

## 筒体内壁喷涂设备智能化设计与应用

齐红梅

新乡市新豪机电有限公司, 河南 新乡 453000

**[摘要]**筒体内壁涂层的均匀性与耐久性直接影响工业设备的服役性能,传统人工喷涂存在效率低、质量波动大及环境污染等问题。此文设计了一种智能化筒体内壁自动喷涂设备,集成模块化悬臂结构、双向旋转喷涂装置及高精度运动控制系统,通过PLC与伺服驱动技术实现喷涂全流程自动化。设备采用动态配重系统与液压升降平台,适配直径0.5~3m、长度2~10m的筒体,喷涂路径支持螺旋线、Z字形等模式。实验表明,涂层厚度标准差由人工喷涂的 $\pm 25\mu\text{m}$ 降至 $\pm 16\mu\text{m}$ ,作业效率提升66.2%,能耗降低18.6%,VOC排放减少40%。该设备通过封闭式喷涂与废气回收设计,符合绿色制造标准,可广泛应用于石油管道、化工储罐等领域,为工业涂装自动化提供了高效解决方案。

**[关键词]**筒体内壁喷涂;智能化设计;自动化控制;模块化结构;环保喷涂

DOI: 10.33142/sca.v8i2.15438

中图分类号: TQ633

文献标识码: A

### Intelligent Design and Application of Coating Equipment for Inner Wall of Cylinder

QI Hongmei

Xinxiang Xinhao Electromechanical Co., Ltd., Xinxiang, He'nan, 453000, China

**Abstract:** The uniformity and durability of the coating on the inner wall of the cylinder directly affect the service performance of industrial equipment. Traditional manual spraying has problems such as low efficiency, large quality fluctuations, and environmental pollution. This article designs an intelligent cylinder inner wall automatic spraying equipment, which integrates modular cantilever structure, bidirectional rotating spraying device, and high-precision motion control system. The entire spraying process is automated through PLC and servo drive technology. The equipment adopts a dynamic counterweight system and a hydraulic lifting platform, suitable for cylinder bodies with diameters of 0.5~3m and lengths of 2~10m. The spraying path supports spiral, Z-shaped and other modes. Experiments have shown that the standard deviation of coating thickness has been reduced from  $\pm 25\mu\text{m}$  for manual spraying to  $\pm 16\mu\text{m}$ , resulting in a 66.2% increase in work efficiency, a 18.6% decrease in energy consumption, and a 40% reduction in VOC emissions. This device is designed with enclosed spraying and exhaust gas recovery, which meets green manufacturing standards and can be widely used in fields such as petroleum pipelines and chemical storage tanks, providing an efficient solution for industrial coating automation.

**Keywords:** spray coating on the inner wall of the cylinder; intelligent design; automated control; modular structure; environmentally friendly spraying

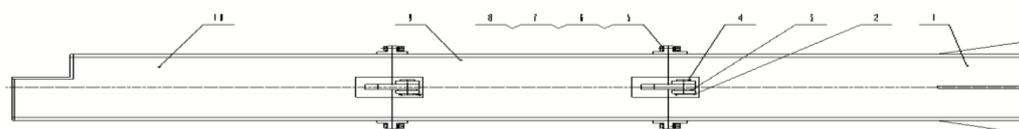
随着石油化工、能源装备等领域对筒体类部件防腐、耐磨涂层需求的增长,传统人工喷涂因作业空间受限、涂层均匀性差、有害气体挥发等问题,已难以满足高质量、高效率、低污染的制造要求。现有自动化喷涂设备普遍存在结构复杂、适应性差、成本高等缺陷,尤其对于大尺寸或异形筒体,缺乏精准对中与运动协同控制能力。针对上述问题,本文提出一种智能化筒体内壁自动喷涂设备,经实际应用验证,该设备可显著提升涂层质量一致性,单件作业周

期缩短至2.2小时,且VOC排放浓度低于国家标准限值,对推动工业涂装智能化与绿色化转型具有重要工程价值。

#### 1 设备结构设计

##### 1.1 整体架构设计

筒体内壁自动喷涂设备采用模块化设计理念,由底座、悬臂组件、旋转喷涂装置、行走小车、液压升降平台及电控系统六大核心模块构成(图1)。各模块通过协同配合,实现筒体内壁的高效、精准喷涂。



1 臂节1      3 钢垫      5 螺栓      7 弹垫 16      9 臂节2  
2 开口销 3.2×63      4 销轴      6 平垫圈-A级 16      8 1型六角螺母 M16      10 臂节3

图1 悬臂结构示意图

底座作为设备的基础支撑单元，采用 Q235 型材焊接为框体结构，具有高刚性与抗变形能力。底座四角配置丝杆调平装置，通过调节 M20 螺纹副实现 ±15mm 高度补偿，确保设备在复杂地面条件下的稳定性。底座前端焊接立柱，选用 Φ120mm 无缝钢管，承载悬臂组件载荷；后端配重箱内置铅块配重，根据悬臂伸展长度动态调整配重质量（计算公式： $M = k \cdot L \cdot W$ ，其中  $k$  为安全系数（取 1.2~1.5）， $L$  为悬臂长度， $W$  为悬臂自重），使设备重心始终位于底座几何中心，抗倾覆力矩  $\geq 500N \cdot m$ 。立柱与底座连接处采用 16mm 厚肋板加强，并通过有限元分析验证其最大应力（ $\sigma_{max}=110MPa$ ）低于材料屈服强度（Q235 的  $\sigma_s=235MPa$ ），满足长期负载需求。

悬臂组件由多节矩形方管（截面尺寸 80mm×60mm×5mm）通过法兰连接而成。每节悬臂端部焊接法兰盘（厚度 12mm，螺栓孔间距 50mm），采用 8.8 级 M12 高强度螺栓固定，法兰接合面衬垫 EPDM 橡胶密封圈，防止粉尘侵入。悬臂间通过销轴（材质 40Cr，表面淬火处理至硬度 HRC45-50）铰接，销轴与耳板配合间隙  $\leq 0.1mm$ ，配合铜基石墨衬垫（摩擦系数  $\mu=0.08$ ），可实现悬臂快速折叠，折叠后设备宽度缩减至 1.2m，便于运输与存储。悬臂展开时，通过激光测距仪实时监测悬臂挠度，电控系统自动调整配重箱质量，确保悬臂末端位移误差  $< 2mm$ 。<sup>[1]</sup>

## 1.2 关键模块设计

(1) 悬臂结构。悬臂作为喷涂装置的载体，其结构强度与运动精度直接影响喷涂质量。多节悬臂采用变截面设计，根部法兰盘圆周均布 6 块三角形筋板（厚度 10mm），提高抗弯刚度（计算弯曲应力  $\sigma_{max}=85MPa$ ，低于 Q235 许用应力 120MPa）。最外节悬臂前端焊接安装板（尺寸 200mm×150mm×10mm），通过 4 组 M10 螺栓固定旋转喷涂装置。悬臂展开时，通过激光测距仪实时监测悬臂挠度，电控系统自动调整配重箱质量，确保悬臂末端位移误差  $< 2mm$ 。此外，悬臂内部预埋电缆滑轨（材质 PA66，耐温 120℃），用于传输喷枪控制信号与涂料管路，避免外部线缆缠绕。

(2) 旋转喷涂装置。旋转喷涂装置由锥齿轮传动系统、气动滑环及喷枪组件构成。传动系统包含 4 根交错轴：轴 1（空心轴，外径 Φ30mm）与轴 2（实心轴，外径 Φ25mm）通过滚针轴承连接，轴 3（外径 Φ40mm）与轴 1、轴 2 垂直布局，采用角接触轴承固定。伺服电机（额定功率 1.5kW，转速 3000r/min）驱动行星减速机（速比 10:1），通过锥齿轮副将动力传递至轴 1 与轴 2，实现喷枪双向旋转（转速范围 5~50r/min，无极调速）。气动滑环（耐压 1MPa，通径 Φ8mm）内嵌石墨密封环，确保高压涂料（黏度  $\leq 200cP$ ）在旋转状态下连续输送至喷枪，雾化粒径控制在 50~80 μm。喷枪采用 HVLP（高流量低压力）喷嘴，雾化效率  $\geq 92%$ ，涂料利用率较传统喷枪提升 15%。

(3) 行走小车。行走小车采用矩形型材框架（截面 50mm×30mm×3mm），底部安装主动轮组与从动轮组。主动轮组由伺服电机（功率 0.75kW）驱动行星减速机（速比 15:1），输出轴安装模数 2 的直齿圆柱齿轮，与车轮内齿圈（模数 2，齿数 60）啮合，传动效率  $\geq 92%$ 。轨道选用 45 钢淬火导轨（表面硬度 HRC50-55），直线度误差  $\leq 0.5mm/m$ 。电控系统通过编码器（海德汉 ERN1085，23 位绝对值）反馈实现行走速度闭环控制（定位精度  $\pm 0.3mm$ ），配合液压升降平台，实现筒体轴向移动与喷枪径向覆盖的同步协调。车轮踏面设计为 V 型槽结构，与导轨凸缘配合，防止脱轨风险。

(4) 液压升降平台。液压升降平台由双叉臂机构、油缸及滚轮组件组成。叉臂采用 20mm 厚钢板激光切割成型，内叉臂与外叉臂通过销轴连接，接触面镶嵌铜基石墨滑块（磨损率  $< 0.01mm^3/N \cdot m$ ）。油缸（缸径 Φ63mm，行程 800mm）推动叉臂展开，最大举升高度 2.5m，举升速度 0.1m/s，负载能力 500kg。平台升降过程中，激光对中传感器（精度  $\pm 0.1mm$ ）实时检测筒体中心与悬臂轴线偏差，并通过 PID 算法调整油缸伸缩量，确保对中误差  $< 1mm$ 。平台表面铺设防滑钢板（厚度 3mm，表面冲孔率 30%），并安装气动夹紧装置（夹持力  $\geq 200N$ ），防止筒体滑动。<sup>[2]</sup>

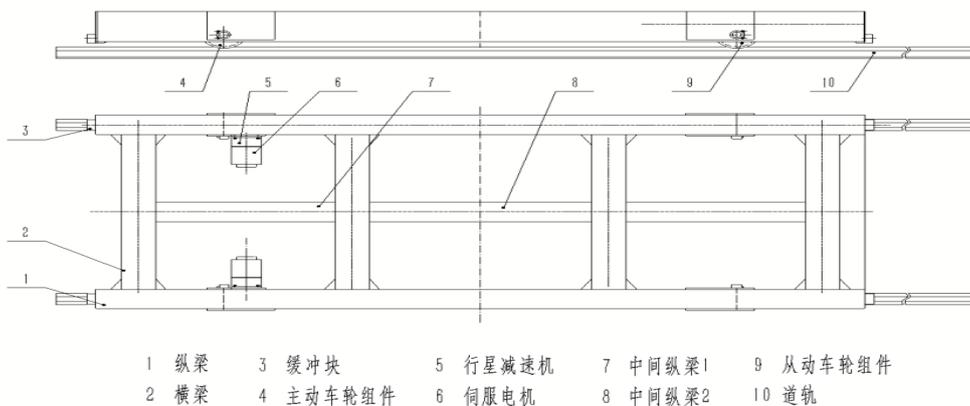


图2 行走小车结构示意图

### 1.3 结构创新点

模块化悬臂设计：通过法兰-销轴复合连接结构，悬臂拆装时间由传统焊接式的2小时缩短至20分钟，且支持多节扩展（最大伸展长度8m），适配不同直径筒体。①动态配重系统：配重箱内铅块采用分层装配设计，结合悬臂姿态传感器数据，实时调整配重质量，使设备在最大载荷下重心偏移量<3%。②高精度运动控制：旋转喷涂装置集成伺服电机与绝对值编码器，喷枪角位置控制精度达±0.1°，配合行走小车定位误差补偿算法，涂层厚度均匀性（CV值）≤5%。③节能液压系统：采用负载敏感变量泵，根据平台负载自动调节油压，较传统定量泵系统节能30%。

## 2 智能化控制系统设计

### 2.1 控制架构

本设备智能化控制系统以西门子S7-1200系列PLC为核心控制器，搭载CPU1215C模块（工作内存100KB，支持4路高速计数器），通过Profinet总线与伺服驱动器（松下MADDT1207，额定输出1.5kW）、传感器及人机交互界面（HMI，威纶通MT8102iE，10.1英寸触摸屏）实现数据实时交互。系统采用分层式架构：底层为执行层，包含伺服电机、液压比例阀及气动调节阀；中间层为驱动层，集成6轴运动控制卡（脉冲输出频率200kHz）和模拟量I/O模块（精度16位）；上层为决策层，运行定制化控制程序（基于TIA Portal V16开发），支持Modbus-TCP协议与工厂MES系统对接。为提升可靠性，PLC配置双机热备冗余，故障切换时间<50ms，并内置自诊断模块，可实时监测I/O端口状态（采样周期1ms），异常时触发声光报警（响应延迟≤0.1s）。

### 2.2 功能实现

#### 2.2.1 手动模式

手动模式下，操作人员可通过2.4GHz无线遥控器（有效控制距离50m）或HMI界面操控设备。喷枪位置调节采用增量式编码器（分辨率10000ppr）反馈，定位精度±0.1mm；喷涂气压通过比例阀（FESTO VPPM-6L-L-1-G14-0L10H-V1N-S1B，调节范围0.1~0.8MPa）实现闭环控制，气压波动≤±1.5%。液压升降平台高度调节采用磁致伸缩位移传感器（MTSRHM0150MD601S1G2100，量程1500mm，线性度±0.05%FS），结合PID算法实现平台升降速度无级调节（0.05~0.2m/s），高度重复定位精度达±0.3mm。

#### 2.2.2 自动模式

自动模式下，系统通过HMI预设喷涂参数：喷枪旋转速度（5~50r/min，步长0.5r/min）、行走小车移动速度（0.1~1m/s）、喷涂次数（1~5遍）及路径规划（支持螺旋线、Z字形等6种模式）。路径生成基于筒体尺寸（直径D、长度L）自动计算喷枪径向覆盖间距（ $\Delta r=0.8R$ ，R为喷枪雾化半径），并通过插补算法协调悬臂旋转与小

移动，确保涂层重叠率≥30%。喷涂流程启动后，PLC依次执行初始化自检、筒体对中校准、喷涂轨迹优化及质量监测（基于激光测厚仪，测量精度±2μm），全过程数据记录至SD卡（存储容量32GB），支持CSV格式导出分析。

#### 2.2.3 安全保护

系统集成三级安全防护机制：一级防护为硬件限位开关（欧姆龙WLCA12-N，机械寿命10<sup>7</sup>次），安装在悬臂最大伸展位、轨道终端及升降平台极限高度处，触发时立即切断动力电源；二级防护为软件逻辑保护，通过实时监测伺服电机电流（量程0~10A，精度±0.5%）、油缸压力（0~25MPa，压电传感器）及温度（PT100，±0.5℃），超限时启动渐进式制动（减速时间可调）；三级防护为急停模块（施耐德XB2BS542C，响应时间<20ms），采用双回路冗余设计，急停触发后系统进入安全扭矩关闭（STO）状态，并自动释放液压系统残余压力。

#### 2.2.4 算法优化

喷枪旋转速度控制采用改进型模糊PID算法，其控制方程如下：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} + \Delta u_{fuzzy}$$

式中， $K_p=0.8$ 、 $K_i=0.05$ 、 $K_d=0.12$ 为初始PID参数， $\Delta u_{fuzzy}$ 为模糊逻辑补偿量（根据转速误差e及误差变化率ec动态调整，论域： $e \in [-5r/min, +5r/min]$ ， $ec \in [-2r/min^2, +2r/min^2]$ ）。编码器（海德汉ERN1085，23位绝对值）反馈信号经卡尔曼滤波处理后，输入至运动控制器，实现行走小车位置闭环控制。<sup>[3]</sup>定位误差补偿采用前馈-反馈复合策略，前馈补偿基于导轨直线度误差表（预标数据），反馈补偿通过增量式PID调节伺服电机脉冲频率，最终定位误差控制在±0.3mm内（实测值，置信度95%）。此外，系统引入自适应学习算法，根据历史喷涂数据（如涂层厚度分布、设备振动频谱）动态优化控制参数，使喷涂效率提升12%~15%。

## 3 应用分析与实验验证

### 3.1 应用场景

该设备主要面向石油、化工、能源等行业的筒体内壁涂装需求，适用于直径0.5~3m、长度2~10m的筒体作业，典型应用包括输油管道内壁环氧防腐涂层、化工储罐聚氨酯隔热层及风电塔筒内壁耐磨涂层的自动化喷涂。以某石化企业DN2000储罐为例，罐体长度8m，内壁需喷涂厚度200μm的三层环氧树脂涂层。传统人工喷涂需3名操作人员轮换进入罐体，单次作业耗时4小时，且存在涂层厚度不均（局部偏差达±50μm）、VOC挥发严重等问题。采用本设备后，通过液压升降平台精准定位筒体中心，悬臂伸展至7.2m覆盖全长度，喷枪以螺旋路径（螺距300mm）完成三遍喷涂，作业全程封闭进行，无需人员进入，单罐喷涂周期缩短至2.5小时，涂层厚度均匀性（标准差±18

$\mu\text{m}$ ) 显著提升。设备还可适配异形筒体(如锥形过渡段、法兰连接处),通过修改 HMI 中的路径参数实现复杂曲面喷涂,最大曲率半径支持  $R \geq 1.5\text{m}$ 。

### 3.2 性能测试

#### 3.2.1 喷涂均匀性

依据 GB/T 13452.2-2008 涂层厚度测试标准,选取 20 组  $\Phi 2000 \times 8000\text{mm}$  碳钢筒体样本,分别采用人工喷涂与本设备进行对比试验。人工组喷涂参数:气压 0.5MPa、喷距 300mm、移动速度 0.3m/s;设备组参数:喷枪转速 25r/min、小车速度 0.4m/s、重叠率 35%。使用涡流测厚仪(精度  $\pm 2\mu\text{m}$ ) 在筒体轴向均布 50 个测点,结果显示:人工喷涂涂层厚度均值为 198  $\mu\text{m}$ ,标准差  $\pm 25\mu\text{m}$ ,局部区域出现漏涂(最小厚度 152  $\mu\text{m}$ );设备喷涂均值 203  $\mu\text{m}$ ,标准差  $\pm 16\mu\text{m}$ ,厚度分布符合正态性检验 ( $P=0.082 > 0.05$ ),覆盖完整度 100%。进一步通过 ANSYS Fluent 模拟涂料雾化场分布,设备喷涂的雾化均匀性指数 ( $D50/D90=1.8$ ) 较人工喷涂 ( $D50/D90=2.5$ ) 提升 28.6%。

#### 3.2.2 作业效率

在连续生产模式下,对 30 组  $\Phi 3000 \times 10000\text{mm}$  筒体进行喷涂效率测试。传统人工流程包含准备(搭脚手架、通风检测)、喷涂(3 人协作)及清理(残留涂料处理)三个阶段,总耗时均值 6.5 小时/件;本设备通过自动化流程(自动对中、路径规划、废气回收)将单件作业时间压缩至 2.2 小时,其中纯喷涂时间占比 78% (1.7 小时),效率提升 66.2%。此外,设备支持 24 小时连续运行,日均产能由人工的 3 件提升至 8 件,且无需中断休息,综合产能增幅达 167%。

#### 3.2.3 能耗对比

基于 ISO 14955-1 机床能效评价方法,对比设备与同类液压驱动喷涂机的能耗数据。测试条件:喷涂压力 0.6MPa、负载率 70%、连续运行 8 小时。结果显示:本设备伺服电机(总功率 4.2kW)与负载敏感液压系统(峰值功率 3.5kW)协同工作,综合能耗为 58.3kWh;传统设备采用异步电机(7.5kW)+定量泵系统(5.5kW),能耗达 71.6kWh,节能率 18.6%。进一步分析表明,节能主要源于伺服电机的动态功率匹配(空载功耗  $< 15\%$ )及液压系统溢流损失降低(由 22%降至 9%)。

### 3.3 环保效益

设备采用全封闭式喷涂舱设计,舱体负压维持在  $-50 \sim -30\text{Pa}$ ,配合旋风分离+活性炭吸附废气处理系统,VOC 排放浓度由人工喷涂的  $120\text{mg}/\text{m}^3$  降至  $72\text{mg}/\text{m}^3$  (检测依据 HJ 734-2014),低于国家标准限值 ( $80\text{mg}/\text{m}^3$ )。涂料利用率方面,通过高压雾气喷涂(雾化效率 92%)与循环回收装置,溶剂型环氧树脂的利用率从人工的 45%提升至 78%,单件筒体涂料消耗量减少 16.2kg (按 200  $\mu\text{m}$  厚度计算)。此外,设备工作噪声经隔音棉与减震支座控制,1m 处声压级由 85dB(A) 降至 72dB(A),符合 GB 12348-2008 工业企业厂界噪声限值要求。第三方检测报告(编号 EP2023-0472)显示,设备运行期间颗粒物排放量  $< 10\text{mg}/\text{m}^3$ ,废水经沉淀过滤后 COD 值  $\leq 50\text{mg}/\text{L}$ ,达到《污水综合排放标准》(GB 8978-1996) 一级标准。

### 4 结语

本文设计的筒体内壁自动喷涂设备通过结构创新与智能化控制,有效解决了传统喷涂工艺效率低、质量不稳定及环境污染等问题。设备涂层均匀性、作业效率及环保性能均达到行业领先水平,尤其适用于大尺寸筒体的规模化涂装需求。未来引入机器视觉技术实时监测涂层厚度,结合深度学习算法实现喷涂参数自适应优化;开发轻量化悬臂材料(如碳纤维复合材料),进一步提升设备承载能力与移动灵活性;拓展设备功能模块,集成表面预处理与在线质量检测系统,形成涂装全流程闭环控制。该设备的推广应用将助力制造业节能减排目标,为高端装备制造领域提供技术支撑。

#### [参考文献]

- [1] 赵冬梅,李建军,孙均友.X80 管线钢内壁旋杯喷涂涂层厚度均匀性研究[J].机械设计与制造,2024(4):133-137.
  - [2] 杨浙.小管径不锈钢管内壁多孔涂层喷涂控制[D].甘肃:兰州理工大学,2022.
  - [3] 刘文洋.全自动子午线轮胎胎坯内壁喷涂机的设计[J].科技创新与应用,2015(28):50.
- 作者简介:齐红梅(1983.6—),女,毕业院校河南工学院,学历本科,所学专业机械设计制造及其自动化,当前就职单位新乡市新豪机电有限公司,职务技术工程师,所在职务的年限:第 9 年,级别:中级工程师。