

地下停车场阳光节能系统 ——光导纤维与传感器在地下停车场中的应用研究

辛海琦, 庞婉茹, 王宇翔, 余明睿, 高士娟^{*}
新疆科技学院信息科学与工程学院, 新疆 库尔勒 841000
DOI:10.61369/ME.2025070024

摘 要 : 随着城市化进程推进迅猛, 机动车保有量持续攀升, 地下停车场作为城市交通基础设施重要组成部分, 规模与数量不断扩大。传统地下停车场在运营过程中面临能源消耗过高核心问题。人工照明作为地下停车场主要能源消耗环节, 长期24小时不间断运行造成巨大能源浪费。由此, 研究提出光导纤维技术与传感器技术融合应用, 光导纤维通过“采光装置—导光纤维—照明终端”体系, 高效引入自然光替代人工照明; 部署红外传感器检测车位与越界, 搭配光敏电阻, 经单片机动态调控LED, 聚焦光导纤维与传感器技术融合, 实现自然光合理利用, 减少能源消耗。

关 键 词 : 地下停车场; 光导纤维; 传感器; 智能节电

Solar Energy-saving System For Underground Parking Lots Research on the Application of Optical Fibers and Sensors in Underground Parking Lots

Xin Haiqi, Pang Wanru, Wang Yuxiang, Yu Mingrui, Gao Shijuan^{*}
School of Information Science and Engineering, Xinjiang College of Science & Technology, Korla, Xinjiang 841000

Abstract : With the rapid advancement of urbanization, the number of motor vehicles has continued to rise. As an important component of urban transportation infrastructure, underground parking lots have been expanding in scale and quantity. Traditional underground parking lots are confronted with the core problem of excessive energy consumption during operation. Artificial lighting, as the main energy-consuming link in underground parking lots, operates continuously for 24 hours a day, resulting in huge energy waste. Therefore, the research proposes the integrated application of optical fiber technology and sensor technology. Through the "light collection device – light guide fiber – lighting terminal" system, optical fibers efficiently introduce natural light to replace artificial lighting. Infrared sensors are deployed to detect parking Spaces and overstepping boundaries, combined with photoresistors. The LED is dynamically regulated by a single-chip microcomputer, focusing on the integration of optical fibers and sensor technology to achieve rational utilization of natural light and reduce energy consumption.

Keywords : underground parking lot; optical fiber; sensor; intelligent power saving

引言

(一) 研究背景

地下停车场作为城市交通基础设施重要组成部分, 在缓解城市停车压力和优化城市空间方面发挥着关键作用。鉴于地理位置和环境条件独特, 地下停车场在管理运营方面面临诸多挑战。传统照明方法不仅耗电量大, 还可能存在照明不均的问题。实时准确地监测停车位状态较为困难, 这导致车主寻找停车位的时间延长, 降低了停车场使用效率。光纤和传感器技术发展为地下停车场上述问题提供了新的解决方案。光纤具有损耗低、带宽高、抗电磁干扰等优良特性, 在照明和信号传输领域展现出巨大潜力^[1]。传感器能够实时感知停车场内的各种物理量和状态信息, 如停车位占用情况, 并将这些信息转换为电信号或光信号进行传输和处理。光纤与传感器技术在地下停车场的有机结合有望实现停车场的智能化管理, 提高能源利用效率, 增强安全性, 改善用户体验。深入研究光纤和传感器在地下停车场中的应用具有重要意义。

通讯作者(指导教师): 高士娟, 职称: 副教授, 单位: 新疆科技学院, 研究方向: 计算机应用、软件测试。

（二）国内外现状

光导纤维导光技术是西方许多发达国家研究的热点，美国、欧洲等纷纷开发研制出相应产品，日本是世界上最早开展采集太阳光用于室内照明研发活动的国家之一^[1]。1979年 LaForet 工程公司推出了第一台采集太阳光的照明系统“一眼 Himawari”，中文意译为“向日葵”^[1]。德国以柏林波茨坦广场车库作案例，用 500mm 光导纤维系统高效导光，验证采光装置与景观融合可行性；英国优化 230mm 光导管光照曲线，缓解视觉适应问题。研究全生命周期环保，推动可回收材料方案，契合欧盟“碳中和”，通过材料改性应对高湿度等极端场景^[1]。20 世纪 90 年代初我国开始进行光纤采光系统的研究，虽起步较晚，但发展较快。2001 年自行研制开发出全自动跟踪太阳光的采光装置，经过测试，主要性能指标居国外同类产品先进水平，在性能价格比方面处于国际领先水平。厦门北站用 82 台采光设备覆盖 7000 m² 地下空间，年节电 72 万度；地铁通道节能率 85%。社区领域，优化采光罩使自然光覆盖率超 85%，济南社区月电费降 5600 元。核心技术上，提“光纤+感应控制”模式，精度达 10Lx；适配本土场景，降设备损耗。政策鼓励，2025 年市场规模增 68%，头部企业市占超 80%^[2]。

（三）研究内容

阐述通过光导纤维把室外阳光引入地下停车场实现自然光照明；同时在停车场安装有感应模块，晚间在感受到人或车的情况下启动灯光设备且可以利用单片机有效的调节灯光的光照强度，以此最大限度的降低地下停车场的耗电量，同时还可以帮助司机正确的停放车辆。

一、光导纤维在地下停车场中的应用

（一）光导纤维照明系统

光导纤维（Optical Fiber，简称“光纤”）是光导纤维照明系统的核心传输元件，其本质是一种由透明光学材料制成、能够以全反射方式传导光信号或光能量的纤维状器件。结构上看，光导纤维通常由纤芯（Core）、包层（Cladding）和保护（Coating）三部分组成。

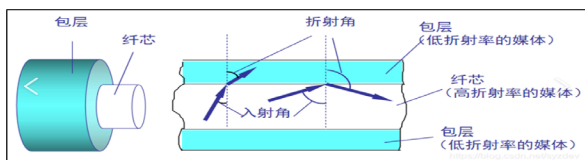


图1 光纤构成图

根据传输光波长范围与应用场景，适用地下停车场照明的光导纤维为塑料光导纤维（Plastic Optical Fiber，POF）。塑料光导纤维则以聚甲基丙烯酸甲（酯 PMMA）为主要原料，具有柔韧性好（可弯曲半径小至直径的 10~20 倍）、重量轻（密度仅为石英玻璃的 1/2）、成本低（约为石英光纤的 1/5~1/3）、易裁剪与安装等特点，在可见光波段（400~760nm）的传输损耗可控制在 10~50dB/km，完全满足地下停车场常规照明传输距离需求（一般单段传输距离不超过 50m），成为地下停车场光导纤维照明系统的首选^[3]。

光导纤维照明系统是一种基于“光的全反射”原理实现自然光或人工光远距离、低损耗传输的新型照明技术，其核心在于通过光导纤维这一关键载体，突破传统照明中“光源与照明区域必须直接关联”的限制，实现光能量的灵活分配与精准投射^[3]。在地下停车场场景中，该系统可有效利用自然光为停车场内部的车道、车位、出入口、应急通道等区域提供均匀、稳定的照明，同时避免了传统分散式灯具带来的布线复杂、能耗分散等问题，是地下空间绿色照明的重要发展方向。

（二）工作模式

地下停车场光导纤维照明系统并非单一的光传输元件，而是

由“光源-传输-输出-控制”四大模块组成完整技术体系，各模块协同工作，实现光能量高效采集、稳定传输与精准分配。主要包括光源装置、光导纤维束、照明终端三部分。工作方式可分为自然光主导模式、人工光源辅助模式、智能节能模式三类。

1. 自然光主导模式

系统完全依赖自然光作为能量来源，智能控制系统指令自然光采集器启动，聚光透镜、反射镜等光学元件最大化采集太阳光能量；关闭 LED 辅助光源，仅为备用电路供电（确保突发情况下可快速启动）。采集自然光进入光导纤维束进行传输；该纤维束依据传输需求选用对应类型光纤——长距离传输采用石英光纤；中短距离则采用 PMMA 塑料光纤，确保自然光在传输过程中能量损耗最小化。自然光被传输至各照明终端，终端根据区域功能（车位、车道、应急通道）自动匹配出光方式；例如应急通道终端维持约 10lx 的最低照度“待机”状态。

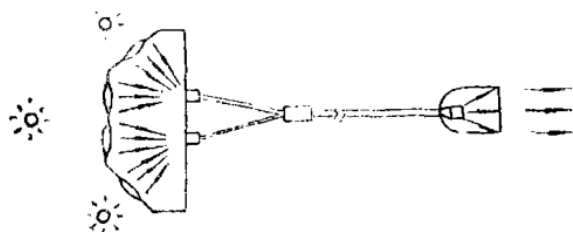


图2 太阳能光导采光实验系统的光路图

2. LED 光源辅助模式

自然光采集器仍保持工作，由于自然光能量不足，智能控制系统会启动 LED 辅助光源，通过“自然光+LED 光”混合方式为系统补充光能量。控制系统首先通过光照度传感器计算自然光的实际贡献值（如自然光可满足系统 30%~50% 的光能量需求），LED 辅助光源输出相应功率光能量（如 LED 阵列的功率从 200W 降至 100~140W），使两者叠加后总光能量满足照明需求^[3]。光导纤维束内的光开关（由控制系统控制的光学切换元件）会根据各区域的照度差异，动态分配自然光与 LED 的比例：例如：靠近

自然光采集器区域（如地下一层靠近采光井的车位）可更多依赖自然光，远离采集器区域（地下二层车道）则增加 LED 光分配比例。

3. 智能节能模式

智能节能核心是“按需分配光能量”，通过动态调整光导纤维束的光能量分配比例与照明终端的出光强度，实现能耗最小化。在实际执行中，控制系统通过人体感应模块实时检测各区域人员活动，通过红外反射式传感器监测车位占用情况（间接反映车流量），两者数据同步传输至 MSP430F5529LP 单片机；对入车流量低于阈值的区域，单片机指令光导纤维束内光开关减少该区域光能量输入（如将其他区域冗余光能量调配至需光区域，自身光能量占比从正常状态下调），以 PWM 技术控制照明终端降低出光亮度，确保亮度维持在满足基础照明需求的合理范围。

智能节能模式具备“预约唤醒”功能：当人体感应模块检测到巡检人员靠近某一低亮度区域，或红外反射式传感器捕捉到车辆向该区域移动（如相邻车位有车辆驶入迹象）时，单片机提前指令该区域的照明终端提升亮度至正常水平，避免因亮度不足导致的安全隐患，确保与光导纤维导光、人工光源（LED）协同的照明稳定性。

二、传感器在地下停车场中的应用以及工作原理

车位检测传感器是地下停车场智能化管理的核心设备，核心功能聚焦于车位状态检测与车辆越界示警，其应用流程清晰且高效：首先，传感器被精准部署在各车位对应区域，以常用的红外传感器为例，它通过“发射红外线—接收反射信号”的工作原理，持续实时监测车位是否有车辆停放——当车位无车时，红外发射装置发出的红外线可顺利抵达接收装置；当有车辆停放时，车身会遮挡红外线，使接收装置接收到的红外线强度发生变化，触发车位状态判断，同步捕捉车辆在车位内的具体位置信息^[3]；随后，传感器将采集到的“有无车辆”“车辆位置”等关键数据转化为电信号，实时传输至系统主控模块——MSP430F5529LP 单片机；单片机接收信号后快速进行数据处理与逻辑分析，核心判断车辆是否完全停放在规定区域内；若检测到车辆存在越界停放情况（如车身超出车位线、位置偏移等），单片机立即生成“触发警报”的控制指令，并将指令发送至执行结构中的电磁式蜂鸣器；蜂鸣器接收到指令后即时发出警报声，提醒车主调整车辆位置，有效提升停车场管理效率，规避因不当停车引发通行阻碍等问题。

三、光导纤维与传感器的协同应用

（一）构建智能照明与环境监测一体化系统

光导纤维照明系统与环境监测传感器进行有机结合，构建

以 MSP430F5529LP 单片机为核心构建，借助多组件协同实现功能：传感器层光敏电阻（采集环境光照强度）、人体感应模块（检测 3 米内人员活动）、红外反射式传感器（监测车位车辆）提供多维度环境数据；执行层基于这些数据，以 PWM 技术控制 LED 灯带动态调节亮度（强光 >500lux 仅用自然光、弱光 100–500lux 时 LED 亮 50%、低光 <100lux 时 LED 全亮），电磁式蜂鸣器则在车辆越界时报警；能源层依托光导纤维（收集传输太阳光实现无电照明，晴天末端光照达 65,000lux）、微型太阳能电池板（为锂离子电池充电）及市政电网保障能源，同时集成自然光导入、光照度调节等技术，形成“传感器监测—单片机处理决策—执行结构调控—能源支撑”闭环，实现智能照明与环境监测一体化运作。

（二）基于光导纤维与传感器的智能停车管理系统

光导纤维与各类传感器的协同应用可进一步构建更高效的智能停车管理系统：一方面，光导纤维作为能源模块核心，白天通过高精度透镜式聚光器、可调节抛物面反光镜收集太阳光，长距离低损耗传输至地下停车场等封闭空间提供无电照明（晴天末端光照可达 65,000lux，多云天气也能保障一定自然光），配合微型太阳能电池板将多余光能储存在锂离子电池中，太阳能不足还能与市政电网协同切换供电，且传输自然光强度经光敏电阻转换为电信号反馈给 MSP430F5529LP 主控模块，主控模块结合人体感应模块（3 米内人员活动检测）与 LED 灯带协同调整照明（强光 >500lux 时仅用自然光关闭 LED，弱光 100–500lux 时以 PWM 技术将 LED 调至 50% 亮度，低光 <100lux 时启动储能让 LED 全亮），并与主控模块的休眠—周期性唤醒机制协同减少能耗；另一方面，光导纤维还与车位检测传感器、车牌识别传感器深度协同，车位检测传感器实时监测车位占用状态，通过光导纤维将信息快速传输至管理中心，管理中心据此生成实时车位分布图并在入口、通道显示屏展示，引导车主找空闲车位^[4]；车辆进入时，车牌识别传感器借光导纤维将车牌信息传至管理系统，系统自动关联车主会员信息、停车费用等；车辆停放中，传感器监测停放位置是否规范，若发现越界等不规范情况，系统通过光导纤维传输控制信号，启动对应区域语音提示设备提醒车主调整^[5]。这种协同模式既实现了照明节能与稳定供电，又整合车位管理、车辆引导、车牌识别功能，显著提升停车场管理效率与服务质量。

四、结语

系统在节能方面表现突出，北纬 30° 地区，年耗电量仅为 8.6kWh/m²，较传统 LED 节能 48.8%，白天可节省 30%–50% 的照明用电，投资回收期约 3.2 年，经济性与节能性兼具；有效提升安全使用体验，光线柔和无眩光，导光纤维不存在高温火灾风险，搭配传感器还可减少交通事故、缩短寻位时间，提高管理效率；适配性强，支持个性化安装，目前已在交通枢纽、社区等场景成功应用，为地下空间技术应用提供可靠参考。相关技术研发

与应用推进过程，一方面从技术与成本双维度发力，通过研发耐高温光纤、优化配套装置，推行国产化替代与节能分成模式以有效降低成本；另一方面注重系统稳定性提升，配置光伏储能系统应对光照不足问题。研发抗潮防尘设备保障运行；智能融合层面，构建数字孪生模型对系统进行优化，积极对接智能城市建设

实现数据共享；着力推进标准统一与协同合作，制定统一行业标准，推动“产学研用”深度协作，拓展应用场景，将相关技术推广至地下商场、地铁等特定空间，全面提升技术实用性与覆盖范围。

参考文献

[1]王聪,何兵,蒋彦.光纤照明技术应用新进展及前景分析[J].城市建设理论研究(电子版),2017,(18):107-109

[2]刘柯,鲍家声.光纤采光照明系统在建筑中的应用[J].南方建筑,2006,(09):91-94.

[3]冯震,魏秀珍,杨双收,等.基于光导纤维的太阳光照明原理与应用[C]//中国照明学会(China Illuminating Engineering Society).2015年中国照明论坛——LED照明产品设计、应用与创新论坛论文集.北京一轻控股有限责任公司;北京首量科技有限公司,2015:137-141.

[4]崔剑.盾构施工中红外线感应防撞门的应用[J].工程机械与维修,2025,(06):20-22.

[5]李蕾.光纤传输日光照明系统优化及实验研究[D].华北电力大学(北京),2019.