典型水质指标

	BOD ₅ (mg/L)	COD _{cr} (mg/L)	SS(mg/L)	NH ₃ -N(mg/L)	TP(mg/L)	TN(mg/L)	色度
进水指标	15000~40000	30000~70000	500~2500	1500~3000	70~100	1800~4000	10000

直接排至渗沥液处理系统进行处理。

3.4 渗沥液

垃圾渗沥液、卸料大厅冲洗排水、生活污水、初期雨水等经渗沥液处理系统处理达到《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T19923-2005)中敞开式循环冷却水系统补充水水质标准后回用于冷却塔补水。系统产生的浓缩液减量化处理后回用于除渣机冷却、石灰浆制备用水以及回喷焚烧炉等,具体用途应结合环评要求进行考虑。垃圾渗沥液受多种复杂因素影响,若无实测数据设计时可参考表2。

垃圾渗沥液的产量应考虑垃圾池中垃圾停留时间、主要成分等因素,垃圾渗沥液日产量宜按垃圾处理量的10%~40%(重量比)计,降雨量少的区域宜按10%~15%(重量比)计,垃圾渗沥液的产量还应按照热季、冷季进行划分。渗沥液系统处理规模应根据渗沥液、生活污水、初期雨水等日产量综合考虑,并预留有一定的富余量,不宜盲目做大。合理确定处理规模,确保渗沥液处理系统在任何季节、雨季与非雨季情况下都能稳定运行。

渗沥液处理采用国内市场较成熟的主流工艺,即“预处理+厌氧(UASB)+生化处理(AO)+外置式MBR+纳滤(NF)+反渗透(RO)(或DTRO)”工艺。

为提高系统产水率以及减少浓缩液的产量,渗沥液系统浓液主要采用“软化(TUF)+高压反渗透(DTRO)”、“高压反渗透(DTRO)+浸没燃烧蒸发(SCE)”等处理工艺。

渗沥液系统应设置足够容积的调节池及事故池。调节池有效容积可按储存5~7天渗沥液产量设计,事故池有效容积可按储存3~5天渗沥液产量进行设计。

渗沥液处理系统产生的污泥经脱水含水率降到80%及以下时运至焚烧炉焚烧;产生的沼气输送至焚烧炉助燃,并设置应急燃烧火炬;调节池、污泥脱水间、生化池等臭气统一收集后负压输送至垃圾池,并就地设置应急除臭装置。

渗沥液及其浓缩液的处理工艺前期规划时应综合考虑渗沥液水质特点、系统产水率、浓液产量及去向等,综合技术、经济比较后选取合理的处理工艺方案。

4 海绵城市

目前,大多数城市已经出台海绵城市建设技术指南,垃圾电厂也不例外。垃圾电厂应结合自身及当地情况因地制宜,结合建设用地功能和布局通过采取设置下凹式绿地、透水铺装、绿植屋面、雨水调蓄池等措施达到年径流控制率的要求。一般情况下,垃圾电厂年径流总量控制率为70%~85%,具体按照项目当地海绵城市建设技术指南要求执行。

5 水务管理

水量平衡对垃圾电厂水务管理有重要的影响,水量平衡是水务管理工作的关键。

垃圾电厂设计中应对电厂的各类用水、排水进行全面规划、综合水量平衡和优化比较,以达到经济合理、一水多用、综合利用,提高水的重复利用率,降低全厂耗水指标,达到污、废水不外排的目标。对于采用水冷系统的垃圾电厂耗水指标建议不大于 $1.0\text{m}^3/(\text{S GW})$,对于采用空冷系统的垃圾电厂耗水指标建议不大于 $0.5\text{m}^3/(\text{S GW})$,从给排水设计的角度控制耗水指标对于垃圾电厂节水意义非凡。

6 结语

垃圾电厂作为目前最有效的解决生活垃圾问题的途径之一,真正实现了垃圾的“减量化、资源化、无害化”利用。随着环境监管日益严厉以及环保标准的提高,为了避免造成环境的二次污染,以及达到节水的目的,在垃圾电厂的给排水设计中,应做到合理规划、提高水的重复利用率,并不断探索水处理新工艺。

参考文献

- [1] 《生活垃圾焚烧处理工程技术规范》(CJJ90-2009)。
- [2] 《火力发电厂水工设计规范》(DLT 5339-2006)。
- [3] 《生活垃圾渗沥液处理技术规范》(CJJ 150-2010)。

中航建投综合规划研究院

中航建投综合规划研究院（以下简称“综规院”）专注于高端规划咨询业务，是目前我国在航空领域能提供从发展战略咨询、产业规划、空间规划、交通规划到重大项目及招商策划等全产业链咨询服务的国家级权威性智库机构。

综规院现有员工63人，其中高级工程师15人，业务范围涵盖以航空为主的行业研究、产业研究、战略规划、区域发展规划、商业策划、政府决策支持研究、园区及新城空间布局规划、城市总体规划、控制性详细规划、城市设计、景观规划、交通旅游规划等。

综规院顺应国家统一规划的发展要求，以提供客户整体咨询规划方案为目标，坚持多团队合作、多专业并行的“整合规划”工作模式，构建起涵盖产业经济、区域规划、城市规划、交通工程、市政工程、景观生态等多专业的整合规划团队，实现规划的前瞻性、系统性、科学性和可操作性。

综规院专业资质完备齐全，企业管理体系完善，项目质量高度保障，将以权威的专业性、丰富的规划与设计经验、优秀的服务品质，为客户提供可操作性强的高品质规划咨询成果及服务体验。



2019年第4期（总第144期）
2019年8月出版



海南文昌国际航天城起步区系列规划项目