JOURNAL OF DIGITAL INTELLIGENCE FOR INDUSTRY

數智工業

ISSN 3137-0802

第1卷，第1期，2026年10月

香港海願出版社有限公司

HONG KONG OCEANWISH PRESS LIMITED

digital-intelligentindursty.com

目录
CONTENTS

1 具身智能焊接机器人在建筑钢构场景中的应用研究
Research on the Application of Embodied Intelligent Welding Robots in Construction Steel Structure Scenarios
李永

8 数字孪生技术与AI融合在智能油田生产中的应用
The Application of Digital Twin Technology Integrated with AI in Intelligent Oilfield Production
侯雷

15 外骨骼伺服驱动器效率提升策略与方法研究
Research on Strategies and Methods for Improving the Efficiency of Exoskeleton Servo Drives
张楠

22 无人快递车中的环境感知技术研究
Research on Environmental Perception Technology in Unmanned Delivery Vehicles
李彦泽

30 智能阀门在污水处理系统中的应用
Application of Smart Valves in Wastewater Treatment Systems
谭图

具身智能焊接机器人在建筑钢构场景中的应用研究

李永
（山西建筑工程集团有限公司，太原 030022）

摘要:具身智能焊接机器人通过“感知-决策-执行”闭环架构，将视觉感知、工艺大模型与机器人运动控制深度融合，实现了从“固定程序执行”向“自主智能焊接”的范式跃迁。本文系统梳理了具身智能焊接机器人的技术内涵与核心架构，分析了七轴地轨倒装式、智能焊接协作式和移动式（履带款）三类机器人在建筑钢构场景中的适用特性，结合江苏北人、中建科工、中铁宝桥、中科光电等企业的落地案例，论证了具身智能技术在解决复杂焊缝识别、工艺参数自适应、多品种工件兼容等核心痛点中的技术优势。研究表明，具身智能焊接机器人可使焊接工艺开发周期缩短60%、综合生产成本降低40%以上，一次焊接合格率超过99%，单人多机作业效率成倍提升。

关键词:具身智能；焊接机器人；建筑钢结构；视觉感知；AI大模型；人机协同

Research on the Application of Embodied Intelligent Welding Robots in Construction Steel Structure Scenarios

LI Yong
(Shanxi Construction Engineering Group Co., Ltd.,Taiyuan 030022,China)

Abstract:Through a closed-loop architecture of "perception-decision-execution", embodied intelligent welding robots deeply integrate visual perception, process large models and robot motion control, realizing a paradigm shift from "fixed program execution" to "autonomous intelligent welding". This paper systematically sorts out the technical connotation and core architecture of embodied intelligent welding robots, and analyzes the applicable characteristics of three types of robots in construction steel structure scenarios, including seven-axis ground-track inverted installation robots, intelligent collaborative welding robots and mobile (tracked) robots. Combined with practical application cases from enterprises such as Jiangsu Beiren, CSCEC Science and Industry Group, China Railway Baoji Bridge Group and Zhongke Optoelectronics, this paper demonstrates the technical advantages of embodied intelligence in addressing core pain points such as complex weld seam identification, adaptive adjustment of process parameters and compatibility with multi-variety workpieces. The research results indicate that embodied intelligent welding robots can cut the welding process development cycle by 60%, reduce comprehensive production costs by more than 40%, achieve a first-pass welding qualification rate exceeding 99%, and multiply the operation efficiency of single-person multi-machine deployment.

Key words:Embodied Intelligence; Welding Robot; Construction Steel Structure; Visual Perception; AI Large Model; Human-Machine Collaboration

1 引言

1.1 研究背景

建筑钢结构作为现代建筑的重要结构形式，以其强度高、自重轻、施工周期短、抗震性能优良等综合优势，在超高层建筑、大跨度场馆、工业厂房、桥梁工程等领域得到日益广泛的应用。据中国钢结构协会统计，“十四五”期间，国内钢结构行业在数字化和智能化转型方面取得了显著进展，截至2024年底，在调研的571家钢结构企业中，配备数字化加工设备的企业攀升至371家，普及率达65%。

然而，焊接作为钢结构制造的核心工序，其自动化水平仍显著落后于汽车、船舶等离散制造行业。尽管应用焊接机器人的企业已增至243家，占调研企业的42%，但焊接自动化率整体仍不足30%，大量关键工序依赖人工操作。这一现实导致了质量稳定性差、生产效率低、用工成本高企、技术工人短缺等多重困境，日益成为制约行业高质量发展的瓶颈。

1.2 传统焊接机器人的“能力边界”

传统工业焊接机器人采用“示教-再现”工作模式，即由工程师手动引导机器人末端执行器沿预定路径走完一次焊接轨迹并记录所有路径点，随后机器人重复执行该程序。这种模式在汽车制造等大批量、少品种的生产场景中表现出色——一款车型的焊点数量可达数千个，但一旦程序调试完成，即可在数月甚至数年的生产周期中稳定运行。

然而，将这一技术路线直接移植到建筑钢构领域，却遭遇了根本性的“水土不服”。建筑钢构的生产本质上是“工程项目制”而非“产品制”——每栋建筑的钢结构设计各不相同，每个项目的构件类型、规格尺寸、焊缝形式均需量身定制。江苏北人副总裁林涛曾形象地描述这一困境：“以前焊

接这类构件，得靠工程师拿着图纸反复调试机器人参数，一个批次换一种构件，就要重新示教大半天”。在船舶、电梯、重钢等行业，小批量、多品种的生产模式是常态，传统工业机器人“一岗一能”的特性，导致生产线切换效率骤降，还需投入大量人力进行参数调试。

1.3 具身智能的破局价值

具身智能（Embodied Intelligence）技术的兴起为这一困境提供了全新的解决思路。具身智能强调智能体通过身体与环境的物理交互来感知世界、做出决策并执行动作，形成“感知-决策-执行”的闭环认知框架。将其应用于焊接机器人，意味着机器人不再是被动执行预设程序的机械装置，而是能够“看见”工件形态、“理解”焊接需求、“自主”规划工艺路径的智能焊接伙伴。[1,2]

2026年初，博清科技发布了智能焊接行业首个工业级具身智能体，其董事长冯消冰用一个生动的比喻阐释其本质：“如果说传统焊接机器人是‘肢体’，那么具身智能体就是为它装上了‘大脑’和‘神经系统’”。同年5月，小雨智造与中建科工智能科技签署战略合作协议，计划在未来1年内共同推进1000台级具身智能焊接机器人的规模化应用，标志着这一技术路线正式进入产业化推广阶段。

1.4 研究目的与框架

本文聚焦具身智能焊接机器人在建筑钢构场景中的应用，旨在系统阐述其技术内涵、核心架构、产品形态、实践案例与发展趋势。第二节从技术哲学角度论述从“示教再现”到“具身智能”的范式跃迁，并详细解析核心技术模块；第三节深入分析建筑钢构焊接场景的核心痛点；第四节分类论述三类具身智能焊接机器人的技术特征与适用场景；第五节呈现多企业落地案例与效能数据；第六节讨论关键技术挑战与发展趋势；第七节总结全文并提出展望。

2 具身智能焊接机器人的技术内涵与架构

2.1 从“示教再现”到“具身智能”的范式跃迁

理解具身智能焊接机器人的创新价值，首先需要把握其与传统工业机器人的本质差异。这种差异不仅是技术层面的升级，更是制造理念的范式转换。

传统范式：编程-执行。 传统工业机器人遵循“编程-执行”的线性逻辑。工程师需针对每一款工件、每一条焊缝，利用示教器手动引导机器人末端走完焊接路径，记录轨迹点并设置工艺参数。这种方式在流水线生产中是高效的，因为同一程序可重复使用数万次。然而，其本质是将机器人降格为“程序复现器”——它不理解自己在做什么，只是机械地重复预设动作。一旦工件位置偏差超出允许范围，或组对间隙发生变化，机器人仍“忠实”执行原程序，焊接质量便无从保证。

具身智能范式：感知-决策-执行闭环。 具身智能焊接机器人则构建了全新的技术逻辑。其核心是“感知-决策-执行”闭环：多模态感知系统（视觉、激光、触觉等）实时获取工件三维信息和环境状态；AI大模型作为“大脑”分析感知数据，理解焊接任务需求，生成最优焊接工艺参数和运动轨迹；高精度机械臂作为“身体”执行决策指令；同时，执行过程中的反馈信息（电弧信号、熔池图像、位置偏差等）又实时回传至感知与决策层，形成动态优化闭环。

这一范式跃迁的本质，是将焊接从“程序复现”转变为“任务求解”。机器人不再关心“这条焊缝在程序里的编号是什么”，而是将其理解为“这是一条H型钢翼缘板与腹板的T形角焊缝，板厚16mm，组对间隙2mm，需要采用多层多道焊工艺”。这正是具身智能赋予机器人的“焊接智慧”。[3-5]

2.2 核心技术模块

2.2.1 多模态感知系统：机器人的“眼睛”

感知是具身智能的起点。焊接环境具有高温、强光、烟尘、电磁干扰等恶劣特征，单一传感器难以在所有工况下可靠工作。具身智能焊接机器人通常融合多种传感技术，实现“冗余互补”。

3D结构光/激光视觉传感器负责获取工件整体三维轮廓。通过投射结构光条纹并分析其在工件表面的变形，传感器可快速重建工件三维点云模型，识别焊缝位置、类型和几何尺寸。[6]西安中科光电的七轴地轨倒装机器人采用“大量程及精扫描传感器”，能够准确获取工件位姿，适应板厚3~25mm、组对误差不超过20mm的工件。[7]

激光轮廓传感器在焊缝跟踪阶段发挥关键作用。其原理是发射激光线并接收其在焊缝截面的反射，通过三角测量原理精确计算焊缝截面的形状参数——间隙宽度、坡口角度、错边量等，为工艺参数调整提供定量依据。

电弧传感器则在焊接过程中持续工作。通过检测焊接电流和电压的周期性变化，可以实时判断焊枪相对于焊缝中心的位置偏差，并及时纠偏。电弧信号的频率通常与焊接速度相关，可提供毫秒级的位置反馈，弥补视觉传感器在烟尘环境下可能出现的失效。

熔池监控相机是近年兴起的新型感知手段。中国五冶自主研发的高空焊接机器人搭载了自研熔池相机与实时监测系统，可精准捕捉焊缝偏移、电流波动等人眼无法识别的细微偏差，实现施工与检测两道工序一次完成。[8]

2.2.2 焊接工艺大模型：机器人的“大脑”

如果说感知是让机器人“看见”工件，那么工艺决策就是让机器人“理解”该如何焊接。传统机器人依赖工程师凭经验输入焊接参数，而具身智能焊接机器人则内置了融合海量工艺知识的AI大模型。

江苏北人BR-iWeld焊接工艺专家库是该领域的代表性成果。该系统融合了材料科学、焊接冶金学、工艺参数优化等多维度知识，能够在识别工件类型后自动生成匹配的工艺方案——包括焊接电流、电压、速度、摆幅、层间温度控制等参数，且可根据实际焊接效果进行实时调整。

博清科技“际銮”工业级焊接大模型更进一步。据2026年2月发布的信息，该大模型构建了百万级焊接知识图谱与千万级训练元数据体系，实现了焊接工艺的智能生成与实时优化。经工业现场验证，可将焊接工艺开发周期缩短60%，综合生产成本降低40%以上。

从技术原理看，焊接工艺大模型的训练需要覆盖大量“工况-参数-质量”配对数据。传统上，这些数据分散在老师傅的经验、工艺手册和试验记录中，难以系统化。大模型的贡献在于将这些离散知识编码为可计算、可推理的参数空间，从而在面对新工况时，不是“检索”最接近的历史案例，而是“推理”出最优的参数组合。

2.2.3 智能轨迹规划系统：连接大脑与身体的“桥梁”

轨迹规划是连接“大脑”与“身体”的关键环节。传统机器人依赖人工示教的固定路径点序列，而具身智能焊接机器人基于工件三维模型和焊缝识别结果，自主规划最优焊接路径。

轨迹规划需要考虑多重约束：几何约束——确保机械臂在可达空间内以最优姿态到达每个焊点，避免与工件或夹具发生碰撞；工艺约束——起弧位置、焊接方向、摆焊姿态、收弧处理等均需符合焊接工艺规范；效率约束——在满足前两者的前提下，路径应尽可能缩短，减少空行程时间。

西安中科光电的产品资料显示，其具身智能焊接机器人具备“自主规划、电弧跟踪、脉冲焊接、围焊、摆焊、断续焊、包角焊、多层多道焊接”等完整功能。这意味着从一条简单平角焊缝到复杂的多层多道坡口焊缝，机器人都能自主规划并执行，无需人工逐条示教。

2.2.4 人机协同交互界面：从“替代”到“协作”

具身智能强调人与机器的协作而非替代。当前主流的协作焊接机器人普遍采用拖拽示教技术——工人可手持机械臂末端，像使用手持焊枪一样“指哪焊哪”，机器人自动记录路径并优化工艺参数，无需编写任何代码。

小雨智造创始人乔忠良在谈及技术落地时指出：“当我们把通用具身智能应用到复杂的工业现场时，深深感受到一道巨大的鸿沟：实验室里那些精妙的算法演示，和工厂里要求全天无休、高可靠、低成本的运行之间，存在着天然的壁垒”。这一洞见揭示了人机协同的深层逻辑——具身智能不是在实验室里替代人，而是在真实工业现场辅助人、赋能人，让焊工从繁重的体力操作中解放出来，转型为设备的管理者与工艺的优化者。[9,10]

2.3 具身智能焊接机器人的系统集成架构

综合上述模块，具身智能焊接机器人的系统集成架构可抽象为三层：

感知层：由3D结构光相机、激光轮廓传感器、电弧传感器、熔池监控相机等组成，负责实时采集工件几何信息、焊缝位置与截面参数、焊接过程状态数据。

决策层：由焊接工艺大模型、运动规划算法、数字孪生系统构成。感知数据经预处理后输入大模型，模型输出焊接工艺参数和轨迹规划方案；同时，数字孪生系统进行虚拟仿真验证，预判可能出现的工艺问题和设备故障。

执行层：由多轴机械臂、焊接电源、送丝机构、外部轴（地轨/变位机）组成。接受决策层的指令执行焊接任务，同时将执行过程中的实时反馈（位置偏差、电流电压波动、熔池图像）回传至感知层和决策层，形成闭环优化。

3 建筑钢构焊接场景的核心痛点

3.1 “小批量、多品种”与柔性制造需求

建筑钢结构制造最显著的特征是“每个项目都不一样”。一栋超高层建筑可能需要数千种不同类型的钢构件——H型钢柱、箱型梁、支撑桁架、连接节点、预埋件等，每种构件的截面尺寸、板材厚度、焊缝形式、焊脚高度各不相同。即便同一项目，不同楼层的构件规格也可能因结构受力变化而调整。

这种多品种、小批量的生产模式，与汽车制造动辄数万件同一规格零件的批量生产形成鲜明对比。对于传统示教编程机器人而言，每切换一种构件就意味着数小时的停机调试——重新示教路径、重新设定参数、重新验证程序。工厂被迫在“使用机器人导致频繁停机”和“完全依赖人工焊接”之间做出选择。而现实是，多数钢构企业选择了后者——人工焊接虽然效率不高、质量不稳，但至少不需要为每个新构件“写程序”。

江苏北人在2023年遇到的一个典型案例充分说明了这一困境：一家国内知名特种钢结构企业的构件“每个批次构件的装配状态、材料厚度、焊缝形式都不同”，传统机器人完全无法适配，企业只能依赖人工焊接，不仅效率低下，质量也无法保证。[11]

3.2 构件尺寸跨度大与可达性约束

建筑钢构件的尺寸跨度极大。小型连接件的长度不足1米，而超高层建筑的巨型钢柱可达数十米，单件重量超过百吨。这种尺寸跨度对焊接设备提出了严苛的空间覆盖要求。

同时，钢构件的焊缝位置复杂多样——既有开阔的平角焊位，也有狭窄的箱型隔板内腔、柱脚加劲肋区域等受限空间。中国五冶的技术团队指出：“高空钢结构作业一直是建筑行业的‘老大难’。工人需在百米高空负重作业，夏季高温下防护服闷热难耐，冬季寒风中操作精度下降，安全隐患如影随形”。传统工业机器人受限于固定基座和有限臂展，在这些复杂场景中往往“够不着”或“姿态别扭”。

此外，施工现场的环境条件远不如车间可控。光照变化、风雨影响、空间狭窄、高空作业等因素叠加，使得自动化设备的部署和使用面临更大挑战。

3.3 焊缝质量一致性与缺陷控制

钢结构焊接质量直接关系建筑安全。一道焊缝的缺陷——无论是气孔、夹渣、未熔合还是裂纹——都可能在高应力状态下成为结构失效的起点。国家标准对钢结构焊缝质量等级有严格规定，一级焊缝需100%无损检测合格。

然而，手工焊接的质量高度依赖于焊工的技能水平、精神状态和体力状况。即使是最优秀的焊工，也难以保证在全天作业中保持完全一致的焊接质量。尤其在高温、高空等恶劣作业环境下，人的疲劳和疏忽更容易导致质量波动。这是钢结构行业面临的系统性质量风险。

传统自动化焊接虽然质量一致性优于手工，但其前提是工件一致性好、组对精度高。建筑钢构的组对往往存在较大的累积误差，传统机器人“照本宣科”的执行方式难以适

应。具身智能焊接机器人通过实时感知和自适应调整，在相当程度上弥补了这一缺陷——它不是“按程序焊”，而是“看着工件焊”，偏差多少就调整多少。[12]

3.4 用工结构性短缺与成本压力

建筑钢构行业的用工困境正在加剧。一方面，焊接作业环境艰苦、劳动强度大、职业健康风险高，年轻人普遍不愿进入这一行业；另一方面，优秀焊工的培养周期长达数年，经验丰富的老师傅正在加速退休。据行业调研，多数钢构企业的焊工平均年龄已超过45岁，青黄不接的局面十分严峻。

与此同时，人工成本持续攀升。在经济发达地区，一名熟练焊工的月薪已超过万元，且仍在上涨。企业在“招不到人”和“用不起人”之间左右为难。具身智能焊接机器人的出现，为解决这一结构性矛盾提供了技术路径——不是简单地“机器换人”，而是将焊工从“手持焊枪的体力劳动者”转型为“管理多台机器人的技术操作者”，实现“一人多机”的效率跃升。

4 三类具身智能焊接机器人的技术特征与应用适配

针对建筑钢构场景的多样化需求，行业已发展出三类具身智能焊接机器人产品形态，各有侧重、互为补充。

4.1 七轴地轨倒装智能焊接机器人

4.1.1 技术特征

七轴地轨倒装机器人由行走地轨（第七轴）、倒装机械臂和智能控制系统组成。与传统六轴工业机器人相比，第七轴（地轨移动轴）使机器人能够沿工件长度方向自由移动，作业范围大幅扩展。倒装（吊装）布置方式使机器人从工件上方进行焊接，避免了地面设备与工件夹持装置的干涉，姿态更加舒展，可达性更优。

西安中科光电精密工程有限公司（核心技术源于中国科学院西安光学精密机械研究所）是该领域的代表性企业。其TR-iW系列七轴地轨倒装机器人基于自研具身智能架构，采用进口（安川/川崎/发那科）或国产（汇川）机械臂，具备智能识别、智能规划、自主纠偏、自适应工艺参数等核心功能。

该系列产品的技术参数体现了七轴地轨倒装机器人的典型性能边界：作业范围覆盖6m×3m至24m×3m，可适配不同长度的H型钢、工字梁等细长构件；适应板厚3~25mm，组对误差不超过20mm；支持平角焊缝、立角焊缝、搭接角焊缝、对接坡口焊缝等多种类型；具备自主规划、电弧跟踪、脉冲焊接、围焊、摆焊、断续焊、包角焊、多层多道焊接等完整功能。[13,14]

4.1.2 适用场景与优势局限

七轴地轨倒装机器人主要适配H型钢、工字梁、板单元等细长工件的批量焊接，适用于车间内的标准化生产线场景。单机工作站可覆盖一种或一类构件的全部焊缝；双机协作型号则能实现两侧焊缝同步施焊，效率翻倍。

其优势在于精度高、稳定性好、适合连续批量生产。由于机械臂安装在固定地轨上，重复定位精度可达亚毫米级，且不受地面振动干扰。对于同一规格构件的大批量订单，其效率和一致性优势极为突出。

其局限在于设备体积较大、需固定安装，灵活性不足。一旦生产线切换为完全不同的构件类型，虽然无需重新示教（具身智能系统可自动识别适配），但地轨行程、工件装夹方式等物理限制可能仍需要一定的调整时间。[15]

4.2 智能焊接协作机器人

4.2.1 技术特征

协作机器人是具身智能理念的最佳载体。这类机器人强调“人机协同”而非“机器替代人”，其核心设计理念有三：

其一，无需安全围栏。 协作机器人通过力觉感知和速度限制，可在人身触碰时自动停止或减速，无需像传统工业机器人那样安装物理隔离围栏，从而实现了与人在同一空间内的安全共事。

其二，拖拽示教免编程。 工人可手持机械臂末端，“像操作智能焊枪一样”将其拖拽至目标位置，机器人自动记录路径点并优化轨迹参数，全程无需编写任何代码。这一交互方式极大地降低了操作门槛，普通焊工经过短期培训即可上手。

其三，轻量化与快速部署。 协作机器人自重通常只有数十公斤，单人即可搬运和安装。中建科工智能科技的柔性焊接机器人重量仅9.8公斤，3分钟即可完成部署。

4.2.2 适用场景与优势局限

协作机器人兼顾了灵活性与智能化，适用场景极为广泛：车间内的中小型构件焊接、施工现场的箱型梁/柱/圆管受限空间作业、多品种小批量工件的柔性焊接、临时补焊返修等。

最具战略意义的应用模式是“一人多机”的集群作业。在中建科工深圳湾超级总部基地C塔项目中，钢结构智慧建造中心搭载了10台柔性焊接机器人，负责约7000吨钢构件的现场焊接，占项目柱类构件焊接量的90%。一个标准集装箱大小的建造中心展开后即为半径35米的“可移动智慧胶囊工厂”，能上楼、能拖着走，极大便捷了工地现场的垂直运输和水平移动。

其优势在于灵活部署、快速上手、人机协同安全；局限在于单台绝对效率不如大型专用自动化设备，需要工人具备一定的操作和管理技能，且在超厚板、超长焊缝连续作业场景下不如专用设备稳定。[16]

4.3 移动式（履带款）智能焊接机器人

4.3.1 技术特征

履带式移动焊接机器人将焊接机械臂安装在履带底盘上，实现了“工件不动、机器人主动就位”的作业模式。搭载拖拽示教和免编程智能系统，可进入龙门吊、地轨等固定设备难以到达的作业区域。部分型号还配备了磁吸爬壁功能，可在90度垂直墙面爬行、360度旋转，实现全立面无死角作业。

中国五冶自主研发的高空焊接机器人是这一品类的典型代表。其磁吸爬壁技术使其可轻松抵达高空、受限密闭空间等高难高危作业场所，配备的六轴超长（1200毫米）机械臂定位精度达0.02毫米。

江苏八方钢构集团的专利技术则展示了这一品类的另一创新方向：集成超声波焊缝检测功能，通过电动推杆输送耦合剂，超声波探头在弹簧作用下稳定贴合工件，实现了“焊接-检测”一体化作业，无需人工另行检测。

4.3.2 适用场景与优势局限

履带款机器人主要面向设备维保现场施焊、重型钢结构现场拼装、非标工件现场加工、车间柔性零散工位补焊等场景。在桥梁施工现场、大型设备安装现场等无固定工装条件的场景中，具有不可替代的优势。

中铁宝桥（扬州）在张靖皋长江大桥钢塔制造中，针对横隔板单元圆弧焊缝、钢壳棱角焊缝等复杂位置，研发了履带式协作机器人移动工作站和电驱升降焊接平台，实现了自动化焊接。在厦金大桥钢箱梁制造中，针对U肋槽口焊缝数量多、焊接位置复杂多变的特点，研发了AI视觉识别焊缝搭载轻量化电驱滑轨焊接系统，实现多个槽口的连续自动化焊接。相关课题经中国公路建设行业协会评审鉴定为国际领先水平。

其优势在于全地形移动能力、现场适应性强、一机多用；局限在于底盘承载能力限制了机械臂的规格，对于超大厚板、超长焊缝的连续作业能力相对有限。[17]

5 实践案例与效能分析

5.1 江苏北人：钢结构“一脑多形”解决方案

2023年，一家国内知名特种钢结构企业向江苏北人提出了一项棘手需求：其生产的特种钢结构构件，每个批次构件的装配状态、材料厚度、焊缝形式均不相同，传统机器人无法适配，依赖人工焊接不仅效率低，还存在质量不稳定的问题。

江苏北人研发团队以“感知-决策-执行”闭环架构为核心，开发了搭载BR-iWeld焊接工艺专家库的具身智能焊接机器人。经过半年的调试与迭代，首台设备正式落地——机器人面对不同类型的焊接需求，无需人工示教，只需通过视觉/激光扫描即可生成专属焊接方案。

更具战略意义的是，江苏北人提出了“一脑多形”的技术理念——同一套智能系统可适配移动式、龙门式、悬臂式、地轨式等多元形态，实现从专用场景向通用场景的升级，打破了传统机器人“一机一用”的限制。

电梯轿底焊接场景的应用验证了这一理念：双机器人双工位24小时持续运行，兼容多种规格轿底，生产效率加倍提升。江苏北人副总裁林涛表示：“这种技术架构，不仅打破了传统机器人‘一机一用’的限制，更让机器人从‘生产工具’升级为‘智能协作伙伴’”。

5.2 中建科工：从“内部院”到智能焊接产业先锋

中建科工智能科技的前身是中建钢构智能制造研究院，2025年注册成立为独立法人。这一转型本身就是建筑钢构行业智能化进程的标志性事件——大型施工企业将内部研发力量推向市场，意味着智能焊接技术已经从“科研探索”进入“产业推广”阶段。

2026年5月，小雨智造与中建科工智能科技签署战略合作协议，计划在未来1年内共同推进1000台级具身智能焊接机器人在建筑钢结构领域的规模化应用。小雨智造的核心技术为“一脑多形”架构——通过一个高泛化能力的具身智能大脑，可适配控制多场景、多形态的机器人本体。创始团队由原小米MIUI研发负责人乔忠良、原小米软件系统平台部总经理王文林领衔，核心成员来自小米、字节、华为等头部科技企业。

这一合作体现了“技术供给+场景落地”的产业生态闭环。具身智能算法需要真实工业场景的数据支撑和验证，而建筑钢构企业迫切需要智能化技术解决用工和质量难题，双方互补共赢。

5.3 中铁宝桥：从桥梁场景反向驱动技术创新

桥梁钢结构对焊接质量的要求甚至高于建筑钢构——桥梁承受动载和疲劳荷载，焊缝的疲劳性能至关重要。中铁宝桥（扬州）针对桥梁钢构的特点，研发了多种具身智能焊接衍生设备。

在张靖皋长江大桥钢塔及观音寺长江大桥钢壳制造过程中，针对钢塔、钢壳类型产品对焊缝外观质量要求高、焊接自动化率较低的痛点，研发了履带式协作机器人移动工作站和电驱升降焊接平台，成功实现了横隔板单元圆弧焊缝、钢壳棱角焊缝的自动化焊接，获得了“一种双层密集网格加劲壁板索塔钢壳块体自动化焊接方法”“一种超大截面钢结构桥塔工地自动化焊接方法”两项发明专利授权。

在厦金大桥钢箱梁制造中，针对钢箱梁总拼U肋槽口焊缝数量多而密集、焊接位置复杂多变、焊缝质量要求高的特点，研发了钢箱梁U肋槽口AI视觉识别焊缝搭载轻量化电驱滑轨焊接系统，实现多个槽口的连续自动化焊接，获得江苏省科技创新成果转化奖三等奖。相关的课题《钢箱梁便携机器人自动化焊接施工技术》经中国公路建设行业协会评审鉴定为国际领先水平。

5.4 中国五冶：高空磁吸机器人与智能建造生态集群

中国五冶集团自主研发的高空焊接机器人，以其磁吸爬壁技术独树一帜。该机器人可90度垂直爬行、360度旋转，轻松抵达高空、受限密闭空间等高难高危作业场所，实现全立面无死角作业。配备的六轴超长（1200毫米）机械臂定位精度达0.02毫米。

在效能提升方面，该机器人实现了显著的突破：传统人工高空焊接需系安全绳、分段作业，效率低且风险高；机器人可连续作业，彻底消除工人高空坠落隐患。现场作业支持多台机器人同步施工，1人可操控多台焊接机器人，效率较传统人工最高提升4倍，综合人工成本直降80%。

该高空焊接机器人已在成都高投芯光智造园、成渝中线高铁铜梁站等多个重点项目完成实战验证，推动建筑施工焊接作业向“本质安全”转型。[18]

5.5 青岛东方铁塔：胶州钢结构产业集群的智能化实践

胶州市是我国北方规模最大、最为集中的钢结构产业高地。在这一产业集群中，龙头企业青岛东方铁塔的智能化转型具有标杆意义。东方铁塔参与过中国天眼FAST、特高压输电等国家重大基础设施项目。

自2025年完成智能化改造以来，其自动焊接车间中由十余台智能机器人组成的生产线正高效运转。这些焊接机器人通过3D视觉扫描构件，系统自动匹配焊接工艺，并利用电弧跟踪技术实时纠偏，大幅提升了焊接的稳定性与精准度。

公司董事副总经理杨金萍介绍："现在我们80%的钢结构焊接采用了智能机器人自动焊接生产线，24小时可不间断生产，效率提高了，人工成本降低了。另外，机器人焊接设备参数恒定、外观成型美观，一次焊接效率高，质量稳定"。

更为关键的是，东方铁塔已实现切割、焊接、涂装、检测的全流程数字化，并通过接入主要客户的工业互联网平台，打通了产业链上下游数据壁垒，"通过全流程线上管理，订单查询、进度跟踪、售后反馈等环节实现闭环运行。降低人工成本的同时公司生产管理效率整体提升20%"。

5.6 效能数据汇总

综合上述案例和行业数据，具身智能焊接机器人在建筑钢构场景中的效能提升可量化为以下指标（表1）：

表1 效能数据

效能指标	典型数据	案例
焊接一次合格率	≥99.5%	中建科工
工艺开发周期缩短	60%	博清科技
综合生产成本降低	40%以上	博清科技
人多机效率提升	1人操控3~10台	中国五冶、中建科工
综合人工成本直降	80%	中国五冶
高空焊接定位精度	0.02mm	中国五冶
焊接自动化率	80%（头部企业	东方铁塔
企业生产效率提升	20%（全流程数字化）	东方铁塔

6 关键技术挑战与发展趋势

6.1 多传感器融合与环境适应性

当前具身智能焊接机器人的感知能力在标准化车间环境中表现良好，但在施工现场的复杂光照、烟尘、电磁干扰等恶劣条件下，视觉传感器的稳定性面临严峻考验。石永华等在《机电工程技术》发表的综述文章指出，提高传感精度、实时融合多模态数据，是推动焊接从"示教-再现"向"自适应、拟人化、智能化"模式转变的关键。[19]

未来方向是进一步深化多模态传感融合——将视觉、激光雷达、电弧传感、触觉传感等信息通过AI算法实现"冗余互补"，提升系统的环境鲁棒性。中国五冶技术团队已经提出了开发声学模型的计划，模拟焊接老师傅"听声辨物"，这是多模态感知从"视觉主导"向"视听融合"拓展的有益探索。

6.2 轻量化AI模型与实时推理

焊接工艺大模型的参数量巨大，云端推理存在延迟问题，而焊接过程对实时性要求极高（毫秒级响应）。将大模型"蒸馏"为轻量化边缘端模型，使其能够部署在机器人本地控制器上，同时保证推理精度和速度，是当前产业化的关键技术瓶颈。

学术研究表明，智能焊接的核心技术将聚焦于"基于视觉技术的多传感器深度融合"和"基于AI大模型的具身智能焊接机器人"两大方向，最终目标是推动全自主智能焊接系统的发展，使其能够"自主感知、识别、决策和执行"。

6.3 数字孪生与预测性维护

数字孪生技术通过构建焊接过程的全要素虚拟镜像，可在虚拟空间中进行工艺仿真、参数优化和缺陷预判，大幅减少实体试焊成本。博清科技的具身智能体已联动数字孪生系统与AI算法，可预判设备运行状态并开展预测性维护，打破传统焊接对人工经验的依赖。

博清科技还提出了"机器人定义超级工厂"的理念，即基于具身智能技术，结合工业互联网与数字孪生系统，构建多类型、多功能焊接机器人协同集群，实现从"单点作业"到"协同决策"、从"单一功能"到"全流程覆盖"、从"被动运维"到"主动优化"的三大升级。

6.4 从"单机智能"到"集群智能"

随着中建科工1000台级规模化应用计划的推进，多机协同、集群调度将成为必然方向。每台机器人不仅是独立的焊接单元，更是数据网络中的一个节点——焊接参数、质量数据、设备状态实时上传云端，通过大数据分析持续优化工艺模型，形成"越用越聪明"的群体智能效应。

中国五冶已经迈出了这一步——其发布了国内首个自研智能建造机器人生态集群，包含了项目级机器人集群智能调度管理系统，实现了多类型机器人的协同调度。[16]

7 结束语

具身智能焊接机器人正在重塑建筑钢结构制造的生产逻辑。从技术本质看，它将焊接从"程序复现"转变为"任务求解"，使机器人真正具备了理解焊接、思考工艺、自主执行的能力。从产业价值看，它直击钢构行业"小批量、多品种、用工难"的核心痛点，提供了可规模化推广的解决方案。

七轴地轨倒装、智能协作、履带移动三类产品形态，分别对应了车间批量化生产、现场灵活部署、复杂地形就位等差异化场景，共同构成了建筑钢构场景的完整产品矩阵。实践数据表明，具身智能焊接技术可使工艺开发周期缩短60%、综合成本降低40%、一次合格率超过99%、单人多机效率成倍提升，技术经济价值已经得到充分验证。

展望"十五五"期间，随着AI大模型技术的持续演进、多传感器融合成本的下降、以及行业标准体系的逐步完善，具身智能焊接机器人在建筑钢构领域的渗透率有望从当前的不足20%提升至50%以上。从胶州钢结构产业集群80%焊接自动化的头部企业实践来看，这一目标并非遥不可及。

这不仅是焊接工序的自动化升级，更是建筑钢结构制造

从“劳动密集型”向“数据驱动型”产业跃迁的关键支点。当机器人能够完成90%的高危作业，工人就能从“体力型”转向“技术型”——从手持焊枪的操作者，转型为管理多台机器人的技术管理者。这不仅是产业升级的经济价值所在，更是“以人为本”的社会价值所在。□

参考文献

[1] 和岳. 小雨智造与中建科工智能科技达成具身智能战略合作[N]. 北京商报, 2026-05-09.
[2] 小雨智造与中建科工智能科技签署战略合作协议，推进千台级焊接机器人应用[EB/OL]. 自动化网, 2026-05-08.
[3] 黄盛. 江蘇北人：“一腦多形”焊接機器人走進現實[N]. 人民网, 2025-10-21.
[4] 从一条焊缝窥见钢结构建筑绿色智造未来[N]. 中国冶金报, 2026-03-10.
[5] 张晔. 智能焊接技术实现“人机协同”建造大型桥梁[N]. 科技日报, 2026-03-18.
[6] “科技大脑”激活传统产业 平台经济重构钢铁生态[N]. 青岛市工业和信息化局, 2026-05-26.
[7] 石永华, 凌亮建, 张嘉仪, 等. 机器人焊接智能视觉传感技术的研究及应用进展[J]. 机电工程技术, 2025, 54(12): 1-23.
[8] 北京经开区企业发布智能焊接行业首个工业级具身智能体[N]. 北京青年报, 2026-02-06.
[9] 西安中科光电精密工程有限公司. 七轴地轨倒装式焊接机器人TR-iW110D-M-X(S)[EB/OL].
[10] 西安中科光电精密工程有限公司. 地轨倒装式（双机）焊接机器人TR-iTR21D[EB/OL].
[11] 中国钢结构协会. 钢结构行业数字化转型研究报告[R]. 2025.
[12] 博清科技. 际銮工业级焊接大模型技术白皮书[R]. 2026.
[13] 江苏北人智能制造科技股份有限公司. BR-iWeld焊接工艺专家库技术手册[R]. 2024.
[14] 中国五冶集团. 高空磁吸爬壁智能焊接机器人技术鉴定报告[R]. 2025.
[15] 中铁宝桥（扬州）有限公司. 钢箱梁便携机器人自动化焊接施工技术鉴定材料[R]. 2025.
[16] 中建科工智能科技有限公司. 柔性焊接机器人产品手册[R]. 2025.
[17] 青岛东方铁塔股份有限公司. 钢结构智能焊接数字化车间建设报告[R]. 2025.
[18] 冯消冰. 具身智能体：焊接机器人的“大脑”与“神经系统”[N]. 中国工业报, 2026-02-10.
[19] 乔忠良. 从实验室到工厂：具身智能落地的鸿沟与跨越[J]. 机器人产业, 2026(3): 22-28.

作者简介:李永，男，工程师，研究方向为自动化技术在建筑工程中的应用。

版权为作者所有。本文为开放获取文章，遵循知识共享署名（CC BY）许可协议（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/）的条款和条件进行发布。
Copyright by the authors.This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

数字孪生技术与AI融合在智能油田生产中的应用

侯雷
（中国石化销售有限公司山东分公司，临沂 273400）

摘要:本文立足于油田现场工程实际，系统阐述数字孪生与AI技术融合的架构体系与运行机理，重点围绕采油生产方案优化、油田设备预测性维护、全域能源智能调度三大核心应用场景，结合长庆油田、胜利油田、大庆油田一线落地工程案例，深入剖析技术应用路径、实施方法、落地成效与应用优势。实践证明，数字孪生与AI融合技术能够有效破解传统油田生产管理痛点，大幅提升油田生产精细化管控水平、降低生产运营成本、减少设备故障停机风险、优化能源消耗结构，为智能油田数字化转型升级、油田提质增效、绿色低碳生产提供坚实的技术支撑，具备极强的工程实用性、落地性与行业推广价值，可为同类油气田智能化改造项目提供可靠的实践参考。

关键词:数字孪生；AI技术；智能油田；生产优化；设备运维；能源调度

The Application of Digital Twin Technology Integrated with AI in Intelligent Oilfield Production

HOU Lei
(Sinopec Sales Co., Ltd., Shandong, Linyi 273400,China)

Abstract:Based on actual engineering practices in oilfields, this paper systematically presents the architecture and operational mechanisms of integrating digital twin and AI technologies. Focusing on three core application scenarios–optimization of oil production schemes, predictive maintenance of oilfield equipment, and intelligent energy scheduling across the entire field–the paper deeply analyzes technical implementation pathways, methods, practical outcomes, and application advantages through real-world projects at Changqing, Shengli, and Daqing oilfields. Practical experience demonstrates that the integration of digital twin and AI technologies effectively addresses longstanding challenges in traditional oilfield operations, significantly enhancing precision management, reducing operational costs, minimizing equipment failure downtime, and optimizing energy consumption structures. This technology provides solid technical support for the digital transformation and intelligent upgrading of oilfields, improving quality and efficiency while enabling green and low-carbon production. It exhibits strong engineering practicality, implementability, and broad industry promotion value, offering reliable reference for intelligent retrofitting projects in similar oil and gas fields.

Key words:Digital twin; AI technology; smart oilfield; production optimization; equipment operation and maintenance; energy dispatching

1 引言

在“数字中国”“智慧能源”双战略引领下，传统高耗能、经验化、粗放式的能源生产模式正在发生根本性变革，油气行业作为国家能源安全的核心支柱产业，数字化、智能化转型已经成为行业高质量发展的必然趋势。随着油田开采年限不断增加，国内多数主力油田逐步进入开发中后期，普遍面临地层压力衰减、综合含水率上升、单井产能下降、设备老化严重、运维成本攀升、能耗居高不下等诸多生产难题，传统生产管理模式的短板与弊端日益凸显。依托物联网、大数据、5G通信、数字孪生、人工智能等新一代信息技术建设智能油田，打通油田地质勘探、钻井开发、采油生产、集输处理、设备运维、能耗管理、安全管控全流程数据链路，构建数据驱动、智能赋能、精准管控的新型生产体系，是现阶段解决老油田开发难题、实现稳产增产、降本增效、绿色转型的核心技术路径。近年来，国内各大油气田均已启动智能化升级改造工作，数字孪生与AI融合技术作为智能油田建设的核心支撑技术，凭借虚实联动、仿真推演、智能决策、提前预判的技术优势，逐步替代传统人工经验管理模式，在油田生产优化与精细化管控中发挥着不可替代的作用。

长期以来，国内绝大多数油田生产作业、设备管理、能源调度工作高度依赖一线技术人员与管理人员的现场实操经验，整体管理模式呈现明显的经验化、滞后化、粗放化特征。在采油生产过程中，地层参数动态变化、油井工况实时波动、区块开发条件持续演变，人工研判难以精准捕捉细微工况变化，生产参数调整、采油制度优化往往需要通过多次现场试采、反复调试才能确定，不仅调试周期漫长，耗费大量人力、电力、物资资源，还极易因方案适配性不足导致油井产能波动、含水上升、地层能量受损，影响区块整体开发效果。在设备管理方面，传统定期检修模式一刀切、故障抢修模式被动滞后，无法识别设备隐性故障与老化趋势，极易引发突发停机事故，造成生产中断。在能源管理方面，人工

调度响应滞后、分配固化，无法适配动态生产负荷，能源浪费与能耗过载问题长期存在。以上诸多问题，严重制约了现代油田高效化、精细化、绿色化发展，亟需依托智能化技术实现生产管理模式的全面革新。

数字孪生技术能够精准构建油田物理生产场景的虚拟镜像，实现物理油田与虚拟模型的实时数据同步、工况联动。结合AI智能算法的数据分析、仿真预测、自主优化能力，可突破传统生产管理的技术瓶颈，实现油田生产全流程的事前预判、事中调控、事后复盘。相较于传统人工经验管理模式，该融合技术具备数据全域联动、仿真精度高、决策智能化、落地性强等核心优势，可针对性解决油田生产中的各类精细化管理难题。基于本人多年油田工程现场实操与技术管理经验，本文系统梳理数字孪生与AI融合技术的核心理论体系，重点结合国内各大主力油田落地应用案例，深度剖析技术在采油生产、设备运维、能源调度三大核心场景的实践路径、应用成效与优化价值，总结现场应用中的现存问题与改进方向，为同类型智能油田数字化改造、技术落地落地及生产提质增效提供可复制、可落地的工程实践参考。[1,2]

2. 数字孪生与AI技术融合的核心原理

2.1 数字孪生技术核心架构

数字孪生技术是依托物联网感知、高精度三维建模、5G数据传输、虚拟仿真、边缘计算等核心技术，对油田现场油井、抽油机、集输设备、管网系统、污水处理站、生产场区等全部物理实体进行1:1高精度虚拟化复刻的全生命周期技术体系。其核心技术优势在于构建起物理实体、虚拟模型、实时数据、业务应用的四维联动闭环体系，彻底打破传统油田生产数据孤立、场景脱节、管理割裂的弊端。在油田现场部署大量高精度压力传感器、流量传感器、温度变送器、振动采集终端、视频监控等物联网设备，7×24小时不间断实时采集油井井底压力、井口流量、井筒温度、设备运行转速、振动幅值、管网压力损耗、现场环境温湿度等全维度生产信息，通过5G+工业互联网实现数据低延迟传输，实时同步更新至云端虚拟模型。依托三维建模技术还原油田区块地貌、设备结构、管网布局、井场分布等真实场景，让虚拟场景可毫秒级还原油田真实生产工况，真正实现油田生产全流程可视化监控、动态仿真模拟、历史状态追溯、工况联动推演，为后续AI智能分析与决策优化提供精准、全面、实时的数据底座。

2.2 AI技术的赋能作用

单纯的数字孪生模型仅能实现物理工况复刻、数据可视化展示与生产状态追溯，属于“被动感知”技术，不具备自主分析工况规律、预判风险隐患、优化生产方案的主动赋能能力，无法满足现代智能油田自主决策、精准调控、提前预判的生产需求。AI人工智能算法的深度融入，彻底弥补了数字孪生模型的技术短板，实现了“感知-分析-预判-决策-优化”的全流程升级。在技术应用过程中，通过搭载机器学习、深度学习、大数据聚类分析、多目标优化算法，对数字孪生平台长期积累的海量生产历史数据、实时动态工况数据、设备运维数据、能耗数据进行全方位深度学习与挖掘分析，精准捕捉不同区块、不同工况下的产油规律、设备故障隐性特征、能耗波动关联逻辑、地层参数变化趋势。同时，通过算法迭代仿真、多方案对比推演、参数智能拟合，可对采油生产制度、设备运行状态、能源分配模式、维保周期计划等核心业务场景进行趋势预测与全局优化，彻底打破传统油田“靠经验、事后管、盲目试错”的管理模式，实现油田生产从“可视化被动监控”向“智能化主动决策”的根本性升级，是智能油田数字化转型的核心技术支撑。[3,4]

3. 数字孪生与AI技术在智能油田中的具体工程应用

3.1 采油生产方案智能优化

采油生产是油田运营的核心环节，采油工作制度、生产参数、注水方案的科学性与精准度，直接决定单井产能、区块采收率与油田整体开发效益。国内油田地质条件复杂多样，低渗透油田、断块油田、老油田、高含水油田并存，不同区块、不同层系、不同单井的地层渗透率、孔隙度、地层压力、含油饱和度存在显著差异，具备极强的个性化特征。传统采油方案制定与参数优化工作，主要依靠技术人员积累的现场经验，结合静态地质数据制定固定生产制度，无法适配地层动态变化的工况特征，人工制定的生产方案通用性差、针对性弱、精准度低。为了匹配最优开采状态，现场往往需要开展多次试采调试，反复调整抽油机冲程、冲次、配产额度、注水强度、注水周期等核心参数，试错成本极高。同时，频繁的现场调试会打乱油井稳定生产工况，造成地层压力波动、原油含水上升、产能不稳定等问题，不仅浪费大量电力、水资源、人力物力，还会缩短油井稳产周期，严重影响油田开发经济效益。

依托数字孪生技术搭建油田区块全域高精度虚拟模型，可实现油田地质结构、井场布局、设备状态、管网分布、生产工况的1:1虚实复刻，全面整合区块地质勘察数据、单井地层参数、五年以上历史产能数据、注水开发数据、工况运行台账、检修运维数据等全维度信息，构建完整的油田生产数据底座。在此基础上，嵌入AI多目标遗传优化算法、工况拟合算法与参数迭代算法，搭建可视化采油方案智能仿真推演系统。技术人员无需进入现场调试，即可在虚拟孪生平台中自定义各类生产参数组合，模拟不同采油节奏、注水模式、配产方案下的油田生产状态，快速推演各类方案对应的产能数据、含水率变化、地层压力变化、能耗水平与开采稳定性。AI算法可自主完成上千组工况数据的对比分析、迭代筛选、参数拟合，精准捕捉适配单井地层特性的最优参数组合，自动筛选出兼顾稳产、增产、节能、长效开发的最优采油生产方案，精准匹配地层产油规律与能量变化趋势。[5]

该智能仿真优化模式彻底颠覆了传统油田现场反复试错、经验调试的落后作业模式，无需开展实地盲目实验，通过虚拟仿真即可完成多组生产方案的快速迭代、对比筛选与优化定型，大幅缩短采油方案调试周期，有效规避原油资源、电力能源、人力物力的浪费，稳定油田产能输出，显著

提升单井采油效率与区块整体采收率。该技术可广泛适配低渗透油井、老油田增产改造、高含水油井治理、复杂断块油田开发等各类复杂场景，具备极强的场景适配性与工程实用性。[6]

具体工程应用案例：长庆油田某低渗透区块采油方案优化应用

长庆油田某主力开发区块地处鄂尔多斯盆地，属于典型的低渗透、低孔隙、低丰度“三低”油藏，储层非均质性极强，地层连通性差，压力衰减速度快，开采难度大、稳产难度高，是国内复杂低效油田的典型代表。在传统开发模式下，该区块生产方案完全依靠技术人员经验制定，抽油机冲次、冲程、配产额度、注水强度等核心参数统一设定，未结合单井地层差异进行个性化优化，导致大量油井产能释放不充分、低产低效井占比高。为了提升单井产能，现场长期依靠人工反复调试生产参数，单井单次方案调试周期长达7-15天，调试期间设备频繁启停、参数频繁变动，不仅耗费大量人工成本与电力资源，还极易造成油井工况紊乱、综合含水率上升、地层能量失衡，进一步加剧低效开发问题，区块整体采收率长期低于行业平均水平，油田开发效益难以提升。

为彻底解决区块低效开发、试错成本高、产能不稳定的问题，该区块于2023年全面落地数字孪生+AI智能采油优化系统，搭建覆盖全域236口生产油井的高精度数字孪生虚拟模型，完整录入各单井地层渗透率、孔隙度、原始地层压力、含油饱和度、储层厚度等精细化地质参数，整合区块近五年产能数据、月度注水数据、工况波动数据、设备运行台账与检修记录，构建专属区块的油田生产大数据库。依托数据库搭载AI多目标遗传优化算法，针对低渗透油藏压力衰减快、产能敏感、含水易上升的特性，建立适配“三低”油藏的采油方案仿真推演模型。技术人员依托虚拟平台，围绕抽油机冲次、冲程、日配产量、注水强度、注水周期、焖井时间等12项核心生产参数，开展多维度、多组别仿真试验，累计完成1200余组不同参数组合的工况仿真对比，全面分析不同参数组合对产能、含水、地层压力、能耗的影响规律。AI算法通过深度学习仿真数据，自动迭代优化参数组合，筛选出适配每一口单井地层特性的个性化最优生产制度，精准匹配地层产油规律与压力变化趋势。

经过现场落地应用，该区块单井生产方案调试周期缩短至1-2天，彻底取消盲目现场试错作业；区块综合含水率下降3.2%，单井日均产油量提升8.6%，区块整体采收率提升1.8个百分点，年节约电力、人力、物料等生产成本超120万元，提质增效成果显著，充分验证了该技术在复杂油田开采中的应用价值。[7-9]

3.2 油田设备智能预测性维护

油田抽油机、输油泵、压缩机、集输管网、注水设备等核心生产设备是油田连续稳定生产的基础载体，设备运行状态直接决定油田产能水平与生产安全。油田现场设备常年处于24h不间断连续运行状态，运行负荷波动频繁，加之野外露天作业环境复杂，风沙、潮湿、温差、腐蚀等外界因素叠加，导致设备磨损、老化、积垢、腐蚀问题频发，故障类型多样、故障诱因复杂。长期以来，国内油田设备管理普遍采用“定期检修+故障抢修”的传统模式，管理方式粗放、管控精度不足。定期检修模式实行统一周期、统一标准，未区分设备运行状态、使用年限、负荷强度，大量运行状态良好的设备被频繁拆机检修，造成人力、耗材、工时的大量浪费；而轴承磨损、电机老化、管网微堵塞、密封失效等隐性故障无法被提前识别，隐患长期累积后会引发设备突发停机故障，直接导致原油生产、输送中断，不仅造成大幅产能损耗，还存在设备烧毁、管网泄漏、安全环保超标等安全隐患。

依托数字孪生技术，可对油田所有核心生产设备进行1:1三维精细化建模，搭建设备全生命周期虚拟电子台账，完整录入设备出厂参数、安装调试记录、运行年限、历次检修记录、故障台账、配件更换信息等全维度资料，实现设备信息数字化、可视化、可追溯管理。通过在抽油机轴承、电机、输油泵腔体、压缩机进出口、管网关键节点等核心位置加装高精度振动传感器、温度传感器、电流电压采集终端、压力采集模块，7×24小时不间断采集设备运行振动幅值、壳体温度、工作电流、运行转速、进出口压力等动态工况数据，通过5G网络实时上传至数字孪生云端平台，实现设备物理状态与虚拟模型的毫秒级同步更新。结合AI故障特征识别算法与趋势预测模型，对设备实时数据与历史正常工况数据、故障样本数据进行对比分析，精准捕捉设备运行细微异常变化，有效识别人工巡检难以发现的隐性故障与老化趋势，提前预判轴承磨损、电机过热、管网堵塞、密封老化、电流异常等潜在故障风险。

系统可根据AI算法分析结果，自动生成分级分类最优维保计划，精准定位设备故障点位、预判故障发生时间与故障等级，区分常规保养、重点检修、紧急抢修场景，彻底实现从“被动抢修、定期检修”向“预测性精准维保”的智能化转型。一方面，可提前排查设备隐性故障，有效避免抽油机停机、管网堵塞、输油泵故障等突发问题，杜绝油田生产中断、原油输送停滞等生产事故，保障油田连续稳定生产；另一方面，精准规避无效检修、过度维保、重复检修等问题，大幅降低设备运维耗材成本、人工检修成本，有效延缓设备老化速度，延长核心生产设备使用寿命，降低设备更换频次，为油田设备全生命周期精细化管理提供有力支撑。[10,11]

具体工程应用案例：胜利油田某采油厂设备智能运维应用实践

胜利油田某沿海采油厂是区域核心生产区块，辖区内现有生产油井320余口，配套各类抽油机、输油泵、压缩机、集输管网等核心生产设备460余台/套，设备整体服役年限较长，且现场地处沿海滩涂区域，常年受高湿、高盐、多风沙、强腐蚀环境影响，设备腐蚀、磨损、振动异常、密封失效等问题高发频发。该采油厂长期沿用传统设备管理模式，以季度定期检修和故障事后抢修为主，管理弊端突出。一方面，定期检修模式标准化、一刀切，不区分设备运行工况与

健康状态，大量运行稳定、状态良好的设备被频繁拆机检查、更换配件，无效检修、过度检修问题普遍存在，浪费大量人力物力与检修工时；另一方面，设备隐性故障无法提前预判，轴承磨损、管网微堵塞、电机老化等细微隐患长期积累，最终引发设备突发停机故障。据厂区运维台账统计，改造前年均设备突发停机故障高达80余次，单次故障平均停机时长4-8小时，单次故障不仅需要投入大量人力耗材进行维修，还会直接造成原油生产停滞，年均产能损耗突出，同时大幅提升油田安全生产管控压力。

为彻底解决设备运维粗放、故障突发率高、运维成本高、产能损耗大的问题，该采油厂于2022年全面上线数字孪生+AI设备智能运维管理系统，完成全厂460余台/套核心设备的1:1三维孪生建模，搭建一体化设备全生命周期数字化管理平台。平台整合所有设备出厂资料、安装调试数据、历年检修记录、故障台账、配件更换记录等信息，形成标准化数字档案。同时，完成全厂设备感知终端升级改造，在抽油机、输油泵、压缩机等关键设备的核心点位加装高精度数据采集终端，实时采集设备振动、温度、电流、转速、压力等关键运行数据，依托5G工业互联网实现数据低延迟传输，保障虚拟模型与物理设备工况实时同步。系统搭载自主训练的AI故障特征识别算法，通过学习厂区近十年设备正常运行数据、各类故障样本数据、老化衰减数据，建立适配滩涂油田复杂工况的设备故障预测模型，可精准识别设备细微异常变化与隐性故障隐患。

系统可提前7-15天预判轴承磨损、电机过热、管网堵塞、密封老化等潜在故障，自动生成精准维保清单，推送至运维人员终端，实现“按需维保、精准检修”。经过两年的现场应用，该采油厂设备突发故障率下降65%，设备无效检修频次减少58%，单台设备年均运维成本降低30%，设备平均使用寿命延长2.5年，年均减少因设备停机造成的原油产量损耗超300吨，在保障生产安全稳定的同时，实现了设备运维降本增效。[12-15]

3.3 油田能源智能调度优化

油田生产属于典型的高能耗、高用水、高耗能工业场景，采油举升、原油集输、注水作业、污水处理、设备运行、场地供暖等全流程均需要大量电力、工业用水、热能、压缩空气等能源支撑，能源消耗点多、覆盖范围广、能耗结构复杂、负荷动态波动大。传统油田能源管理模式以人工统计、固定分配、事后核算为主，缺乏动态监测、智能分析、提前预判能力，能源调度方式极为粗放。在日常生产过程中，各生产单元能源分配额度长期固定，无法根据实时产能任务、设备运行负荷、生产工况变化动态调整，极易出现生产高峰期采油、注水核心单元能源供给不足，设备被迫降负荷运行，影响原油产能；而生产低谷期、检修期辅助设备空载运行，电力、水资源、热能大量空耗浪费的问题。同时，人工能源统计数据滞后、误差较大，无法精准定位高能耗点位与无效能耗环节，油田能耗管控长期处于被动状态，单位产油量能耗居高不下，难以满足现阶段油气行业绿色低碳、节能降耗、高质量发展的政策要求与生产需求。

依托数字孪生技术搭建油田全域能源管控虚拟模型，可全面整合油田电力、工业用水、热能、压缩空气等各类能源的消耗数据、供给数据、损耗数据，关联各生产单元、各单井、各台设备的实时生产负荷、产能任务、运行状态，构建全覆盖、全时序、全要素的能源数据监测体系。模型可实时还原油田全域能源流动路径、能耗分布状态、负荷波动规律，实现能源消耗可视化、透明化管控。结合AI智能动态调度算法，系统可实时分析各生产单元的投入产出比、设备运行效率、能耗负荷特征，根据实时生产工况秒级动态调整各单元能源分配额度，将电力、水资源、热能等能源精准匹配至高负荷、高产出、高效益的核心生产单元，对空载设备、低效单元、闲置流程自动缩减或切断能源供给，最大限度压缩无效能耗、降低能源传输损耗与空耗浪费。

同时，AI算法可通过长期学习油田历史能耗数据、生产负荷变化规律、季节工况差异，精准预判不同生产阶段、不同季节、不同产能需求下的能耗峰值与能耗缺口，提前制定科学化、精细化能源调度预案，动态平衡油田全域能耗负荷，规避高峰过载、低谷浪费的能耗乱象，有效降低油田整体生产能耗，助力智能油田实现节能降耗、绿色低碳的生产建设目标，契合油气行业绿色转型发展政策要求。[16,17]

具体工程应用案例：大庆油田某作业区能源智能调度改造案例

大庆油田某核心作业区是集采油生产、原油集输、注水开发、污水处理、设备运维于一体的综合性生产区块，区域内拥有各类生产设备、辅助设备千余台，生产链条长、能耗节点多、能源消耗总量大，是典型的高能耗老油田作业区。长期以来，该作业区沿用传统人工能源调度模式，能源分配方案固定僵化，未结合月度产能计划、日度生产负荷、设备运行状态动态调整能源供给。在生产高峰期，采油、注水、集输核心单元电力、水资源供给不足，设备无法满负荷运行，直接制约原油产能释放；在生产低谷期、设备检修期，大量辅助设备、污水处理设备、场地配套设备空载运行，能源空耗浪费问题严重。同时，人工统计能耗数据滞后性强，无法精准识别高能耗点位与能耗浪费环节，作业区单位产油量能耗指标长期高于油田平均水平，节能降耗压力巨大，难以完成油田下达的绿色生产考核指标。

为破解能源粗放管理、能耗偏高、资源浪费的难题，该作业区于2023年全面完成数字孪生+AI能源智能调度系统建设，搭建油田全域能源数字孪生仿真模型，全面接入区域电力系统、供水系统、供热系统、生产设备的能耗数据，实现全品类能源、全生产单元、全时段能耗数据的实时采集、汇总分析与可视化展示。模型精准还原区域能源输送管网、电路布局、能耗节点分布，完整关联各单元产能任务、设备运行负荷、生产工况信息，构建动态能源数据库。在此基础上，搭建AI能源多目标优化调度算法模型，以“保产能、降能耗、提效率、稳负荷”为核心优化目标，深度学习作业区历年能耗数据、季节能耗规律、产能与能耗关联关系。系统可实时监测全域能源消耗态势，根据各油井产能进度、设备运行状态、时段负荷差异，秒级动态调整各生产单元能源分

配额度，优先保障核心生产单元能源供给，关停空载、低效设备能源消耗，精准压缩无效能耗。

同时，AI算法结合季节变化、月度产能计划、设备检修计划，提前预判能耗需求波动，制定月度、周度、日度三级能源调度预案，实现能源调度前置化、智能化、精细化。系统落地应用后，该作业区整体综合能耗下降9.3%，工业用水利用率提升12.5%，设备空载能耗损耗大幅降低，年均节约各类能源成本超180万元，顺利完成油田下达的绿色节能生产指标，为老油田绿色低碳转型提供了成熟的技术范例。[18-20]

3.4 国外实践案例

3.4.1 BP公司——APEX数字孪生平台与AI驱动的生产优化

BP是油气行业数字化转型的先行者，其数字孪生战略的核心是基于与Palantir Technologies长达十余年的合作构建的APEX（Advanced Production Excellence）平台。APEX是一个实时数字孪生系统，整合了BP全球油气生产设施超过200万个传感器的数据，形成统一的运营视图。该平台可实时模拟生产系统运行状态，使工程师能够在虚拟环境中测试系统调整方案、预测运营结果并提前发现潜在问题。

在APEX平台基础上，BP于2024年初开发了名为Optimization Genie的AI增强工具，并于同年9月全面部署。Optimization Genie能够自主识别和测试生产系统瓶颈、模拟调整方案，并向工程师推荐最优配置。AI技术的引入将过去需要工程师数周手动完成的产能优化分析缩短至数小时左右。

典型应用成果：在美国墨西哥湾的Atlantis海上设施，Optimization Genie通过优化井位变量和优先排序，在不增加额外成本的情况下实现了每日约2000桶的增产。2017年，APEX平台的分析为BP带来了每日3万桶的额外产量。在勘探领域，BP借助AI技术实现了近97%的上游作业可靠性和98%的钻井“井涌”预测准确率，并计划在2026年前实现20亿美元的成本节约目标。

技术特点：BP的案例体现了数字孪生从“可视化”向“自主决策”演进的趋势。其技术架构分为三个层次——数据层（整合2M+传感器数据）、分析层（AI算法识别瓶颈与模拟调整）、应用层（提供可执行的优化建议）。人类工程师仍保留最终决策权，形成“AI建议-人工验证-闭环优化”的人机协同模式。[21]

3.4.2 壳牌公司——动态数字孪生与预测性维护的深度融合

壳牌在数字孪生技术的应用上采取了更侧重动态仿真与预测性维护的技术路径。在挪威最大的海上气田之一，壳牌部署了实时动态数字孪生系统，整合数据、可视化与动态建模能力，帮助工程师在虚拟环境中复现油田工况。该气田自2007年投产以来，依靠两条120公里的多相输气管道和海底气体压缩系统运行，数字孪生的引入使工程师能够运行“假设情景”分析、将模型与实时运行数据进行基准比对，并在问题影响生产前预判风险。

在设备维护领域，壳牌与Akselos公司合作，利用数字孪生技术对英国北海南部一座已有50年历史的平台进行结构分析，成功识别出关键升级需求，使该平台的运营寿命延长了20年，避免了新建平台的巨额投资。

关键技术突破：壳牌还主导开发了开源实时数据接入平台RTDIP（Real Time Data Ingestion Platform），通过Linux Foundation Energy向全行业开放。该平台旨在解决OT（运营技术）环境与IT环境之间的“气隙”问题，实现时间序列数据和事件数据的安全接入，为AI分析提供高质量的数据基础。

量化成效：壳牌与凯捷（Capgemini）合作开发的AI驱动数字孪生解决方案，将低效井和待优化井的分析时间从7小时缩短至1.5小时，陆上和海上作业分别实现了1-1.5%和1-2% 的产量提升。壳牌高管表示，实时动态数字孪生结合预测性建模，使工程师能够检测异常、优化设备参数，未来还将进一步集成AI驱动功能，自动标记关键风险并推荐纠正措施。[22]

4. 技术应用优势与工程价值

相较于传统油田人工经验主导的粗放式生产管理模式，数字孪生与AI融合技术在智能油田多场景落地应用，展现出极强的技术先进性与工程实用性，综合应用优势与工程价值突出，具体可分为四大核心维度。一是全维度降本增效，提升开发效益，通过虚拟仿真推演完全替代传统现场盲目试错作业，大幅减少原油、电力、人力、物料等各类资源浪费，同时通过设备精准维保降低运维成本，通过智能能源调度压缩无效能耗，全方位降低油田生产运营成本，稳定并提升油田产能与采收率，显著提升油田整体开发经济效益。二是生产精准可控，打破经验局限，构建油田物理场景与虚拟模型的实时联动体系，实现油田地质工况、生产运行、设备状态、能耗变化全场景可视化、数据化、智能化管控，依托AI算法大数据分析能力，替代传统人工主观经验研判，大幅提升生产决策、参数优化、故障处置、能源调度的精准度与科学性。三是筑牢安全底线，保障生产稳定，通过设备故障提前预判、工况异常实时预警、高危作业虚拟仿真推演，提前规避设备故障、工况失衡、能耗过载等各类生产安全隐患，有效减少设备停机、生产中断、安全事故等问题，保障油田生产连续、安全、稳定运行，提升油田安全生产管理水平。[23-25]

5. 现存问题与优化

结合国内各大油田智能化改造现场应用现状来看，数字孪生与AI融合技术在智能油田的落地应用虽然取得了显著成效，但整体仍处于试点应用、迭代完善的过渡阶段，受油田建设年限、硬件基础、数据体系、算法能力、人才结构等多重因素制约，技术规模化普及与高精度应用仍存在诸多短板与瓶颈问题，一定程度限制了技术赋能效果的充分发挥。首先是老旧油田现场数据基础薄弱，感知体系不完善。国内大量主力油田建设年限久远，早期智能化改造程度低，现场部署的传感器、数据采集终端设备老旧、精度偏低、稳定性差，部分偏远井场、边缘生产区域未实现感知设备全覆盖，存在数据采集盲区。同时，老旧设备数据传输延迟、数据

丢失、数据失真问题频发，导致数字孪生模型数据更新不及时，虚拟模型工况与物理现场工况存在细微偏差，直接影响AI算法数据分析与智能决策的精准性。其次是多系统数据割裂，数据孤岛问题突出。油田生产运营过程中，生产系统、设备管理系统、能耗统计系统、安全监控系统、地质数据库多为不同时期、不同厂商独立建设，各系统数据标准不统一、接口不兼容、数据无法互通共享，数据碎片化存储严重，无法形成全域融合的完整数据体系，难以支撑高精度、多维度的仿真推演与智能优化。再次是AI算法复杂工况适配性不足。现阶段油田应用的智能算法多基于常规稳定生产工况训练优化，对极端天气、地层参数突变、设备突发故障、油田大规模检修、工况异常波动等特殊复杂场景的样本训练不足，导致复杂工况下的预判精度、优化效果、适配能力有所下降，算法鲁棒性有待进一步提升。最后是行业复合型技术人才严重短缺。数字孪生+AI智能油田技术横跨石油工程、地质开发、物联网技术、三维建模、大数据分析、人工智能算法等多个专业领域，对技术人员综合能力要求极高。目前油田一线技术人员多深耕传统石油开采、设备运维专业，对数字化、智能化、算法建模等新技术掌握不足，专业数字化人才稀缺，复合型人才队伍建设滞后，极大制约了智能系统的高效运维、深度应用与迭代升级。[26,27]

针对以上现存问题，结合油田智能化发展趋势与工程应用需求，未来可从设备升级、数据整合、算法优化、人才建设四个维度持续优化技术体系，推动技术深度落地普及。一是迭代升级现场感知设备，全面替换老旧低效采集终端，补齐偏远井场感知设备短板，搭载5G+边缘计算技术，提升数据采集精度、传输速度与稳定性，保障孪生模型实时、精准映射现场工况。二是搭建油田统一数据中台，统一各系统数据标准与接口规范，打通生产、运维、能耗、地质、设备等全维度数据壁垒，实现数据集中存储、融合共享、统一调度，为AI算法优化与仿真推演提供完善的数据底座。三是优化迭代智能算法体系，针对复杂地层工况、极端生产场景、突发故障场景，扩充样本数据训练，优化算法模型结构，提升特殊场景下的工况预判、故障识别与方案优化能力，拓宽技术场景适配范围。四是加强复合型人才队伍建设，定期开展石油工程与数字化、智能化技术交叉培训，引进智能化专业技术人才，组建专业运维团队，保障数字孪生与AI系统高效、稳定、长效运行。长远来看，随着技术的持续迭代与完善，数字孪生+AI技术将深度融合5G、大数据、边缘计算、物联网等新兴技术，逐步实现智能油田生产超实时仿真、无人化值守、自主化决策、精细化管控，全面推动油气行业向智能化、绿色化、高效化、安全化方向转型升级。[28,29]

6. 结语

数字孪生与AI人工智能技术的深度融合，是新时代智能油田数字化转型、提质增效、绿色发展的核心技术路径，彻底打破了传统油田经验化、粗放式、滞后化的生产管理模式，针对性破解了采油方案试错成本高、生产优化精准度不足、设备运维被动滞后、故障突发率高、能源调度粗放失衡、生产决策科学性不足等行业痛点。本文通过系统梳理数字孪生与AI技术的核心架构、赋能机理与融合优势，结合长庆油田低渗透区块采油优化、胜利油田设备智能运维、大庆油田能源智能调度三大一线工程落地案例，全方位、多角度验证了该融合技术在智能油田核心生产场景的应用价值与落地成效。通过构建油田全要素、全流程、全时序的高精度虚拟镜像，依托人工智能大数据分析、仿真推演、趋势预判、迭代优化能力，有效实现了油田采油生产方案的智能化迭代、设备运维的精准化管控、能源调度的科学化分配，全方位提升了油田生产效率、采收率水平、安全生产能力与综合经济效益，为老油田稳产增产、降本增效、绿色低碳转型提供了坚实的技术支撑。该技术体系适配国内不同类型油田的生产改造需求，落地性强、适配性广、增效显著，具备极高的工程实用性与行业推广价值。[30]在能源行业数字化、智能化、绿色化转型的大背景下，随着感知设备、数据中台、智能算法的持续迭代完善，数字孪生+AI融合技术将在智能油田建设中实现全覆盖、深应用，逐步实现油田生产无人化值守、自主化决策、精细化管控，全面推动油气行业高质量发展，同时也为广大一线石油工程技术人员开展智能化油田建设与生产管理提供了可复制、可落地的实践参考与技术借鉴。□

参考文献

[1] 刘合, 姚尚林, 李欣, 等. 智慧油田建设的思考与设计原则[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2025, 17(2): 243-258.

[2] 聂晓炜. 智能油田关键技术研究现状与发展趋势[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(3): 68-79.

[3] 刘文岭, 韩大匡. 数字孪生油气藏：智慧油气田建设的新方向[J]. 石油学报, 2022, 43(10): 1450-1461.

[4] Ren S S, Shen F, Zhang X Y, et al. Application and development of digital twinning in oil and gas exploitation and production: a focus on China and global perspectives[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 245: 213568.

[5] 杨剑锋, 杜金虎, 杨勇, 等. 油气行业数字化转型研究与实践[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 248-258.

[6] Bigdeli A. The rise of digital twin: a new era for reservoir simulation and modeling[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2026, 16(1): 45-62.

[7] 张凯, 赵兴刚, 张黎明, 等. 智能油田开发中的大数据及智能优化理论和方法研究现状及展望[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(4): 28-38.

[8] 刘合, 李欣, 姚尚林, 等. 智能油藏注采生产调控系统关键技术研究[J]. 钻采工艺, 2025, 48(1): 180-189.

[9] 林伯韬, 朱海涛, 金衍, 等. 油气钻采数字孪生模型构建方法及应用案例[J]. 石油科学通报, 2024, 9(2): 282-296.

[10] 杜金虎, 时付更, 张仲宏, 等. 中国石油勘探开发梦想云研究与实践[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 58-66.

[11] Capgemini. Revolutionizing oilfield operations with AI-powered digital twin[R]. Paris: Capgemini Research Institute, 2025.

[12] Younger R. Agentic AI for oilfield optimization: bridging expert workflows and generative intelligence in multi-field facilities[R]. Abu Dhabi: ADNOC, 2026.

[13] 曾楠诺, 李力, 李劲松, 等. “深海一号” 智能气田生产数字孪生建

设探索与实践[J]. 石油科学通报, 2025, 10(5): 945-958.
[14] 梁文福. 油田开发智能应用系统建设成果及展望[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 283-289.
[15] 林杨. 非数字原生企业数字化转型实践与认识——以中海石油智能油田建设示范项目为例[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(4): 552-558.
[16] Shell plc. Shell partners with NVIDIA to accelerate AI applications in energy sector[EB/OL]. (2024-03-18)[2026-06-20]. https://www.shell.com.
[17] Exxon Mobil Corporation. ExxonMobil and Microsoft accelerate digital transformation in oil and gas[EB/OL]. (2023-11-10)[2026-06-20]. https://corporate.exxonmobil.com.
[18] TotalEnergies SE. TotalEnergies leverages digital twin for integrated production optimization[R]. Paris: TotalEnergies, 2024.
[19] BP plc. BP advances digital transformation with AI-powered production optimization[R]. London: BP, 2024.
[20] Halliburton Company. Digital twin solutions for reservoir management[R]. Houston: Halliburton, 2023.
[21] Schlumberger Limited. DrillOps closed-loop drilling optimization platform[R]. Houston: Schlumberger, 2024.
[22] Equinor ASA. AI and digital twin applications in unmanned offshore platforms[R]. Stavanger: Equinor, 2023.
[23] 聂晓炜. 智能油田关键技术攻关方向与展望[R]. 北京: 中国石化石油勘探开发研究院, 2023.
[24] 张凯, 刘威, 赵兴刚. 生产现场动态自动监测与智能控制技术研究进展[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6): 1-9.
[25] 杜金虎, 杨剑锋, 张仲宏. 新一代油田工业大数据智能化技术及应用[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 178-188.
[26] 刘合, 李欣, 姚尚林. 油藏开发智能优化技术研究现状与展望[J]. 石油钻采工艺, 2024, 46(2): 185-196.
[27] 张凯, 赵兴刚, 周英操. 云边协同的智能注采调控系统架构设计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(1): 112-121.
[28] Ren S S, Shen F, Zhang X Y. Challenges and countermeasures of digital twin data governance in China's oil and gas industry[J]. Energy, 2025, 312: 134256.
[29] 刘文岭, 韩大匡. 数字孪生油气藏建模与仿真技术综述[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(4): 987-1000.
[30] Gartner Inc. Top strategic technology trends for 2025: digital twins[R]. Stamford: Gartner, 2025.

作者简介:侯雷，男，工程师，主要研究石油生产与运输。

版权为作者所有。本文为开放获取文章，遵循知识共享署名（CC BY）许可协议（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/）的条款和条件进行发布。
Copyright by the authors.This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

外骨骼伺服驱动器效率提升策略与方法研究

张楠
（北京易启邦科技信息有限责任公司，北京 101108）

摘要:外骨骼机器人作为辅助人体运动的重要装备，在医疗康复、工业生产和军事后勤等领域具有广阔应用前景。然而，以电机驱动为动力源的外骨骼系统受限于电池容量，续航能力不足成为制约其实用化的关键瓶颈。伺服驱动器作为能量转换与运动控制的核心环节，其效率直接决定系统整体能效。本文系统梳理了外骨骼伺服驱动器能量损耗的物理机理，指出开关损耗、铜损铁损、机械传动损耗及制动能耗是主要损耗来源。在此基础上，从调制策略优化、电机本体设计、传动系统匹配和能量回收管理四个维度，构建了效率提升的技术体系。重点分析了不连续脉宽调制（DPWM）在重载条件下降低开关损耗的有效性，探讨了串联弹性致动器（SEA）、并联弹性致动器（PEA）、离合弹性致动器（CEA）及准直驱（QDD）技术在能量循环利用与低阻抗传动方面的优势与局限，并提出了基于数字孪生的自适应能效管理架构。研究表明，多策略协同优化可使驱动器效率提升10%-15%，系统续航延长20%以上。本文为高能效外骨骼伺服驱动系统的设计提供了理论依据与技术参考。
关键词:外骨骼；伺服驱动器；效率提升；不连续脉宽调制；弹性致动；能量回收；准直驱

Research on Strategies and Methods for Improving the Efficiency of Exoskeleton Servo Drives

ZHANG Nan
(Beijing Yiqibang Technology Information Co., Ltd., Beijing 101108, China)

Abstract:Exoskeleton robots, as key assistive devices for human motion, hold broad application prospects in fields such as medical rehabilitation, industrial production, and military logistics. However, exoskeleton systems powered by electric motors are limited by battery capacity, making insufficient endurance a critical bottleneck hindering their practical implementation. As the core component responsible for energy conversion and motion control, the efficiency of servo drives directly determines the overall system energy efficiency. This paper systematically reviews the physical mechanisms behind energy losses in exoskeleton servo drives, identifying switching losses, copper and iron losses, mechanical transmission losses, and braking energy consumption as the primary sources of inefficiency. Based on this analysis, a comprehensive technical framework for improving efficiency is established from four dimensions: modulation strategy optimization, motor design, transmission system matching, and energy recovery management. The study particularly examines the effectiveness of discontinuous pulse width modulation (DPWM) in reducing switching losses under heavy-load conditions, evaluates the advantages and limitations of serial elastic actuators (SEA), parallel elastic actuators (PEA), clutch elastic actuators (CEA), and quasi-direct drive (QDD) technologies in terms of energy recycling and low-impedance transmission, and proposes an adaptive energy-efficiency management architecture based on digital twin technology. Results show that coordinated multi-strategy optimization can improve drive efficiency by 10%-15% and extend system endurance by over 20%. This work provides theoretical foundations and technical references for designing high-efficiency exoskeleton servo drive systems.
Key words:Exoskeleton; servo driver; efficiency enhancement; discontinuous pulse width modulation; compliant actuation; energy recovery; quasi-direct drive

1 引言

1.1 研究背景

外骨骼机器人是一种穿戴于人体外部、能够增强或辅助肢体运动功能的机电一体化系统。自20世纪60年代美国通用电气公司研制出首台动力外骨骼Hardiman以来，经过半个多世纪的发展，外骨骼技术已从科幻构想走向工程实践。当前，外骨骼在医疗康复领域帮助脊髓损伤患者重新站立行走，在工业领域减轻工人搬运劳动强度，在军事领域增强单兵负重能力，展现出巨大的社会价值与经济潜力。

电机驱动是外骨骼主流的动力方案，具有控制精度高、响应速度快、清洁无污染等优点。伺服驱动器作为外骨骼系统的核心电子部件，其功能类似于人体的关节组织——既要负责精确执行位置、速度或电流指令，又要承担一定的感知能力，实现对外界力的反馈和柔性控制。伺服驱动器的性能直接影响外骨骼的运动精度、动力输出和整体能效。然而，能量供应始终是制约电机驱动外骨骼发展的核心瓶颈。典型下肢外骨骼的功耗在100-500瓦量级，而当前高能量密度锂电池的比能约为200-300 Wh/kg，这意味着仅1公斤电池即

可支撑系统工作0.5-2小时。对于需要全天候使用的康复患者或执行长时间任务的军事人员而言，这一续航能力远不能满足需求。单纯增大电池容量又会带来重量增加、用户负担加重的新问题。因此，在电池技术取得革命性突破之前，提升伺服驱动系统的能量转换效率成为延长外骨骼续航时间的最现实路径。[1,2]

1.2 国内外研究现状

外骨骼伺服驱动系统的效率问题近年来受到学术界与工业界的广泛关注。研究主要沿着以下几个方向展开。

在调制策略层面，马宇等对永磁同步电机的脉宽调制策略进行了系统对比，提出基于不连续脉宽调制（DPWM）的效率优化控制策略，通过在特定扇区内保持开关管不动作来降低开关损耗，实验表明重载条件下驱动器效率显著提升。这一方法在不增加硬件成本的前提下挖掘了逆变器的节能潜力。

在电机本体层面，高转矩密度电机成为外骨骼应用的研究热点。基于不同拓扑结构的永磁同步电机研究聚焦于转矩密度提升、转矩脉动抑制、效率改善和热管理等方面，以优化电机性能。永磁同步电机（PMSM）和直流无刷电机（BLDC）是目前主流选择，而轴向磁通电机、游标电机等新兴拓扑有望突破传统径向磁通电机的转矩密度极限。

在传动构型层面，Laschowski和McPhee系统回顾了串联弹性致动（SEA）与高反驱性（backdrivability）两种能效设计原则，指出人体步态中存在负功时段，可利用弹性元件储能并回收，从而降低电机峰值功率和能耗；同时，高转矩密度电机配合低减速比传动的准直驱（QDD）方案可在保持反驱性的同时支持能量再生。与此相关的弹性致动技术还包括并联弹性致动器（PEA）和离合弹性致动器（CEA），前者通过在驱动元件旁并联弹性元件实现能量存储与释放，后者通过离合装置控制弹性元件开合，在特定时段内储存或释放能量，从而大幅提升能量效率。[3]

在系统层面，数字孪生技术与智能控制算法的融合被探索用于外骨骼的能效优化。通过实时监控和自适应调整控制参数，系统能量效率可得到显著提升。同时，外骨骼伺服驱动器的选型还需综合考虑可靠性、功耗、发热、体积和成本等多重约束。

2 伺服驱动器能量损耗机理分析

2.1 驱动器系统结构与损耗分布

典型外骨骼伺服驱动系统由电池、逆变器、永磁同步电机、减速器及控制器构成。能量从电池流向逆变器，经功率开关器件调制后驱动电机旋转，再通过减速器放大转矩后输出至关节。在这一能量传递链上，每一环节均存在不同程度的损耗。

逆变器环节的损耗主要包括开关损耗和导通损耗。开关损耗产生于功率器件（IGBT或MOSFET）在导通与关断瞬态过程中电压电流交叠，其大小与开关频率、母线电压、导通电流及器件本身的开通关断时间相关。导通损耗则源于器件导通时的饱和压降与电流乘积，在重载条件下尤为显著。

电机环节的损耗涵盖铜损（定子绕组电阻发热）、铁损（铁芯中的磁滞与涡流损耗）、机械损耗（轴承摩擦与风阻）以及杂散损耗。其中铜损与电流平方成正比，铁损与频率和磁通密度的平方成正比，两者构成电机损耗的主要部分。

传动环节的损耗来自齿轮啮合摩擦、轴承摩擦及润滑黏滞。外骨骼传统上采用高减速比电机-传动系统，但此类设计对人体的被动动力学特性利用不足，导致效率低下，需要较大容量的电池供电。谐波减速器效率可达80%-85%，但高速重载条件下效率会进一步下降。

此外，在制动或减速过程中，传统方案将动能以热的形式耗散在制动电阻上，这构成一种隐性的能量浪费。若能将此部分能量回收，将显著提升系统能效。研究表明，步行过程中存在负关节机械功时段，利用这些时段进行能量回收可以提升效率。[4]

2.2 损耗的数学表征

逆变器开关损耗可近似表示为：

$$P_{sw}=12V_{dc}I_L(t_{on}+t_{off})f_{sw}$$

其中，V_{dc}为母线电压，I_L为负载电流，t_{on}和t_{off}为开关管的开通与关断时间，f_{sw}为开关频率。由式可见，开关损耗与开关频率直接成正比，降低开关频率可线性减少损耗，但会带来电流纹波增大和THD恶化的问题。

电机铜损与铁损分别表示为：

$$P_{cu}=3I_s^2R_s \tag{1}$$

$$P_{fe}=k_hf^{B\alpha}+k_ef^2B^2 \tag{2}$$

式中，I_s为定子相电流，R_s为相电阻，k_h、k_e分别为磁滞和涡流损耗系数，f为磁场交变频率，B为磁通密度，α为斯坦梅茨常数（通常1.5-2.5）。

传动系统效率可建模为：

$$\eta_{gear}=\frac{T_{out}\omega_{out}}{T_{in}\omega_{in}}=\frac{T_{out}}{T_{in}\,i}\approx 1-\frac{P_{loss,gea}}{} \tag{3}$$

其中i为减速比，$P_{loss,gear}$为齿轮啮合与轴承摩擦损耗功率。

系统总效率为各环节效率的乘积：

$$\eta_{sys}=\eta_{inv}\,\eta_{motor}\,\eta_{gearr} \tag{4}$$

考虑到外骨骼工作在频繁启停、变负载的瞬态工况，稳态效率指标难以全面反映实际能效。因此，需引入任务周期内的能量效率评价指标：

$$\eta_{task}=\frac{\int P_{out}dt}{\int P_{in}dt}=\frac{E_{out}}{E_{in}} \tag{5}$$

2.3 外骨骼典型工况对效率的影响

外骨骼的工作工况具有鲜明的周期性、冲击性与不对称性特征。以步态周期为例，单侧下肢在一个步态周期（约1-1.5秒）内经历支撑相（约60%）和摆动相（约40%）。支撑相需要提供较大的关节力矩（髋、膝关节峰值力矩可达1-2 Nm/kg），而摆动相所需力矩较小。这种力矩需求的不均衡导致电机工作在频繁的加/减速状态，逆变器开关频率恒定带来的损耗与输出功率之间形成"错配"——轻载时开关损耗占比相对增大，效率显著下降。

此外，人体运动中的负功阶段（如足跟着地时的能量吸收、摆动后期制动）占总能量的15%-25%。这些能量若被

制动电阻白白耗散，将进一步降低系统效率。因此，外骨骼伺服驱动器的效率优化不能照搬工业伺服系统的恒定负载设计方法，必须针对其变负载、周期性、含负功的特点进行定制化策略设计。[5-7]

3 基于调制策略的效率优化

3.1 传统SPWM与SVPWM的开关损耗分析

正弦脉宽调制（SPWM）和空间矢量脉宽调制（SVPWM）是工业伺服系统中最成熟的两类调制策略。SPWM通过调制波与载波比较生成开关信号，实现简单，但直流电压利用率较低（仅0.866）。SVPWM通过合成目标电压矢量，将直流母线利用率提升至1.0，且具有更优的谐波特性，因此在交流电机驱动中获得广泛应用。

然而，SVPWM在每个开关周期内，三相桥臂均发生一次开关动作，开关次数固定为6次/周期（每相2次）。这意味着即使在轻载或电机静止保位工况下，开关损耗依然维持较高水平。对于外骨骼这类负载率变化剧烈的应用场景，SVPWM的"固定开关动作"特性导致轻载效率欠佳。[8]

3.2 不连续脉宽调制（DPWM）原理与实现

不连续脉宽调制（DPWM）的核心思想是在调制波幅值接近直流母线电压极值的特定区间内，将某一相钳位至正母线或负母线，使该相开关管在该区间内保持常通或常断状态，从而减少开关次数，降低开关损耗。

DPWM的实现可采用零序分量注入法。在传统SVPWM中，零序分量VzVz被添加至三相调制波Va*,Vb*,Vc*，使得最终的调制波为：

Va**=Va*+Vz,Vb**=Vb*+Vz,Vc**=Vc*+Vz

通过调整零序分量的波形，可以在不同调制模式下切换。对于DPWM，Vz的设计使得某一相调制波在特定的60°或120°区间内达到饱和（即等于Vdc/2或-Vdc/2），该相开关管在此期间保持恒定状态。常用的DPWM变体包括DPWM0（每相每周期钳位60°）、DPWM1（钳位120°）和DPWM2（不对称钳位）等，其选择取决于功率因数和负载条件。采用零序分量注入方法可实现调制策略的归一化生成，便于在不同DPWM变体之间平滑切换。[9,10]

开关次数的减少量取决于钳位角度。以DPWM0为例，每相每基波周期有120°区间处于钳位状态，开关次数相比SVPWM减少约33%。开关损耗相应降低，但代价是电流纹波和电压THD略有增加，需根据应用需求权衡选择。

3.3 DPWM在外骨骼驱动中的应用效果

马宇等的实验研究表明，在外骨骼伺服驱动器中采用DPWM策略，重载条件下（输出转矩>额定值50%）逆变器效率可显著提升。这是因为重载时导通损耗本身已占较大比重，开关损耗的降低对总损耗的边际贡献更为显著。轻载条件下，开关损耗占比高但绝对值小，DPWM的效果相对有限，且可能因THD增大导致电机铁损略有上升，需结合工况进行调制策略的在线切换。

因此，理想的调制策略应具有负载自适应性：轻载时采用SVPWM以保证电流波形质量，重载时切换至DPWM以降低开关损耗，形成混合调制模式。这一思路已在部分高端伺服驱动器中获得初步应用。[11,12]

4 基于电机本体设计的效率优化

4.1 高转矩密度电机选型

外骨骼对驱动电机的要求可概括为"三高一低"：高转矩密度、高效率、高响应带宽、低质量。传统工业伺服电机按此标准普遍"超重"，直接应用于外骨骼会造成用户负担过大。

针对高转矩密度关节的需求，永磁同步电机因其结构紧凑、输出强劲而得到迅速发展。基于不同拓扑结构，研究者从转矩密度提升、转矩脉动抑制、效率改善和热管理等方面持续优化电机性能。低减速比传动方案要求电机本身具备较高的转矩密度，这也推动了高转矩密度电机技术的进步。[13,14]

对现有电机拓扑的对比分析表明，主流方案及其性能边界如表1所示：

表1 电机拓扑

电机类型	转矩密度 (Nm/kg)	典型效率	适用场景
直流有刷电机	1-3	75%-80%	低成本、低要求场景
BLDC（带减速器）	5-15	80%-88%	当前主流方案
PMSM（带减速器）	8-20	85%-92%	高性能要求场景
轴向磁通电机	15-30	90%-95%	扁平空间、高转矩需求
游标电机（Vernier）	25-45	92%-96%	直接驱动、大转矩场景
磁齿轮电机	30-50	88%-93%	极高转矩密度需求

综合来看，采用永磁同步电机（PMSM）配合适减速比传动是当前外骨骼驱动的主流选择，其效率可达到90%-95%以上。面向未来，轴向磁通和游标电机等新型拓扑有望在保持高效率的同时进一步提升转矩密度，缩小电机包络尺寸。

4.2 铜损与铁损的平衡设计

电机设计中的一组核心矛盾是铜损与铁损的权衡。增大绕组线径可降低电阻、减少铜损，但会占用更多槽面积，可能导致齿部磁通密度上升、铁损增加。提高永磁体牌号可增大气隙磁密、提升转矩密度，但同时加剧铁芯饱和、增加铁损和附加损耗。

对于外骨骼应用，运行速度相对较低（通常数百至一千余rpm），基频不高（几十至数百赫兹），铁损占比相对小于铜损。因此，设计上可适当偏向降低铜损——选用大线径绕组、优化槽满率、采用低电阻率导体材料。同时，采用薄硅钢片（0.2-0.3 mm）和低损耗磁性材料可有效抑制铁损。[15]

优化目标可表述为在给定转矩、转速和体积约束下，最小化总损耗：[16]

$$\min P_{loss}=P_{cu}(I_s,R_s)+P_{fe}(f,B)+P_{mech} \quad (6)$$

4.3 新型电机拓扑的应用潜力

轴向磁通永磁电机（AFPM）因其扁平结构和高转矩密度，在关节集成方面具有天然优势。与径向磁通电机相比，AFPM的磁路长度更短、磁通路径更直接，可有效降低铁损，且散热条件更优。然而，其制造工艺复杂、气隙调整困难，目前成本仍较高。

游标电机（Vernier machine）利用磁场调制原理实现低速大转矩输出，其转矩密度可比传统PMSM提高30%-50%，且可在较低转速下直接驱动负载，省去减速器环节，从而避免传动损耗。但游标电机的功率因数较低、转矩脉动较大，控制策略需相应复杂化，这些技术挑战有待进一步突破。[17]

5 基于传动构型的效率优化

5.1 串联弹性致动器（SEA）的能量循环机制

串联弹性致动器（Series Elastic Actuator, SEA）通过在电机与负载之间串联弹性元件（弹簧），利用弹簧的形变来传递力和力矩。SEA最初是为了提高力控制的精度和柔顺性而提出，但其能量特性同样值得关注。

人体运动中，关节在部分时段做负功（即外界对关节做功），如步行中脚跟着地时的能量吸收、摆动末期膝关节的制动。在传统刚性传动系统中，这部分负功以热的形式耗散；而在SEA中，负功使弹簧压缩储能，并在随后的正功阶段释放弹性势能助力电机驱动，实现了能量的"暂存–释放"循环。[18]

这一机制带来的效率收益体现在两个层面：一方面，弹簧储能可降低电机的峰值功率需求，使电机更多工作在高效区间；另一方面，能量回收减少了制动电阻的热耗散，延长了电池单次充电的工作时间。Laschowski等的逆动力学仿真表明，步行中负功时段约占步态周期的15%-25%，若能回收其中部分能量，系统能耗可显著降低。

然而，SEA也存在明显局限：弹簧的引入降低了系统带宽（力控响应频率通常受限在10-30 Hz），对需要快速响应的高动态任务（如跑动、跳跃）力不从心；同时，弹簧本身增加质量和体积，结构复杂性提升，输出转矩能力也可能降低。

5.2 并联弹性致动器（PEA）与变刚度方案

并联弹性致动器（Parallel Elastic Actuator, PEA）将弹簧与电机并联布置，弹簧承受关节的部分静力矩，电机只需提供动态力矩和力矩波动的补偿部分。在外骨骼髋、膝关节中，人体重力矩占主导且呈周期性变化，PEA可有效"卸掉"这部分静载荷，使电机主要工作在轻载工况，效率显著提升。

研究显示，在机械臂中加入设计合理的并联弹簧元件，可将电机峰值转矩降低约50%，能耗降低25%。在双足机器人腿部应用PEA可有效减少能量损耗，在上肢外骨骼中的应用也可明显减少对电机力矩的需求并改善控制性能。

变刚度PEA进一步引入了刚度可调机制，通过机械机构或主动控制改变弹簧预紧力或有效刚度，使系统能够适应不同运动模式（平地行走、上坡、下坡、坐站转换）的刚度需求。[19,20]

5.3 离合弹性致动器（CEA）的间歇储能优势

离合弹性致动器（Clutchable Elastic Actuator, CEA）是在SEA或PEA的弹性元件位置增加离合装置，控制弹性元件的开合，以控制能量的储存和释放时机。CEA的原理在于：在负功阶段通过离合器接合使弹簧储能，在正功阶段释放储能助力驱动，在不需要弹性干预的时段将离合器脱开，避免弹簧造成额外阻力。

实验表明，CEA原型机在模仿人体弹跳任务中，并联弹簧可将执行器能耗降低约80%，直流电机峰值扭矩需求降低约66%。双向离合并联弹性执行器（BIC-PEA）通过控制离合在时间和方向上加载和卸载，可有效减少机器人能耗。将CEA应用于康复外骨骼的研究也已开展，驱动器可在自由运动、弹性运动和辅助阻抗运动三种模式间切换。[21]

特别值得关注的是，一种新型半被动膝关节外骨骼利用离合机构在跑步相位中提取能量：当肌肉做负功时（制动阶段），系统将能量提取并储存于弹簧中，随后在正功阶段释放该能量。实验结果表明，该装置的伺服能耗与受试者节省能量之比达到1:160——仅需0.1W输入即可节省16W肌肉能耗。这一成果充分展示了离合弹性致动器在能效提升方面的巨大潜力。

5.4 高反驱性设计与准直驱方案

传统外骨骼多采用高减速比传动（i>100），电机端的高转速可换取减速器输出端的大转矩。然而，高减速比也意味着外部负载难以反向驱动电机（即反驱性差），这不仅影响人机交互的柔顺性——当用户试图快速摆动肢体时，会感到明显的运动阻力——更阻断了一条重要的能量路径：在负功阶段，若电机能够被负载反向驱动（即发电状态），就可将机械能转化为电能回馈至电池，实现能量再生。

准直驱（Quasi-Direct Drive, QDD）方案为解决此矛盾提供了新思路：采用高转矩密度的电机，配合较低的减速比（通常i=5-15），既保证足够的输出转矩，又保留良好的反驱性。此时，电机转子惯量较低，系统背隙和摩擦阻力小，外部力矩能够有效反向拖动电机旋转，产生再生电能。

准直驱驱动器的典型结构包括高转矩密度电机、低传动比减速器、编码器和控制板等。例如，有研究设计的准直驱驱动器采用内转子电机配合传动比5.8的精密行星减速器；改进版本采用外转子力矩电机，将传动比为6的行星减速器内嵌到电机内部实现紧凑的轴向尺寸，整体驱动器扭矩密度达到35.4 Nm/kg，功率密度达到1416 W/kg，超过了肌肉的功率密度（500 W/kg）。[21]

QDD的代价在于电机本身需要设计得更大、更重以产生足够的原始转矩，且定子铜耗因电流增大而上升，需通过优化绕组设计和散热措施来弥补。但整体而言，QDD在能量回收、人机交互柔顺性和系统效率方面的综合优势使其成为外骨骼驱动的重要发展方向。

5.5 离合器机构的间歇驱动策略

外骨骼的摆动相中，关节力矩需求很小，此时若电机仍保持工作状态，将产生不必要的空载损耗。单向或双向离合器可在摆动相将电机与关节脱开，使关节在惯性和重力作用下"自由摆动"，降低能耗。

Hanyang大学的研究团队开发了一种滚子凸轮离合器机构，安装在膝关节处，在摆动相脱离啮合，使关节呈现零阻抗状态，有效降低了该相位的能耗，同时保证了高反驱性和安全性。此类间歇驱动策略与弹性致动、能量回收配合使用，可进一步挖掘能效潜力。[18]

6 多模态弹性驱动器与综合比较

6.1 多模态弹性驱动器

针对单一驱动器难以同时满足高瞬时输出扭矩、能量效率和抗冲击能力等多重需求的问题，研究者提出了多模态弹性驱动器的概念。

串并联弹性驱动器（SPEA）将平行弹性元件与电动机并联，使用带有锁紧环和锁板的不完全齿轮作为间歇机构，可降低电机扭矩要求，减小电机尺寸，提高效率。应用于假肢的多模态驱动器同时具有并联和串联弹簧，并联弹簧可锁定，相较传统顺应性和直接驱动的人工膝关节，该构型在水平步行时能量消耗更小，运动轨迹也更接近健康膝关节。

在三自由度腿部机器人上的实验表明，在SEA基础上增加并联储能分支可节能53%以上。多模态弹性驱动器集合了单一驱动器的优点，具有优良的储能和节能性能，但也面临结构复杂、系统建模和控制复杂化等挑战。[22]

6.2 各传动构型方案对比

基于前述分析，各传动构型方案的能效特性对比如表2所示：

表2 各传动构型方案的能效特性

方案类型	能效优势	主要局限	适用场景
传统高减速比刚性传动	输出力矩大	反驱性差，负功无法回收，人机交互不柔顺	早期外骨骼
SEA（串联弹性）	冲击耐受、峰值功率降低、储能回收	带宽受限、输出转矩降低、质量增加	低速力控任务
PEA（并联弹性）	卸除静载荷、大幅降低电机力矩需求	刚度固定、适配特定工况	周期性重力载荷场景
CEA（离合弹性）	可控储能释放、能耗降低可达80%	离合机构复杂、控制时序要求高	节奏明确的运动（跑步、步行）
QDD（准直驱）	反驱性好、能量再生、高带宽力控	电机尺寸大、铜耗高	高动态、需频繁能量回收的任务
多模态驱动器	综合多项优势、节能可达53%以上	结构复杂、建模困难	高性能需求场景

7 基于系统控制的效率优化

7.1 外骨骼伺服驱动的控制需求特殊性

外骨骼伺服驱动器的控制面临独特挑战。与工业伺服系统不同，外骨骼的伺服驱动器必须响应穿戴者微妙的人体生理信号，并综合来自多个位置传感器的数据进行调制。由于穿戴者直接与机器耦合，任何伺服机构故障都可能造成严重安全风险，因此驱动器必须满足极高的速度、鲁棒性和精度要求。这些控制目标与效率优化之间存在复杂的权衡关系。

7.2 自适应调制与能量管理

理想的外骨骼驱动器应具备根据工况自适应调整的能力。在调制策略层面，可根据负载率和调制比实时选择最优调制模式——轻载采用SVPWM以保证电流波形质量，重载切换至DPWM以降低开关损耗。

在能量管理层面，可依据步态相位识别（如通过IMU或足底压力传感器判断当前处于支撑相还是摆动相）提前调整控制策略：支撑相采用高助力模式，摆动相降低电流限幅或启用离合器脱开；上坡时增大助力，下坡时增大能量回收比例。新型半被动膝关节外骨骼即利用IMU传感器估计小腿方向，据此决定离合弹簧的接合与脱开时机。

7.3 能量最优轨迹规划

除驱动系统本身的效率优化外，从任务规划层面提升能效同样重要。能量最优轨迹规划的核心思想是：在满足运动任务约束（如步态周期、关节角度范围、用户意图）的前提下，优化各关节的角度、角速度轨迹，使电机工作在高效区域，降低总能耗。

一种可行方法是以驱动器损耗模型为目标函数，以人体运动学、动力学约束为边界条件，采用最优控制算法（如动态规划、模型预测控制）求解最优轨迹。虚拟样机仿真表明，与传统轨迹跟踪控制相比，能效最优轨迹规划可降低可观百分比的系统能耗。

7.4 多策略协同优化框架

单一效率优化策略的效果有限，且往往存在"此消彼长"的副作用（如DPWM降低开关损耗但THD增大，SEA储能但限制带宽）。因此，需要构建多策略协同优化的整体框架：

第一层：调制策略自适应切换。根据负载率和调制比实时选择最优调制模式——轻载采用SVPWM，重载采用DPWM，中间负载采用混合调制。

第二层：电机电流最优分配。对双电机或多电机配置，根据各电机效率MAP图动态分配转矩指令，使总铜损最小。

第三层：弹性元件刚度/离合调控。根据运动模式（行走、跑步、上/下坡）调节VPEA的刚度参数，或控制离合器在步态周期的适当相位接合/脱开，使重力补偿和能量回收效果最优。

第四层：能量回收策略。在关节做负功的时间窗口内，控制逆变器工作于整流模式，将再生电能回馈至储能单元；或通过离合机构将负功能量储存于弹簧中待后续释放。

第五层：任务级轨迹优化。结合用户意图识别和步态相位预测，实时调整运动轨迹，使驱动系统尽可能工作在高效区间。

各层之间通过实时通信共享信息，形成分层递阶的优化决策链路。

8 效率提升效果的实验验证与综合分析

8.1 典型实验方法与结果

目前关于外骨骼伺服驱动器效率提升的实验验证主要采用以下方法：

台架测试：将驱动电机与测功机或磁粉制动器相连，模拟外骨骼的负载特性，测量不同调制策略和电流条件下的输入功率、输出功率，计算效率。马宇等采用此方法验证DPWM的有效性，结果表明在重载条件下DPWM相比SVPWM可有效提升驱动器效率。

虚拟样机仿真：利用MATLAB/Simscape、Adams等多体动力学仿真平台，建立外骨骼-人体耦合动力学模型，比较不同致动构型的能耗差异。仿真分析可验证外骨骼关节角度和驱动器运动范围等关键指标。

穿戴实测：受试者穿戴外骨骼在跑步机上完成规定动作，通过电池电压电流监测系统记录实际能耗。例如，半被动膝关节外骨骼实验中，受试者穿戴设备在跑步机上运动，通过IMU传感器估算小腿方向控制离合，测试结果表明控制机制可实现实时接合与脱开，最大膝力矩达到17 Nm（设备可提供28 Nm），伺服能耗与受试者节省能量之比达到1:160。

8.2 各策略效果对比与协同增益

基于文献报道与理论分析，各效率优化策略的典型效果对比如表3所示：

表3 各效率优化策略的典型效果

策略方向	具体方法	典型效率提升/节能效果	附加成本	适用场景
调制优化	DPWM	重载条件下显著提升	低	重载工况
并联弹性	PEA	峰值转矩降低50%，能耗降25%	中	周期性重力载荷
离合弹性	CEA	能耗降低80%，峰值扭矩降66%	中高	节奏明确运动
准直驱	QDD	高反驱性+能量再生	中	频繁负功工况
多模态	SPEA/多模态	节能可达53%以上	高	高性能需求
离合+弹簧	半被动离合	输入0.1W节省16W（1:160）	中	步行/跑步

各策略之间存在协同效应。例如，DPWM的开关损耗降低可与SEA的储能释能、QDD的能量回收进行动态协调，使总系统效率提升优于单一策略效果的简单叠加。实际工程中，应根据目标外骨骼的应用场景、成本约束和开发周期，选择适配的策略组合。[23]

8.3 效率提升与系统性能的权衡

效率优化并非"免费的午餐"，需与系统其他性能指标进行权衡设计：

效率 vs. 动态响应：降低开关频率或采用DPWM可减少开关损耗，但电流环带宽下降，系统响应速度降低；

效率 vs. 控制精度：SEA提高力控柔顺性，但位置控制精度和带宽受限；

效率 vs. 质量：QDD需要更大尺寸的电机，增加了关节质量，可能影响用户舒适度；

效率 vs. 热量：外骨骼作为可穿戴设备，电子部件不可避免会发热，必须控制温升以确保用户舒适和安全；

效率 vs. 成本：定制化驱动器、多模态弹性方案等先进技术的成本远高于传统方案。

此外，外骨骼伺服驱动器的设计还必须优先考虑可靠性和安全性，任何效率优化措施都不得以牺牲这些核心指标为代价。因此，效率优化应在满足外骨骼核心功能需求（安全性、助力效果、穿戴舒适性）的前提下进行，不宜片面追求效率极值而牺牲其他关键性能。

9 结论与展望

9.1 主要结论

本文系统研究了外骨骼伺服驱动器效率提升的策略与方法，主要结论如下：

1）外骨骼伺服驱动系统的能量损耗分布在逆变器开关损耗与导通损耗、电机铜损铁损、传动机械损耗以及制动能耗等多个环节，各环节损耗的占比随工况变化显著，需针对性优化。

2）基于不连续脉宽调制（DPWM）的调制策略通过减少开关次数，在重载条件下可有效降低逆变器损耗，实现简单、成本低，是效率优化的首要选项。

3）串联弹性致动（SEA）、并联弹性致动（PEA）和离合弹性致动（CEA）等弹性方案利用人体运动中的负功时段进行能量储存与回收，可显著降低电机峰值功率和总能耗，同时改善人机交互的柔顺性与安全性。CEA在特定条件下可实现80%以上的能耗降低。

4）准直驱（QDD）方案通过高转矩密度电机配合低减速比传动，实现高反驱性和能量再生，兼顾了人机交互柔顺性和能效提升。

5）离合机构和半被动设计展现出极高的能效比，新型半被动膝关节外骨骼的伺服输入功率与人体节省功率之比达到1:160，代表了能效优化的前沿方向。

6）效率优化需与动态响应、控制精度、质量、热管理和成本等指标进行系统级权衡，根据具体应用场景选择策略组合。

9.2 未来研究方向

展望未来，外骨骼伺服驱动器效率提升的研究可从以下方向深入：

智能材料与新型换能原理。探索压电、电致伸缩等新型材料在致动器中的应用，突破传统电磁驱动的效率瓶颈。

多学科协同优化设计。将电机电磁设计、减速器参数、控制算法作为一个整体进行多目标优化，追求系统级能效最优而非局部最优。

基于学习的能效预测与控制。利用深度强化学习等方法，使驱动系统具备自主学习和适应不同用户、不同地形的能力，实现个性化的效率最优控制。

轻量化与高效率的统一。探索碳纤维复合材料结构、增材制造等工艺，在降低系统质量的同时保持高效率，实现"减重"与"节能"的相互促进。

模块化与标准化。推动高效驱动组件的模块化和标准化，降低开发和应用成本，加速外骨骼技术的大规模推广。

离合与弹性驱动的深度融合。CEA和半被动设计展现出极高的能效潜力，进一步探索离合时机优化、多模式切换和

智能控制算法，有望将外骨骼续航能力推向新的高度。□

参考文献

[1] Laschowski B, McPhee J. Energy-efficient actuator design principles for robotic leg prostheses and exoskeletons: a review of series elasticity and backdrivability[J]. ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2023, 18(6): 060801.
[2] Xu J B, Chen S L, Li S P, et al. A survey on design and control methodologies of high-torque-density joints for compliant lower-limb exoskeleton[J]. Sensors, 2025, 25(13): 4016.
[3] 马宇, 吴庆勋, 李如飞, 等. 外骨骼伺服驱动器效率提升研究[J]. 载人航天, 2022, 28(2): 223-229.
[4] 北京精密. 一文读懂机器人"关节"伺服驱动器的前世今生[EB/OL].
[5] Celeramotion. 5 tips for using servo drives in exoskeleton robots[EB/OL]. 2022-12-07.
[6] Design and control of a novel semi-passive knee exoskeleton[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(11): 9661-9668.
[7] 下肢外骨骼机器人电液伺服驱动系统设计[J]. 机械科学与技术.
[8] Adaptive digital twin integration with multilevel inverter control for energy efficient smart rehabilitation systems[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 8511.
[9] Review of high-torque electric machines applied in biorobotics and wearable devices[J]. Energies, 2026, 19(12): 2781.
[10] Ghaffar A, Rehman A, Riaz M T, et al. Energy-efficient actuation for wearable exoskeletons: a virtual prototype[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2025.
[11] Wang H, et al. Digital twin-driven exoskeleton control for personalized rehabilitation[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2024.
[12] Chen S L, et al. Impedance and admittance control for compliant exoskeleton joints: a comparative study[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024.
[13] Zhang L J, et al. Zero-sequence component injection method for unified DPWM generation in PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023.
[14] Lauer A, et al. Machine learning-enabled digital twins for adaptive exoskeleton control[J]. IEEE Access, 2024.
[15] Semeraro C, et al. Digital twin for energy-efficient rehabilitation systems: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024.
[16] Gao Z, et al. Model predictive control integrated with digital twin for exoskeleton energy optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025.
[17] Cheng L, et al. Real-time monitoring of rehabilitation devices using digital twin and MLI integration[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024.
[18] Wu Q X, et al. Comparative analysis of PWM strategies for exoskeleton servo drives[J]. Electric Machines and Control, 2022.
[19] Li R F, et al. Efficiency optimization of permanent magnet synchronous motor drives using discontinuous PWM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022.
[20] Liu H, et al. Loss modeling and efficiency mapping of PMSM drives for exoskeleton applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023.
[21] Zhang C, et al. Series elastic actuator design for lower-limb exoskeletons: a review[J]. Mechanism and Machine Theory, 2024.
[22] Chen S L, et al. Quasi-direct drive for compliant robotic joints: design and control[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023.
[23] Khalil W, et al. Energy regeneration in electrically actuated exoskeletons: a survey[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2023.

作者简介:张南，女，工程师，研究方向为自动化和机器人。
收稿日期:2026-04-23
接受日期:2026-06-06

版权为作者所有。本文为开放获取文章，遵循知识共享署名（CC BY）许可协议（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/）的条款和条件进行发布。
Copyright by the authors.This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

无人快递车中的环境感知技术研究

李彦泽
（固安船行科技有限公司，廊坊 065599）

摘要:本文全面梳理无人快递车主流环境感知技术体系，逐一剖析激光雷达、视觉摄像头、毫米波雷达、超声波传感器四大单一感知技术的工作原理、技术架构、性能参数、适用场景与优缺点，深入研究多传感器融合感知的核心算法、融合架构与实现流程。结合京东、美团、Nuro等头部企业无人快递车的真实落地案例，辅以2025年无人配送行业权威统计数据与市场格局分析，系统总结当前无人快递车环境感知技术应用中的核心技术瓶颈、场景适配难题与工程落地短板，针对性提出技术优化方案，并预判未来技术迭代趋势与行业发展方向。本文研究可为无人快递车感知系统优化、工程落地应用、行业技术标准化建设提供理论支撑与实践参考，同时为智慧物流无人设备技术升级、中级工程技术应用研究提供可靠依据。
关键词:无人快递车；环境感知；多传感器融合；激光雷达；视觉感知；毫米波雷达；智慧物流

Research on Environmental Perception Technology in Unmanned Delivery Vehicles

LI Yanze
(Gu'an Chuanhang Technology Co., Ltd., LANGFANG 065599,China)

Abstract:This paper comprehensively reviews the mainstream environmental perception technology systems for autonomous delivery vehicles, systematically analyzing the working principles, technical architectures, performance parameters, application scenarios, and advantages and disadvantages of four primary sensing technologies: LiDAR, visual cameras, millimeter-wave radar, and ultrasonic sensors. It delves into core algorithms, fusion architectures, and implementation processes of multi-sensor fused perception. Drawing on real-world deployment cases from leading companies such as JD.com, Meituan, and Nuro, and supported by authoritative 2025 industry statistics and market analysis in autonomous delivery, the study systematically summarizes current technological bottlenecks, scenario adaptation challenges, and engineering implementation gaps in environmental perception for autonomous delivery vehicles. Targeted optimization strategies are proposed, along with predictions on future technological evolution and industry development trends. The research provides theoretical foundations and practical references for optimizing perception systems, facilitating engineering deployment, and advancing industry-standardization efforts in autonomous delivery vehicles, while also offering reliable support for upgrading intelligent logistics equipment and advancing applied engineering research.
Key words:Unmanned delivery vehicle; environmental perception; multi-sensor fusion; LiDAR; visual perception; millimeter-wave radar; smart logistics

1 引言

1.1 研究背景

在数字经济、智慧物流与新基建战略的全面推进下，我国快递物流行业迎来高速发展期，快递业务量连续多年稳居全球首位。据《2025年中国智慧物流行业发展蓝皮书》统计，2025年我国快递业务总量突破1300亿件，末端配送订单日均超3.5亿单，传统人工配送模式面临人力成本攀升、配送时效不均、末端覆盖不足、恶劣天气作业受限等多重难题，末端物流智能化转型迫在眉睫。无人快递车作为低速自动驾驶智能设备，具备全天候作业、低运营成本、高配送效率、零人工干预的核心优势，可精准适配最后一公里末端配送场景，有效填补人工配送短板，已成为智慧物流转型升级的核心突破口。

无人快递车自动驾驶系统主要由环境感知、决策规划、运动控制三大核心模块构成，其中环境感知模块是整车自动驾驶的“感知眼睛”，是决策规划与运动控制的基础前提。城市末端配送场景具备路况复杂、行人密集、非机动车混杂、障碍物随机、光照天气多变等特征，对无人快递车的环境感知能力提出了极高要求。单一感知传感器受物理特性限制，无法兼顾全天候、全场景、高精度感知需求，例如摄像头易受光照、雨雪天气干扰，激光雷达成本偏高、无速度感知能力，毫米波雷达分辨率有限，超声波传感器探测距离较短。

在此背景下，融合多类感知传感器、构建多模态环境感知体系，成为无人快递车技术迭代的核心方向。深入研究各类感知技术的工作机理、应用特性与融合算法，剖析行业落地案例与市场现状，梳理技术瓶颈与优化路径，对提升无人快递车行驶安全性、作业稳定性、场景适配性，推动末端物

流智能化、标准化、规模化落地具有重要的工程价值与行业意义。同时，本研究贴合智能物流工程、自动驾驶工程一线应用实际，可为中级工程技术人员开展智能设备技术研究、工程优化与落地应用提供系统的理论与实践支撑。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

国外无人配送车感知技术研究起步较早，以美国、欧洲为核心代表，技术路线偏向高精度、高可靠性、全场景适配，主打L4级低速自动驾驶感知体系落地。美国Nuro公司作为全球无人配送赛道标杆企业，率先搭建“固态激光雷达+高清成像毫米波雷达+视觉摄像头”的多传感器融合感知架构，摒弃传统机械激光雷达，采用小型化固态激光雷达，大幅提升设备稳定性与环境适配性，可实现恶劣天气下远距离小目标精准感知，适配城市开放道路配送场景。欧洲企业侧重感知技术的安全性与标准化研究，重点优化传感器抗干扰算法与场景适配模型，针对欧洲城市窄路、慢行交通特征，优化近距离障碍物感知与低速避障感知精度，形成了成熟的感知技术落地标准体系。整体来看，国外无人快递车感知技术优势在于传感器硬件精度高、融合算法成熟、场景适配性强，但存在设备成本高、本土化场景适配不足、规模化落地难度大的问题。[1-3]

1.2.2 国内研究现状

国内无人快递车产业依托庞大的末端配送市场，实现快速迭代发展，形成了“性价比优先、场景适配、快速迭代、规模化落地”的本土化技术路线。以京东、美团、菜鸟为代表的头部企业，深耕城市社区、园区、高校等本土化复杂场景，持续优化感知技术体系，形成了适配国内路况的感知方案。京东第六代无人配送车搭载感知大模型与点云视觉融合技术，实现感知范围19倍扩容、感知性能3倍提升；美团无人车采用“1主2辅”激光雷达布局+多摄像头+毫米波雷达融合方案，实现深圳城中村复杂路况98%通过率。

国内高校与科研机构同步开展技术研究，重点突破多传感器融合算法、复杂场景语义感知、低算力端侧部署等核心技术，有效降低感知系统硬件成本，提升算法落地适配性。但整体而言，国内无人快递车感知技术仍存在短板：复杂极端场景感知鲁棒性不足、多传感器时间空间同步精度有限、老旧场景感知盲区较多、高端感知芯片与核心传感器依赖进口，制约了行业规模化高质量发展。[4,5]

2 无人快递车环境感知技术整体概述

2.1 环境感知系统核心定义与功能

无人快递车环境感知系统是依托各类车载传感器、数据采集模块、算法处理单元，实时获取车辆周边环境信息，完成环境建模、目标检测、语义识别、状态预判的核心车载系统，是无人快递车实现自主导航、避障行驶、智能制动、路径调整的基础核心。区别于高速自动驾驶车辆，无人快递车属于低速自动驾驶设备（最高行驶速度≤30km/h），作业场景以城市低速道路、封闭园区、社区窄路为主，感知系统更侧重近距离高精度感知、小目标识别、复杂动态障碍物预判、全天候稳定作业四大核心能力。

无人快递车环境感知系统核心功能主要包含四项：一是环境信息采集，通过各类传感器实时采集周边路况、障碍物、行人、非机动车、交通标识、路面状况等多维信息；二是目标检测与分类，通过算法识别区分静态障碍物（路沿、石墩、护栏、静止车辆）与动态障碍物（行人、电动车、行驶车辆），完成目标分类、测距、测速；三是场景语义解析，识别车道线、红绿灯、路口、斑马线、禁行区域等场景语义信息，构建实时环境语义模型；四是风险预判与数据输出，实时分析环境风险，将感知数据传输至决策规划模块，为车辆避障、减速、停车、变道等动作提供数据支撑。[6]

2.2 环境感知系统整体架构

无人快递车环境感知系统采用“硬件感知层–数据预处理层–算法融合层–决策输出层”四层递进架构，整体架构逻辑清晰、层级分明，可实现环境信息从采集、处理、融合到输出的全流程闭环处理。

第一层为硬件感知层，是系统底层基础，主要搭载激光雷达、高清摄像头、毫米波雷达、超声波传感器四大核心感知硬件，负责全方位采集车辆周边三维点云数据、图像像素数据、速度距离数据、近距离障碍物数据，实现360°无死角环境信息覆盖；第二层为数据预处理层，通过滤波算法、校准算法、去噪算法，剔除原始数据中的噪声、冗余、异常数据，完成多源数据的时间同步与空间对齐，提升原始数据精度；第三层为算法融合层，依托多传感器融合算法，整合各类传感器优势，弥补单一感知短板，完成高精度目标检测、语义分割、轨迹预测；第四层为决策输出层，将融合后的高精度感知数据传输至自动驾驶决策模块，支撑车辆路径规划、避障控制、速度调节等自主作业行为。[7]

2.3 环境感知技术分类与适配标准

根据传感器硬件类型与感知原理，无人快递车环境感知技术可分为被动感知与主动感知两大类。被动感知以视觉摄像头为核心，依托环境自然光采集图像信息，具备语义识别能力、成本低、分辨率高，但抗干扰能力弱；主动感知包含激光雷达、毫米波雷达、超声波传感器，通过设备主动发射探测信号获取环境数据，不受外界光照影响，抗干扰能力强，适配全天候作业场景。[8]

结合无人快递车低速作业、场景复杂、成本可控的行业需求，行业形成了明确的感知技术适配标准：一是近距离（0-50m）高精度障碍物感知，保障窄路通行、近距离避障安全；二是动态目标实时测速、轨迹预判，适配行人和非机动车无序穿梭场景；三是雨雪、强光、夜间等复杂天气稳定感知，保障全天候作业；四是低算力、低功耗适配，适配车载嵌入式终端部署需求；五是低成本、小型化、高可靠性，满足规模化量产落地需求。各类感知技术需围绕上述标准完成选型与适配优化。

3 无人快递车单一环境感知技术原理与应用研究

3.1 激光雷达感知技术

3.1.1 工作原理

激光雷达（LiDAR）是无人快递车核心高精度主动感知传感器，核心工作原理为飞行时间测距法（ToF），通过激光发射器主动发射高频激光束，激光束接触周边障碍物后反射，接收器接收反射激光信号，通过计算激光发射与接收的时间差，结合光速参数精准测算传感器与障碍物的距离，同时结合激光发射角度，构建周边环境三维点云模型，实现环境三维重构、障碍物定位与轮廓识别。[9]

其核心测距公式为：

$$L = \frac{1}{2}c \times \Delta t \tag{1}$$

式中：L为传感器与障碍物距离（m）；c为光速，取值3×108m/s；Δt为激光发射与接收的时间差（s）。

激光雷达通过高频扫描发射激光束，可快速采集海量三维坐标点，形成高密度点云数据，精准还原障碍物轮廓、尺寸、空间位置，具备极高的测距精度与空间分辨率，是无人快递车高精度环境建模的核心硬件。

3.1.2 技术分类与架构参数

目前无人快递车搭载的激光雷达主要分为机械激光雷达、半固态激光雷达、固态激光雷达三类，适配不同定位、不同成本的无人配送车型。机械激光雷达以16线、32线为主，扫描角度广、点云密度高、技术成熟，多用于中高端无人配送车；半固态激光雷达体积更小、稳定性更强，兼顾精度与成本；固态激光雷达无机械转动部件，故障率低、功耗低、适配量产，是行业未来主流迭代方向，Nuro新一代无人车已全面搭载固态激光雷达替代传统机械雷达。

无人快递车常用激光雷达核心性能参数如下：测距范围0.05-200m，测距精度±2cm，水平扫描角度360°/120°，垂直扫描角度15°-30°，扫描频率10-20Hz，可完全满足低速无人车近距离高精度感知需求。行业主流布局方案为“主雷达+辅助雷达”，如美团无人车采用1主2辅激光雷达布局，主雷达负责前方核心区域高精度建模，辅助雷达补充侧后方感知盲区，实现全车360°无死角感知覆盖。[10]

3.1.3 技术优势与短板

激光雷达核心优势：一是测距精度极高，厘米级感知精度，可精准识别路沿、石墩、低矮障碍物等细小目标；二是不受光照干扰，昼夜感知一致性强，可适配夜间、逆光、阴影等复杂光照场景；三是可构建三维环境模型，精准还原空间地形与障碍物轮廓，支撑路径规划与精准避障；四是抗环境杂光干扰能力强，稳定性远优于纯视觉感知。

核心短板：一是硬件成本偏高，大幅提升无人车量产成本；二是传统机械激光雷达存在转动部件，长期户外作业易受风沙、振动影响，故障率偏高；三是无法直接获取障碍物速度、纹理、颜色、语义信息，需搭配其他传感器使用；四是雨雪、大雾极端天气下，激光束易被水汽散射，感知精度小幅下降。

3.1.4 适用场景

激光雷达主要适配无人快递车高精度感知场景，包括城市开放道路精准建模、窄路通行避障、低矮障碍物识别、复杂路口环境重构、静态地形感知等，是高端无人快递车感知系统的核心主力硬件。

3.2 摄像头视觉感知技术

3.2.1 工作原理

视觉摄像头是无人快递车最基础、成本最低的被动感知硬件，核心原理为光学成像与数字图像处理。通过光学镜头采集环境自然光信号，经图像传感器（CMOS/CCD）将光信号转换为数字电信号，生成高清图像视频帧，依托深度学习视觉算法（CNN、YOLO、SegNet）完成图像预处理、特征提取、目标检测、语义分割、分类识别，实现交通标识、红绿灯、行人、车辆、车道线的精准识别。

视觉感知核心特征提取公式为：

$$F(x,y)=\sigma(W\times I(x,y)+b) \tag{2}$$

式中：F(x,y)为图像特征输出矩阵；I(x,y)为原始图像像素矩阵；W为卷积权重参数；b为偏置参数；σ为激活函数。

通过多层卷积、池化、激活运算，可逐层提取图像浅层纹理特征与深层语义特征，实现复杂场景多目标精准识别，是无人快递车语义感知的核心载体。[11]

3.2.2 技术分类与架构参数

无人快递车搭载的视觉摄像头主要分为单目摄像头、双目摄像头、全景摄像头三类。单目摄像头成本最低、结构简单，主要用于交通标识、红绿灯、车道线识别；双目摄像头依托视差原理，可实现测距功能，弥补单目摄像头无测距能力的短板，适配近距离障碍物测距场景；全景摄像头可实现360°环视成像，消除车身感知盲区，适配社区、园区复杂窄路场景。

行业主流配置参数：分辨率1080P/4K，帧率30-60fps，水平视角90°-180°，夜视成像、宽动态成像功能，可有效抑制强光逆光干扰，保障昼夜成像效果。京东、美团无人车均采用多摄像头组合方案，通过前视、侧视、后视、环视摄像头搭配，实现全方位视觉感知覆盖。[12]

3.2.3 技术优势与短板

视觉感知核心优势：一是硬件成本极低、体积小巧、易集成、适合规模化量产；二是语义识别能力极强，可精准识别红绿灯、交通标识、车道线、行人非机动车类别，是无人车场景语义理解的核心；三是图像分辨率高，可捕捉细微纹理特征，适配复杂场景目标分类；四是技术成熟、算法迭代快，适配性极强。

核心短板：一是高度依赖环境光照，强光、逆光、黑夜、雨雪大雾天气下成像质量大幅下降，易出现识别失效、误识别问题；二是单目摄像头测距精度低，无法满足高精度避障需求；三是动态目标抗干扰能力弱，易受遮挡、阴影干扰，导致目标漏检、错检。

3.2.4 适用场景

视觉感知技术主要适配无人快递车语义识别场景，包括交通信号识别、道路标识识别、车道线检测、目标分类识

别、场景语义解析等，是所有无人快递车的标配感知技术，多作为主力感知硬件搭配雷达设备使用。

3.3 毫米波雷达感知技术

3.3.1 工作原理

毫米波雷达是无人快递车全天候动态感知核心硬件，属于主动感知设备，工作原理为调频连续波（FMCW）探测原理。通过天线发射高频毫米波电磁波，电磁波接触障碍物后反射，雷达接收回波信号，通过分析发射信号与回波信号的频率差、相位差，精准测算障碍物的距离、相对速度、角度信息，实现动态目标实时监测与轨迹追踪。

毫米波雷达测速核心公式为：

$$v = \frac{c \times \Delta f}{2f_0} \tag{3}$$

式中：v为目标相对速度（m/s）；c为光速；Δf为发射与回波信号频率差（Hz）；f_0为雷达中心工作频率（Hz）。

毫米波雷达具备天然的速度感知能力，可实时捕捉动态障碍物的速度变化，预判运动轨迹，弥补激光雷达无测速能力、视觉测速精度低的短板。

3.3.2 技术分类与架构参数

无人快递车主流搭载24GHz、77GHz两类毫米波雷达。24GHz毫米波雷达成本低、探测范围适中、抗干扰强，多用于近距离障碍物监测、盲区预警；77GHz毫米波雷达带宽更大、分辨率更高、测速精度更强，可实现远距离动态目标精准感知，适配开放道路高速动态避障场景。Nuro新一代无人车搭载高清成像毫米波雷达，可实现恶劣天气下远距离小目标精准探测，大幅提升复杂场景安全性。

核心性能参数：探测距离0.2-150m，测距精度±0.5m，测速精度±0.2m/s，水平探测角度±60°，可全天候稳定工作，不受光照、雨雪、大雾、沙尘天气影响。[13]

3.3.3 技术优势与短板

毫米波雷达核心优势：一是全天候工作能力极强，不受光照、雨雪、大雾、沙尘天气干扰，环境鲁棒性最优；二是可直接精准测速，实时捕捉动态目标运动状态，适配行人、非机动车无序穿梭场景；三是硬件体积小、功耗低、成本适中、稳定性强，适合车载长期部署；四是具备穿透性，可识别轻度遮挡目标，抗干扰能力突出。

核心短板：一是空间分辨率低，无法识别障碍物轮廓、纹理与语义信息，难以区分目标类别；二是近距离探测精度有限，易受地面杂波干扰；三是对静态细小障碍物识别能力弱，无法满足高精度地形感知需求。

3.3.4 适用场景

毫米波雷达主要适配无人快递车动态风险感知场景，包括动态行人、非机动车、车辆的测速与轨迹预判、恶劣天气全天候监测、车身盲区风险预警、高速行驶状态下的动态避障感知。[14]

3.4 超声波传感器感知技术

3.4.1 工作原理

超声波传感器是无人快递车近距离辅助感知核心硬件，属于主动感知设备，核心原理为超声波测距原理。通过传感器探头发射高频超声波信号，超声波接触障碍物后反射，探头接收反射信号，通过计算超声波往返时间差，结合声波传播速度，测算传感器与障碍物的近距离距离，实现近距离障碍物检测与防撞预警。[15]

核心测距公式为：

$$S = \frac{1}{2} v_s \times \Delta t \tag{4}$$

式中：S为探测距离（m）；v_s为常温下超声波传播速度，取值340m/s；Δt为超声波往返时间差（s）。

3.4.2 技术参数与部署方式

超声波传感器具备超低成本、高稳定性、无盲区的优势，探测距离0.02-5m，测距精度±1cm，响应速度快，可精准识别近距离低矮障碍物、墙体、路沿、台阶等细小目标。行业主流部署方式为全车环绕式布局，在无人车车头、车尾、车身两侧均匀部署8-12个超声波传感器，实现近距离无死角防撞感知，作为高端感知硬件的补充兜底设备。

3.4.3 技术优势与短板

核心优势：一是成本极低、结构简单、故障率低、免维护；二是近距离探测精度极高，无感知盲区，可有效弥补雷达、摄像头近距离感知盲区；三是不受光照、天气影响，全天候稳定性强；四是响应速度快，适配紧急近距离防撞场景。

核心短板：一是探测距离极短，仅适配近距离感知，无法实现中远距离环境探测；二是易受环境气流、噪声干扰，远距离探测误差大；三是无测速、无语义识别、无三维建模能力，仅能实现简单测距功能。[16]

3.4.4 适用场景

超声波传感器仅作为辅助感知设备，适配无人快递车近距离低速防撞场景，包括窄路会车、停车对位、近距离障碍物识别、车身盲区兜底防护，是低成本无人配送车的核心兜底感知硬件。

4 无人快递车多传感器融合感知技术研究

4.1 多传感器融合技术核心内涵与必要性

通过上述单一感知技术分析可知，各类传感器均存在固有技术短板，单一感知方案无法适配复杂城市末端配送场景：纯视觉方案抗干扰差、恶劣天气失效风险高；激光雷达无语义、无测速能力；毫米波雷达无轮廓无语义；超声波传感器探测距离有限。多传感器融合感知技术，是通过硬件协同校准与算法融合处理，整合激光雷达、视觉摄像头、毫米波雷达、超声波传感器的多维感知优势，实现“高精度三维建模+精准语义识别+全天候动态测速+近距离无死角兜底”的全方位感知能力，彻底弥补单一感知技术的局限性，大幅提升无人快递车在复杂路况、恶劣天气、动态场景下的感知鲁棒性与精度，是现阶段无人快递车感知技术的唯一最优解。[17]

4.2 多传感器融合层级与核心算法

按照数据处理层级划分，无人快递车多传感器融合分为数据层融合、特征层融合、决策层融合三个层级，各层级适配不同算法与应用场景，形成完整的融合技术体系。

4.2.1 数据层融合

数据层融合为底层原始数据融合，直接对各类传感器采集的原始点云、图像、距离、速度数据进行同步对齐、去噪校准与融合拼接，保留全部原始数据特征，感知精度最高。核心适配算法为卡尔曼滤波算法，可有效剔除原始数据噪声，完成多源数据时空同步校准。

卡尔曼滤波核心迭代公式：

$$\text{状态预测：}\ \hat{x}_{k|k-1} = A\hat{x}_{k-1|k-1} + Bu_{k-1}$$

$$\text{协方差预测：}\ P_{k|k-1} = AP_{k-1|k-1}A^T + Q$$

$$\text{增益计算：}\ K_k = P_{k|k-1}H^T(HP_{k|k-1}H^T + R)^{-1}$$

$$\text{状态更新：}\ \hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k|k-1})$$

$$\text{协方差更新：}\ P_{k|k} = (I - K_kH)P_{k|k-1} \tag{5}$$

式中：x^为系统状态值；P为协方差矩阵；K为滤波增益；A、B、H为系统参数矩阵；Q、R为噪声矩阵；z为观测值。该算法可实现多源传感器原始数据的实时滤波与精准校准，为上层融合提供高质量数据基础。[18,19]

4.2.2 特征层融合

特征层融合为中层特征信息融合，分别对各类传感器数据完成特征提取后，融合多维特征信息，兼顾精度与运算速度，是无人快递车最常用的融合层级。通过视觉算法提取图像语义特征、激光雷达提取三维空间特征、毫米波雷达提取速度特征、超声波提取近距离距离特征，通过加权融合算法完成特征关联与融合重构，实现目标精准分类、定位、测速。

4.2.3 决策层融合

决策层融合为高层结果融合，各类传感器独立完成目标检测、风险判断后，输出各自决策结果，通过D-S证据理论算法完成多决策融合研判，输出最终感知决策结果，运算量小、容错性高，主要用于风险兜底与紧急避障决策场景。

4.3 多传感器融合整体架构与实现流程

本文结合行业主流技术方案，搭建适配无人快递车的“四维一体”多传感器融合架构，即“激光雷达三维建模+视觉语义识别+毫米波动态测速+超声波近距离兜底”融合架构。

整体实现流程分为五步：第一步，多传感器同步采集，四类传感器并行采集环境多维数据，完成硬件时钟同步；第二步，原始数据预处理，通过卡尔曼滤波去噪、时空校准，剔除异常数据；第三步，分层特征提取，分别提取空间、语义、速度、近距离测距特征；第四步，多特征融合研判，通过加权融合算法整合多维特征，完成目标检测、场景建模、风险预判；第五步，感知结果输出，将融合后的高精度环境数据传输至决策控制模块，支撑车辆自主行驶与避障作业。

4.4 融合技术核心优势

多传感器融合技术彻底解决了单一感知技术的场景局限性，核心优势体现在三方面：一是感知全方位化，兼顾远近距离、动静目标、昼夜天气全场景感知；二是感知高精度化，整合三维空间、语义、速度多维信息，实现目标精准定位、分类、测速；三是感知高鲁棒化，单一传感器失效时，其他传感器可兜底补偿，避免感知失效，大幅提升无人车行驶安全性与作业稳定性，完全适配城市复杂末端配送场景。[20,21]

5 无人快递车感知技术工程应用案例分析

5.1 京东无人快递车感知技术应用案例

京东作为国内无人配送行业头部企业，深耕末端无人配送技术多年，旗下第六代智能无人配送车是行业标杆产品，主打“感知大模型+多传感器深度融合”技术方案，适配城市开放道路、社区窄路、乡村道路、批发市场等全场景复杂配送环境。

在硬件配置上，京东六代无人车搭建立体化感知硬件体系，车顶搭载高精度激光雷达，车身部署多组高清双目摄像头、全景环视摄像头，前后侧方标配毫米波雷达与环绕式超声波传感器，形成“激光雷达为主、视觉为辅、雷达兜底、超声防护”的四层感知架构。在技术迭代上，该车搭载自研感知大模型与点云视觉融合技术，实现点云数据与图像数据的深度融合，感知范围较传统方案扩容19倍，整体感知性能提升3倍，同时创新采用“轻地图+强感知”技术，摆脱高精地图依赖，依托车载感知系统实现实时建图与环境适配，大幅提升复杂场景通行能力。

工程落地效果：目前京东无人配送车已在全国30余个城市、200多个园区、社区规模化落地，累计完成末端配送超亿单。在城市窄路、夜间配送、逆光强光、小雨小雪等复杂场景下，感知准确率达99.2%，复杂路况通行通过率大幅提升，设备故障率同比下降40%，有效解决了传统无人车复杂场景感知失效、通行卡顿的行业难题，实现全天候、全场景稳定配送作业。[22]

5.2 美团无人快递车感知技术应用案例

美团无人配送车主打城市社区、城中村、商圈高频短途配送场景，针对国内城中村道路狭窄、障碍物杂乱、行人非机动车密集、路况不规则的极端复杂场景，定制化研发专属多传感器融合感知方案。

硬件架构采用行业经典的“1主2辅”激光雷达布局方案，主雷达负责车辆前方120°核心行驶区域高精度三维建模，2个辅助雷达补充车身侧后方感知盲区，搭配11组高清摄像头完成全场景语义识别，搭载高精度毫米波雷达实现动态目标测速与轨迹预判，车身环绕部署超声波传感器实现近距离窄路通行兜底防护。通过特征级多传感器融合算法，实现三维点云数据、图像语义数据、速度数据的实时融合校准，针对性优化低矮障碍物、临时占道杂物、突发穿行行人的识别能力。

工程落地效果：美团无人车已全面落地深圳、广州、上

海等一线城市城中村与老旧社区，复杂城中村路况通行通过率达98%，可精准适配无规则路况、动态人流密集场景，昼夜作业稳定性极强。截至2025年底，美团无人配送累计订单量突破8亿单，规模化运营验证了其感知技术的场景适配性与稳定性，成为国内复杂城市场景无人配送感知技术的标杆方案。

5.3 美国Nuro无人快递车感知技术应用案例

Nuro是全球低速无人配送赛道开创企业，主打海外城市开放道路轻量化无人配送场景，技术路线主打高精度、高可靠性、恶劣天气适配，感知技术处于全球领先水平。Nuro新一代无人配送车摒弃传统机械激光雷达，全面搭载小型化固态激光雷达，消除机械转动故障隐患，提升设备长期户外作业稳定性；同时搭载高清成像毫米波雷达，具备远距离、高精度小目标探测能力，可在暴雨、大雾、沙尘等极端天气下稳定感知微小障碍物。

其感知系统采用“固态激光雷达+成像毫米波雷达+高清视觉”深度融合方案，通过自研融合算法实现多源数据毫秒级同步，重点优化高速动态目标预判、远距离障碍物识别、极端天气抗干扰能力，无需超声波传感器即可实现全场景高精度感知，整体感知鲁棒性与安全性行业领先。

工程落地效果：Nuro无人车已获得美国多州开放道路自动驾驶运营资质，可在城市公共道路合法行驶，实现全天候、全天气稳定配送作业，极端恶劣天气感知准确率较传统方案提升35%，设备故障停机率低于0.5%，充分验证了高精度多传感器融合技术的落地价值，为行业高端感知方案迭代提供了参考方向。[23]

6 行业统计数据与市场发展分析

6.1 行业整体市场规模

依托智慧物流政策扶持与感知技术持续迭代，我国无人快递车行业进入规模化落地爆发期。据《2025-2026年低速无人驾驶产业发展蓝皮书》权威数据显示，2024年我国无人配送车市场规模突破100亿元，2025年同比增长50%，市场规模达150亿元；2025年国内户外无人配送车累计出货量突破3.9万台，全年新增交付量2.7万台，较往年实现量级式增长。行业机构预测，2030年国内无人配送车市场规模将突破410亿元，年复合增长率维持35%以上，行业发展潜力巨大。

从全球市场来看，2025年全球L4级无人配送车出货量达3万台，中国市场占比超40%，已成为全球最大的无人配送车消费与研发市场。末端快递配送、商超零售、园区物流是三大核心应用场景，占比分别为52%、28%、15%，其余5%为医疗、环卫等细分场景。

6.2 感知技术市场格局分析

当前行业感知技术形成三大主流路线，适配不同市场定位的产品：一是高端全融合路线，以Nuro、京东高端车型为代表，采用“固态激光雷达+高清毫米波+多目视觉”融合方案，感知精度高、稳定性强，适配开放道路场景，主打高端商用市场；二是中端性价比路线，以美团主流车型为代表，采用“机械激光雷达+双目视觉+普通毫米波”方案，兼顾精度与成本，适配城市复杂社区场景，是行业量产主流方案；三是低端纯视觉路线，以小型园区无人车为代表，采用“多摄像头+超声波”方案，成本极低，适配封闭园区简单场景，主打低端下沉市场。

从市场占有率来看，2025年国内无人配送车厂商格局初步集中，新石器、九识智能、京东、美团为核心头部企业，四家企业市场占有率超90%，均已完成多传感器融合感知技术的规模化落地，单一纯视觉、纯雷达感知方案已逐步退出主流市场，多传感器融合成为行业技术刚需。

6.3 感知技术产业化发展现状

随着感知硬件国产化迭代与融合算法开源优化，无人快递车感知系统成本持续下降，产业化落地速度大幅提升。激光雷达国产化率从2022年的40%提升至2025年的75%，传感器硬件整体成本同比下降52%，为行业规模化量产奠定基础。同时，感知算法持续轻量化、嵌入式优化，可适配低算力车载终端部署，解决了传统融合算法算力需求高、落地难度大的问题，大幅提升了工程实用性。

目前行业已形成“硬件国产化、算法轻量化、融合标准化、场景全覆盖”的产业化发展态势，感知技术不再是无人配送车落地的技术瓶颈，复杂场景适配、极端天气抗干扰、低成本高精度平衡成为现阶段技术迭代的核心焦点。[24]

7 无人快递车环境感知技术现存核心挑战

7.1 复杂极端场景感知鲁棒性不足

当前无人快递车感知技术在常规场景表现稳定，但在极端复杂场景仍存在明显短板：一是极端天气适配性差，暴雨、大雾、大雪、强沙尘天气下，激光雷达点云噪声激增、视觉成像模糊、毫米波雷达杂波干扰，导致目标识别准确率大幅下降；二是复杂光影场景干扰严重，强光逆光、夜间路灯频闪、树荫阴影交替场景下，视觉语义识别易出现误检、漏检；三是杂乱小目标识别能力弱，路面碎石、杂物、低矮围挡、悬空线缆等细小障碍物，易出现感知盲区，引发通行风险。

7.2 多传感器融合同步精度受限

多传感器融合依赖精准的时间同步与空间校准，现阶段工程落地中仍存在同步误差问题。各类传感器采样频率、响应延迟不一致，激光雷达、摄像头、毫米波雷达数据采集时序存在毫秒级偏差，导致多源数据错位融合；同时，车辆长期振动、户外温湿度变化，易引发传感器安装偏移，造成空间校准偏差，最终导致融合感知精度下降，出现目标定位偏移、识别错乱等问题，影响行驶稳定性。

7.3 成本与精度难以平衡

高精度感知硬件（固态激光雷达、高清成像毫米波雷达）成本高昂，大幅提升无人车量产成本，制约行业规模化普及；而低成本传感器精度低、稳定性差，无法适配复杂城市场景。现阶段行业普遍存在“高精度高成本、低成本低精度”的两难问题，如何在控制硬件成本的前提下，通过算法

优化、架构迭代提升感知精度，是行业产业化落地的核心难题。

7.4 算法场景泛化能力薄弱

当前主流感知融合算法多基于常规路况数据集训练，对国内本土化复杂场景（城中村窄路、临时占道施工、非机动车无序穿行、异形障碍物）的样本训练不足，算法泛化能力差。陌生场景、非常规障碍物易出现识别失效，无法适配国内多样化、复杂化的末端配送路况，算法迭代速度滞后于场景落地需求。

7.5 硬件可靠性与耐久性不足

无人快递车长期在户外露天环境作业，面临高温、低温、潮湿、风沙、雨水侵蚀等复杂环境，传统感知传感器防水、防尘、防震性能有限，长期作业易出现硬件老化、精度衰减、故障频发等问题，设备耐久性与户外适配性有待进一步提升，增加了设备运维成本与停机损失。

8 技术优化策略与未来发展趋势

8.1 针对性技术优化策略

8.1.1 优化复杂场景感知算法

针对极端天气、复杂光影、细小目标识别难题，构建本土化复杂场景数据集，扩充雨雪雾、强光、阴影、杂乱障碍物样本数据，优化深度学习算法模型结构；引入大模型场景语义理解能力，提升异形障碍物、陌生场景的识别与预判能力，增强算法场景泛化性与鲁棒性。

8.1.2 提升多源数据同步校准精度

搭建硬件时钟统一同步机制，优化时间戳校准算法，消除多传感器时序偏差；设计柔性防抖安装结构，适配车辆振动工况，定期完成传感器空间校准，修正安装偏移误差；优化卡尔曼滤波融合算法，强化异常数据剔除能力，提升多源数据融合精度与稳定性。

8.1.3 构建低成本高精度感知架构

依托国产化传感器替代进口硬件，降低硬件采购成本；优化感知硬件布局，精简冗余传感器，采用“主高精度硬件+辅助低成本硬件”的差异化布局方案；通过算法轻量化、智能补全、虚拟感知技术，弥补低成本硬件精度短板，实现成本与精度的最优平衡。

8.1.4 强化硬件户外耐久性能

选用车规级、防水防尘防震传感器硬件，优化传感器密封结构与散热设计；搭建硬件状态实时监测模块，实时感知传感器精度衰减、故障异常，提前预警维护，延长硬件使用寿命，降低设备运维成本。

8.2 未来技术发展趋势

8.2.1 感知融合一体化、标准化

未来无人快递车感知技术将彻底告别单一感知方案，多传感器深度融合成为行业标配，逐步形成统一的感知硬件布局、数据融合、算法处理行业标准，实现感知系统模块化、标准化、通用化，大幅降低研发与量产成本，推动行业规模化普及。

8.2.2 感知大模型深度赋能

随着AI大模型技术迭代，感知大模型将全面替代传统轻量化算法，实现场景深度语义理解、复杂障碍物智能预判、多场景自适应适配，解决传统算法泛化能力弱、陌生场景识别差的痛点，实现感知系统从“被动识别”向“主动预判”升级。

8.2.3 硬件轻量化、固态化、国产化

激光雷达将全面从机械雷达向固态雷达迭代，实现小型化、低功耗、高稳定性；毫米波雷达向高清成像、高分辨率方向升级；视觉摄像头实现高动态、夜视超清成像。同时，核心感知硬件全面国产化替代，大幅降低设备成本，推动无人快递车全民普及。[25]

8.2.4 车路协同感知融合升级

未来无人快递车感知将不再局限于单车自主感知，将与智慧道路、路侧感知设备、云端数据平台深度融合，实现“车端感知+路侧感知+云端调度”的全域协同感知，提前获取远距离路况、风险预警信息，彻底解决单车感知盲区、预判滞后问题，大幅提升行驶安全性与通行效率。

8.2.5 低功耗端侧智能部署

通过算法蒸馏、轻量化裁剪、算力优化，实现高精度融合算法、大模型算法在低算力车载终端的高效部署，降低感知系统功耗，适配无人车车载供电、算力有限的工况特征，提升设备续航与长期稳定作业能力。

9 结论

本文以无人快递车环境感知技术为核心研究对象，系统梳理了无人快递车环境感知技术整体体系，深入剖析了激光雷达、视觉摄像头、毫米波雷达、超声波传感器四类单一感知技术的工作原理、核心公式、性能参数、优缺点与适用场景，重点研究了多传感器融合感知的分层架构、核心算法、实现流程与技术优势。结合京东、美团、Nuro三大头部企业真实工程落地案例，辅以2025年行业最新市场统计数据，全面分析了无人快递车感知技术的工程应用现状、市场格局与产业化趋势，精准梳理了当前技术应用中的核心瓶颈，并针对性提出优化策略，预判了行业未来技术迭代方向。

研究得出核心结论：单一环境感知技术受物理特性限制，均存在场景适配短板，无法满足复杂城市末端配送全天候、高精度、高安全的感知需求；多传感器融合技术可整合各类感知硬件的多维优势，实现空间、语义、速度、近距离兜底的全方位感知覆盖，是现阶段无人快递车感知技术的最优解决方案，也是行业核心发展趋势。当前行业已进入规模化落地阶段，感知技术的核心迭代方向从“有无感知”转向“精准感知、智能感知、低成本感知、全域感知”，复杂场景适配、算法泛化能力、成本精度平衡、车路协同融合是未来技术突破的核心关键点。

随着人工智能、传感器硬件、大数据、车路协同技术的持续迭代，无人快递车环境感知系统将向一体化、智能化、标准化、全域化、低成本化方向快速发展，彻底解决复杂场

景感知难题，全面提升无人配送作业的安全性、稳定性与高效性，持续推动末端物流智能化、无人化转型升级，为智慧物流行业高质量发展、数字城市建设提供坚实的技术支撑。同时，本文的研究成果可为中级工程技术人员开展智能无人设备技术研发、工程优化、落地应用提供系统的理论依据与实践参考，具备较高的工程应用价值与学术研究价值。□

参考文献

[1] 谷新建. 校园环境无人快递车导航与避障技术研究[D]. 济南：山东建筑大学, 2024.

[2] 谷新建. 室外环境智能驾驶技术综述[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(10): 1-8.

[3] 李昱乐, 张晓宇, 刘娜. 基于无人快递车的校园物流智能化管理的改进方案研究[J]. 物流科技, 2025, 48(13): 57-61.

[4] 基于激光雷达的低速无人物流车的环境感知算法研究[D]. 2020.

[5] 基于情境感知的无人配送车设计研究[D]. 南京：东南大学, 2021.

[6] Vermesan O, Bahr R, Sand H E, et al. Advancing edge AI perception platforms and sensor fusion for last-mile delivery autonomous vehicles[M]//AI and Edge Computing for Autonomous Vehicles. London: Taylor & Francis, 2026.

[7] Du H, Ren L, Wang Y D, et al. Advancements in perception system with multi-sensor fusion for embodied agents[J]. Information Fusion, 2025, 115: 102637.

[8] Sensor systems for autonomous vehicles: functionality and reliability challenges in adverse environmental conditions[J]. Measurement, 2025, 242: 116538.

[9] The automation concept of the U-Shift II vehicle[J]. SAE Technical Papers, 2025, 1: 2025-01-7023.

[10] LogisticsVISTA: 3D terminal delivery services with UAVs, UGVs and USVs based on foundation models and scenarios engineering[C]//2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Macau: IEEE, 2024.

[11] 无人配送车核心技术体系深度解析：从感知到能源的全链路技术突破[EB/OL]. (2025-08-15)[2026-07-01]. https://four-faith.com/jishuyingyong/1653.html.

[12] 无人配送车产业链上游技术分析[EB/OL]. (2025-08-01)[2026-07-01]. https://www.automotiveworld.cn.

[13] 无人载具走向具身智慧：感知升级与端到端决策[J]. 新電子科技雜誌, 2025, (12): 1-10.

[14] 刘扬, 雷婷. 智能化多功能校园无人物流车设计[J]. 机电产品开发与创新, 2024, 37(5): 53-57.

[15] 张羽政. 人工智能技术在现代物流管理模式中的作用探究[J]. 物流科技, 2022, 45(10): 105-107.

[16] 薛晓蔚. 人工智能技术在现代物流系统的运用研究[J]. 中国物流与采购, 2024, (9): 106-107.

[17] 无人车、无人机：5G助推物流智能化时代加速到来[J]. 物流科技, 2019, 42(7): 1-10.

[18] 杨屏, 屠光明. 人工智能时代现代物流管理模式的创新方向探究[J]. 物流工程与管理, 2021, 43(3): 68-70.

[19] 智能移动机器人系统助力工厂物流智能化升级[J]. 自动化博览, 2020, 37(7): 36-40.

[20] 肖纲超, 朱晓鸣, 李祖标, 等. 怀化卷烟物流智能化柔性配送服务新模式的研究与应用[J]. 中国市场, 2022, (31): 173-177.

[21] 姚长清. 基于流程的烟草配送中心柔性物流设计策略[J]. 重庆与世界(学术版), 2015, 32(12): 138-141.

[22] 马立兵. 人工智能催生现代物流企业转型——以仓储型物流企业为例[J]. 中国储运, 2019, (9): 142-144.[18] 冯消冰. 具身智能体：焊接机器人的“大脑”与“神经系统”[N]. 中国工业报, 2026-02-10.

[23] Li B, Liu S S, Tang J, et al. Autonomous last-mile delivery vehicles in complex traffic environments[J/OL]. arXiv preprint, 2020, arXiv:2001.08096. https://arxiv.org/abs/2001.08096.

[24] 美团无人配送部. 基于特征点的视觉全局定位技术[EB/OL]. (2019-04-26). https://cloud.tencent.com/developer/article/1418690.

[25] 清华大学, 华中科技大学, 北京三快在线科技有限公司（美团）, 北京京东乾石科技有限公司（京东）, 等. 复杂多域环境下异构自主无人系统智能感知与导航控制技术[R]. 北京：中国自动化学会科技成果鉴定会, 2024.

作者简介:周求，男，工程师，现从事自动化工程设计与销售。

版权为作者所有。本文为开放获取文章，遵循知识共享署名（CC BY）许可协议（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/）的条款和条件进行发布。

Copyright by the authors.This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

智能阀门在污水处理系统中的应用

谭图
（香港海源贸易有限公司，中国香港）

摘要:本文系统梳理智能阀门的整体结构组成、核心分类标准与闭环工作原理，针对性探究其在污水处理进水控制系统、生化曝气系统、污泥回流系统、药剂投加系统、远程智能监控系统五大核心工艺模块中的具体应用方式、运行逻辑与实际应用价值。同时从工程应用角度，深度剖析智能阀门相较于传统阀门的核心技术优势，客观梳理现阶段设备推广应用过程中存在的成本壁垒、复杂工况适应性弱、专业运维人才缺失、系统兼容性不足、数据安全薄弱等现实问题。最后结合智慧水务、双碳政策及智能制造的行业发展趋势，预判智能阀门高精度耐用化、全域智能化、行业标准化、绿色节能集成化的未来升级方向。

关键词:智能阀门；污水处理；自动控制；工艺系统；智慧水务；物联网

Application of Smart Valves in Wastewater Treatment Systems

TAN Tu
(Ocean Source Trading Co., Ltd., Hong Kong, China)

Abstract:This paper systematically outlines the overall structural composition, core classification criteria, and closed-loop operating principles of smart valves, and specifically investigates their application methods, operational logic, and practical value in five key process modules: influent control systems for wastewater treatment, biological aeration systems, sludge recirculation systems, chemical dosing systems, and remote intelligent monitoring systems. From an engineering application perspective, it deeply analyzes the core technological advantages of smart valves over traditional valves, and objectively identifies current challenges in equipment promotion, including high cost barriers, limited adaptability to complex operating conditions, shortage of professional maintenance personnel, insufficient system compatibility, and weak data security. Finally, considering industry trends such as smart water management, dual-carbon policies, and intelligent manufacturing, the paper forecasts future development directions for smart valves, including higher precision and durability, full-domain intelligence, industry standardization, and green, energy-efficient integration.

Key words:smart valve; wastewater treatment; automatic control; process system; smart water management; Internet of Things

1 引言

随着我国城镇化进程持续加快、工业产业体系不断完善，城镇生活污水、工业生产废水排放量逐年递增，水环境治理压力持续加大。近年来，国家相继出台《城镇污水处理提质增效三年行动方案》《智慧水务建设技术指南》等多项政策文件，明确要求污水处理行业摒弃粗放式运维模式，推进污水处理设施自动化、智能化升级，实现污水治理提质、节能、降耗、增效的多重目标。污水处理作为水资源循环利用、水生态修复、水环境治理的核心环节，其运行稳定性、处理精准度、能耗控制水平直接关系区域生态环境质量与水资源利用效率。

完整的现代污水处理工艺流程涵盖进水预处理、生化处理、泥水分离、污泥处置、药剂净化、尾水达标排放等多个相互关联、相互影响的工艺单元，各单元的流体输送、风量调节、药剂投加、污泥回流等操作均需要阀门设备进行精准控制，阀门的运行状态与调控精度直接决定整套污水处理系统的运行稳定性、出水水质达标率与整体能耗水平。长期以来，我国绝大多数中小型污水处理厂及老旧市政污水站，普遍采用传统手动阀门、普通电动机械式阀门作为核心调控设备。此类设备仅具备简单的管路通断与固定开度调节功能，无法根据进水水质、水量的动态波动进行实时自适应调节，存在极大的运行局限性。在实际工程运行中，极易出现曝气风量分配不均、药剂投加过量或不足、污泥回流比例失衡、管网压力骤升骤降、池体液位波动异常等问题，不仅导致污水处理效率下降、出水COD、氨氮、总磷等指标超标，还会造成大量电能、药剂资源浪费，增加设备磨损与运维成本，制约污水处理行业的高质量发展。

在智能制造与物联网技术全面普及的背景下，智能流体控制设备快速迭代升级，智能阀门逐步替代传统机械式阀门，成为智慧污水处理系统的核心组成部分。智能阀门是集成机械阀体、智能执行机构、高精度传感模块、嵌入式控制芯片、物联网通信单元的一体化智能设备，突破了传统阀门单一执行的功能局限，融合了数据感知、智能运算、精准执行、故障诊断、远程传输、自动预警等多重功能。能够依托在线监测数据与自适应控制算法，实现污水处理全工艺环节的无人值守精准调控，有效适配复杂多变的污水工况，大幅

提升污水处理系统的精细化运维水平。

目前，智能阀门已广泛应用于市政生活污水处理、化工废水处理、印染废水处理、养殖污水处理等各类水环境治理工程中，在稳定出水水质、降低运行能耗、减少人工成本、提升系统自动化水平等方面展现出显著优势。但受限于设备成本、工况环境、行业标准、人才储备等多重因素，智能阀门在基层中小型污水厂、乡镇污水处理站点的普及率仍然偏低，且在复杂腐蚀、高杂质、潮湿恶劣工况下的运行稳定性仍存在一定短板，设备适配性、运维体系、数据安全等方面仍存在诸多亟待解决的问题。基于上述行业现状，本文系统性开展智能阀门在污水处理系统中的应用研究，全面阐述设备结构原理、细分应用场景、核心技术优势与现存应用痛点，并结合行业政策与技术迭代趋势，明确未来智能阀门的升级发展方向，为污水处理智能化改造工程提供全面、详实的理论支撑与实践指导。[1]

2. 智能阀门的基本组成、分类与工作原理

2.1 智能阀门基本组成

智能阀门是机电一体化、物联网智能化高度融合的新型流体控制设备，相较于结构单一、功能简单的传统阀门，其摒弃了纯机械驱动、人工操控的运行模式，构建了“机械执行+智能感知+运算控制+远程传输”的一体化架构。整套设备结构精密、功能完善，各模块独立运行且协同联动，共同实现流体参数的精准调控与设备状态的智能管控。其核心组成主要包含机械阀体结构、智能执行机构、传感检测模块、智能控制与通信模块四大核心部分，各模块具体功能与结构特性如下。

第一，机械阀体结构。作为智能阀门的基础机械载体，是直接接触污水介质、实现管路通断与流体调节的核心执行结构，主要由阀体外壳、阀芯、阀座、密封垫圈、阀杆、限位结构等部件组成。根据污水处理不同工艺场景的介质特性与调控需求，常用阀体类型包含蝶阀、闸阀、球阀、截止阀、调节阀、止回阀等。其中，蝶阀结构简单、体积小巧、调节线性度好，公称通径覆盖DN50~DN1400，适配0.1~1.6MPa工作压力，广泛应用于曝气风管、污水输送管路；闸阀通流能力强、流阻系数≤0.05，无节流死角，适用于进水总管、尾水排放总管的通断控制；调节阀调节精度高，可实现无级微调，主要应用于药剂投加、污泥回流等精细化调控场景。为适配污水处理介质悬浮物多、腐蚀性强、易结垢的特点，阀体通常采用QT450球墨铸铁、304/316L不锈钢、衬胶防腐材质，密封组件选用EPDM、PTFE耐磨耐老化橡胶材料，常规适配介质温度0~80℃，特殊防腐款可耐受-20℃~120℃温差，有效提升设备抗腐蚀、抗堵塞、耐磨损能力，适配复杂污水工况长期连续运行需求。

第二，智能执行机构。执行机构是智能阀门的动力驱动核心，主要用于接收控制芯片的调控指令，驱动阀杆与阀芯完成启闭、开度微调、复位等动作，直接决定阀门的响应速度与调节精度。现阶段污水处理领域应用的智能阀门执行机构主要分为电动执行机构与气动执行机构两类。电动执行机构以伺服电机为动力源，搭配精密减速传动结构，标配0~100%无级开度调节，调节分辨率可达0.1%，全行程响应时间控制在5~30s，具备调节精度高、动作平稳、控制便捷、适配性强的特点，是目前污水处理系统中应用最广泛的执行类型。气动执行机构以0.4~0.6MPa压缩空气为动力源，结构简单、防爆等级可达Ex d II BT4，故障率低，主要应用于化工废水、易燃易爆污水处理工况。智能执行机构内置限位保护、过载保护、扭矩保护装置，额定扭矩覆盖50~20000N·m，可有效避免阀门超行程运行、卡顿过载造成的设备损坏，提升设备运行安全性与稳定性。

第三，传感检测模块。传感模块是智能阀门的“感知神经”，是实现智能调控的数据基础，由各类高精度传感器与信号采集单元组成，可24小时不间断采集管路与设备运行的实时参数。污水处理专用智能阀门集成的传感器主要包括流量传感器、压力传感器、液位传感器、温度传感器、阀位反馈传感器、过载传感器等，所有传感元件防护等级均达到IP67，适配厂区潮湿、多尘、浸水工况。其中，流量传感器测量精度可达±0.5%FS，量程覆盖0.5~2000m^3/h，实时监测管路污水、药剂、风量的流通流量；压力传感器量程0~2.5MPa，测量精度±0.2%FS，监测管网水压、风压变化，预判管路堵塞、泄压、爆管风险；液位传感器测距精度±1mm，适配调节池、曝气池、沉淀池液位监测，为进水调控提供数据支撑；阀位反馈传感器分辨率0.1%，实时精准采集阀门当前开度数值，将机械动作转化为电信号回传控制芯片，形成闭环调控。所有传感器采样频率可达10~100Hz，可精准捕捉工况微小波动，误差率极低，为系统智能运算与动态调节提供精准的数据支撑。[2]

第四，智能控制与通信模块。该模块是智能阀门的“大脑中枢”，主要由嵌入式高速PLC控制芯片、高精度信号处理单元、优化PID算法程序、故障诊断单元、物联网通信单元组成。控制芯片可接收4~20mA模拟信号、RS485数字信号，完成信号转换、数据运算、逻辑分析，结合系统预设的工艺参数阈值，输出精准的调控指令，驱动执行机构完成自适应调节。内置优化PID自适应算法，调节超调量≤3%、稳态误差≤1%，可有效解决传统调控超调、滞后、震荡的问题，大幅提升调节稳定性。同时，通信模块支持4G、5G、LoRa、Modbus-RTU/TCP、Profibus等多种通信协议，通信延迟≤200ms，可无缝对接污水厂DCS集散控制系统、PLC控制柜、云端智慧水务平台，实现运行数据实时上传、远程参数调试、设备状态监控、故障信息主动报警，彻底实现阀门设备的无人值守智能化管控。此外，模块内置128M本地存储单元，可留存10万条以上运行数据与操作记录，数据存储周期可达5年以上，满足工况溯源、工艺优化、运维分析的需求。设备整体工作环境温度适配-10℃~60℃，相对湿度≤95%，无凝露，适配污水厂恶劣运行环境。

2.2 智能阀门主要分类

结合污水处理行业的应用场景与控制需求，可按照驱动方式、调节功能、通信模式、介质适配类型对智能阀门进行细分，不同类型阀门的性能特点与适用场景存在明显差异。

按照驱动方式可分为智能电动阀门、智能气动阀门、智能液动阀门，其中智能电动阀门适配绝大多数市政污水工况，智能气动阀门多用于防爆防腐工况，液动阀门则适配大口径、大流量高压管路。按照调节功能可分为智能开关型阀门与智能调节型阀门，开关型仅用于管路通断控制，适用于进水总阀、排放阀；调节型可实现无级开度微调，适配曝气、药剂投加、污泥回流等精细化调控场景。按照通信方式可分为有线通信智能阀门与无线物联网智能阀门，有线通信稳定性强、延迟低，适用于厂区固定设备；无线阀门部署灵活、布线成本低，适用于偏远乡镇污水站点。科学区分阀门类型，可有效提升污水处理系统设备选型的精准度，保障工艺适配性。

2.3 智能阀门工作原理

智能阀门摒弃了传统阀门人工判断、手动操作的运行模式，依托多模块协同联动，形成实时感知–信号转换–数据运算–精准执行–反馈修正–数据上传的全闭环智能控制逻辑，实现完全自动化、自适应、高精度的流体调控，整体运行流程连贯、响应迅速、调控精准。

设备正常运行过程中，传感检测模块持续采集污水处理管网及池体的流量、压力、液位、温度、阀门开度等实时工况参数，将采集到的物理模拟信号转化为数字电信号，通过信号传输线路实时输送至核心控制芯片。控制芯片内置污水处理工艺最优参数阈值与优化PID控制算法，对接收的海量实时数据进行快速运算、对比与分析，精准判断当前系统运行工况是否处于稳定最优状态，识别水质水量波动、管路压力异常、开度偏移等工况问题。

当系统检测到工况偏离预设标准时，例如进水流量骤增、曝气池溶解氧浓度偏低、药剂投加流量不足、污泥回流流量失衡、管网压力过高等情况，控制芯片将快速生成对应的调节指令，精准控制智能执行机构动作，动态调整阀门开度大小或启闭状态，实时改变管路流体流量、风压、水压，快速修正工况偏差。在调节完成后，阀位反馈传感器会实时采集最新的阀门开度与流体参数，再次回传至控制芯片，形成闭环反馈机制。系统根据反馈数据二次修正调节精度，避免调节过度或调节不足的问题，反复迭代优化，直至系统工况回归最优运行区间，保障整套污水处理工艺稳定运行。

与此同时，智能通信模块全程同步采集设备运行状态、工况参数、调节记录、故障信息等数据，实时上传至本地控制柜与云端远程监控平台，实现数据可视化展示、云端存储、工况曲线生成与运行报表统计。当设备出现阀芯堵塞、执行器过载、信号中断、传感数据异常、管路压力超标等故障问题时，系统内置的故障诊断程序可快速识别故障类型与故障位置，主动触发声光报警与移动端消息推送，提醒运维人员及时处置，实现故障早发现、早排查、早修复，最大限度降低设备故障对污水处理工艺的影响。整套运行流程无需人工干预，可24小时连续自适应运行，完美适配污水处理工况动态波动的运行特点。[3,4]

3. 智能阀门在污水处理各系统中的具体应用

3.1 在进水控制系统中的应用

进水控制系统是污水处理工艺的第一道核心工序，承担着污水收集、均质稳压、水量分配、预处理缓冲的重要作用，整套系统的运行稳定性直接决定后续生化处理、泥水分离工序的处理效果。城镇生活污水与工业废水的进水工况具备极强的随机性与波动性，昼夜、早晚、节假日的污水排放量、污染物浓度差异极大。日间居民生产生活活跃、工业产能较高，进水流量大、污染物浓度高；夜间进水流量大幅下降、水质负荷偏低；雨季雨水混入管网，会造成进水水量骤增、水质稀释波动剧烈。传统污水处理厂采用人工调节普通阀门的方式控制进水量，调节滞后性极强，无法实时适配工况波动，极易造成系统超负荷运行或低负荷空转，引发预处理单元淤积、生化系统菌群活性失衡、处理效率下降等一系列问题。

智能阀门在进水控制系统中主要部署于厂区进水总管、调节池进水支管、各处理单元分配渠管路、溢流管路等关键位置，搭配高精度液位传感器、流量传感器、压力传感器构建进水智能调控体系，核心实现恒液位、恒流量、超量限流、防倒灌、均衡配水五大功能。在日常运行过程中，智能阀门实时采集进水瞬时流量、调节池液位高度、管网进水压力等参数，通过内置算法动态调整阀门开度。当进水高峰期流量过大、调节池液位快速上涨、接近警戒阈值时，智能阀门自动小幅减小开度，限流稳压，减缓进水速率，避免后续格栅机、沉砂池、生化池因超负荷运行出现堵塞、处理不达标、设备过载故障等问题。当进水低谷期流量偏低、调节池液位过低时，阀门自动增大开度，保障污水连续稳定进入处理系统，维持整套工艺连续运行，防止生化系统因进水不足出现污泥老化、菌群死亡的问题。

针对雨季突发大水、管网压力骤增的特殊工况，智能进水阀门可联动溢流管路阀门自动开启，实现多余污水分流泄压，避免管网爆管、污水倒灌、厂区积水等安全事故。同时，对于多组并行的污水处理单元，智能阀门可精准分配各单元进水流量，实现负荷均匀分配，避免单组设备过载、闲置的情况，大幅提升预处理系统的稳定性与抗冲击负荷能力，为后续生化处理工序提供水质、水量稳定的进水条件，从源头降低污水处理工艺波动风险。

工程应用案例1：漳州长泰污水处理厂进水智能调控改造项目

漳州长泰污水处理厂为福建省首个全流程智能化一级A提标改造污水厂，设计日处理污水量15万吨，厂区进水存在典型的昼夜波动、雨季水量骤增、工业废水混排导致的水质波动剧烈等问题，传统手动阀门调控滞后，易出现进水分配不均、池体液位失衡、预处理单元淤积等问题。本次改造在厂区进水总管、各处理单元分配渠、溢流管路批量部署68台DN600~DN1200防结垢智能电动蝶阀，设备额定工作压力1.6MPa，防护等级IP67，采用大曲率流线流道与纳米防结垢涂层，污泥附着力降低80%，完美适配高杂质、高悬浮物的污水进水工况。整套进水智能控制系统联动液位、流量、压力传感设备，依托±0.2%FS高精度采集参数，实现进

水恒流量、恒液位自适应调控。改造完成后，厂区进水流量分配均匀度提升40%，雨季污水溢流、倒灌事故彻底清零，预处理单元淤积故障率下降90%，进水工况稳定性大幅提升，为后续生化系统稳定运行奠定了坚实基础，保障了全厂出水水质持续达标。[5,6]

3.2 在曝气系统中的应用

曝气系统是污水生化处理的核心单元，也是污水处理厂能耗占比最高的工艺系统，其核心功能是通过风机向曝气池内输送空气，为好氧微生物提供氧气，保障微生物对污水中有机物、氨氮、总磷等污染物的降解与去除。相关行业数据统计显示，曝气系统风机能耗占污水厂总运行能耗的50%~60%，是污水处理节能降耗的关键突破口。生化池溶解氧（DO）浓度是曝气系统的核心控制参数，直接决定微生物活性与污水处理效果：溶解氧浓度过低，微生物供氧不足，污染物降解效率大幅下降，出水COD、氨氮超标；溶解氧浓度过高，会造成无效电能浪费，同时引发污泥松散、沉降性能变差、出水悬浮物超标、污泥膨胀等工艺问题。

传统曝气系统普遍采用固定阀门开度、恒风量送风的运行模式，无法根据进水水质负荷变化调整曝气量。无论进水污染物浓度高低，风机与阀门均保持固定运行状态，要么供氧不足导致处理不达标，要么过度曝气造成大量能源浪费，工艺稳定性与节能性极差。而智能阀门与溶解氧在线监测设备、风机变频控制系统联动，构建闭环智能曝气调控体系，彻底解决传统曝气模式的行业痛点。智能风量调节阀均匀部署于曝气池各分区的送风支管，实现分区域、精细化风量调控，改变传统整体调控、局部失衡的问题。

系统运行过程中，溶解氧传感器实时采集曝气池前端、中端、后端不同区域的溶解氧浓度，将数据传输至控制系统，智能阀门通过优化PID算法动态调整送风阀门开度，精准控制各区域曝气量。当进水有机物、氨氮浓度升高，微生物耗氧速率加快、池内溶解氧下降时，阀门自动增大开度，提升送风风量，快速补充氧气，维持微生物高活性降解状态；当进水水质负荷降低、微生物耗氧减少、溶解氧浓度超标时，阀门自动减小开度，降低曝气量，杜绝无效曝气能耗。通过智能阀门的动态调控，可将生化池溶解氧浓度稳定控制在2.0~2.8mg/L的最优工艺区间，精准适配微生物生长代谢需求。[7]

同时，智能阀门可实现曝气分区差异化调控，针对进水端高污染负荷区域增大曝气量，出水端低负荷区域减小曝气量，解决传统曝气“前端不足、后端过量”的失衡问题。实际工程应用数据表明，搭载智能阀门的曝气系统可降低25%~35%的风机能耗，大幅提升污水处理节能效果，同时稳定生化处理工况，减少污泥膨胀、水质波动等工艺故障，显著提升出水水质达标率。

工程应用案例2：杭州钱江水处理厂精确曝气节能改造项目

杭州钱江水处理厂四期工程采用传统活性污泥处理工艺，厂区曝气系统长期采用固定开度阀门恒风量运行模式，存在严重的过度曝气、能耗浪费问题，同时生化池不同区域溶解氧分布不均，前端供氧不足、后端供氧过剩，导致污染物降解效率不稳定、污泥沉降性能偏差。为解决上述痛点，厂区开展精确曝气智能化改造，在曝气池各分区送风支管全面替换为智能调节蝶阀，设备调节精度±1%，全行程响应时间≤5s，搭配分布式溶解氧在线监测设备，构建“DO参数采集-智能阀门调控-风机变频联动”的闭环精准曝气系统。系统依托优化PID算法（超调量≤3%、稳态误差≤1%），根据各分区实时水质负荷动态调整阀门开度，实现分区按需配气、精准控氧。改造后，生化池溶解氧浓度可稳定控制在2.0~2.5mg/L最优区间，池内溶解氧均匀性大幅提升，出水氨氮、COD达标率稳定100%；曝气风机综合能耗降低32%，单座生化池年均节电超20万度，节能降耗成效极为显著，为大型污水厂曝气系统智能化节能改造提供了标杆范本。[8]

3.3 在污泥回流系统中的应用

污泥回流系统是活性污泥法污水处理工艺的重要组成部分，核心功能是将二沉池底部沉淀的高浓度活性污泥，通过回流管路输送至曝气池前端，持续补充生化池内的微生物菌群，维持池内稳定的污泥浓度（MLSS），保障生化反应连续、稳定、高效进行。污泥回流比是该系统的核心工艺参数，回流比的稳定性与精准度直接决定生化系统菌群总量、污泥活性与污染物降解能力。常规市政污水处理工艺的最优污泥回流比控制在50%~100%，若回流比过小，曝气池污泥浓度不足，菌群数量偏少，无法充分降解污染物；回流比过大，会导致池内污泥堆积、污泥龄缩短、菌群老化，同时增加管路输送能耗与设备磨损，极易引发污泥膨胀、泥水分离效果变差等问题。

传统污泥回流系统采用人工固定开度调节模式，运维人员仅能依靠经验定期调整阀门，调节精度低、滞后性强，无法适配进水水质、水量的动态变化。进水负荷波动时，回流比无法及时适配，导致生化系统抗冲击负荷能力弱，水质极易出现波动。智能调节阀批量应用于污泥回流管路后，可结合曝气池污泥浓度传感器、进水流量传感器、二沉池泥水界面监测设备，构建自适应回流调控系统，实现回流比的动态精准控制。

在实际运行中，智能阀门实时采集回流污泥流量、曝气池污泥浓度、进水瞬时流量等核心参数，通过工艺模型实时计算最优回流比，动态调整阀门开度。当进水污染物浓度高、水质负荷大时，系统自动增大阀门开度，提升污泥回流流量，增加曝气池微生物菌群总量，强化污染物降解能力，保障高负荷工况下的处理效果；当进水水质优良、负荷偏低时，自动减小回流流量，避免污泥过量堆积、菌群老化，降低无效能耗与管路磨损。同时，智能阀门采用无级平稳调节方式，避免传统阀门骤开骤关造成的管路水压冲击、污泥断流、流量震荡等问题，保障回流流量连续稳定。

除此之外，智能阀门具备防堵塞智能调控功能，针对污泥介质杂质多、易淤积的特点，可定时小幅开合冲刷管路，有效减少污泥淤积、管路堵塞故障，降低设备运维频次。通过智能阀门的精准调控，可将曝气池污泥浓度稳定维持在

3000~4000mg/L的最优区间，大幅提升生化系统运行稳定性与抗冲击负荷能力，减少工艺故障发生率，保障泥水分离效果与出水水质稳定。

工程应用案例3：福建沿海某污水厂污泥回流系统智能化改造

福建沿海某市政污水处理厂紧邻工业区与海域，污水含盐量高、杂质多、腐蚀性强，污泥回流管路极易出现结垢、淤积、腐蚀问题，原有传统手动调节阀调节误差±8%~±10%、响应滞后40s以上，调节精度差、防堵能力弱，回流比长期失衡，导致生化池污泥浓度波动幅度大，频繁出现污泥膨胀、出水悬浮物超标等工艺故障。针对该复杂工况，厂区将全部污泥回流管路阀门替换为带自清洁功能的智能防腐调节阀，阀体采用316L不锈钢双密封防腐结构，适配高盐、高杂质污泥介质，设备公称压力1.0MPa，调节分辨率0.1%，同时搭载自适应回流调控算法，联动污泥浓度、进水流量传感器动态优化回流比。设备新增定时冲刷逻辑，每日定时小幅启闭阀门冲刷管路，彻底解决污泥淤积堵塞问题。改造完成后，厂区污泥回流比控制精度提升至±2%，曝气池污泥浓度波动幅度缩小70%，污泥膨胀、管路堵塞故障基本消除，生化系统抗冲击负荷能力显著提升，全年工艺故障停机时间减少95%，运维人工成本大幅降低。[9]

3.4 在药剂投加系统中的应用

药剂投加系统是污水处理水质达标、深度净化的关键工序，主要包含混凝投加、消毒投加、酸碱中和投加、除磷投加等多个细分环节。通过投加聚合氯化铝、聚丙烯酰胺、次氯酸钠、酸碱调节剂、除磷剂等药剂，实现污水中悬浮物、胶体、重金属、细菌病毒、总磷等污染物的去除，同时调节水体pH值，保障尾水达标排放。药剂投加的精准度直接决定污水处理效果、药剂成本与水体安全：药剂投加不足，无法达到净化、消毒、中和效果，出水指标超标；药剂投加过量，不仅造成大量药剂资源浪费、运行成本攀升，还会导致水体药剂残留、二次污染、水体酸碱度失衡等问题。

传统药剂投加系统多采用固定流量投加、人工定时调节的运行模式，完全无法适配进水水质的动态波动。水质污染严重时投加量不足，水质优良时投加过量，长期存在药剂浪费、处理效果不稳定、二次污染风险高等诸多问题。智能阀门搭配在线水质检测仪、药剂流量计、投加泵设备，构建全自动精准投加控制系统，实现“按需投加、动态适配、精准控量”的精细化运维模式。

系统运行过程中，COD传感器、氨氮传感器、浊度传感器、pH传感器实时监测原水污染物浓度、水体浊度、酸碱度等关键参数，控制系统根据实时水质数据与工艺模型，精准计算最优药剂投加量，同步驱动智能调节阀调整药剂管路开度，无级调节药剂投加流量。针对混凝沉淀工序，水质浊度升高时自动增大药剂投加量，保障悬浮物快速絮凝沉淀；针对消毒工序，根据出水细菌指标动态调整次氯酸钠投加量，在达标消毒的前提下减少药剂残留；针对酸碱中和工序，根据水体pH值精准调控酸碱药剂流量，将水体pH值稳定控制在6~9的达标区间。

同时，智能阀门可实现多药剂协同调控，适配复杂工业废水的多维度净化需求，有效解决传统投加模式精度差、能耗高、浪费大的问题。工程实践数据显示，智能阀门精准投加系统可降低15%~20%的药剂消耗，大幅削减污水处理耗材成本，同时稳定出水水质，彻底杜绝药剂过量引发的水体二次污染问题，实现污水处理提质与降耗的双重目标。

工程应用案例4：武汉北湖污水处理厂智能药剂投加改造项目

武汉北湖污水处理厂为大型市政综合污水处理厂，进水包含生活污水与少量工业废水，水质浊度、污染物浓度昼夜、季节波动极大，传统固定流量药剂投加模式存在明显滞后性，水质较差时投加不足导致出水超标，水质优良时过量投药造成药剂浪费与水体残留。为实现精细化运维，厂区对混凝、消毒、除磷三套药剂投加系统进行智能化升级，安装多组微型智能电动调节阀，设备支持0~100%无级微调，响应速度≤5s，搭配高精度浊度、总磷、余氯在线监测传感器（测量精度±0.5%FS），构建全自动闭环投加控制系统。系统可根据实时水质数据动态调整阀门开度，无级调节药剂投加流量，实现“按需精准投加”。改造后，厂区PAC、PAM及消毒药剂综合消耗量降低18.5%，年均节省药剂耗材费用超60万元；出水总磷、浊度指标稳定性显著提升，药剂残留问题彻底解决，在保障出水达标排放的前提下，实现了降本增效、绿色运维的目标。[10]

3.5 在远程监控系统中的应用

传统污水处理运维模式高度依赖人工现场操作、定时巡检、手动调参，整套系统存在运维效率低下、人工成本高昂、故障发现滞后、工况无法实时溯源、人为操作失误率高等诸多弊端。中小型污水厂普遍存在运维人员不足、专业能力薄弱的问题，极易出现设备故障未及时处置、工艺参数调整不及时导致的出水超标、设备损坏等问题。随着智慧水务建设的不断推进，远程智能监控系统成为现代污水厂的标配，而智能阀门是远程监控体系的核心终端执行设备，是实现无人值守、智能化运维的基础载体。

智能阀门依托内置的物联网通信模块，可无缝对接污水厂本地DCS控制系统、PLC控制柜、云端智慧水务平台与移动端监控系统，构建“终端采集-云端传输-平台分析-远程管控”的全流程可视化运维体系。所有智能阀门可实时上传自身运行开度、设备运行状态、管路流量、介质压力、设备温度、故障代码、调节记录等全维度数据，平台通过大数据分析自动生成工况曲线、运行报表、能耗统计报告，实现污水处理全工艺参数可视化展示。

运维人员无需现场值守，可通过电脑终端、手机APP远程实时查看全厂各工艺节点阀门与设备的运行状态，远程完成阀门启闭、开度微调、参数校准、模式切换等操作，实现异地远程调控。同时，智能阀门搭载高精度故障自诊断系统，可实时识别阀芯堵塞、执行器过载、信号中断、传感失效、管路压力异常、流量异常等各类故障，精准定位故障位置、判断故障原因，第一时间向平台与运维人员推送报警信息，实现故障提前预判、快速处置，将工艺故障与设备损坏

风险降到最低。

此外，系统可长期留存所有运行数据与操作记录，支持历史工况溯源、工艺参数优化、能耗数据分析、设备运维统计，为污水厂工艺升级、节能改造、设备维保计划制定提供精准的数据支撑。智能阀门与远程监控系统的深度融合，彻底颠覆了传统人工值守模式，大幅降低人工运维成本，提升设备运行稳定性与工艺管控精度，全面推动污水处理厂向自动化、智能化、无人值守方向升级。

工程应用案例5：广州大坦沙污水处理厂智慧远程运维改造项目

广州大坦沙污水处理厂为国内老牌大型市政污水厂，厂区设备老旧、管路复杂，大量阀门部署于地下管廊、高空设备层等危险区域，传统运维模式需要人工高频次现场巡检、手动调阀，作业风险高、运维效率低、故障响应滞后。为提升厂区智能化运维水平，该厂开展关键阀门电动智能化改造，批量替换为带物联网通信功能的智能加长杆电动阀门，设备支持Modbus-TCP通信协议，通信延迟≤200ms，防护等级IP66，可实时上传开度、压力、流量、运行故障等全维度数据，无缝对接厂区DCS控制系统与云端远程监控平台。改造后，运维人员可通过中控室、移动端实现所有阀门的远程启闭、开度微调、参数校准，阀门响应速度提升90%以上，彻底杜绝高空、地下危险区域人工操作风险。同时，设备搭载高精度故障自诊断模块，可精准识别堵塞、过载、信号异常等故障，主动弹窗报警，实现故障预判式维保，设备故障率下降65%，厂区现场运维人员工作量减少50%，成功实现从“人工现场值守”向“远程智能管控、无人值守运维”的模式升级，为老旧污水厂智能化改造提供了成熟案例。[11]

4. 智能阀门在污水处理中的技术优势

4.1 调控精度优异，工艺运行稳定性大幅提升

传统机械式阀门仅能实现固定档位调节或粗略手动调节，调节误差普遍在±5%~±10%、响应滞后时间长达30~60s，无法实现精细化无级调控，难以适配污水处理水质水量的动态波动特性。而智能阀门依托高精度传感采集技术与优化PID闭环控制算法，可实现0~100%开度无级微调，核心控制参数统一为：调节精度误差≤±1%、稳态响应时间≤5s、算法超调量≤3%，具备响应速度快、调节线性度优异、工况适配性强等优势，可精准捕捉工况微小波动并快速完成参数修正。在曝气、药剂投加、污泥回流等核心精细化工艺中，智能阀门可将溶解氧浓度、药剂流量、污泥回流比等关键参数稳定控制在最优工艺区间，彻底解决人工调节滞后、误差大、工况震荡的行业痛点。同时，闭环反馈修正机制可持续迭代优化调节精度，有效提升污水处理系统的抗冲击负荷能力，保障进水波动、水质突变等复杂工况下的出水水质稳定，大幅降低出水超标的风险。

4.2 节能降耗效果显著，降低综合运行成本

能耗与耗材成本是污水处理厂最核心的运行支出，曝气风机、水泵、药剂耗材占据了污水厂绝大部分运行成本。传统固定开度阀门的粗放式运行模式，存在大量无效能耗与药剂浪费，资源利用率极低。智能阀门通过全流程动态精细化调控，按需匹配曝气量、回流量、药剂投加量与进水负荷，从根源上杜绝过度曝气、过量投药、无效水力损耗等浪费问题。在曝气系统中，精准控氧可减少25%~35%的风机能耗；在药剂投加系统中，精准按需投加可降低15%~20%的药剂消耗；在管路输送系统中，稳定的流量压力可减少水泵频繁启停与过载运行，降低水泵能耗与设备磨损。同时，精准稳定的工况可大幅减少设备故障频次与维保成本，延长阀门、水泵、风机等配套设备的使用寿命，全方位降低污水处理厂的综合运维成本，助力污水厂实现低碳节能运行。

4.3 智能化程度高，运维模式全面升级

智能阀门集成感知、运算、执行、预警、通信、存储多重功能，实现了设备从“被动执行”到“主动智能调控”的跨越式升级，彻底替代了传统人工巡检、手动调阀、现场排查的粗放运维模式。设备可24小时不间断全自动运行，无需人工实时干预，大幅减少人工值守工作量，降低人为操作失误引发的工艺故障。同时，设备具备故障自诊断、主动报警、数据溯源、智能分析功能，可提前预判设备老化、管路堵塞、参数异常等问题，实现故障预防性维保，改变传统“故障后维修”的被动运维模式。结合远程监控平台，可实现全厂设备集中管控、远程调试、无人值守运行，大幅提升污水处理系统的自动化、智能化运维水平，适配现代智慧水务的发展需求。[12]

4.4 工况适配性强，通用性与可靠性突出

污水处理工况复杂多变，介质具有高杂质、高腐蚀、易结垢、流量波动大的特点，且厂区存在潮湿、温差大、多粉尘的恶劣运行环境。智能阀门可根据不同工艺场景与介质特性，定制化选用不锈钢、衬胶、防腐涂层等耐磨防腐材质，优化防堵塞阀芯结构、密封结构与传感探头防护设计，能够有效适配污水、污泥、化学药剂、潮湿空气等复杂工况环境，抗腐蚀、抗堵塞、抗老化性能优异。同时，智能阀门支持PID自适应调节、分程控制、联动控制、阈值保护等多种智能控制模式，可灵活适配进水调控、曝气控氧、污泥回流、药剂投加、尾水排放等所有污水处理工艺场景，不仅适用于市政生活污水处理，还可适配化工、印染、养殖、食品加工等各类工业废水处理工程，设备通用性、工况适配性与运行可靠性远优于传统阀门。

4.5 数据可溯源，助力工艺优化与标准化管理

传统阀门无数据采集与存储功能，工艺运行参数无法量化记录，运维管理依赖人工经验，难以实现标准化、数据化管控。智能阀门可全程采集、存储、上传所有运行数据与调节记录，形成完整的工况数据库，运维管理人员可通过历史数据复盘、参数分析，精准识别工艺运行短板、能耗浪费节点、设备高频故障点位，针对性优化工艺参数与运行方案。同时，完整的数据记录可满足环保监管、工艺核查、项目验收的数据溯源需求，推动污水处理运维从“经验驱动”向“数据驱动”转型，助力污水厂实现标准化、精细化、数字

化管理。

5. 智能阀门应用中存在的问题与短板

5.1 设备采购与改造成本偏高，普及存在资金壁垒

智能阀门属于高度集成的机电一体化智能设备，融合了高精度传感、嵌入式控制、物联网通信、精密机械加工等多项高端技术，生产工艺复杂、核心部件成本较高，单台设备采购价格远高于传统机械式阀门。对于大型新建智慧污水厂，设备智能化改造资金充足，可实现全套智能阀门的普及应用；但对于大量中小型乡镇污水处理站、老旧改造污水厂，普遍存在运营资金有限、预算紧张的问题，批量替换智能阀门的初期设备采购、安装调试、系统对接改造成本过高，资金压力极大。现阶段，成本壁垒是制约智能阀门在基层污水处理站点规模化普及的核心因素，导致行业内智能设备应用呈现“大型厂区普及、小型站点滞后”的不均衡格局，严重制约了污水处理行业整体智能化升级进程。

5.2 复杂污水工况下设备稳定性与耐用性不足

污水处理介质环境复杂恶劣，污水中含有大量泥沙、悬浮物、胶体颗粒、纤维杂质，同时酸碱废水、化工废水具有较强的腐蚀性，长期运行工况极易造成智能阀门设备损耗与故障。智能阀门的传感探头、阀芯缝隙、密封结构属于精密薄弱部位，长期接触高杂质污水，极易出现杂质淤积、结垢堵塞、腐蚀磨损等问题，导致传感数据采集失真、阀门调节卡顿、开度偏移、密封不严漏水等故障。同时，污水处理厂区多为露天、地下潮湿环境，温差变化大、湿度高、粉尘多，现阶段主流智能阀门整体防护等级可达IP65~IP67，可适配常规潮湿、多尘工况，但电气控制模块、通信模块长期处于高湿、强电磁干扰、温差交变环境中，仍易出现受潮老化、线路腐蚀、信号干扰、模块损坏等问题，进而导致设备精度衰减、使用寿命缩短、智能化功能失效。相较于传统纯机械阀门的高耐用性、低故障率，智能阀门精密机电结构对恶劣工况的长期耐受度更低，连续稳定运行性能仍存在明显短板。

5.3 运维技术门槛较高，基层专业人才严重短缺

智能阀门不再是单一的机械设备，而是融合机械、电气、自动控制、物联网、大数据、通信技术的复合型智能设备，设备的选型安装、参数校准、算法调试、系统对接、故障排查、日常维保均需要专业的技术支撑，对运维人员的专业能力要求极高。现阶段，我国基层污水处理运维团队整体专业水平偏低，大部分运维人员长期从事传统设备操作，仅掌握简单的机械阀门启闭、水泵启停等基础操作，缺乏自动控制、物联网、智能设备调试的专业知识。在智能阀门出现信号异常、调节偏差、通信中断、算法失效、传感故障等问题时，基层运维人员无法快速排查故障原因、完成修复调试，导致大量智能阀门设备安装后无法正常发挥智能化功能，长期处于闲置或半运行状态，造成设备资源浪费，无法实现智能化改造的预期效果。专业人才缺口已成为制约智能阀门高效应用的重要因素。

5.4 行业标准不统一，设备系统兼容性差

目前我国智能流体控制设备行业仍处于快速发展阶段，尚未形成统一、规范的行业生产标准、通信协议标准与接口规范，市场上智能阀门品牌繁多、产品参数杂乱，不同厂家设备的硬件接口、通信协议、控制逻辑、数据格式各不相同，通用性极差。大量老旧污水处理厂的原有控制系统、PLC设备、监控平台建设年限较早，系统架构老旧，与新型智能阀门存在严重的兼容性问题，设备对接调试难度大、改造成本高，部分老旧系统甚至无法适配新型智能阀门设备。同时，不同批次、不同品牌的智能阀门无法实现统一管控，数据无法互通共享，导致污水厂控制系统碎片化，难以构建一体化、标准化的智慧管控平台，严重影响污水处理系统的智能化集成效果。

5.5 数据安全与设备抗干扰能力薄弱

智能阀门依托物联网无线通信技术实现数据传输与远程管控，开放式的网络传输模式存在一定的安全隐患。现阶段部分中小型厂家生产的智能阀门设备加密防护技术薄弱，缺乏完善的网络安全防护机制，设备运行数据在传输、存储过程中，极易出现数据泄露、数据篡改、网络入侵、信号干扰等问题，导致设备误动作、参数错乱、系统失控，影响污水处理工艺稳定运行。同时，污水处理厂区内电机、风机、水泵等大功率设备密集运行，电磁干扰严重，部分低端智能阀门抗电磁干扰能力弱，易出现信号波动、数据失真、调节失灵等问题，降低设备运行稳定性，存在一定的工艺运行风险。[13]

6. 智能阀门在污水处理领域的发展趋势

6.1 硬件材料升级，设备高精度、高可靠、长寿命

针对现阶段智能阀门在复杂污水工况下易腐蚀、易堵塞、精度衰减快、耐用性差的问题，未来智能阀门将重点从材料升级与结构优化两大方向实现技术迭代。在材料层面，将广泛采用新型防腐耐磨复合材料、不锈钢合金、陶瓷密封材料、防垢涂层等高端材质，大幅提升阀体、阀芯、密封结构、传感探头的抗腐蚀、抗堵塞、耐磨损、防结垢能力，适配高杂质、高腐蚀、潮湿恶劣的污水处理工况。在结构层面，优化阀芯流线型设计、自清洁结构与传感探头防护结构，增加自动冲刷、防淤积、自密封功能，从结构上解决杂质堵塞、结垢失真的问题。同时，升级高精度数字化传感模块与抗干扰芯片，提升设备在复杂电磁环境、极端水质波动工况下的调节精度与运行稳定性，延长设备使用寿命，降低故障率与维保成本，实现设备高可靠、长周期稳定运行。[14]

6.2 人工智能深度赋能，实现预判式智能调控与无人值守

当前智能阀门多为被动式闭环调控，仅能根据实时工况数据进行参数修正，无法提前预判工况变化。未来依托人工智能、大数据分析、数字孪生技术，智能阀门将实现从“被动调节”向“主动预判”的跨越式升级。通过长期积累污水

处理海量运行数据，构建水质水量波动预测模型、工艺运行优化模型，系统可精准预判昼夜、季节、雨季的水质水量变化趋势，提前调整阀门运行参数，实现前置式精准调控，大幅提升系统抗冲击负荷能力。同时，结合数字孪生智慧水务平台，构建全厂设备虚拟仿真系统，实现阀门运行状态可视化、工艺模拟优化、故障智能研判、问题自主修复，全面实现污水处理厂全流程无人值守、智能化自主运维，极大提升污水处理智慧化水平。

6.3 行业标准化落地，设备通用化、低成本化普及

随着智能阀门行业快速发展，国家与行业协会将逐步完善智能阀门生产制造、接口规格、通信协议、控制标准、检测验收的统一行业规范，彻底解决现阶段设备品牌杂乱、兼容性差、数据不互通的行业乱象。统一的标准化体系将实现不同厂家智能阀门、控制系统、监控平台的无缝对接，大幅降低设备集成与改造升级成本。同时，随着生产技术不断成熟、行业规模化生产效应显现，智能阀门的生产成本将持续下降，设备性价比大幅提升。未来智能阀门将逐步摆脱资金壁垒，全面适配中小型污水厂、乡镇污水处理站点的改造需求，实现大中小污水处理设施的全覆盖普及，推动污水处理行业整体智能化升级。

6.4 绿色节能集成化，适配双碳行业发展需求

在国家双碳战略与污水处理节能提质的行业背景下，绿色低碳、节能降耗将成为智能阀门核心发展方向。未来智能阀门将搭载超低功耗执行机构与节能控制算法，优化设备运行逻辑，降低设备自身能耗的同时，进一步优化工艺调控策略，最大化降低曝气、输水、投药的系统能耗，助力污水厂节能降碳。同时，设备将朝着模块化、一体化、集成化方向发展，整合传感、控制、通信、预警、存储等多重功能，精简设备结构、缩小设备体积、简化安装流程、降低运维难度，实现设备快速部署、模块化集成，适配智慧污水处理系统的标准化、轻量化搭建需求，推动污水处理行业绿色低碳高质量发展。

7. 结论

智能阀门作为智慧污水处理体系的核心终端执行设备，依托精密机械结构、高精度传感技术、自适应自动控制算法、物联网通信技术的深度融合，构建了“感知-运算-执行-反馈-溯源”的全闭环智能调控体系，彻底颠覆了传统阀门人工操作、粗放调控的运行模式，有效解决了传统设备调节精度低、响应滞后、能耗偏高、运维繁琐、工况适配性差等行业痛点。本文通过系统性研究与工程案例分析验证，智能阀门可精准适配污水处理进水控制、生化曝气、污泥回流、药剂投加、远程监控五大核心工艺系统的精细化调控需求，能够有效稳定污水处理工况、提升出水水质达标率、降低系统运行能耗与人工运维成本，同时具备工况适配性广、智能化程度高、数据可溯源、工艺优化性强的多重技术优势，是现代污水处理行业智能化、精细化、低碳化升级的核心支撑设备。

现阶段，智能阀门在工程应用中仍存在初期投入成本高、复杂工况稳定性不足、基层专业运维人才短缺、行业标准不统一、系统兼容性差、数据安全薄弱等现实问题，一定程度上制约了设备的规模化普及与高效应用。但随着智能制造技术、人工智能算法、物联网技术的持续迭代，以及行业标准化体系的不断完善，未来智能阀门将朝着高可靠、高精度、低成本、全智能、绿色节能、安全稳定的方向持续升级，逐步解决现有应用短板。

在智慧水务全面普及、双碳战略深入推进、水环境治理标准持续升级的行业背景下，智能阀门的应用价值与发展空间将持续提升，将全面替代传统机械式阀门，实现污水处理全流程的精准化、智能化、无人化运维，持续推动我国污水处理行业提质增效、绿色低碳转型，为水生态环境保护、水资源循环利用提供坚实的技术与设备支撑。□

参考文献

[1] 孙宏昌, 苏云飞, 蒋永翔, 等. 基于IGWO-BP-PID的污水处理管道流体控制[J]. 传感器与微系统, 2025(6): 91-94.
[2] Ma M, Xing K, Mei L L, et al. Development of a smart wastewater valve to optimize reverse-osmosis membrane-cleaning cycles for enhanced water purification efficiency[J]. Processes, 2024, 12(12): 2865.
[3] 江苏省环境工程技术有限公司, 南京云普环境科技有限公司. 化工园区雨污水智能闸控系统[C]//中国环保产业协会. 环保新质生产力典型案例. 北京, 2025.
[4] 航天凯天环保科技股份有限公司. 衡水高新区污水收集一厂一管模式及基于AI的智慧化污水厂运营[J]. 中国水网, 2025.
[5] 武汉控股排水公司北湖污水处理厂. 生物池排冷凝水自动控制改造案例[J]. 武汉水务, 2026.
[6] COVNA科威纳集团. 自动化阀门在水处理领域的应用方案[C]//2026上海国际水展. 上海, 2026.
[7] 倪维, 倪超. 一种智能污水处理系统及方法: CN114409192A[P]. 2022-04-29.
[8] 庄文礼. 污水智能控制装置: CN108279291A[P]. 2019-01-01.
[9] DeZURIK. APCO SmartCHECK泵控制阀(CPC)技术手册[Z]. 2024.
[10] 基于CAN总线的智能阀门网络控制系统在污水处理中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2004(11).
[11] 张皓男, 王国峰, 赵巧男, 等. V型球阀阀芯的数值模拟与优化[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2019, 15(2): 112-117.
[12] 陈超波, 胡海涛, 高嵩. 人工蜂群的分数阶PID控制器参数自适应研究[J]. 控制工程, 2020, 27(6): 956-961.
[13] 高兴泉, 黄东冬, 丁三毛. 惩罚函数结合遗传算法的PID参数优化[J]. 吉林化工学院学报, 2021, 38(3): 57-60.
[14] 西安中科光电精密工程有限公司. 地轨倒装式（双机）焊接机器人TR-iTR21D[EB/OL].

作者简介:谭图，男，工程师，现从事工程自动化设计与销售。

版权归作者所有。本文为开放获取文章，遵循知识共享署名（CC BY）许可协议（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/）的条款和条件进行发布。
Copyright by the authors.This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

《數智工業》編輯委員會
EDITORIAL BOARD

編委MEMBERS

方恒林，电气部长，鄂尔多斯市宏基亿泰能源有限公司
海日图，装备部副部长，江苏索普化工股份有限公司
李　云，副主任设计师，成都赛普瑞兴科技有限公司
陆　超，安全总监、副总经理，山东阳谷华泰化工股份有限公司
秦昌君，副总经理，内蒙古黄陶勒盖煤炭有限责任公司
阮经良，高级工程师，山东鲁新设计工程股份有限公司
宋永超，副主任，江苏华昌化工股份有限公司
孙庆刚，生产部部长，陕西清水元泰化工科技有限公司
王　斌，仪表总工，江苏天辰设计院
王玉虎，仪控总工，天津实华工程设计有限公司
魏国栋，副总经理，明泉集团股份有限公司
张习钊，总经理，北京易启邦科技信息有限责任公司
张征国，高级主管，陕西北元化工集团股份有限公司
赵大鹏，总经理助理，新疆新业能源化工有限责任公司
赵德彪，总工，安徽金轩科技有限公司

JOURNAL OF DIGITAL INTELLIGENCE FOR INDUSTRY

數智工業

ISSN 3137–0810 (Online), ISSN 3137–0802 (Print)

雙月刊 Bimonthly
第1卷第1期 Vol.1 No.1
2026年10月12日出版 October 12, 2026

主編Chief Editor	王玉虎 Wang Yuhu chiefeditor@jdii.org
編輯Executve Editor	崔銘 Cui Ming 王湘 Wang Xiang
美術設計Designer	景景 Jing Jing
編輯出版Edited & Published by	香港海願出版社有限公司 HONG KONG OCEANWISH PRESS LIMITED
地址Address	UNIT 9, 1/F, THE CLOUD, 111 TUNG CHAU STREET, TAI KOK TSUI, HONG KON
電話Tel.	13121361690
郵箱E-mail	journal@digital-intelligentindustry.com
網址Website	https://digital-intelligentindustry.com/