

智能阀门在污水处理系统中的应用

谭图

(天津英增贸易有限公司, 天津 300499)

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

(Tianjin Yingzeng Trading Co., Ltd., Tianjin 300499, 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、物联网智能化深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、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;闸阀流通能力强、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及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 $\pm 0.5\%$ FS,量程覆盖0.5~2000m³/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 $\pm 0.2\%$ 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 ± 1 mm,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 $\leq 3\%$ 、稳态误差 $\leq 1\%$,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 ≤ 200 ms,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 $\leq 95\%$,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 $\pm 0.2\%$ 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 $\pm 1\%$, 全行程响应时间 $\leq 5s$, 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 $\leq 3\%$ 、稳态误差 $\leq 1\%$), 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 $\pm 8\% \sim \pm 10\%$ 、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 $\pm 2\%$ ，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 $\leq 5s$ ，搭配高精度浊度、总磷、余氯在线监测传感器（测量精度 $\pm 0.5\%FS$ ），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 $\leq 200\text{ms}$ ，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 $\pm 5\% \sim \pm 10\%$ 、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 $\leq \pm 1\%$ 、稳态响应时间 $\leq 5\text{s}$ 、算法超调量 $\leq 3\%$ ，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，从源头上杜绝过度曝气、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，优化阀芯流道型设计、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。

6.5 安全防护升级,构建稳定可靠的智能管控体系

针对现阶段智能阀门数据安全、抗干扰能力薄弱的问题,未来设备将全面升级网络安全防护体系,搭载加密传输、数据防火墙、异常访问拦截、数据备份恢复等安全技

术,杜绝数据泄露、篡改、网络入侵等安全风险,保障设备运行数据与控制系统安全稳定。同时,优化设备电磁屏蔽、防潮、防尘、抗干扰结构设计,提升设备在复杂工业环境下的抗干扰能力,减少信号波动、数据失真、设备误动作等故障,构建高安全、高稳定、高可靠的智能流体管控体系,为智慧污水处理系统安全运行提供坚实保障。

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. 生物池排净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。

收稿日期:2026-04-30

修回日期:2026-05-25

接受日期:2026-06-16

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/>).