

Research on Anti-interference Technology of Theater Lighting Control System Based on PLC

Yueyang Du

Tianjin Beichen District Workers' Service Center, Tianjin, 300402, China

Abstract

This paper focuses on the anti-interference technology of the theater lighting control system based on PLC and conducts research on the complex interference problems in the theater environment. First, analyze the composition structure of the system, and clarify the functions and collaborative mechanisms of the control layer, execution layer, sensing layer and communication layer; Furthermore, identify internal power sources, signals, equipment interference, as well as external interference sources such as electromagnetic radiation, static electricity, and lightning strikes, and analyze their influence mechanisms on data transmission, logical operations, signal integrity, and equipment safety. Anti-interference solutions are proposed from three aspects: hardware design such as power processing, signal isolation and filtering, electromagnetic shielding, software optimization such as data verification and error correction, instruction redundancy and delay filtering, self-diagnosis and handling of faults, and grounding and wiring design, providing a practical and feasible technical path for improving the stability and reliability of the theater lighting control system.

Keywords

PLC Theater lighting control Anti-interference technology; Electromagnetic compatibility

基于 PLC 的剧场灯光控制系统抗干扰技术研究

杜岳阳

天津市北辰区职工服务中心, 中国 · 天津 300402

摘要

本文聚焦基于PLC的剧场灯光控制系统抗干扰技术, 针对剧场环境中复杂的干扰问题展开研究。首先剖析系统的组成结构, 明确控制层、执行层、传感层和通信层的功能与协同机制; 进而识别内部的电源、信号、设备干扰及外部的电磁辐射、静电、雷击等干扰源, 分析其对数据传输、逻辑运算、信号完整性及设备安全的影响机制。从硬件设计如电源处理、信号隔离与滤波、电磁屏蔽、软件优化如数据校验与纠错、指令冗余与延时滤波、故障自诊断与处理、接地与布线设计三方面提出抗干扰方案, 为提升剧场灯光控制系统的稳定性与可靠性提供了切实可行的技术路径。

关键词

PLC; 剧场灯光控制; 抗干扰技术; 电磁兼容

1 引言

剧场灯光作为演艺呈现的核心要素, 其控制系统的稳定运行直接关乎演出效果与质量。随着 PLC 技术在工业控制领域的成熟应用, 其凭借高可靠性与灵活性成为剧场灯光控制的核心设备。然而, 剧场环境的特殊性使其面临多重干扰挑战: 大功率灯光设备引发的电源波动、舞台机械运转产生的电磁辐射、信号传输中的耦合干扰等, 均可能导致系统指令失真、设备误动作, 甚至引发演出中断。目前, 工业领域的抗干扰方案虽有借鉴价值, 但针对剧场场景的针对性研究不足, 难以完全适配其复杂的干扰环境。因此, 深入探究基于 PLC 的剧场灯光控制系统抗干扰技术, 构建兼顾硬件、

软件及布线接地的综合防护体系, 对保障剧场演艺活动的顺利开展具有重要的实践意义。

2 基于 PLC 的剧场灯光控制系统组成与干扰源分析

2.1 系统组成结构

基于 PLC 的剧场灯光控制系统主要由控制层、执行层、传感层和通信层组成。控制层以 PLC 为核心, 负责接收上位机的控制指令, 进行逻辑运算和控制决策, 并向执行层发送控制信号^[1]。执行层由灯光驱动设备组成, 负责将 PLC 输出的控制信号转换为灯光设备的动作, 实现灯光的亮度调节、开关控制等功能。传感层包括亮度传感器、温度传感器等, 用于采集现场环境参数, 为 PLC 的控制决策提供依据。通信层实现各设备之间的数据传输, 常用的通信方式包括以太网、RS485、DMX512 等。

【作者简介】杜岳阳(1987-), 男, 中国天津人, 本科, 工程师, 从事剧场内电气工程研究。

2.2 主要干扰源类型

剧场灯光控制系统中的干扰源可分为内部干扰和外部干扰两类。内部干扰主要源于系统内部设备的运行，电源干扰是其中一个重要方面，系统中存在大量大功率灯光设备，这些设备的启停会导致电源电压波动，产生浪涌、尖峰等干扰信号，影响 PLC 及其他控制设备的供电稳定性。信号干扰不容忽视，控制信号在传输过程中，由于导线间的电磁耦合、接地不良等原因，可能受到串模干扰和共模干扰。设备干扰也是内部干扰的一部分，PLC、调光器等设备内部的电子元件在工作时会产生电磁辐射，若设备布局不合理，可能相互干扰。外部干扰主要来自剧场环境及周边设备，电磁辐射干扰是常见的一种，舞台机械的电机运转、无线麦克风、对讲机等无线通信设备的信号发射，会产生较强的电磁辐射，干扰 PLC 的正常工作。静电干扰在特定环境下也会产生影响，剧场内空气干燥时，人体、衣物与设备之间的摩擦会产生静电，静电放电可能损坏 PLC 的集成电路芯片或导致数据错误。同时，雷击干扰也需警惕，剧场建筑若未做好防雷措施，雷击产生的过电压可能通过电源线、信号线等路径侵入系统，造成设备损坏。

2.3 干扰对系统的影响机制

干扰对基于 PLC 的剧场灯光控制系统的影响主要体现在多个方面。在数据传输方面，干扰信号可能导致 PLC 与上位机、执行层设备之间的通信数据发生错误，如指令丢失、数据篡改等，使系统无法正确接收或发送控制信息。在逻辑运算上，PLC 的中央处理器（CPU）在处理数据时，若受到强电磁干扰，可能出现运算错误，导致控制逻辑混乱，引发灯光设备误动作。输入输出信号也会因干扰而失真，干扰信号叠加在 PLC 的输入输出信号上，可能导致信号失真，如模拟量信号精度下降，数字量信号误触发等，强干扰可能击穿 PLC 的电源模块、I/O 模块等元件，导致设备永久性损坏。

3 硬件抗干扰技术设计

硬件抗干扰是提高 PLC 控制系统可靠性的基础，通过合理的硬件设计可以有效抑制干扰源的产生、阻断干扰的传播路径。针对剧场灯光控制系统的特点，从电源处理、信号隔离、电磁屏蔽等方面设计硬件抗干扰措施。

3.1 电源抗干扰设计

电源系统是 PLC 控制系统最易受干扰的环节之一，剧场灯光设备产生的电源波动会直接影响 PLC 的稳定运行。因此，可在 PLC 控制系统的电源输入端设置隔离变压器，利用其电磁隔离特性，阻断电网中的共模干扰和部分串模干扰，同时隔离变压器的初次级绕组采用屏蔽层接地处理，进一步增强抗干扰效果^[2]。在隔离变压器的输出端串联电源滤波器，用于抑制电源线上的高频干扰信号，应选择具有差模和共模滤波能力的复合型滤波器，其截止频率根据系统中干扰信号的频率特性确定。为 PLC 控制系统配置 UPS，当电网电压突然中断或大幅波动时，UPS 能快速切换至蓄电池

供电，保证系统在短时间内正常运行，避免因断电导致的数据丢失或设备损坏，同时，UPS 的稳压功能可有效抑制电源电压波动。将剧场灯光系统的动力电源与 PLC 控制系统的控制电源分开布线，采用独立的配电箱供电，避免大功率设备的启停对控制电源产生干扰，控制电源的容量应留有一定余量，防止过载。

3.2 信号隔离与滤波

PLC 的输入输出信号在传输过程中易受干扰，通过信号隔离和滤波技术可有效提高信号的抗干扰能力。在 PLC 的输入输出回路中采用光电耦合器进行信号隔离，使 PLC 内部电路与外部信号回路实现电气隔离，阻断共模干扰的传播，对于模拟量信号，可选用带光电隔离的模拟量输入输出模块；对于数字量信号，可在信号输入端串联光电耦合器。在 PLC 的数字量输入回路中并联 RC 滤波电路，用于吸收高频干扰脉冲，RC 电路的参数根据干扰信号的频率确定，通常电阻取值为 $1\text{k}\Omega\sim 10\text{k}\Omega$ ，电容取值为 $0.1\mu\text{F}\sim 1\mu\text{F}$ 。PLC 的信号传输线缆采用双绞线，利用双绞线的绞合结构抵消电磁耦合产生的干扰，对于模拟量信号和高频数字信号，应选用屏蔽双绞线，屏蔽层单端接地。

3.3 电磁屏蔽设计

电磁屏蔽是抑制电磁辐射干扰的有效手段，通过设置屏蔽体将干扰源与受干扰设备隔离^[3]。PLC、调光器等核心设备应安装在金属屏蔽柜内，屏蔽柜的外壳应采用厚度不小于 1mm 的冷轧钢板制作，并保证良好的电气连续性，同时屏蔽柜需进行接地处理，接地电阻不大于 4Ω 。信号线缆和动力线缆均采用屏蔽线缆，屏蔽层应与屏蔽柜或接地端子可靠连接，不同类型的线缆应分开敷设，若必须交叉，应采用垂直交叉方式，并在交叉点处增加屏蔽隔板。在舞台灯光设备与 PLC 控制柜之间设置金属屏蔽隔板，减少灯光设备产生的电磁辐射对 PLC 的干扰，屏蔽隔板的高度应高于设备顶部，宽度覆盖干扰源与受干扰设备之间的空间。

4 软件抗干扰技术优化

软件抗干扰技术通过编程手段提高系统对干扰的容错能力，弥补硬件抗干扰措施的不足。针对剧场灯光控制系统的特点，从数据校验、指令冗余、故障自诊断等方面设计软件抗干扰算法。

4.1 数据校验与纠错

为防止干扰导致的数据传输错误，在 PLC 与上位机、执行层设备的通信过程中需采用数据校验机制。在传输的数据帧中加入校验码，接收方通过校验码判断数据是否出错，若校验出错，则请求发送方重发数据。PLC 接收传感器数据或上位机指令后，对数据的合理性进行判断，若数据超出合理范围，则视为无效数据，忽略该数据并记录错误信息。

4.2 指令冗余与延时滤波

针对干扰导致的 PLC 指令执行异常，需采用指令冗余和延时滤波技术。在关键控制指令的程序中，重复执行多次

相同的指令，提高指令被正确执行的概率。对于 PLC 的数字量输入信号，采用延时滤波算法消除干扰脉冲。当检测到输入信号状态变化时，启动定时器，若在设定的延时时间（通常为 10ms~100ms）内信号状态保持不变，则确认信号有效；否则，视为干扰信号，不予响应。在灯光设备进行场景切换或亮度调节时，若 PLC 检测到干扰信号，则立即锁定当前输出状态，避免设备出现异常动作，待干扰排除后，再根据控制指令恢复正常输出。

4.3 故障自诊断与处理

设计故障自诊断程序，使 PLC 能够实时监测系统的运行状态，及时发现并处理故障。PLC 通过通信接口实时读取执行层设备的运行状态信息，若发现设备异常，立即记录故障信息并发出报警信号。定期检测 PLC 与上位机、执行层设备之间的通信连接状态，若检测到通信中断，则启动备用通信路径，并尝试重新建立连接。在 PLC 程序中设置 watchdog 定时器，定时器的溢出时间大于程序正常运行的周期，程序正常运行时，定期刷新 watchdog 定时器；若程序因干扰陷入死循环，watchdog 定时器溢出，触发 PLC 复位，使系统恢复初始状态。

5 接地与布线抗干扰设计

合理的接地与布线是减少干扰耦合的关键，通过优化接地系统和线缆敷设方式，可有效降低干扰对系统的影响。

5.1 接地系统设计

剧场灯光控制系统的接地系统应根据设备类型和干扰特性进行分类设计，避免不同接地系统之间的干扰耦合。PLC 控制柜、屏蔽柜、灯光设备的金属外壳均应进行保护接地，将设备外壳与大地可靠连接，防止设备漏电时对人体造成伤害，同时抑制电磁干扰，保护接地电阻应不大于 4Ω ，接地体采用镀锌角钢（ $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 5\text{mm}$ ），埋深不小于 0.8m。PLC 的信号地、模拟量输入输出模块的参考地应连接至专用的信号接地端子，形成独立的信号接地系统，信号接地采用单点接地方式，避免多点接地导致的地电位差干扰，信号接地电阻应不大于 1Ω ，接地体与保护接地体之间的距离不小于 5m。设备屏蔽柜、线缆屏蔽层的接地应与信号接地系统连接，形成统一的屏蔽接地网络，屏蔽接地采用单端接地方式，对于长度小于 30m 的线缆，屏蔽层在 PLC 侧接地；对于长度大于 30m 的线缆，屏蔽层在两

端接地，但需通过接地隔离器避免地电位差。剧场建筑的防雷接地系统应与控制系统的接地系统分开设置，两者之间的距离不小于 10m，若无法满足距离要求，应采用接地均压带将防雷接地体与控制系统接地体连接，降低雷击时的地电位差。

5.2 布线设计

线缆的敷设方式直接影响干扰的耦合程度，合理的布线设计可有效减少干扰。将系统中的线缆分为动力线缆、控制线缆、通信线缆三类，分别敷设在不同的桥架或穿线管中，避免交叉干扰，桥架之间应保持不小于 30cm 的距离，穿线管采用金属管并接地。线缆的敷设路径应远离强干扰源，避免平行敷设，若必须平行敷设，两者之间的距离应不小于 1m，且平行长度不超过 10m。对于关键的控制信号和通信信号，采用冗余布线方式，敷设两根独立的线缆，当一根线缆受干扰时，可自动切换至另一根线缆，冗余线缆应采用不同的敷设路径，降低同时受干扰的概率。线缆的终端接头应牢固可靠，避免虚接产生的接触干扰，对于屏蔽线缆，屏蔽层应与接头的屏蔽壳可靠连接，确保屏蔽的连续性。

6 结语

综上所述，针对基于 PLC 的剧场灯光控制系统的抗干扰研究，通过系统梳理干扰源类型与影响机制，从硬件、软件及接地布线三个维度构建的抗干扰方案，能够有效抑制剧场环境中的各类干扰。硬件层面的电源处理与电磁屏蔽阻断了干扰传播路径，软件层面的数据校验与故障诊断提升了系统容错能力，科学的接地与布线设计则减少了干扰耦合。这些技术措施的协同应用，为剧场灯光控制系统的稳定运行提供了全面保障。未来，可进一步结合智能化技术实现干扰的动态监测与自适应调控，探索新型材料在屏蔽与传输中的应用，持续优化抗干扰方案，以适应剧场演艺对灯光控制日益严苛的可靠性要求。

参考文献

- [1] 王亚军.PLC控制系统抗干扰技术设计策略[J].内蒙古石油化工,2018,44(10):103-105.
- [2] 邱志顺.PLC抗干扰技术在工业控制系统中的应用[J].集成电路应用,2020,37(1):88-89.
- [3] 曲国权.PLC控制系统抗干扰技术与应用研究[J].山东工业技术,2016(22):275-275.