

建筑工程电气与机电系统的一体化智能管控研究

周 菲

中国建筑土木建设有限公司 江苏 泰州 225410

摘 要：建筑工程中的电气系统与机电系统（如暖通空调、给排水、电梯等）作为建筑功能实现的核心载体，其运行效率与管理水平直接决定了建筑的整体性能。然而，长期以来二者在设计、施工与运维阶段普遍存在信息孤岛、协同不足、管理割裂等问题，严重制约了建筑全生命周期价值的最大化。本文聚焦于“一体化智能管控”这一核心命题，系统性地探讨了其理论内涵、技术架构、关键支撑技术、核心挑战、典型应用场景。研究认为，以建筑信息模型（BIM）、物联网（IoT）、人工智能（AI）和数字孪生（Digital Twin）等新一代信息技术为驱动，构建一个深度融合、数据互通、智能决策、自主优化的一体化管控体系，是实现建筑从“物理空间”向“智慧生命体”演进的必由之路。

关键词：建筑工程；电气系统；机电系统；一体化；智能管控

引言

建筑正从单纯遮蔽功能向可持续、健康与智能化综合体验演进。在“双碳”目标下，作为能耗与碳排放大户的建筑行业亟需转型。智能建筑的核心并非子系统堆砌，而是通过信息技术实现各要素融合协同，构建可感知、决策与优化的动态生态系统。其中，电气与机电系统是其“神经”与“血脉”，既是功能基础，也是能耗主体。然而当前实践中，二者在全生命周期中长期“物理集成、逻辑分离”：设计阶段专业割裂、协调低效；施工阶段管线复杂、信息滞后；运维阶段系统孤立、数据标准不一，形成“信息孤岛”，阻碍能效管理与预防性维护。这种割裂造成资源浪费，限制建筑性能提升。因此，推动电气与机电系统从“分散管控”迈向“一体化智能管控”，是实现绿色低碳、提升建筑品质、支撑智慧城市发展的关键路径。本研究旨在厘清其核心理念、构建技术路径并展望未来方向，为行业数字化转型提供理论与实践指引。

1 一体化智能管控的内涵与核心理念

“一体化智能管控”并非一个简单的技术叠加概念，而是一种贯穿建筑全生命周期的系统性思维与方法论。其核心在于将原本孤立的电气与机电系统视为一个不可分割的有机整体，通过统一的数据平台、一致的通信协议和智能的决策算法，实现从物理层到应用层的深度融合。

1.1 全生命周期视角

一体化智能管控的理念首先体现在其覆盖建筑“规划-设计-施工-运维-改造/拆除”全生命周期的广度上。在规划设计阶段，它要求利用BIM等工具进行多专业协同

设计，提前模拟系统间的交互关系，优化设备选型与布局；在施工建造阶段，通过BIM与现场物联网数据的联动，实现精准预制、可视化交底与进度质量管控；在运维管理阶段，则是其价值体现的核心，通过实时采集全域数据，进行能效分析、健康诊断、故障预警与自动优化控制，最终在建筑改造或拆除时，还能材料回收与循环利用提供数据支持。

1.2 数据驱动与模型先行

一体化智能管控的本质是“数据驱动”。它摒弃了传统依赖经验与规则的被动式管理，转而构建一个以数据为核心资产的管理体系。所有设备、传感器、控制器的状态与行为都被转化为可量化、可分析的数据流^[1]。而建筑信息模型（BIM）则扮演了“模型先行”的角色，它不仅是几何信息的载体，更是承载了设备属性、性能参数、运维手册等丰富非几何信息的“数字DNA”。BIM模型为后续的物联网数据提供了精准的空间定位与语义关联，是构建数字孪生体的基石。

1.3 智能协同与自主优化

“智能”是一体化管控的灵魂。它意味着系统不仅仅是数据的记录者，更是知识的创造者与行动的执行者。通过引入人工智能算法（如机器学习、深度学习），系统能够从海量历史与实时数据中学习规律，预测未来趋势（如负荷变化、设备故障），并基于预设的目标函数（如最低能耗、最高舒适度）自主生成并执行最优控制策略。例如，在夏季午后用电高峰期，系统可以综合考虑室外气象、室内人员密度、电价信号等因素，智能调节空调设定温度、新风量以及部分非必要照明的功率，在保障基本舒适度的前提下，实现削峰填谷与能效最

大化。

2 一体化智能管控的技术架构

2.1 感知层：万物互联的神经末梢

感知层是整个系统的数据源头，由遍布建筑各处的智能传感器、执行器、智能电表、智能断路器、变频驱动器等终端设备构成。这些设备负责实时采集电压、电流、功率、温湿度、光照度、CO₂浓度、水流量、设备振动等多种物理量。随着边缘计算技术的发展，部分感知设备已具备初步的数据处理能力，能够在本地完成数据过滤、特征提取甚至简单的异常检测，有效减轻了上层网络与平台的负担。

2.2 网络层：高速可靠的传输通道

网络层承担着连接感知层与平台层的重任，确保数据能够安全、稳定、低延迟地传输。现代建筑网络架构趋向于融合化，即不再为不同子系统单独布设专用网络，而是构建一个统一的IP化信息基础设施。该基础设施通常包括有线（如光纤、Cat6A网线）与无线（如Wi-Fi 6, Zigbee, LoRaWAN）相结合的混合组网方式，以适应不同场景下对带宽、功耗和覆盖范围的需求^[2]。网络安全机制（如防火墙、VLAN隔离、数据加密）是此层不可或缺的组成部分。

2.3 平台层：数据融合与智能中枢

平台层是整个架构的核心，也是实现“一体化”的关键所在。它通常是一个基于云原生或混合云架构的综合性软件平台，主要包含以下功能模块：（1）数据湖/数据仓库：用于存储来自各子系统的结构化与非结构化数据，为后续分析提供基础。（2）BIM引擎：加载和渲染BIM模型，实现数据与空间的可视化绑定。（3）物联网平台：负责设备的接入、认证、管理、数据解析与指令下发。（4）AI引擎：提供机器学习、深度学习等算法模型的训练、部署与推理服务。（5）规则引擎：支持用户自定义业务逻辑与联动控制策略。平台层通过统一的数据模型（如IFC, Haystack）和开放的API接口，打破了各子系统间的数据壁垒，实现了真正的信息融合。

2.4 应用层：价值实现的交互界面

应用层是面向最终用户的交互窗口，通过Web端、移动端或大屏可视化等方式，提供丰富的业务功能。典型的应用场景包括：（1）三维可视化监控：在BIM模型上直观展示所有设备的实时状态与运行参数。（2）能效管理：进行分项计量、能耗对标、KPI分析，并提供节能优化建议。（3）智能运维：实现设备健康度评估、故障根因分析、工单自动生成与派发。（4）应急指挥：在火灾、停电等紧急情况下，联动相关系统，启动应急预

案。（5）空间管理：结合室内定位技术，优化会议室、工位等空间资源的使用效率。

3 关键支撑技术

3.1 BIM与数字孪生的深度融合

BIM是静态的、面向建造过程的数字模型，而数字孪生则是动态的、面向运维过程的虚拟映射。将二者深度融合，构建一个能够实时反映物理世界状态并具备模拟能力的“活”的数字孪生体，是实现高级别智能管控的前提。这要求BIM模型不仅要包含几何与属性信息，还需嵌入设备的行为逻辑与物理机理模型，以便进行更精准的仿真与预测。

3.2 人工智能与大数据分析

AI是赋予系统“智慧”的核心。利用深度学习算法，可以从复杂的多维数据中挖掘出人难以察觉的关联与模式。例如，通过分析数月的HVAC系统运行数据，AI模型可以学习到建筑的热惰性特征，从而实现比传统PID控制更为精准和节能的前馈-反馈复合控制。大数据分析技术则为能效对标、KPI考核、趋势研判等提供了强大的工具支持。

3.3 边缘计算与云边协同

面对海量终端设备产生的高频数据流，将所有计算任务都推向云端会导致网络拥塞和响应延迟。边缘计算通过在靠近数据源的网络边缘侧部署计算资源，可以在本地完成实时性要求高的任务（如设备保护、快速联动），而将需要大规模计算和长期学习的任务（如能效优化、故障预测）上传至云端^[3]。构建高效的云边协同架构，是平衡系统性能与成本的关键。

3.4 开放平台与微服务架构

为应对系统未来的扩展与迭代需求，一体化管控平台应采用开放的、基于微服务的架构。每个功能（如设备管理、告警服务、报表引擎）都作为一个独立的、松耦合的服务运行，可以通过标准化的API进行调用和组合。这种架构极大地提升了系统的灵活性、可维护性和可扩展性。

4 核心挑战

4.1 标准化与互操作性困境

当前，建筑自动化领域存在多种通信协议（如BACnet, Modbus, LonWorks, KNX等），不同厂商的设备往往采用私有协议，导致系统集成困难，成本高昂。尽管BACnet等开放协议已被广泛接受，但在语义层面的互操作性（即不同系统对同一数据项的理解是否一致）仍是巨大障碍。推动基于统一数据模型（如Brick Schema, Project Haystack）的标准化进程，是实现真正“即插即

用”式一体化管控的必经之路。

4.2 数据安全与网络安全风险

当所有关键设备都接入统一网络后，整个建筑的物理安全便与网络安全紧密捆绑。一旦系统遭受网络攻击（如DDoS攻击、勒索软件、中间人攻击），可能导致设备失控、数据泄露甚至物理破坏。因此，必须建立纵深防御体系，包括网络分区、访问控制、入侵检测、安全审计、固件安全更新等多层次防护措施。

4.3 系统可靠性与高可用性要求

建筑的电气与机电系统关乎人身与财产安全，其可靠性至关重要。一体化平台本身必须具备高可用性（HA）和灾难恢复（DR）能力，避免单点故障导致全局瘫痪。同时，智能控制策略的设计必须遵循“故障安全”原则，即在系统出现异常时，应能自动退回到一个安全的默认状态。

4.4 隐私保护与伦理考量

智能建筑中部署的大量传感器（尤其是摄像头、麦克风、室内定位设备）会收集大量关于人员活动、行为习惯的敏感信息。如何在利用这些数据提升服务体验的同时，严格遵守《个人信息保护法》等相关法规，确保用户隐私不被侵犯，是系统设计者必须严肃对待的伦理与法律问题。数据匿名化、差分隐私、联邦学习等技术为此提供了可能的解决方案。

4.5 初始投资与投资回报周期

一体化智能管控系统的前期投入（包括软硬件采购、系统集成、人员培训等）相对较高，而其带来的节能效益、运维效率提升等收益往往需要较长时间才能显现。如何量化其全生命周期的综合价值，并设计合理的商业模式以降低业主的初始投资门槛，是推广普及的关键。

5 典型应用场景

5.1 全域三维可视化监控与管理

这是最直观的应用。管理人员可以在中央控制室的大屏或移动终端上，通过加载的BIM模型，以三维透视的方式，实时查看建筑内每一台配电柜、每一台风机盘管、每一部电梯的运行状态、关键参数（如电流、电压、温度、流量）及告警信息。点击任一设备，即可弹出其详细信息、历史曲线、关联工单及电子版运维手册，极大提升了管理的直观性与便捷性。

5.2 基于AI的精细化能效管理

系统能够对建筑总能耗及各分项（照明、空调、动

力、特殊用电等）进行实时计量与分析。通过AI算法，系统可以自动识别异常能耗模式，进行根因分析（如某区域夜间照明未关闭、冷水机组效率低下等），并生成具体的节能优化建议^[4]。更进一步，系统可以结合天气预报、建筑使用日程、实时电价等外部信息，自动执行最优的设备运行策略，实现主动式能效管理。

5.3 预测性维护与智能运维

传统的运维模式多为“事后维修”或“定期保养”，效率低下且成本高昂。一体化系统通过对设备运行数据（如振动、温度、电流谐波）的持续监测与AI分析，可以提前数天甚至数周预测潜在的故障风险（如轴承磨损、电机绝缘老化）。系统会自动生成预防性维护工单，并推送至相关工程师的移动终端，指导其携带合适的备件和工具前往现场，将故障消灭在萌芽状态，从而大幅降低非计划停机时间和运维成本。

6 结语

建筑工程电气与机电系统的一体化智能管控，是一项复杂的系统工程，它既是技术革新的产物，也是时代发展的必然要求。本文通过对其内涵、架构、关键技术、核心挑战、典型应用场景及未来趋势的系统梳理，揭示了其从“物理集成”迈向“智能融合”的演进路径。实现这一目标，不仅需要BIM、IoT、AI、数字孪生等技术的深度融合，更需要在标准化、安全性、伦理规范等方面取得突破。尽管前路充满挑战，但其对于推动建筑业高质量发展、实现国家“双碳”战略、构建宜居智慧城市所具有的深远意义，使其成为一项值得持续投入与探索的伟大事业。未来的建筑，必将是一个集成了先进技术、体现了人文关怀、并与自然和谐共生的智慧有机体。

参考文献

- [1]韩旭鹏.智能建筑电气系统设计标准与功能实现[J].大众标准化,2026,(05):158-160.
- [2]容俊.智能建筑电气综合自动化系统的节能控制研究[J].科学技术创新,2026,(08):183-186.
- [3]马联蒙,陈永团,桑广坤,等.智能建筑中电气工程及其自动化技术的应用分析[J].智能制造研究与应用,2026,2(03):118-120.
- [4]王海峰.智能建筑电气设备的协同控制技术研究[J].电气应用,2026,45(01):141-146.