

基于深度强化学习的城市道路照明节能调控系统的分析

丁汉栋

联通（山西）产业互联网有限公司，山西 太原 030032

DOI:10.61369/UAID.2025030008

摘 要： 本文在传统电力线载波通信技术、PWM(脉冲调制)技术、无线通信技术基础上，提供一种基于深度强化学习的城市道路照明节能调控方法、系统和装置，综合考虑道路沿途夜间的照度需求，节能举措不影响正常通行的前提下，实现间隔亮灯、单灯控制，达到对路灯的自适应控制与管理，在一定范围内降低照度，减少道路照明能耗，从而实现最优的照明节能目的。本文从深度强化学习的城市道路照明节能调控系统构建意义入手，分析深度强化学习的城市照明节能调控工作原理，最终探究系统的实际应用。

关 键 词： 深度强化学习；城市道路照明；照明节能；节能调控

Analysis of An Energy-Saving Regulation System for Urban Road Lighting Based on Deep Reinforcement Learning

Ding Handong

China Unicom (Shanxi) Industrial Internet Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030032

Abstract： Based on traditional power line carrier communication technology, PWM (Pulse Width Modulation) technology, and wireless communication technology, this paper proposes a method, system, and device for energy-saving regulation of urban road lighting using deep reinforcement learning. By comprehensively considering the illuminance requirements along roads at night and ensuring that energy-saving measures do not impede normal traffic flow, the approach achieves intermittent lighting and individual lamp control. This enables adaptive control and management of streetlights, reducing illuminance within a certain range and cutting down on road lighting energy consumption, thereby achieving optimal energy-saving lighting goals. This paper begins by discussing the significance of constructing a deep reinforcement learning-based system for energy-saving regulation of urban road lighting, analyzes the working principles of energy-saving regulation for urban lighting using deep reinforcement learning, and ultimately explores the practical applications of the system.

Keywords： deep reinforcement learning; urban road lighting; lighting energy efficiency; energy-saving regulation

一、基于深度强化学习的城市道路照明节能调控系统构建意义

（一）节能降耗推动可持续发展

城市道路照明系统是城市基础设施的关键部分，它的能耗问题不能轻视，传统照明系统大多是固定照明模式，不能按照实际需求灵活改变，造成很多能源浪费，依靠深度强化学习的节能调控系统可以及时监测道路照明环境，电网电压这些重要参数，利用智能算法自动调节路灯亮度和功率，比如在车流量不多时或者路段，系统就会自动减小路灯亮度，削减不必要的能耗，当电网电压过高时，系统会自动减小输入电压，防止灯具超负荷运转而造成能源浪费，这种精确的动态调节手段，可以在保证照明需求的情况下，最大程度削减能源消耗，削减碳排放，为城市的可持续发展提供有力支撑，契合当下社会对节能环保的迫切需求^[7]。

（二）提高照明质量以保障交通安全

良好的道路照明对保证交通安全极为关键。传统的照明系统没有智能调控功能，碰到复杂路况和环境改变时，不能及时调节，容易造成照明不够或者太亮。依靠深度强化学习的节能调控系统能依照即时路况和环境亮度，自动改良照明计划，像下雨起雾或者夜里看不清时，系统可以把路灯亮度调高些，让道路清楚可见，车流量大或者人多的地方，系统会准确地改变照明角度和强度，防止出现刺眼或者有阴影的地方，为司机和路人营造更安全舒服的视觉环境。该系统还能利用智能监测与预警功能，及时察觉灯具故障或者照明异常状况，迅速展开修理或者调节，从而进一步优化道路照明的可靠性和稳定性，切实减小交通事故出现的频率^[6]。

（三）优化资源配置以降低运维成本

城市道路照明系统的建设与维护要耗费不少资金和人力，传

作者简介：丁汉栋（1978—），男，陕西汉中人，研究生，高级工程师，研究方向：工业互联网、能源互联网、网络安全、数字经济、5G+物联网、云计算、图计算、边缘计算、区块链、数字孪生、信息系统项目管理师（高级）等。

统照明系统缺少智能化管理手段，常常出现资源配置不恰当，维护效率低等情况，基于深度强化学习的节能调控系统利用智能算法对路灯运作情况实施即时监测并加以剖析，从而做到对路灯的精细管理，系统可以依照实际状况妥善安排路灯的开闭时刻及亮度调整，杜绝无谓的资源浪费。同时，对于灯具存在的故障情况也能够通过及时的监控以及预报，由维护人员及时的发现问题并对问题进行处理，这样不仅可以减小灯具发生故障以后影响到的照明中断时间，而且还可以提高维护的工作效率，并且还能够减少由于维护工作而导致的资金消耗^[1]。

（四）推进智能化城市建设

伴随着信息技术迅猛前行，智能化城市发展成为未来城市发展必然走向的道路，智能城市建设离不开城市设施的智能化建设，城市道路照明节能调节系统是城市基础设施智能化重要的部分，对提高城市建设管理水平有着十分重要的意义，城市道路照明节能调节系统采用深度强化学习算法对城市照明节能调控，能够自主学习适应不同环境及运转状况，持续不断优化照明管控，做到智能化的路灯管控，并且可以同其他的智慧城市管理系统共享数据，协同工作。比如系统能与城市交通管理系统相连接，根据交通流量实时数据对城市的道路照明做相应的调整^[2]。

二、基于深度强化学习的城市照明节能调控工作原理

基于深度强化学习的城市道路照明节能调控系统，主要由现场监控感知设备（环境光亮度传感器、风速计、雨量计、视频监控设备、时间采集器）、单灯控制器、智能远程终端（Remote Terminal Unit, RTU）、通信网络和中央照明监控管理中心构成（如图1）。

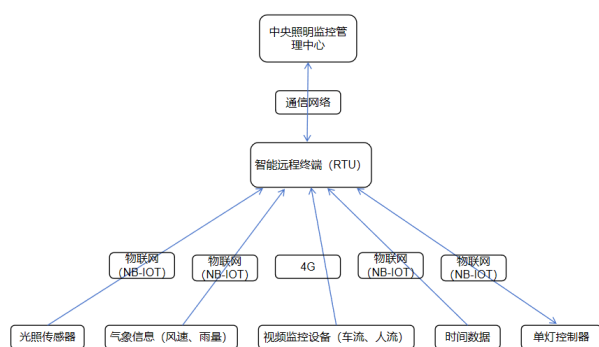


图1 基于深度强化学习的城市道路照明节能调控系统架构图

现场监控感知设备，实时采集环境光照度、气象信息（风速、雨量）、车流、人流、时间传感数据。

单灯控制器，实时测量路灯配电柜的所有电气参数和单灯电气参数（如图2）。

智能远程终端（RTU）控制系统，将现场监控环境数据和单灯控制器采集的数据进行汇聚、预处理，再经无线数据通讯网或经城市宽带网将预处理后的现场数据发送到中央照明监控管理中心，在中央照明监控管理中心基于深度强化学习算法模型，进行训练推理，构建形成基于深度强化学习的城市照明节能调控方案。最后，通过无线数据通讯网或经城市宽带网将城市照明节能调控方案传送为RTU控制系统，由RTU驱动单灯控制器。单

灯控制器实时采集输出、输入电压信号与最佳照明电压比较，再结合由中央照明监控管理中心经深度强化学习后下发的照明节能调控方案，进行自动调节，从而保证输出最佳的照明系统工作电压，以此来自适应调控城市道路的每一盏路灯^[3]。

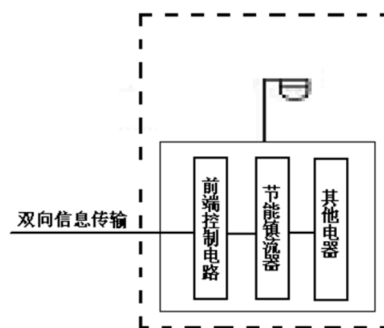


图2 单灯控制器框架原理示意图

中央照明监控管理中心针对接收的现场监控环境数据和单灯控制器采集的数据，基于深度强化学习算法模型，进行训练推理，构建形成基于深度强化学习的城市照明节能调控方案，同时，对城市所有路灯运行状况进行实时、远程监控及管理（亮灯率统计、故障报警等）。

三、基于深度强化学习的城市照明节能调控模型构建

1. 将每盏灯对应的环境信息（环境光照度、气象信息、车流、人流、时间传感数据及路灯配电柜和单灯电气数据），作为输入参数，得到当前观测状态集 S_t 。

2. 对于每个当前候选动作 a_t ，通过深度Q网络（Deep Q-Network, DQN）计算t时刻的观测状态集 S_t 和动作 a_t 对应的Q值 $Q(s_t, a_t) = f_{DQN}(s_t, a_t; \omega)$ 。

3. 选择Q值最大的动作作为最优动作。

4. 执行最优动作，得到奖励反馈 r_t 以及下一时刻状态集 S_{t+1} 。

5. 将经验 $e_t = (s_t, a_t, r_t, s_{t+1})$ 存放到经验池B中。

6. 从经验池中随机选择小批量样本 $\{e_i \in B\}_{i=1}^m$ ，采用批随机梯度下降算法对深度Q网络进行训练，并更新当前策略。

7. 重复执行上述步骤对模型进行学习训练直至收敛。

借助这一模型，系统可以根据当前时刻的实际环境状态数据及配电柜和单灯电气数据，自适应输出能耗最小且光照强度适宜的照明设备开/关和强度调整的方案，达到对路灯的自适应控制与管理^[4]。

四、基于深度强化学习的城市照明节能调控系统的应用

（一）平滑功率调节

相对于传统的固定功率照明系统而言，城市照明节能调控系统操作更加灵活，可以防止出现不必要的能源浪费，该系统能够根据深度强化学习算法，针对每一盏路灯的功率实施动态调节，随时掌握环境光照度、车流量、人流等重要数据，判断并调整路

灯功率。即便在深夜车流量较少时，系统也会自己把路灯功率降到30%–50%，削减能源浪费。到交通高峰期，系统又把功率升到80%–100%，依靠按需调节的方法来保障道路照明既充足又均匀，防止因为频繁启动或者超负荷运转而损坏灯具^[5]。

（二）单灯软启动控制

城市照明节能调控系统所具有的单灯软启动控制功能，改变传统的照明系统工作模式。传统的照明系统一般采用硬启动方式，这种硬启动会在启动时产生极大的电流，不但使灯具自身造成严重的损坏，而且对电网带来很大的压力。灯具受到频繁的电冲击之后，其使用寿命就会大幅度缩减，这就意味着要更加频繁地替换灯具，从而增加维持的成本和资源，电网同样会受到这种电冲击的影响，会遭遇电压波动的危险，这种波动会影响到其他用电设备的正常运作，甚至有可能引发更为严重的电网故障^[9]。

照明节能调控系统所具有的单灯软启动控制功能能很好的解决这一问题，它会通过逐步加大灯具的功率，削减启动时的电冲击。在系统启动后，灯具的功率从10%到20%渐进增加，一直到达到设定的数值为止。这个过程仅仅只需要3到5秒的时间，避免因为灯具受瞬间极大电冲击而损坏，从而避免频繁更换灯具所浪费的资源和本。同时电网也会因为避免这些瞬间的电冲击而变得更加稳固，提升整个照明系统的稳定性。此外，这种单灯软启动控制，还能提升照明系统的运作效率，它能节约用电，减轻电网的工作压力，也减少因为电压波动导致的其它设备出故障的情况，为市民供应更稳定，更可靠的照明服务，在环保方面也起到积极的推动作用^[9]。

（三）降压与稳压功能的实现

以前，电网电压受很多因素影响，用电高峰期，许多电器一起启动并运行，造成电网负荷猛增，电压明显下降，电网故障、线路老化、天气变化等都会引发电压波动，这些波动现象既影响普通电器设备正常运行，又为城市路灯照明系统带来诸多麻烦。而且在路灯系统出现电压不稳时，易出现灯具损坏，照明效果差，能耗增多等问题，极大影响城市照明的可靠性和经济性^[10]。

（四）不产生调相谐波

系统采取先进的控制技术以及深度强化学习算法，很好地规避调相谐波出现的现象，在传统照明控制体系里较为普遍存在的调相谐波，会污染电网，影响其它用电设备的正常运转情况，不过该系统借助精准地控制路灯的功率和电压来保证输出的波形干净，避免产生调相谐波，如此一来，能够优化照明系统的电能品质，并且削减对电网的干扰，进而保证整个电网能够稳定运行下去。

五、基于深度强化学习的城市照明节能调控系统的应用

第一，节能效果显著，系统依靠深度强化学习算法的智能调控，可以按照实际需求灵活调节路灯的功率，从而防止传统照明系统存在的过度照明和能源浪费现象，在实际应用当中，系统的平均节能率可以达到30%以上，极大地削减城市照明的能耗和运营成本，对于某个城市的主干道，系统依照车流和人流的变动来动态调节路灯的功率，做到在保障照明质量的同时最大程度地节能，这样的节能效果有益于减轻城市的能源压力，为城市的可持续发展提供助力。

第二，系统可以对灯具实施单灯软启动控制，对灯具执行降压与稳压控制，从而减轻灯具所承受的冲击并缓解电网电压起伏为灯具造成的破坏，进而延长灯具的寿命，传统照明系统里的灯具，其寿命一般比较短，需不断进行替换，这就加大维护的成本，并为环境带来压力，而本系统利用智能化的控制手段，使得灯具的寿命比之前增长2 – 4倍，缩减灯具的替换频次，削减维护费用。

第三，系统的未来前景十分广阔，物联网、大数据以及人工智能技术不断发展，这个系统将会与城市里的其他智能系统密切联系起来，从而达成更为智能的城市管理，系统可以同交通管理系统、环境监测系统以及安防系统等展开数据共享并协同工作，做到多系统联动控制，在交通拥挤时，系统会自动加大路灯亮度，为交通疏导提供更好的照明条件，当环境质量比较差时，系统就会减小路灯亮度，削减能源耗费。

六、结语

目前常见的市政照明节能技术虽然在一定程度上可以实现照明节能的目的，但在现实生活中，存在很多的问题，比如初始投入成本高、节能成本不经济、电网供电不稳定、影响灯具寿命、电网中的谐波污染等，电网中的电压波动和设备的毁损等都会影响到市政照明的照明效果与灯具的寿命，同时也会导致在后期维护成本和安全方面出现问题，所以市政照明节能技术也需要进一步的发展和改进，在节能的同时减少成本，提高安全稳定性等。

参考文献

- [1] 王书昂. 基于城市道路照明的智慧路灯设计与施工研究——以德州市 S84（南外环）完善改造项目为例 [J]. 光源与照明, 2025, (05): 51–55.
- [2] 李炳辉. 智能配电系统在照明控制中的应用 [J]. 光源与照明, 2025, (04): 62–64.
- [3] 申子涵. 城市道路照明节能改造及全生命周期管理研究 [J]. 光源与照明, 2025, (04): 5–7.
- [4] 陈叶烜, 翟宏伟, 吴胜红. 智能调控 LED 照明技术在高速匝道照明中的应用 [J]. 光源与照明, 2025, (04): 29–31.
- [5] 刘畅. 基于物联网技术的交通道路照明亮度自动控制方法 [J]. 光源与照明, 2025, (04): 8–10.
- [6] 罗元连. 城市道路照明节能设计和管理办法探讨 [J]. 光源与照明, 2022, (11): 11–13.
- [7] 邓军. 城市道路照明节能措施探讨 [J]. 光源与照明, 2022, (08): 25–27.
- [8] 郑燕亲. 城市道路照明节能设计分析 [J]. 河南科技, 2021, 40(17): 109–111.
- [9] 龚海华, 张玲玲. 城市道路照明节能改造与光衰研究 [J]. 节能与环保, 2020, (05): 71–72.
- [10] 刘青禾. 对城市道路功能照明节能技术的探讨 [J]. 居舍, 2017, (36): 34.