

城市多功能灯杆配电综合计量系统

匡 军

山东省青岛市公安局交通管理支队，市南区大队，山东 青岛

收稿日期：2025年9月24日；录用日期：2025年10月29日；发布日期：2025年11月10日

摘 要

随着网络信息技术发展及群众对便捷社会生活的追求，2010年IBM提出“智慧城市”概念并深入研究，2012年中国政府开始推行试点。“智慧城市”项目中，多功能灯杆成为重要组成部分。作为城市常见且覆盖广泛的基础设施，灯杆成为“多功能载体”，承载5G基站、Wi-Fi信号站、传感器等装置。但这也带来配电箱负荷上升、电能计量混乱等问题。为确保配电箱安全有序使用并明确各部分电能使用量，业界已开始研究多功能灯杆配电综合计量系统。本文阐述了多功能灯杆配电系统强弱电分离、配电综合计量系统及配电箱继电保护的分析与设计。随着多功能灯杆发展，配电箱将更加安全易用，有助于降低智慧城市的经济预算，以提高工作效率。本文提出了改善其内部结构的小方法，以期助力智慧城市普及。

关键词

智慧城市，多功能灯杆，配电箱，计量系统，继电保护

Urban Multi-Functional Lamp Pole Distribution Integrated Metering System

Jun Kuang

Shinan District Brigade, Traffic Management Detachment of Shandong Provincial Qingdao Public Security Bureau, Qingdao Shandong

Received: September 24, 2025; accepted: October 29, 2025; published: November 10, 2025

Abstract

Driven by the global adoption of smart city initiatives, multifunctional light poles have evolved into essential urban assets, supporting an array of devices such as 5G base stations, environmental sensors, and surveillance systems. However, the convergence of these functionalities introduces significant challenges, including increased electrical loads on distribution boxes and complex energy metering requirements. In response, this paper proposes an integrated power distribution and

metering system specifically designed for multifunctional light pole networks. The system incorporates clear separation between high-voltage and low-voltage components, a unified metering mechanism for accurate energy monitoring, and relay protection schemes to enhance operational safety. By improving the clarity of electricity consumption data and preventing failures, this approach not only optimizes the management of urban infrastructure but also reduces long-term maintenance costs. The proposed model supports the development of more efficient, reliable, and sustainable smart city operations.

Keywords

Smart City, Multi-Functional Lamp Pole, Distribution Box, Metering System, Relay Protection

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着当代社会快速发展，部分城市的基础设施已难以适应扩张中的城市规划需求。在此背景下，以现代信息技术为支撑的“智慧城市”成为一种新型发展模式，其核心在于通过感知、分析与整合城市运行信息，提升管理效率与服务能力[1]。作为智慧城市的重要载体，智慧路灯系统由传统路灯智能化改造而来，逐步发展为集照明、视频监控、交通管理、环境监测与 5G 通信于一体的综合感知节点[2]，不仅承担基础照明功能，更是城市大数据采集与传输的关键基础设施。然而，随着灯杆集成功能的不断增加，配电系统面临负荷上升、布线复杂、接口冗余及系统性规划不足等挑战，长期运行易导致结构混乱与安全隐患。因此，亟需对配电箱进行结构优化与集成设计，以保障其可靠、安全与可持续运行。

当前学术研究多聚焦于多功能灯杆的节能与传感应用，而相关专利则侧重于具体的远程监控与电压控制方法。商业解决方案虽已提供功能集成的智能灯杆，但其内部配电、计量及综合保护架构的公开资料有限，常导致现场加装设备时计量方案混乱、成本高昂。区别于现有方案，本文的核心创新在于提出了一套模块化的箱式配电系统。其贡献是通过集中式计量方案显著优化了成本效益与可维护性，并系统性地集成了针对强弱电分离的多层次继电保护机制，为解决多功能负载带来的安全隐患与扩展性难题提供了清晰的工程化路径。

2. 多功能灯杆及智能配电箱概述

多功能灯杆是指集成了充电桩、无线通信设备、电子屏幕等多种传感器与设备的新型城市基础设施[3]。如图 1 所示，与传统灯杆仅具备照明功能不同，多功能灯杆作为一种综合性设施，具有“供电、网络、控制”一体化特征。它不仅实现了灯杆本身的复合化应用，有效节约了日益紧张的城市地面空间，还凭借其特有的取电与入网功能，为公共区域持续提供电力支持和无线网络覆盖，犹如城市中随处可见的“充电宝”，增强了城市的服务能力与智能化水平。

2.1. 智能配电箱概述

智能配电箱系统通过集成嵌入式智能器件与传感器等新型硬件，并搭配专用线上操作系统，实现了配电任务的自主执行及与其他智慧系统的协同联动。该系统采用模块化设计理念，通过对不同功能单元进行分区封装与集中计量管理，显著提升了组织性与可维护性。模块化结构既为功能扩展预留了充足空

间，也增强了安全性能。此外，配电箱在材料方面的持续优化进一步延长了其使用寿命[4]。同时，通过使用多功能电能表，可将集计量存储、监测、控制与管理功能于一体，为用电管理提供全面数据支持[5]。综上所述，当前应用于多功能灯杆的智能配电箱不仅在智能化水平、可靠性和经济性方面显著提升，同时有效降低了故障率与维护需求。



Figure 1. Multifunction lamp pole
图 1. 多功能灯杆

2.2. 多功能灯杆配电系统原则

强弱电分离是配电系统设计的重要原则，旨在避免强电对弱电的信号干扰。二者的区别基于处理对象：强电侧重电能传输与分配(如高压电缆、路灯供电)，弱电侧重信息传递与通信(如有线电视、通信网络、管道监测)。普通灯杆仅含照明功能，无需强弱电分离；集成多种通信功能的多功能灯杆则需严格分离，以保障信号传输稳定可靠。强电干扰弱电的主要机制为电容耦合与电磁感应[6]。例如：单相接地故障时，电源母线与通信线路近距离平行敷设会因电磁耦合产生感应电压干扰信号；电源线断裂接触通信

线路会引发直接干扰；电网中性点位移也可能通过电容耦合影响通信系统[7]。实际案例显示，强弱电线路间距过近，如地下车库监控线路与供电主干线间距不足，可导致设备损坏。故布线需严格遵循国标，保持至少 30 cm 间距。此外，不同弱电系统间亦可能存在干扰，如网线与电话线需分管敷设以降低相互影响等[8]。

3. 多功能灯杆配电综合计量系统

目前，多功能灯杆的计量系统装置还不够规范，每增加一个功能就在灯杆上或者配电箱内增加一个电表，给相关工作人员造成了大量不必要的工作量，并且使整个多功能灯杆计量系统看起来杂乱无章。为了规范电表选择与安装规范，需要对计量系统进行统一化设计。

3.1. 计量装置的设计

在灯杆中比较常见的计量方式是互感器 - 电能表的搭配使用，连线方式如图 2 所示。互感器是一种能将大电流化为小电流(电流互感器)或者将大电压化为小电压(电压互感器)的装置[9]，与电能表一起使用能够为电能表提供标准的电流或电压。在多功能灯杆配电箱中，互感器可以直接安装在电度表旁边。

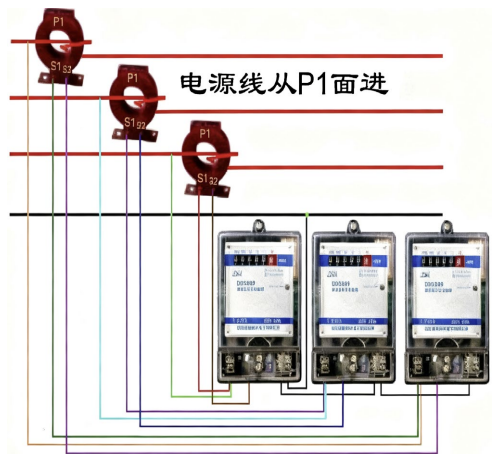


Figure 2. Connection mode of transformer and ammeter
图 2. 互感器与电度表连接方式

假设每个多功能灯杆仅安装基础照明系统和 5G 信号传输系统两个系统，因此我认为在多功能灯杆计量系统的安装中存在两种设计。方案一将互感器和电能表放在每一个灯杆中，如图 3 所示。

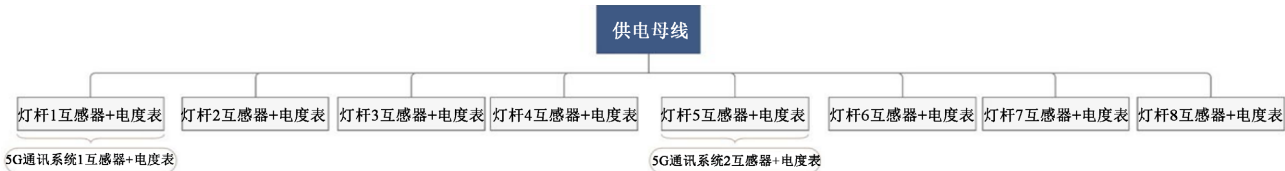


Figure 3. Schematic diagram of scheme I
图 3. 方案一示意图

在每个灯杆杆体上设计一个小窗口，并在其中安装两个电能表，分别用于计量基础照明系统与 5G 信号传输系统的耗电量。该设计具有以下优点：首先，每个灯杆配备独立计量装置，可在单杆出现故障时迅速切断对应计量系统，有助于减少整体计量误差；其次，在灯杆间距较大的应用场景中，无需长距离

布线进行统一计量，单体电能表的设置成为更优解决方案。然而，该方案也存在一些缺点：一是计量设备布置较为分散，日常检修和维护的工作量相应增加；二是计量设备数量较多，导致经济预算提高，造价相对偏高；三是若未来灯杆需新增功能并加装电能表，现有电表空间可能不足，存在无法扩展的风险。

方案二、将互感器和电能表放在配电箱中，如图 4 所示。

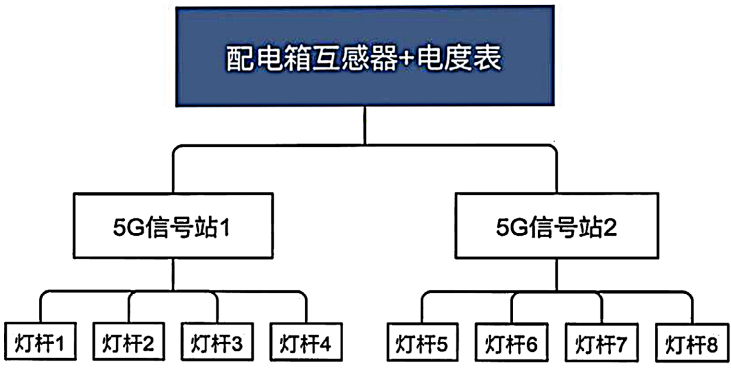


Figure 4. Schematic diagram of scheme II
图 4. 方案二示意图

在智能灯杆系统的典型设计中，通常多个灯杆会共享一个配电箱。我们可在模块化配电箱中专设一个计量模块，并分别设置两个电能表，分别对照明系统与 5G 信号传输系统进行独立电能计量。该配置方式具有以下优点：其一，实现计量设备的集中管理，在系统发生故障时便于快速定位与检修，显著提高维护效率并降低工作量；其二，考虑到智能灯杆功能尚在持续演进中，该结构具有良好的可扩展性——未来若新增用电系统，仅需在现有计量模块中增装电能表即可，无需大幅改动现有架构。然而，该方案亦存在一定局限性：首先，由于计量装置与用电设备之间存在一定距离，可能导致计量数据出现偏差；其次，若灯杆间距较大，需铺设较长电缆连接至配电箱，不仅增加线路复杂度，也可能提高工程实施难度与成本。

Table 1. Comparison and results between the two schemes

表 1. 两个方案之间的对比与结果

	优势	劣势	最终选择
方案一	计量误差小 灯杆间减少电线	造价高 检修工作量大 前瞻性低	×
方案二	前瞻性高 检修工作低	灯杆电线用量高 计量存在小误差	√

通过表 1 中方案一与方案二对比可知，方案二在适应智慧城市未来发展方向方面展现出更显著的优越性。在智慧城市整体建设中，多功能灯杆作为不可或缺的基础设施组成部分，其功能集成度将随技术进步持续扩展。因此，在配电箱设计中预先为计量系统规划充足的安装与接口空间，不仅有利于后续新增功能的顺畅接入，也可显著提升系统整体的可扩展性与维护便利性。

3.2. 计量装置的经济问题

此外，方案二所带来的经济效益也相当显著。根据不完全统计，目前上海市约有 80 万盏路灯，其中计划接入智慧城市系统的路灯数量约为 20 万盏。若以每 8 盏路灯配置一个配电箱，每 4 盏路灯设置一个

5G 信号传输点进行估算，则共需约 2.5 万个配电箱。在采用方案二的情况下，预计仅需配置 2.5 万个照明系统电能表及 2.5 万个 5G 信号传输系统电能表。与方案一相比，该方案所需照明系统电能表数量仅为方案一的 1/8，5G 信号传输系统电能表数量为方案一的 1/2。以一款市面常见的 15(60)ADDS1334 型单相电子式电能表为例，其单价约为 50 元，据表 2 计算，采用方案二可比方案一节约成本约 1000 万元。

Table 2. Economic budgets of the two schemes
表 2. 两个方案的经济预算

	方案一	方案二	(方案一—方案二)
照明电能表数量(万个)	20	2.5	17.5
5G 电能表数量(万个)	5	2.5	2.5
总计金额(万元)	1250	250	1000

3.3. 照明系统的耗电情况

在当前的智慧城市系统中，尽管引入了诸多新型功能，照明系统仍承担着不可或缺的基础性作用。根据电力部门的统计，照明系统约占公共设施总能耗的 30%。因此，在将照明系统纳入智慧城市整体规划的同时，也需深入分析其能耗特征，并积极探索有效的节能途径。

目前，高压钠灯因其发光效率高、使用寿命长以及在恶劣天气条件下仍具备良好照明效果等优势，在城市道路照明中仍占主导地位。尽管许多城市正逐步推进向 LED 照明转型，然而受经济因素制约，高压钠灯仍在城市照明市场中占据较大份额。但类型灯具存在一项显著能源浪费问题：其传统镇流器在运行过程中会产生大量热量，导致额外的能量损耗。为客观评估高压钠灯的综合性能，可通过实际数据进一步分析其利弊。以下将以一个典型电路为例，该电路包括开关、70 W 高压钠灯及配套 70 W 镇流器。

表 3 展示了 70 W 高压钠灯与配套 70 W 镇流器在工作状态下的实测数据。电能表在一小时内测得的总能耗为 0.14 kWh，据此可计算出该照明系统的实际工作功率为 140 W。测量结果表明，该高压钠灯电路产生的无功功率达到 124 W。为降低传统镇流器所带来的热损耗及无功功率问题，政府正在积极推动采用 LED 节能灯作为替代方案。

Table 3. Theoretical and practical data of high-pressure sodium lamp
表 3. 高压钠灯理论情况与实际工作的数据

	无镇流器(理论情况)	加入镇流器	两者之差
电源两端电压(AC)	220 V	205 V	15 V
电流	1.2 A	0.7 A	0.5 A
电路总功率	264 W	140 W	124 W

3.4. 5G 基站的耗电情况

毫无疑问，5G 作为主流通信技术，显著提升了网络传输速度等性能，但其基站能耗问题也引起广泛关注，尤其对供电系统可能带来的负荷压力值得重视。为此，运营商在多个城市开展了试点测试，结果如图 5 所示。数据显示，5G 基站本体功耗约为 4G 基站的三倍，且尚未计入散热等辅助设备能耗。图 5 中，BBU(基带处理单元)负责基带数字信号处理[10]，其功耗主要与所插板件相关，受实际业务负荷影响较小；AAU(有源天线单元)负责信号转换、调制及发射[11]，其功耗随业务负荷显著增加。

尽管 5G 功耗更高，但其能效远优于 4G。例如，4G 能效通常约为 192 GB/kWh，而 5G 可达 5425

GB/kWh，提升达数十倍。因此，5G 在实际能耗方面可能更具优势。在确定计量系统设计方案时，应结合设备最高功率与耗电情况进行估算，以合理选用电能表，如表 4。

	业务负荷	AAU/RRU平均功耗 (W)	BBU平均功耗 (W)
5G	100%	1127.28	293.012
	50%	892.32	283.68
	30%	762.43	273.537
	20%	739.12	292.597
	10%	699.36	292.233
	空载	633	293.533
4G	100%	289.68	175.68
	50%	273.58	174.32
	30%	259.1	171.92
	空载	222.59	169.44

Figure 5. Power consumption comparison between 5G and 4G
图 5. 5G 与 4G 功耗对比

Table 4. Estimation of lighting and 5G function related data
表 4. 照明和 5G 功能相关数据估算

	单体满载功率	配电箱需承载功率	满载电流	所需量程	所选 DDS1334 电表
主道路灯照明	400 w	3.2 kw	17.1 A	25.5 A	10(40)A
辅道路灯照明	150 w	1.2 kw	6.42 A	9.58 A	5(20)A
5G 通信功能	3.9 kw	7.8 kw	41.69 A	62.22 A	15(60)A

3.5. 电路保护设计

过电流是指流经被保护电气元件的电流超过回路额定电流的现象[12]。短路保护的主要功能在于保护供电电源，避免其因短路电流而损坏。因此，短路保护器件通常安装在非常靠近供电电源的位置，常见于电源开关下游。如图 6，这种布置方式不仅实现了用电设备与供电电源之间的电气隔离，还有助于扩大短路保护对整个用电系统的覆盖范围。

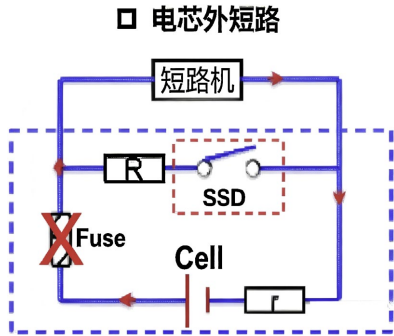


Figure 6. Short circuit protection circuit diagram
图 6. 短路保护电路图

过负荷是指用电系统的实际负荷超过了电机或变压器等设备的额定容量运行，而过载保护通常在电路功率异常升高或导线截面选择不当、实际负载超过导线安全电流时启动。这两种情况均会导致导线温度上升，当超过绝缘材料的最高允许工作温度(例如聚氯乙烯绝缘为 70℃，交联聚乙烯绝缘为 90℃)时，会加速绝缘老化甚至引发危险[13]。针对过电流和过负荷的检测，可在由互感器等构成的回路中增设保护电路：例如，利用熔断器配合晶体管电路，当检测到过电流时触发指示灯进行报警，实现预警功能，其电路示意图如图 7 所示。

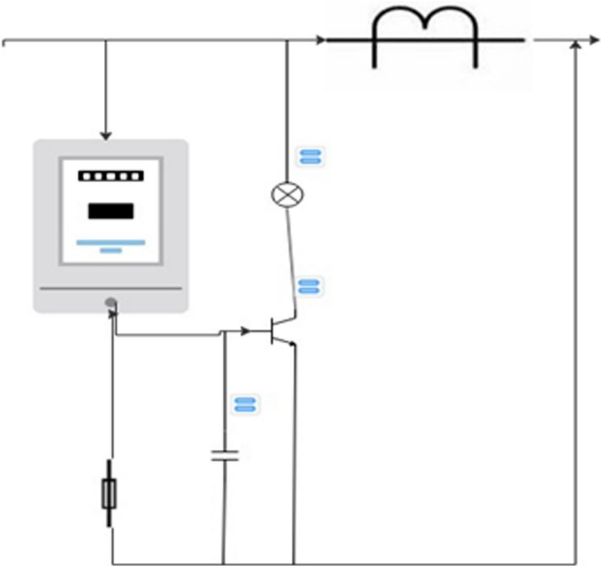


Figure 7. Short circuit protection in the circuit of transformer and circuit meter
图 7. 互感器与电路表回路中的短路保护

针对过载情况，可在电表旁的互感器上安装热电偶温度传感器，并在配电箱门板处设置显示屏，实时显示导线温度。这一设计使工作人员无需打开配电箱即可持续监测导线温度状态，从而判断电路运行是否正常，其安装示意如图 8 所示。

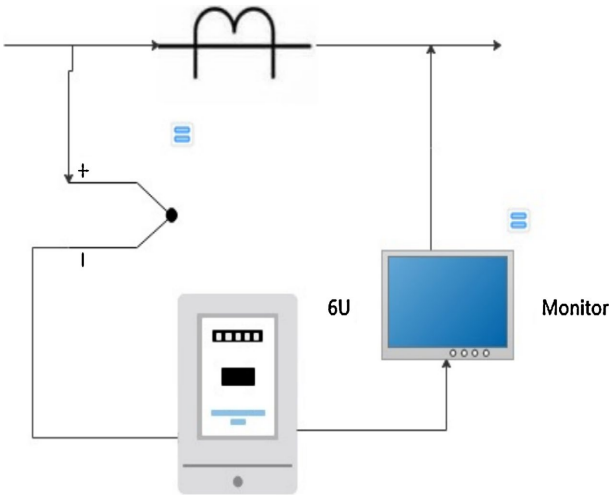


Figure 8. Overload protection in the circuit of transformer and circuit meter
图 8. 互感器与电路表回路中的过载保护

综上所述,本研究针对当前计量系统提出两种设计方案:方案一是在灯杆杆体设置独立窗口并内置空间以安装计量仪表;方案二则在模块化配电箱内划分专用区域集中安装电能表。经综合比较,方案二在多个方面展现出明显优势,不仅可显著减少电能表数量、降低设备成本,还具备更高的经济效益。此外,普通照明系统中广泛采用的高压钠灯及镇流器易引发大量无功功率,而 5G 系统的功耗可达 4G 系统的三倍以上,进一步增加了电力系统的负荷压力。在采纳方案二的基础上,需准确估算照明与 5G 系统的最大工作电流,以选用匹配的电能表。过电流(指回路电流超过额定值),易导致供电设备损坏,而短路保护通过隔离供电与用电设备并在故障时快速切断电路以保障安全;同理,过负荷(指负载超出额定容量)可能引发导线过热甚至燃烧,而过载保护能有效防止设备因过热而受损。为解决上述问题,可在电能表中集成报警电路,并在互感器内嵌入温度传感器,从而实现实时监测、预警与保护功能。

4. 多功能灯杆配电箱继电保护

4.1. 继电保护

继电保护是指在供电系统出现如过电流、过负荷或低电压等异常工况时,能够迅速报警并自动隔离或切断故障部分的技术措施[14]。一个有效的继电保护系统需满足可靠性、灵敏性、选择性和速动性四个基本要求[15]。继电保护装置是检测异常状态并执行操作的关键自动设备,其结构包括三个核心单元:测量比较单元实时采集电气参数,经计算与设定值比较后生成逻辑信号,以决定是否启动保护[16];逻辑判断单元按预设逻辑识别故障类型与范围,并生成指令[17];执行输出单元则执行跳闸或报警操作。基于强弱电分离原则,在多功能灯杆配电箱设计中,除须配备强电回路保护外,还应设置适用于弱电系统的继电保护装置,以实现全面可靠的系统防护。继电保护装置的整体结构见图 9。

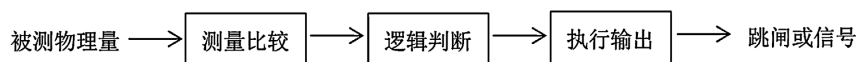


Figure 9. Composition diagram of relay protection device

图 9. 继电保护装置组成框图

4.2. 空气开关

配电箱需集成短路、过载及低电压等多种继电保护功能,因此需配置多种保护装置。最基本且普遍采用的是空气开关,属于断路器的一种,可在电流超过设定值时自动切断电路,即俗称的“跳闸”。智能灯杆配电箱属低压配电范畴,故选用低压断路器。其脱扣机制分为热动与电磁两种方式:热动脱扣用于一般过载,电流超限使双金属片受热变形推动机构脱扣[18];电磁脱扣则针对严重过载或短路,瞬时激发磁场驱动衔铁动作,使机械解锁实现分断[19]。可见,空气开关兼具短路与过载保护能力,是供电总闸不可或缺的部分,其原理如图 10 所示。

4.3. 熔断器与漏电保护器

熔断器通过过电流使熔体熔化从而切断电路,是重要的保护装置之一[20]。在多功能灯杆配电箱中,可采用无填料封闭型熔断器,其分断能力略低于有填料型[21]。尽管熔断后需更换熔芯且通常仅能保护故障相,但其动作速度快(约 10 ms)[22]。建议将熔断器用于支路保护,并结合总路的空气开关构成“双重保护”机制,以有效应对过载和过电压风险。此外,漏电也是一种重大安全隐患,需配置漏电保护器。其工作原理基于检测回路电流差异:正常状态下电流平衡,检测线圈无感应;漏电时电流差会生成感应信号,触发脱扣机构跳闸[23][24]。依托剩余电流检测技术,漏电保护器具备极高灵敏度(动作阈值可达 mA 级),可迅速切断故障电路,如图 11 所示。

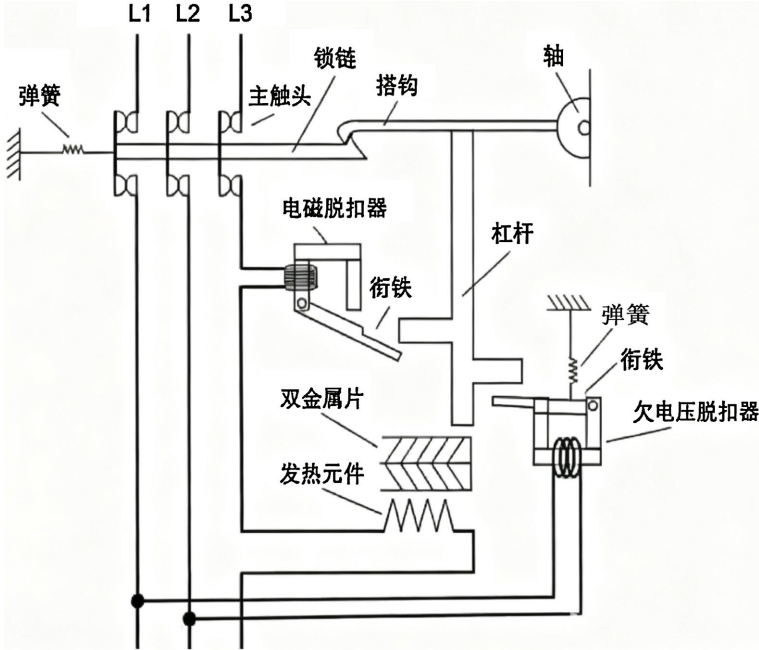


Figure 10. Schematic diagram of air switch
图 10. 空气开关原理图

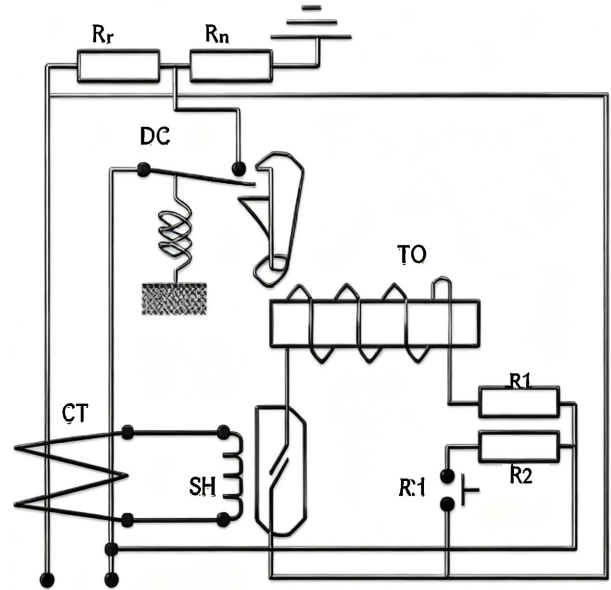


Figure 11. Schematic diagram of leakage protector
图 11. 漏电保护器原理图

4.4. 强弱电分离系统

鉴于配电箱内同时存在强电与弱电系统，需引入低电压保护机制。交流接触器可在电压过低时自动切断电路，其工作原理为：线圈在额定电压下产生电磁力使触点闭合；欠压时电磁力不足，触点复位以实现断电保护[25]。继电保护是保障配电系统安全的关键措施。多功能灯杆配电系统结构复杂、集成度高，需配置包括短路、过载及低电压保护在内的多重继电保护装置。低电压保护能够在供电异常时及时隔离

设备,避免低压运行损害并抑制电压恢复时的冲击电流。针对短路和过载,可在电源进线端设置空气开关,并在支路配置熔断器,形成协同保护。此外,还需安装漏电保护器以防范绝缘故障,并借助交流接触器实现欠压自动分断。

5. 结论

通过对智能灯杆配电箱的研究表明,其作为多功能载体的关键在于优化配电设计,具体包括明确划分功能区、合理配置计量装置并引入集成化继电保护系统,从而全面提升运行效率、经济性与安全性。以当前仅含照明与 5G 通信功能的系统为基础,可总结出如下结论:首先,多功能灯杆除照明外,亦作为智慧城市的数据采集节点与 5G 基站,其配电箱需兼容强电与弱电系统。采用模块化设计可实现强弱电分离,例如将照明与 5G 模块分置于电源出线口对角位置,并保持 30 cm 以上间距,有效抑制电容耦合对通信的干扰。其次,面向未来扩展需求(如交通与环境监测),模块化结构通过划分独立功能区支持灵活增容与分模块维护,在满足强弱电隔离的同时提升可扩展性与可维护性。第三,在箱内设置集中计量模块统一安装电能表,可节省杆体空间、减少设备数量、降低检修成本。第四,应依据各系统最大功率与电流选配适当量程的电能表,避免计量偏差与设备过流损坏。第五,为应对短路、过载、漏电和低电压等故障,需在总路配置空气开关,各支路采用熔断器,并增设漏电保护器与交流接触器,构建多层次保护机制。综上,通过模块化设计、精确计量与综合继电保护,可有效解决多功能灯杆配电系统的混乱与安全隐患,为智慧城市基础设施提供理论支撑与工程借鉴。然而,本研究存在以下局限性:首先,对两种方案的经济性比较主要集中于设备采购成本,尚未完全涵盖线缆、施工及长期运维等全生命周期成本,未来的分析可引入更全面的成本模型。其次,方案二的适用边界未能精确定量,研究未基于线路损耗和计量误差给出典型的灯杆间距或线路长度建议。未来的工作应结合具体工程参数进行仿真计算,以明确该方案在不同场景下的最佳适用范围,从而增强结论的实践指导价值。

参考文献

- [1] 于晓阳. 物联网通信技术在智慧城市应用中的难点与疑点[J]. 通信电源技术, 2018, 35(4): 206-207, 210.
- [2] 张苏文. 城市智慧路灯建设的研究及实现[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 华东交通大学, 2020.
- [3] 蔡仁丰. 智慧灯杆在道路照明改造中的应用[J]. 智能建筑与智慧城市, 2020(4): 29-30.
- [4] 王炳晖. 建筑消防电源和消防供电系统的消防安全检查[J]. 智能建筑与智慧城市, 2020(5): 45-46.
- [5] 章运鹏, 周南星, 主编. 实用电工手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 728-730.
- [6] 杨忱. 机场航站楼低压配电系统谐波处理设计分析与研究[J]. 中国设备工程, 2020(9): 116-117.
- [7] 闫磊. 基于场耦合的控保设备抗扰度研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- [8] 李强, 任勇. 杭州城市轨道交通防雷技术探讨[J]. 中国设备工程, 2019(15): 181-182.
- [9] 童悦. 电流互感器在线校验关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [10] Sigwele, T., Hu, Y.F. and Susanto, M. (2020) Energy-Efficient 5G Cloud RAN with Virtual BBU Server Consolidation and Base Station Sleeping. *Computer Networks*, 177, Article ID: 107302. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107302>
- [11] Kim, J. and Park, C.Y. (2020) A Case of Severe Flare Reaction Observed in HLA B27 Associated Acute Anterior Uveitis. *BMC Ophthalmology*, 20, Article No. 201. <https://doi.org/10.1186/s12886-020-01472-3>
- [12] 赵靖英, 陆俭国, 王景芹. 电子式过载保护继电器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2004(32): 41-43.
- [13] 郭红光. 短路电流在建筑供配电工程设计中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2017.
- [14] 徐定成. 建筑电气与智能化通用规范(征求意见稿) [J]. 电气工程应用, 2019(4): 2-54.
- [15] 陈康. 基于多 Agent 的变电站继电保护研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 华东交通大学, 2020.
- [16] 刘益青. 智能变电站站域后备保护原理及实现技术研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2012.

-
- [17] 陈星田. 智能变电站继电保护隐藏故障诊断与系统重构方法[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2015.
 - [18] 胡传振. 10kVPT 保护用真空灭弧室快速动作机构的研究[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门理工学院, 2017.
 - [19] 麦少球. 电气工程 CAD [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
 - [20] 高压交流熔断器[J]. 高压电器, 2000(36): 44.
 - [21] 陈英霞. 熔断器综合自动测试仪研发[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2011.
 - [22] 赵铁英. 基于 SSCB 的煤矿下井电缆快速故障限流器研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
 - [23] 杨凤彪. 漏电保护器可靠性技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2004.
 - [24] 王尧. 复杂波形条件下剩余电流检测技术研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2012.
 - [25] 高雪. 交流接触器智能控制系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.