

基于 PLC 与压差法的气瓶自动化气密性检测系统设计与实现研究

沈永兴

杭州东贝机电设备有限公司 浙江杭州 311107

【摘要】针对工业高压气瓶气密性检测传统方法效率低、精度差、风险高的问题，设计并实现基于PLC与压差法的自动化气密性检测系统。该系统以西门子S7-1200 PLC为核心，融合压差检测、温度补偿与机器视觉辅助功能，采用三工位三区联动架构，实现气瓶全流程自动化作业。经硬件集成与软件编程优化，系统检测压力范围0-40兆帕，精度达±0.01千帕，单瓶检测时间缩至4.5分钟，三工位并行每小时可检36瓶，较传统单工位人工检测效率提升2倍，漏检率控制在0.1%以内。

【关键词】PLC控制；压差法；气瓶；自动化气密性检测；温度补偿

Research on Design and Implementation of Automated Gas Cylinder Sealing Inspection System Based on PLC and Differential Pressure Method
Shen Yongxing

Hangzhou Dongbei Electromechanical Equipment Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang Province 311107

【Abstract】To address the limitations of traditional industrial high-pressure gas cylinder sealing inspection methods—low efficiency, poor accuracy, and high risks—the study presents an automated sealing inspection system utilizing PLC and differential pressure technology. Centered around the Siemens S7-1200 PLC, the system integrates differential pressure detection, temperature compensation, and machine vision assistance features. Employing a three-station, three-zone coordinated architecture, it achieves full-process automation for gas cylinder inspection. Through hardware integration and software optimization, the system operates within a pressure range of 0-40 MPa with ±0.01 kPa precision. Single-cylinder inspection time is reduced to 4.5 minutes, enabling 36 cylinders per hour through parallel three-station operation—doubling the efficiency of traditional single-station manual inspection while maintaining a missed detection rate below 0.1%.

【Key words】PLC control; differential pressure method; gas cylinder; automated air tightness testing; temperature compensation

一、引言

目前,国内中小制造企业普遍采用传统人工喷液检漏与单工位检测模式,存在诸多弊端。人工检测需操作人员手持喷液装置喷淋加压后的气瓶,观察气泡判断泄漏,劳动强度大、作业环境恶劣,还有高压气体喷射风险。检测效率上,传统单工位检测单瓶耗时超8分钟,且检测时需人工完成气瓶固定、加压等操作,设备闲置率高,难以适配批量生产。

随着工业自动化技术发展,PLC控制、压差法检测、机器视觉等技术融合应用成气瓶气密性检测主流趋势。此类自动化检测系统可规避人工操作弊端,实现检测标准化、精准化与高效化,降低人工依赖与安全风险。基于此,结合杭州东贝机电设备有限公司气瓶生产线实际需求,设计适配批量生产、精度达标、成本可控的自动化气密性检测系统,对提升企业生产效率、保障产品质量、增强市场竞争力有重要实际应用价值。

二、系统总体设计

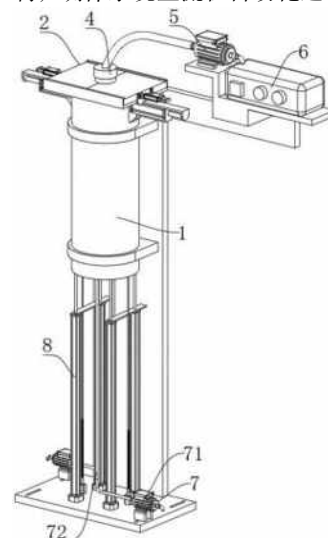
2.1 系统总体架构

本系统采用“硬件+软件”一体化架构,分硬件层与软件层,二者通过数据通讯协同工作,构建自动化检测体系。

硬件架构三区联动,含准备区、检测区、排气区,各区域经磁编码轨道实现气瓶自动化流转。准备区有快速接头装

置,可速连气瓶与检测气路;检测区3工位直线排列,间距1.5米,各工位配压差检测等设备,设1.2米隔离挡板防喷淋液飞溅;排气区有余压排放装置,可安全排放气瓶内压力至室外。

软件架构分下位机控制层与上位机监控层,下位机以PLC为核心开发控制程序,实现气瓶流转等核心功能逻辑控制;上位机开发监控软件,实现实时数据显示等功能。同时,软件层集成视觉识别算法与温度补偿逻辑,通过数据交互与硬件层协同控制,确保系统全流程自动化运行。



2.2 设计方案论证

为确保系统设计合理可行,本研究从检测效率、精度、安全性三核心维度对比论证设计方案。在检测效率上,对比单工位与多工位设计方案,单工位结构简单但效率低,无法适配批量生产;三工位并行设计可实现空闲工位自动补位,在不增加过多设备成本下,将检测效率提升 2 倍,更符合批量生产需求。

在检测精度方面,对比纯压差法与压差 + 温度补偿 + 机器视觉融合方案,纯压差法受温度影响大且无法定位泄漏点;融合方案通过温度补偿消除干扰、提升精度,借助机器视觉定位泄漏点,满足高压气瓶检测要求。在安全性方面,对比开放式与密封防护设计,密封防护设计通过隔离挡板、压力超限报警、急停按钮等机制,防止高压气体泄漏冲击与喷淋液飞溅,降低作业安全风险。

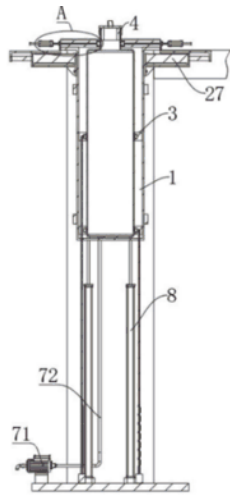
三、系统硬件设计与集成

3.1 机械结构设计

系统机械结构围绕三区联动布局,重点实现气瓶自动化流转、固定、旋转与喷淋功能,兼顾稳定性与便捷性,机械部件采用工业级材质,适配高压、潮湿环境。

准备区核心为快速接头装置,气动驱动,可自动对接气瓶接口与检测气路,对接时间 ≤ 10 秒,密封性好,防气路泄漏。检测区 3 工位直线排列,各工位配备双 V 型滚轮旋转托举机构,由伺服电机驱动,转速 0-5 转/分钟可调,适配不同直径气瓶,托举精度 ± 2 毫米;还配备两轴联动喷头组,扇形雾化喷嘴,单瓶喷液量 50 毫升,喷淋路径与旋转速度动态匹配,确保全方位覆盖。检测区四周设有 1.2 米高钢化玻璃透明隔离挡板,不影响视觉采集,可防喷淋液飞溅与高压气体冲击。排气区配备余压排放装置,可分级泄压,自动调节排气速度。

气瓶通过磁编码轨道传输,定位精度 ± 2 毫米,实现三区平稳流转,传输速度 0-0.5 米/秒可调,配合 PLC 控制精准对接各区域,确保检测连贯。



3.2 电气控制系统设计

电气控制系统以西门子 S7-1200 PLC 为核心,集成传感器组、执行元件、安全回路等模块,实现检测流程电气控制与数据采集,确保系统稳定精准运行。

PLC 核心模块选西门子 S7-1214C 型号,有 14 路数字输入、10 路数字输出,经扩展模块扩至 16 路输入、16 路输

出,满足多设备协同控制需求。传感器组含差压、压力、温度、磁编码传感器与视觉摄像头,差压传感器量程 0-10 千帕、精度 $\pm 0.05\%$ FS,采被测气瓶与标准件压力差值;压力传感器量程 0-50 兆帕,监测气路压力;温度传感器精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,采环境与气瓶温度数据;磁编码传感器定位气瓶轨道位置,确保传输定位精准。

执行元件包括电磁阀、伺服电机、气缸,气缸推力 500 牛、响应时间 ≤ 0.2 秒,控制快速接头对接等动作;伺服电机驱动气瓶旋转与轨道传输,控制精度 ± 0.01 转/分钟;电磁阀控制气路通断与压力调节。安全回路采用多重防护机制,配急停按钮等功能,检测到异常情况,系统自动停机报警,显示故障位置与类型,启动压力超限自动泄压功能,响应时间 ≤ 0.3 秒,保障作业安全。

3.3 检测模块集成

检测模块是系统气密性检测核心,包括压差、视觉和余压排放模块,各模块协同实现泄漏检测、定位与余压排放一体化。

压差检测模块由氮气储罐、减压阀、过滤器、气路管道和差压传感器构成,采用气路压力闭环控制。通过减压阀将氮气调至 35 兆帕检测压力,过滤器过滤杂质。检测时,PLC 采集数据、调节电磁阀开度,使压力稳定在设定值,波动 $\leq \pm 0.02$ 兆帕,为检测提供稳定压力。

视觉检测模块含 4 台 1200 万高清摄像头、图像采集卡和数据传输线路。摄像头分布四周,覆盖气瓶全表面,采集卡将图像传至 PLC 和上位机,经视觉算法处理识别气泡定位泄漏点。

余压排放模块由泄压阀、流量控制器和排放管道组成。检测完,PLC 控制泄压阀开启,流量控制器调流量,避免压力骤降伤气瓶,气体引至室外保安全。该模块分级泄压,2 分钟内将气瓶压力从 35 兆帕降至 0.1 兆帕,兼顾安全与效率。

四、系统软件设计与实现

4.1 PLC 控制程序设计

PLC 控制程序是系统自动化检测核心,采用结构化编程,分主程序和子程序。主程序统筹检测流程,子程序负责具体功能模块逻辑控制,确保程序易调试维护。

主程序按气瓶检测流程设计,逻辑为:操作人员放气瓶于准备区轨道,磁编码传感器检测到后,PLC 控制气缸驱动快速接头对接完成气路连接,再控制轨道将气瓶传至检测区空闲工位,定位后启动旋转托举机构使气瓶匀速旋转。接着控制压差检测模块对气瓶加压至 35 兆帕,保压 3 分钟。保压时,差压传感器采集压力差值,温度传感器采集温度数据并修正,视觉模块启动图像采集与气泡识别。检测到泄漏标记气瓶不合格并记录位置,未检测到则标记合格。保压完成,轨道将气瓶传至排气区泄压,再传至下料区,操作人员下料,系统存储检测数据后进入下一轮循环。

子程序包括加压、保压、多工位协同和故障处理子程序。加压子程序调节电磁阀开度,控制压力上升速率为 5 兆帕每分钟;保压子程序实时监测气路压力,低于设定值自动补压;多工位协同子程序通过逻辑判断实现空闲工位补位;故障处理子程序预设常见故障处理逻辑,检测到故障停机报警,显示位置与类型,启动超压自动泄压等安全防护措施。

4.2 上位机监控软件设计

上位机监控软件采用组态软件开发,以 Windows 系统为运行平台,具备实时数据显示、参数设置、数据存储与查询、故障报警等功能,提供人机交互便捷界面,实现检测过程全程监控。

实时数据显示模块动态展示各工位检测压力、温度等关键数据,以数值与曲线结合呈现变化趋势,方便操作人员掌握检测状态。参数设置模块支持操作人员依不同规格气瓶检测需求调整关键参数,自动保存,有参数权限管理功能,防非授权误操作。

数据存储与查询模块自动保存每瓶气瓶检测数据,存储时长 ≥ 1 年,支持按多种条件精准查询与导出,为产品质量追溯提供数据支撑。故障报警模块以声光报警提醒故障,界面显示故障位置等信息,方便排查解决问题,减少停机时间。

人机交互界面简洁直观,模块化布局,分状态显示等四区,支持手动/自动模式切换,手动用于调试维护,自动用于批量检测,满足不同操作需求。

4.3 视觉识别与温度补偿实现

视觉识别功能通过图像预处理与气泡识别算法实现。图像预处理用高斯滤波降噪、灰度化增强对比度、二值化突出气泡特征;气泡识别采用形态学分析,检测二值图像连通区域并计算参数,直径 ≥ 0.5 毫米的判定为气泡,记录坐标确定泄漏点,定位精度 ± 5 毫米。经算法优化,图像处理时间缩至 0.5 秒每帧,确保同步。

温度补偿功能基于 PLC 编程实现。温度传感器每 0.1 秒采集温传至 PLC,PLC 结合理想气体状态方程计算压力偏差值,叠加修正原始压力差值,得实际值用于泄漏判断。该补偿消除温度影响,使系统在 -10°C 至 45°C 环境下,检测精度稳定在 ± 0.01 千帕。

五、系统实现与性能测试

5.1 系统硬件组装与调试

系统硬件组装按“机械结构 \rightarrow 电气接线 \rightarrow 气路连接 \rightarrow 模块固定”流程,全程依工业安全标准操作。先拼接机械结构,组装轨道、旋转托举机构等部件,调精度确保气瓶传输与旋转平稳;接着进行电气接线,连接 PLC、传感器等设备,接线后做通断测试;随后进行气路连接,安装氮气储罐等部件,连接后做气密性测试;最后固定各模块,整理线路与管道完成组装。

硬件调试重点排查模块协同能力。先调试 PLC 与传感器通讯,确保数据采集准确;再调试传输与旋转机构,修正轨道定位偏差,优化旋转速度稳定性;接着调试喷淋与视觉模块,调整摄像头角度与喷淋路径;最后调试气路系统,优化压力闭环控制参数。

5.2 软件调试与优化

软件调试包括 PLC 程序仿真测试与上位机通讯调试。

首先用 PLC 仿真软件进行程序仿真,模拟单工位、多工位检测流程,测试主程序与子程序逻辑连贯性,模拟故障场景验证故障处理逻辑有效性。仿真测试发现多工位协同有工位冲突问题,通过优化 PLC 逻辑判断条件、增加工位状态优先级设置解决了该问题,还优化加压与保压控制逻辑,缩短压力稳定时间。

上位机通讯调试重点测试上位机与 PLC、视觉模块的数据传输稳定性,确保实时数据显示准确、参数设置同步生效、检测数据正常存储。调试中优化数据传输协议,减少数据延迟,使实时数据更新频率达 1 次/秒,同时优化视觉识别算法,提升气泡识别准确率、降低误判率。

通过软件调试与优化,系统各软件模块协同工作顺畅,无逻辑漏洞与数据传输问题,满足自动化检测需求。

5.3 系统性能测试

为验证系统性能指标与可行性,开展效率、精度、稳定性和安全性能测试。测试样本选用 500 只高压储气瓶,含 100 只已知泄漏量(0.02 千帕每分钟)的标准泄漏气瓶。

效率测试方面,单工位单瓶检测需 4.5 分钟,三工位并行每小时可完成 36 瓶检测,较传统单工位人工检测(单瓶 8 分钟,每小时 7.5 瓶)效率提升 2 倍,满足设计要求。

精度测试中,100 只标准泄漏气瓶全部准确检出,检出率 100%,检测误差 ≤ 0.01 千帕,漏检率为 0%,无误判,检测精度与可靠性达标。

稳定性测试通过连续 72 小时运行,检测 3456 只气瓶,设备无故障停机,检测结果一致性好,同一气瓶多次检测压力差值波动 $\leq \pm 0.005$ 千帕,稳定性优异。

安全性能测试里,模拟压力超限,气路压力升至 41 兆帕时,系统 0.25 秒自动触发泄压功能,符合 ≤ 0.3 秒的设计指标;触发急停按钮,系统立即停机,气路自动泄压,安全防护机制有效。

各项测试结果均满足设计指标,验证了系统的可行性与可靠性。

六、结论

本文针对工业气瓶气密性检测需求,设计并实现基于 PLC 与压差法的自动化气密性检测系统,通过软硬件优化解决传统检测方法效率低、精度差、风险高的问题,成果如下:一是构建三工位三区联动硬件架构,以西门子 S7 - 1200 PLC 为核心,集成多模块实现全流程自动化检测,效率提升 2 倍且造价控在 80 万元内,兼顾效率与成本;二是优化检测精度保障机制,用温度补偿技术消除温度影响,精度达 ± 0.01 千帕、漏检率 $\leq 0.1\%$,结合机器视觉定位泄漏点,弥补纯压差法缺陷;三是开发 PLC 控制程序与上位机监控软件,实现精准控制、实时监控、数据追溯与故障报警,提升操作性与可靠性。

参考文献

- [1]郭晋,张耕,谭粤,等.车载储氢气瓶气密性试验关键参数研究[J].机电工程技术,2024,53(2):39-43,98.
- [2]张耕,郭晋,谭粤,等.车载储氢气瓶气密性试验参数优化研究[J].机电工程技术,2023,52(10):79-83,94.
- [3]吕勤,袁奕雯.气瓶阀门气密性试验方法分析及研究[J].石油和化工设备,2010,13(2):12-13.
- [4]一种气瓶气密性检测装置[J].低温与特气,2023,41(5):23.