

赋能高速机电：智慧化供配电系统的构建与应用研究

文 / 余嘉佳 广东新粤交通投资有限公司

摘要：本文主要研究智慧化供配电系统，深入探讨其在高速公路机电工程里如何构建、有何应用价值。文章首先分析了系统的主要特点，如提供高品质电源、可进行信息化管理等。接着搭建了一个多层级架构，包括电源系统、配电系统和监控管理系统。并且重点研究了它在隧道和道路机电场景中的实际应用情况。希望本篇文章能为智慧交通基础设施建设提供理论和实践方面的参考，促进供配电技术和交通工程更好地结合。

关键词：智慧化供配电；高速公路；机电工程

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.073

引言

高速公路是国家交通网络的重要部分，它的机电系统能不能稳定运行直接影响到行车安全、通行效率和运营成本。以前的供配电模式靠的是单一电源结构和固定的调度策略，没办法应对越来越大的负荷需求、极端环境带来的挑战，还有突发故障的风险^[1]。现在人工智能、物联网和新能源技术发展得十分迅速，智慧化供配电系统就成了提升高速公路机电系统性能的关键办法。

一、高速公路智慧化供配电系统的特点

（一）高品质电源

传统的供配电模式经常会遇到电压不稳定、频率有偏差等问题。而智慧化供配电系统采用多种技术手段，能精确控制电源质量。在设计上，该系统采用了可靠性很高的电源架构，比如双回路供电、UPS不间断电源，还能接入分布式能源。这样一来，如果突然停电或者负载有大变化，系统能快速切换电源，保证关键设备正常运行。同时，智能监控系统会一直收集电压、电流、功率因数这些关键数据，再结合人工智能算法动态调整供电策略，能有效减少谐波干扰和电压突然降低的情况^[2]。另外，系统还利用储能技术在用电高峰时少用电，用电低谷时多用电，减轻电网的压力，提高能源的利用效率。这种高品质的电源既能满足高速公路机电设备对供电连续性和稳定性的严格要求，也为未来智能交通系统的发展打下了坚实基础。这种电源质量的提升不仅体现在技术层面，更在实际运行中展现出显著优势。系统通过实时监测电网参数，能够自动识别并隔离供电异常，确保隧道照明等关键设施不间断运行。此外，不少智慧化系统还创新性地微电网控制理念引入高速公路场景，通过光伏、储能与传统电源的协同控制，形成多能互补的供电格局。

（二）智慧化

智慧化其实就是通过数据来实现对供配电整个过程的智能化管理，系统利用物联网技术，把各种传感器、监控装置和通信网络紧密结合起来，建立了一个能实时采集发电、输电、配电和用电环节数据的网络。这些数据不光有设备的运行状态，还包括环境的温度、湿度以

及负载的变化趋势，能为系统优化提供全面的依据。在处理数据时系统把边缘计算和云计算结合起来，对大量的数据进行多方面分析，能提前发现可能出现的故障，发出预警信息。同时，基于大数据的预测性维护模型可以提前发现设备老化或者性能下降的问题，大大降低维护成本^[3]。而且信息化还让供配电系统能和高速公路的其他机电系统一起工作，比如根据车流量来调整照明亮度，或者根据天气信息来优化排水设备的运行策略。在决策层面，系统采用模块化算法架构，既可执行预设的控制逻辑又能通过机器学习不断优化运行策略。这种智慧化转型不仅改变了运维方式，更重新定义了供配电系统的价值——从单纯的能源输送载体升级为具有主动服务能力的智能基础设施。

二、高速公路智慧化供配电系统的组成架构构建

（一）电源系统

电源系统是整个系统的核心，设计的时候得同时考虑可靠性、灵活性和可持续性。以前的供配电模式只靠一种市电输入，要是突然断电或者遇到极端天气导致停电，就没办法应对了。智慧化系统搭建了一个多源协同的电源架构，把市电、柴油发电机、储能系统还有分布式能源，像光伏、风电这些都整合在一起，形成了一个多层次的供电保障体系。在架构设计上，电源系统采用了模块化冗余配置，比如说有双回路供电结构，还运用了分布式能源并网技术。这样一来，要是哪个电源模块出问题了，系统能马上切换到备用电源，不会因为停电影响机电设备。

具体来说，市电是基础电源，通过智能变电站调节电压、稳定频率，给系统提供稳定的电力。市电故障时，由储能系统提供毫秒级无缝切换保障关键负荷供电，同时柴油发电机接收信号自动启动，通常在10-30秒内启动并达到额定状态，通过自动转换开关（ATS）在发电机稳定后切换非关键负荷或作为储能的后续支撑电源^[4]。储能系统通常使用铅酸电池或者超级电容器来储存和释放能量，可以减少电网波动，也能应对短时间内负载突然变大的情况。另外分布式能源接入电网，得和电网调度系统配合好。通过逆变器把光伏、风电这些可再生能

源变成标准的交流电，再用智能微电网控制器动态分配和优化能源。在电源管理方面，系统用了基于人工智能的智能调度算法，实时分析电网负荷、天气情况和能源价格等因素，动态调整电源组合策略。比如说阳光好、电价低的时候，优先用光伏供电；用电高峰的时候，让储能系统放电，减轻电网压力。

(二) 配电系统

配电系统是智慧化供配电网的中间部分，主要负责分配电能、调节电压和隔离故障。设计架构时要考虑高效性、安全性和可扩展性，这样才能适应高速公路复杂多变的运行环境。传统的配电系统是固定的拓扑结构，很难灵活应对负载变化或者设备故障。智慧化系统引入了智能配电设备和动态拓扑优化技术，能精准分配电能，高效传输电力。在结构设计上，配电系统采用环网供电和辐射式供电结合的混合模式，具备网络重构能力。环网供电通过智能环网柜实现多条供电路径，要是某段线路出故障了，系统能自动切换到备用路径，尽量减少停电范围；辐射式供电适合局部用电集中的地方像服务区、隧道，通过分段保护装置隔离故障。此外，系统还配了智能变电站和智能断路器远程监控和操作高压侧，用智能变压器调节输出电压，保证供配电质量稳定。在选设备和配置方面，配电系统采用模块化设计，关键地方安装了电力监控通信模块，能实时监测电流、电压、功率因数等参数。比如中压配电侧的智能环网柜集成了故障指示器和自动化开关，能快速找到并隔离故障点；低压配电侧用智能断路器和电能质量分析仪，动态平衡负载、抑制谐波。同时，

系统引入了分布式能源接入技术，通过逆变器和隔离变压器把光伏、风电等可再生能源接入配电网，让能源能在当地被利用和优化配置。

(三) 监控与管理系统

监控与管理系统是智慧化供配电系统的“大脑”，它的主要功能是实时采集数据、检测异常、优化决策和远程控制。传统的供配电系统靠人工巡查和固定的报警机制，满足不了高速公路高频率、变化快的运行需求。智慧化系统搭建了多层级的监控架构，能全面感知供配电的整个过程，实现智能调控。在采集数据方面，系统在整个网络都装了物联网传感器，像电压互感器、电流互感器、温度传感器，还有环境监测设备，能实时采集设备运行状态、环境参数和负载变化等数据。这些数据通过工业以太网或者无线通信协议（LoRa、5G）传到边缘计算节点，处理后再上传到云端平台^[5]。云端平台用大数据分析技术，对大量数据进行多方面建模，比如通过时间序列分析预测负荷高峰，用聚类算法找出异常用电模式。在检测异常和处理故障方面，系统把自适应控制策略和智能算法结合起来。如基于深度学习的故障诊断模型能实时分析电压波动、谐波畸变等特征，快速确定像短路、接地故障一类的故障类型，然后给出修复方案；引入数字孪生技术，构建供配电系统虚拟模型，可用于故障场景的初步模拟与推演，辅助运维人员理解故障影响和制定修复预案，为未来实现更精准的修复验证奠定基础。此外，系统还装了自动保护装置，像继电保护和故障定位系统，能用行波法、阻抗法等极短时间内隔离故障区域，防止事故扩大。

表 1：智慧化供配电系统构成

系统层级	核心组成	主要功能
电源系统	市电、柴油发电机、储能、光伏 / 风电	多电源协同供电，智能切换保障连续供电，AI 优化能源分配
配电系统	智能环网柜、断路器、变电站、保护装置	混合模式配电（环网 + 辐射式），动态调节电压 / 电流，快速隔离故障，支持可再生能源接入
监控与管理系统	传感器、边缘计算、云端平台、数字孪生	实时监测设备状态，AI 预测故障并自动隔离，远程控制与虚拟推演辅助决策

三、智慧化供配电系统在高速公路机电工程中的应用

(一) 在隧道机电中的应用

智慧化供配电系统在隧道里的应用主要体现在电源冗余设计、远程控制、远程供电，以及构建应急保障机制（如应急电源）上。隧道里面的环境很复杂，有高温、高湿、粉尘这些不好的情况，传统的供配电模式没办法保证长期稳定运行。智慧化系统把多层级电源架构和智能监控技术结合起来，大大提高了隧道机电设备的可靠性。比如说电源系统用双回路供电，还和柴油发电机联

动设计，这样市电停电的时候，应急照明、通风系统还有监控设备能马上切换到备用电源，让隧道里能保持基本的运行条件。同时，储能系统用锂电池组能瞬间释放能量，在紧急情况时给设备启动多一份保障。

在远程供电和自动控制方面，智慧化系统依据预设的智能联动控制策略，自动调节相关设备的运行参数和供电优先级，通过分布式传感器网络，能实时收集隧道里的温湿度、二氧化碳浓度、烟雾浓度等数据，并且把这些信息和供配电系统紧密联系起来。当监测到参数不正常时，系统能自动调节照明亮度、通风设备的功率或者启动排烟装

置，保证隧道里的环境安全^[6]。比如发生火灾时，系统会优先给应急照明和排烟风机供电，同时用智能断路器把故障区域隔离开，防止事故变大。另外，智慧化供配电系统还能和隧道里的交通监控、通信系统一起工作，通过共享

数据快速应对突发事件。如车辆拥堵或者发生事故时，系统能动态调整照明亮度和信号灯的控制策略，帮助救援行动。这种高度集成的供配电方案，不仅让隧道机电系统运行得更高效，还大大降低了安全风险。

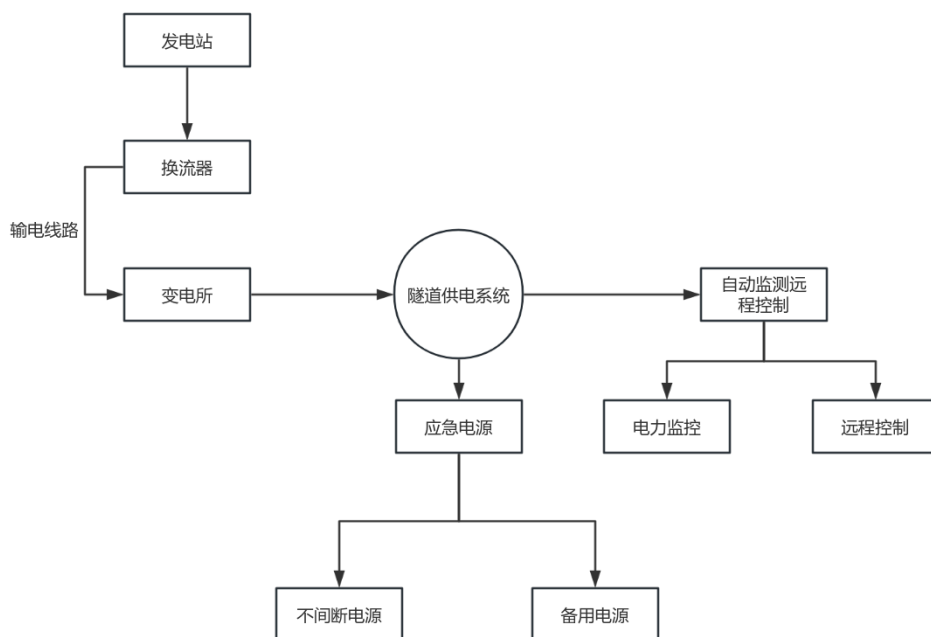


图 1: 隧道供配电系统组成图

(二) 在道路机电中的应用

在高速公路主干道的机电工程里，智慧化供配电系统的主要价值体现在优化能源效率、进行智能调度管理，以及提高环境适应能力等方面。道路机电系统包括路灯、交通信号、ETC 设备、视频监控等重要设施，它们的供电需求是动态变化、比较分散的。智慧化供配电系统通过接入分布式能源、实现动态负载均衡，再加上智能调度算法，能精准地给道路机电设备供电。比如应用光伏发电和储能技术的路灯系统，能根据白天黑夜的变化和车流量的多少自动调节照明亮度，既保证开车安全，又能大幅降低能耗。在极端情况下（如大范围停电恢复后），供配电系统状态可作为信号控制系统恢复最优运行模式的输入参数之一。

在交通管理和应急响应方面，智慧化供配电系统和道路机电设备深度融合，可让运行效率有效提升。智能交通信号系统可实时收集车流数据，再结合供配电系统的动态供电能力优化信号灯的时间设置，减少车辆等待时间，降低碳排放^[7]。此外，系统还有自适应保护功能，检测到设备过载或者线路故障时，能快速切换到备用电源，或者调整负荷分配，保证关键设备一直运行。遇到像暴雨、大风等极端天气时，系统通过环境传感器和供电设备一起工作，提前启动防雷接地装置或者调整设备运行模式，防止设备因为外部环境变化而损坏。

结语

智慧化供配电系统在隧道和道路机电场景中有很明

显的优势，未来新能源接入的比例会越来越高，交通需求也会持续增加，供配电系统得进一步往柔性化、低碳化和自适应化的方向发展。建议后续研究应深入多源能源协同优化算法，完善数字孪生技术在运维方面的应用，探索智慧化供配电系统和车路协同、自动驾驶等新技术的融合。

参考文献

- [1] 阳辉. 智慧供电系统在高速公路机电工程中的应用 [J]. 交通世界, 2024(27): 172-174.
- [2] 覃敏兴, 龙维珍. 无人机搭载检测设备在高速公路机电工程质量检测中的应用研究 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2025(3): 070-073.
- [3] 马元奎. 高速公路隧道机电工程施工常见问题及解决措施探析 [J]. 中国交通信息化, 2025(S1): 243-245.
- [4] 王恩雨. 基于信息时代的高速公路机电工程施工监理工作方法 [J]. 大众标准化, 2025(9): 158-160.
- [5] 闫石. 高速公路机电工程系统集成设计与施工调试技术研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024(12): 119-122.
- [6] 段浩. 系统集成调试技术在高速公路机电工程施工中的应用分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2024(11): 151-154.
- [7] 梁彦龙, 邵鹏, 李龙. 智慧高速公路数字孪生平台的应用及设计思路 [J]. 数字技术与应用, 2025, (2): 127-129.