

气候环境实验室测控系统研究

安 衡

南京第一建设事务所有限责任公司西藏分公司 西藏 林芝 860000

摘 要：气候环境实验室是开展装备环境适应性试验的关键设施，传统分立测控模式存在数据采集不全面、多参数联动性差、调控精度不足等问题，难以适配复杂复合工况模拟需求。本文结合实验室密闭空间的参数变化规律，从感知采集、协同架构、传输链路、运行逻辑四方面优化测控系统，配套完善全流程运行管控策略，有效提升环境模拟精度与系统运行稳定性，可为相关试验开展提供技术参考。

关键词：气候环境实验室；测控系统；多参数协同调控；动态适配；长效运维

引言：气候环境实验室可精准复现各类极端自然气候工况，是装备可靠性试验的核心基础平台。当前，传统测控系统固化的独立调控模式，无法满足日趋多元的复合工况高精度模拟需求，易出现参数失衡、工况稳定性不足等问题。基于实验室工况动态变化特性，本文系统梳理测控系统运行短板，开展全链路优化设计并完善运行策略，旨在提升系统工况适配能力，保障环境模拟试验精准、高效开展。

1 气候环境实验室测控系统运行特性

1.1 气候环境实验室整体系统构成

气候环境实验室采用分层模块化结构，适配多类型环境参数调控工作。系统由环境模拟单元、数据感知单元、智能测控单元、终端执行单元与数据交互单元组成。环境模拟单元搭建密闭试验空间，为气候参数调节提供稳定场地条件^[1]。数据感知单元布设于试验舱全域，持续采集场内环境状态信息。智能测控单元承担核心调度功能，接收采集数据并输出对应调控指令。终端执行单元根据控制指令，完成温湿度、气压、气流等环境参数的物理调节。数据交互单元实现运行数据的传输与存储，打通各功能模块信息通道，保障设备协同运转。

1.2 多环境参数调控运行机理

多环境参数调控以闭环调控逻辑为核心，依靠实时感知数据修正参数偏差。温湿度调控借助换热、加湿、除湿设备调整舱内空气状态，通过局部设备微调平衡空间温湿度分布。气压调控依托充气、抽气设备改变密闭舱体内部压力，适配不同海拔气压状态。气流调控通过风机组与导风结构，调节空气流速与流向，构建规整稳定的内部气流场。各参数调控链路相互联动，摆脱单一独立调节模式，匹配预设工况同步调整设备运行状态，实现复合气候环境的稳定构建。

1.3 测控系统硬件组成与工作属性

测控系统硬件分为感知、控制、执行三类核心设备，各司其职完成环境测控工作。感知硬件以高精度传感器为主体，持续采集场内环境参数，具备高采集精度与快速响应能力，捕捉细微环境波动。控制硬件包含可编程控制器、工控主机，负责多通道数据运算、逻辑判别与调控指令输出，支撑多参数并行调控。执行硬件涵盖换热、调压、气流调节等设备，直接作用于舱内环境，改变各项环境参数。整套硬件体系支持长时间连续运行，参数调节区间宽泛，设备响应速度灵敏，适配多类型环境模拟工况。

1.4 实验室环境工况动态变化规律

实验室环境工况随调控指令与设备运行状态动态更迭，变化过程具备连续、渐进、平稳的特点。工况切换过程中，各项环境参数按固定速率平缓变动，规避瞬时突变带来的状态紊乱。稳态运行阶段，各项参数波动幅度极小，舱内空间环境分布均匀。不同气候工况切换过程中，温湿度、气压、气流参数会产生对应联动变化，形成固定的参数变化轨迹。参数联动变化特征可直接用于测控逻辑优化与系统性能升级，提升环境模拟精准程度。

2 气候环境实验室测控系统现存运行短板

2.1 环境参数采集适配性不足问题

气候实验室参数采集设备采用固定点位布设形式，空间布置模式较为固化。舱内不同区域存在温度与气流分布差异，固定点位采集无法覆盖全域环境状态，存在局部数据盲区。现有传感器适配常规单一工况，面对多参数叠加的复合气候环境，采集精度出现浮动偏差^[2]。传感设备长期处于高低温、高湿交替的严苛环境中，灵敏性能逐步衰减，采集数据出现持续偏移。采集点位无法根据试验样品尺寸、摆放位置灵活调整，数据采集覆盖范围受限，监测全面性不足。

2.2 多参数协同调控匹配度偏低

现有测控系统采用分立式调控架构,各环境参数调控单元独立工作,跨单元联动性偏弱。温湿度、气压、气流调控链路设置独立控制阈值,单元之间缺少交互制衡机制。单一参数调节动作会间接扰动舱内其他环境参数,引发场内环境失衡。常规简单工况可以维持基础稳定,复合气候工况构建时,参数之间的相互干扰无法抵消。系统缺少参数优先级匹配逻辑,工况切换过程中各设备调节节奏不一致,参数收敛速度变慢,环境稳定耗时增加,降低气候模拟质量。

2.3 传统控制模式工况适配局限

传统测控模式依托预设固定程序运行,调控逻辑僵化,动态适配能力不足。系统程序针对标准常规工况编写,可调参数范围有限,特殊极限气候工况无法精准匹配。工况切换按照固定速率完成参数升降,不会根据舱内实时环境状态调整调节节奏。环境出现细微偏移或外部轻微扰动时,系统修正手段单一,精细化调节能力不足。固定运行逻辑无法适配多样化、定制化的试验需求,工况适配灵活度不足,限制试验室试验场景拓展。

2.4 系统运维与状态管控体系不完善

系统运维管理依赖周期性人工巡检,缺少常态化在线状态监测机制。设备隐性运行隐患与微小数据偏移无法及时排查,长期积累会引发系统性异常。运维作业缺少统一标准化流程,检修、更换、线路排查操作随意性较强。日常管控只关注设备停机等显性故障,忽视数据漂移、响应延迟等隐性問題。设备状态、运行数据、工况监测相互割裂,未形成一体化管控模式,整体运维覆盖度与精细度不足。

3 气候环境实验室测控系统优化设计

3.1 高精度感知采集单元设计思路

高精度感知采集单元采用分区分布式布设方案,结合试验舱的空间结构与内部环境分布特点,在舱内分层区域、试验核心区域以及易忽略的盲区增设采集节点,补齐传统监测的空间短板。选用适配复合气候场景的高分辨率传感器,有效提升温湿度、气压、气流各类参数的采集精度,降低极端环境对采集工作的干扰影响。传感器配套专属防护结构,能够适应高低温交替、高湿等恶劣工况,减缓设备性能衰减速度,长期保持稳定的采集状态^[3]。采集点位具备灵活可调的特性,可根据样品尺寸、摆放位置以及试验场景的不同调整布设方式,适配多样化的试验需求。系统内置分级数据筛选机制,自动过滤环境扰动产生的无效杂散数据,保障上传数据的真实性与有效性。

3.2 多参数协同调控架构设计

多参数协同调控架构摒弃传统分立的调控模式,搭建一体化联动调控框架,适配复杂气候环境的构建需求。架构设置统一的数据交互与指令调度中枢,打通温湿度、气压、气流各调控模块之间的信息壁垒。植入参数联动制衡逻辑,梳理各类参数调节的相互影响关系,在调整单一参数的过程中,抑制关联参数出现的异常波动,避免舱内整体环境失衡。结合不同试验场景的核心需求,设置差异化调控优先级,合理分配设备调节权重,让各类执行设备的运行节奏保持统一。系统搭载梯度收敛机制,工况切换过程中平稳修正参数偏差,缩短环境达到稳定状态的耗时,有效改善独立调控模式的诸多局限,提升复杂气候模拟的精准度。

3.3 系统传输与交互链路优化设计

系统传输与交互链路重新规划整体拓扑结构,精简多余的传输节点,缩短数据传输时延,提升整体信号传递效率。更新通信协议,适配多通道高频数据传输场景,减少数据丢失、信号紊乱等常见问题的发生。系统区分稳态运行和工况切换两种工作状态,动态调整数据传输频率,让设备运行负载和数据实时性形成平衡。搭建全域统一的数据交互中台,整合感知、控制、执行各单元的数据资源,实现整套系统数据同步更新、统一交互。优化现场线路排布方式,增强链路抗电磁干扰、耐环境腐蚀的能力,规避外界环境干扰引发的传输故障,稳定全链路的数据交互质量。

3.4 测控系统运行逻辑优化设计

测控系统运行逻辑摒弃固化的程序调控模式,构建动态自适应的调控运行体系。升级底层调控程序,拓宽参数可调范围,覆盖常规试验工况与各类极限特殊工况。系统结合舱内实时环境状态和工况切换幅度,自主调整参数升降节奏,缓解工况切换过程中产生的环境波动。增设微量偏差修正功能,针对环境细微偏移、外部轻微扰动开展精细化调节,提升稳态工况的精准程度。优化故障判别逻辑,清晰区分隐性数据异常与显性设备故障,匹配对应的处理方式,规避无效调控和过度防护问题。优化场景适配逻辑,适配各类定制化试验场景,拓宽系统工况适配范围,提升测控工作的精细化水平与灵活度。

4 气候环境实验室测控系统运行优化策略

4.1 环境参数动态适配调控方式

环境参数动态适配调控围绕试验舱内环境变化规律,建立跟随式参数调节模式,改善传统固定阈值调控的滞后问题。调控方式依托全域采集节点的实时数据,捕捉温湿度、气压、气流的细微变化,根据试验工况需

求自动更新调控阈值。常规稳态工况下,系统维持小幅度精准微调模式,弱化参数波动幅度,保持舱内环境均匀性^[4]。工况切换阶段,系统根据参数偏移程度匹配对应的调节力度,依据环境变化趋势渐进修正参数状态,避免单一调节速率带来的环境失衡。针对复合气候试验场景,对各类环境参数实行差异化适配调控,结合参数间的相互干扰规律提前做好制衡调节,削弱参数耦合带来的状态偏差。适配机制可跟随试验类型、样品摆放位置、试验时长动态调整调控逻辑,适配多样化试验场景的精准控制标准,持续提升环境模拟的精细程度。

4.2 多单元协同运行管控策略

多单元协同运行管控打破各功能单元独立运行的隔离状态,建立全域联动的运行管控体系。统筹感知采集、数据传输、中心控制、终端执行全部单元的运行状态,统一各单元的运行时序与工作节奏。设定单元联动运行规范,明确各模块的数据输出、指令接收、动作执行标准,消除单元交互过程中的时序偏差。针对工况切换、稳态维持、异常修正等不同运行阶段,匹配对应的单元协同模式,调整各单元工作优先级。采集单元提升数据更新频次,为控制端提供充足研判依据。传输单元维持高频稳定的数据交互状态,保障指令与数据实时同步。执行单元依据统一指令分步完成调节动作,规避多设备无序运行引发的环境震荡。整套管控策略强化系统整体联动能力,消解单元独立运行带来的适配短板。

4.3 系统运行稳定性提升路径

系统运行稳定性提升从数据传输、设备运行、参数调控三个维度推进,全方位降低系统运行波动。针对数据传输波动问题,优化信道占用规则,规范多通道数据传输秩序,减少数据拥堵与信号紊乱问题,保障数据交互链路持续通畅。针对终端设备运行波动,建立设备分级启停机制,设备启停动作分步开展,弱化瞬时功率变动对舱内环境的冲击。细化参数调控的收敛逻辑,延长稳态工况的精细修正链路,抵消外界环境扰动与设备运行偏差带来的参数偏移。增设系统运行自检环节,周期性排查数据采集偏移、指令响应延迟、设备运行异常等隐性问题,提前处理各类不稳定诱因。结合试验室长期

运行工况特征,更新设备保护阈值与调控参数,适配长期连续运行需求,筑牢系统稳定运行的基础条件。

4.4 测控系统长效运维管理机制

测控系统长效运维管理机制聚焦常态化管控、精细化排查与标准化运维,解决传统运维模式粗放、滞后的问题。建立分层分级巡检制度,针对传感采集设备、控制主机、终端执行装置、传输线路划分巡检频次与检查内容,覆盖系统全部硬件单元。搭建设备状态台账管理模式,持续记录设备运行状态、参数偏移情况、检修更换记录,追踪设备性能衰减规律,提前预判部件老化与运行隐患。规范运维操作流程,统一设备校准、故障排查、线路维护、部件更换的操作标准,降低人为操作带来的系统偏差。建立运维数据复盘机制,依托日常运行数据总结常见故障诱因,针对性优化系统运行参数与管控方式^[5]。长效运维机制补齐隐性故障排查短板,维持测控设备的精准工作状态,保障整套系统长期、稳定、精准完成各类气候环境模拟工作。

结束语

整套测控系统的优化设计与运行管控体系,覆盖从前端数据采集到后端运维管理的全流程环节,完全贴合气候环境实验室的密闭运行特性。现场落地过程中可结合试验室的实际试验需求与长期运行状态灵活调整细节,持续强化多参数协同调控能力,保障各类复杂气候工况的精准稳定构建。

参考文献

- [1]安毓辉,刘志兵,陈晓东.极地气候环境实验室设计[J].船舶,2023,34(1):185-192.
- [2]马军卫,孙永平,白冰.飞机气候环境实验室压缩空气系统管理浅析[J].设备管理与维修,2022(12):5-7.
- [3]马军卫,孟雪泳,孙永平.气候环境实验室新风处理系统机组管理浅析[J].设备管理与维修,2023(6):12-13.
- [4]王军朋.气候环境实验室:大飞机适航取证的利器[J].大飞机,2025(9):21-22.
- [5]杜文辉,吴敬涛,任战鹏,等.气候实验室环境场动态平衡调控技术研究[J].测控技术,2024,43(2):67-73,79.