

基于传感网络的展厅环境自适应调控系统设计

——以光与声为例

王继顺

北京盛世永信文化发展有限公司 北京 100024

摘要：本研究设计了一套基于传感网络的展厅环境自适应调控系统，重点针对光与声环境。系统融合传感网络、自适应控制及光声耦合调控理论，构建四层架构，实现多传感器数据采集、低延迟传输及数据库预处理。通过闭环算法，系统根据不同场景动态设定光声参数，实现精准调控。试点应用显示，该系统有效提升展厅环境品质，显著降低能耗，增强观众满意度。此方案为博物馆等文化展示空间提供了高效、智能的环境调控新途径。

关键词：传感网络；展厅环境；自适应调控；光环境；声环境；智能系统

1 展厅光声环境调控的核心需求与理论基础

1.1 核心需求分析

展厅光声环境调控需兼顾展品保护、观众体验与能源节能三大目标，不同维度需求差异显著。（1）展品保护方面，不同类型展品对光声环境的耐受阈值差异明显。书画、纺织品等光敏展品，需控制光照强度 $\leq 50\text{lux}$ ，且避免紫外线（波长 $< 400\text{nm}$ ）与红外线（波长 $> 700\text{nm}$ ）照射，声音需 $\leq 40\text{dB}$ 以防振动损伤；金属、陶瓷等非光敏展品，光照可放宽至 $100\text{-}200\text{lux}$ ，声音控制在 50dB 以下即可；互动科技展品需 $150\text{-}200\text{lux}$ 光照保障操作清晰度，声音需 $50\text{-}60\text{dB}$ 确保讲解可辨。（2）观众体验方面，光照需满足均匀性要求，观展区域光照均匀度（最小光照/最大光照） ≥ 0.8 ，避免强光直射（眩光指数 ≤ 19 ）；行走通道光照 $\geq 150\text{lux}$ ，保障安全通行。声音需控制信噪比（信号声压级-背景噪声声压级） $\geq 20\text{dB}$ ，相邻展区声音串扰 $\leq 10\text{dB}$ ，避免不同区域声音叠加导致嘈杂。（3）能源节能方面，需结合展厅时段流量规律优化调控：高峰时段（如上午10点-下午3点）优先满足体验与保护需求，精准调控局部参数；平峰/低谷时段（如开馆前、闭馆前），无人展区光照降至 50lux 以下，声音关闭或降至 30dB 以下，目标使整体能源消耗较传统模式减少20%以上。

1.2 相关理论基础

传感网络理论是系统感知层的核心支撑，由感知层、传输层、应用层组成。感知层通过多传感器节点分布式采集数据，解决单一传感器监测盲区问题；传输层采用 ZigBee、LoRa 等协议，实现低延迟数据传输（延迟 $\leq 1\text{s}$ ）；应用层对数据进行处理与控制，保障网络连通率 $\geq 99\%$ ，为后续调控提供稳定数据支撑。自适应控

制理论是系统决策层的关键依据，通过“监测-比较-调整”闭环实现动态适配。其中，模型参考自适应设定理想光声参数模型（如“光敏展品-低光-低噪”模型），将实际数据与模型对比计算调整量；模糊自适应控制则处理“较多观众”“较吵环境”等模糊信息，输出灵活调控策略，适配展厅环境的非线性与不确定性；光声耦合调控理论是系统协同性的保障，光声环境存在相互影响：强光环境下观众对声音敏感度提升，需适当降低音量；光敏展品展区降低光照的同时，同步减少声音以缩短观众停留时间，间接减少光照累积影响。基于正向耦合（如观众聚集区同步提升光照与声音清晰度）与反向耦合（如光敏展区同步降低光照与声音）逻辑，可实现光声协同优化^[1]。

2 基于传感网络的展厅环境数据采集系统设计

2.1 传感网络总体架构

系统采用“分层分布式”架构，分为感知层、传输层、数据层，各层功能明确且协同联动。感知层负责环境数据采集，部署光照、声音、人体红外、温湿度等传感器，实现光声环境与观众状态的全面感知；传输层构建无线传输网络，将感知数据实时传输至数据层，解决展厅墙体多、信号遮挡问题；数据层搭建数据库与预处理模块，存储、清洗与融合数据，为调控决策提供可靠输入。

2.2 感知层设计：传感器选型与部署

传感器部署采用“重点覆盖+全域补充”原则。展柜区域每个展柜顶部部署1个光照传感器与1个声音传感器，间距 $\leq 2\text{m}$ ，确保覆盖展品全域；观众通道每隔 5m 部署1个人体红外传感器与1个光照传感器，保障行走安全；互动体验区每个设备周边部署1个声音传感器与2个人体红外传感器，间距 $\leq 3\text{m}$ ；展厅顶部每隔 10m 部署1

个温湿度传感器，辅助修正调控参数。

传感器类型	核心功能	技术参数	适配场景
光照传感器	采集光照强度、波长	测量范围0-2000lux，精度±5lux；波长检测380-780nm	展柜内、观众通道、互动区域
声音传感器	采集音量、信噪比	测量范围30-120dB，精度±1dB；采样频率44.1kHz	讲解区、互动体验区、文物展区
人体红外传感器	监测观众存在与密度	探测距离0-5m，探测角度120°	展区入口、展柜周边、通道
温湿度传感器	辅助光声调控	温度0-50℃（精度±0.5℃），湿度20%-90%（精度±3%）	全域部署，修正调控参数

2.3 传输层与数据层设计

传输层采用“ZigBee+WiFi”混合协议。ZigBee用于传感器节点数据传输，优势为低功耗（传感器电池续航 ≥ 6个月）、自组网（支持100+节点）、抗干扰，满足环境数据实时传输需求；WiFi用于数据网关与控制中心的高速数据交互，保障预处理后的数据快速上传，传输速率 ≥ 150Mbps。网络拓扑采用“星型+mesh”混合结构：每个展区设置1个数据网关，作为该区域传感器节点的中心，简化网络管理；网关之间通过无线链路互联形成冗余路径，某一网关故障时，数据可通过其他网关传输，故障恢复时间 ≤ 5秒，保障网络可靠性；数据层构建MySQL数据库，存储三类核心数据：基础数据（展厅布局、展品属性阈值）、实时监测数据（秒级存储最近24小时数据）、历史数据（小时级汇总1年数据）^[2]。数据预处理采用三步流程：剔除异常值（如光照传感器突发10000lux判定为故障，用前5秒平均值替代）、多传感器数据加权融合（如3个光照传感器数据取平均）、按“展区-展品类型-时段”分类，为调控提供针对性数据。

3 展厅光声环境自适应调控算法与系统实现

3.1 调控算法总体框架

系统采用“数据输入-需求分析-参数计算-执行反馈”的闭环算法框架，分为需求分析、参数计算、执行反馈三大模块。需求分析模块基于预处理数据，判断当前场景类型。根据“展品类型+观众流量”二维维度，将展厅场景分为四类：光敏展品+低流量、光敏展品+高流量、非光敏展品+低流量、互动展品+高流量，不同场景对应差异化光声目标参数。参数计算模块结合场景需求与光声耦合逻辑，计算最优调控参数。光照调控采用“模型参考+模糊补偿”算法，先调用预设模型获取理想光照值，再根据实际偏差与模糊规则输出调整量；声音调控采用“信噪比优先+区域隔离”算法，保障声音清晰且无串扰；光声协同模块基于耦合关系修正参数，如观众聚集区同步提升光照与声音清晰度。执行反馈模块将调控参数下发至执行设备（LED灯、音响），并通过传感器实时监测调控效果，若未达标则重新计算调整，形成闭环控制。

3.2 核心调控算法设计

光照自适应调控算法分为三步：首先，根据场景类型调用理想光照模型，如光敏展品低流量场景理想光照为30lux；其次，计算实时光照与理想值的偏差，若偏差 > 5lux则触发调整；最后，采用模糊规则输出调整量，如偏差10lux时降低光照8lux，偏差20lux时降低15lux，控制精度达±5lux。声音自适应调控算法聚焦信噪比与区域隔离。实时计算声音信噪比，若 < 20dB则提升信号声压级，若 > 30dB则降低；监测相邻展区串扰量，若 > 10dB则调整发声设备方向或降低音量5dB；无人区域延迟5秒后关闭声音或降至30dB以下，有观众进入时1秒内恢复；光声协同调控算法基于耦合关系优化参数，观众流量增加时，同步提升光照（如从100lux升至150lux）与声音清晰度（信噪比从20dB升至25dB）；光敏展品展区降低光照（如从50lux降至30lux）的同时，同步降低声音（从40dB降至35dB），减少观众停留时间^[3]。

3.3 系统硬件与软件实现

系统硬件包括传感器节点、数据网关、控制中心、执行设备。传感器节点采用模块化设计，集成多类型传感器与ZigBee通信模块；数据网关选用工业级网关，支持多协议转换与边缘计算；控制中心配置服务器与监控终端，实现数据可视化与手动干预；执行设备选用智能LED灯（支持0-2000lux调光）与定向音响（支持30-60dB音量调节）。系统软件分为感知层软件、数据层软件、应用层软件。感知层软件实现传感器数据采集与协议封装；数据层软件完成数据存储、清洗与融合；应用层软件包括场景管理、参数设置、监控预警模块，支持工作人员查看实时数据、修改展品阈值、接收异常预警，界面采用可视化设计，操作便捷。

4 系统试点应用与效果评估

4.1 试点展厅概况

本研究选取济南市博物馆书画展厅作为实地试点，该展厅是济南市级重点文化展示空间，总面积800㎡，依托博物馆“明清书画馆藏”特色，形成功能明确的三大区域。其中，书画展区是核心区域，布设20个恒温恒湿展柜，陈列从明代到近现代的30余件书画珍品，涵盖山水、花鸟等题材，均属于典型光敏展品，长期强光照射易导致颜料褪色、纸张脆化；互动体验区位于展厅中

部,配置5台书画数字临摹设备,支持观众通过触控屏模拟毛笔笔触,体验传统书画创作;观众通道沿展区外环形分布,宽2.5m,承担人流疏导与安全通行功能。

在本系统部署前,该展厅采用传统固定参数调控模式:书画展区长期维持50lux光照、35dB声音,虽能满足基础保护需求,但未考虑观众观赏清晰度;互动区固定150lux光照、55dB讲解音量,适配设备操作却忽略人流变化;观众通道保持200lux常亮照明。实际运营中,两大问题突出:节假日观众聚集时,互动区与书画展区相邻区域声音叠加,嘈杂度超50dB,影响观众沉浸式体验;工作日上午9-11点、下午3-5点等低人流时段,无人区域照明与音响持续运行,日均浪费电能约12kWh,不符合博物馆低碳运营要求^[4]。

4.2 系统部署与运行

在济南市博物馆书画展厅完成系统部署。感知层按“重点覆盖+全域监测”布设:25个光照传感器,20个嵌入展柜顶部(距展品1.5m),5个在通道天花板;20个声音传感器分区域布设,精准捕捉声压级;15个人体红外传感器部署在展区入口等位置,探测距离5m;8个温湿度传感器均匀分布,辅助修正参数。传输层部署3个工业级数据网关,用“ZigBee+WiFi”混合组网,ZigBee连接传感器节点,电池续航8个月,WiFi负责网关与控制中心交互,传输速率稳定,延迟低。控制中心配高性能服务器,搭载管理软件,通过RS485总线连接智能LED灯和定向音响,支持远程配置与手动干预。试运行实现动态调控:书画展区依人流调光照和声音;互动区按设备操作状态调整;通道根据人流开关照明。

4.3 应用效果评估

系统在书画展厅稳定运行3个月,从四维度评估效果。环境参数优化明显:书画展区光照均匀度提升,声

音实现“声景分区”;互动区光照和声音指标良好;通道光照符合标准。展品保护达标:专业检测显示,书画展区光照强度波动小,无紫外线与红外线照射,颜料无褪色;声音和振动远低于安全阈值,无结构损伤风险。能源消耗降低:较传统模式,照明和音响能耗降幅分别为28%、32%,整体能源消耗减少25%,月均节省电费约351元,年节约超4200元。观众体验提升:问卷调查300份有效反馈显示,92%观众认为光照舒适,88%表示声音清晰,综合满意度从55%升至90%,青少年对互动区满意度达95%,适配不同人群需求。

结束语

本研究通过对展厅光声环境的自适应调控系统设计与实践,验证了基于传感网络的智能调控技术在提升展览品质与能源效率方面的显著优势。未来,随着物联网技术的不断发展,传感网络的覆盖范围与数据采集精度将进一步提升,为展厅环境的精细化调控提供更多可能。同时,结合人工智能与大数据分析技术,系统可进一步优化调控策略,提升展品保护与观众体验的均衡性。本研究为文化展示空间的环境调控提供了有益探索与参考,期待在更多领域实现广泛应用与深入发展。

参考文献

- [1]张志恒,姜世超.基于多传感器的温室环境监测系统研究[J].信息与电脑(理论版),2023,35(05):141-144.
- [2]王晨,刘鑫.无线传感网络数据异常状态检测算法[J].传感技术学报,2025,38(6):1133-1137.
- [3]陈文庆,孙更新.无线多媒体传感网络多路径可靠传输数据分配[J].传感技术学报,2025,38(1):185-190.
- [4]单慧勇,张程皓,李晨阳,等.温室环境自动调控系统设计[J].河南农业科学,2021,50(8):174-180.