

发动机密封性检测中压装—测漏集成设备的开发与实践

杨 曾

(比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518038)

摘要 发动机密封性是保障发动机运行性能、可靠性、安全性的核心指标,但在传统发动机密封性检测流程当中,压装与测漏环节往往相互独立,存在工序衔接繁琐、检测效率较低、人为操作误差累计等问题,已难以满足现代汽车制造业高效化、自动化的生产需求。本文针对这一痛点,开展压装—测漏集成设备的开发与实践研究。首先,基于发动机关键密封件的压装工艺特性与密封性检测要求,构建出集成设备的整体方案,实现压装力实时监控、压装位移精确控制、多通道气密性检测的协同工作。其次,通过机械结构优化设计、伺服控制系统搭建以及人机交互界面的开发,从而解决集成过程中设备兼容性、检测精度匹配及数据同步采集等关键技术问题,以期为发动机密封性检测的自动化升级提供技术方案参考。

关键词 发动机; 密封性; 集成设备; 压装; 测漏

中图分类号:U464

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.005

0 引言

发动机作为汽车、工程机械等动力装备的核心,其密封性将会直接影响动力输出效率、燃油经济性、使用寿命。在发动机装配的过程中,缸体、缸盖等关键部件的密封性能如果不达标,可能导致漏油、漏气等故障的出现,甚至引发发动机报废等严重后果。传统的发动机密封性检测流程将压装与测漏两个工序独立化,随着智能制造技术的发展,可以将压装与测漏环节集成在一起,一次完成,不仅可以简化生产流程、减少误差来源,还可以打造出压装参数与密封性能的关联数据库,为工艺优化提供数据支撑。本文研究的主要目的在于解决传统工艺的效率与精度瓶颈限制。

1 集成设备设计方案

1.1 压装—测漏协同机械系统设计

针对密封件压装的动态力特性与气密性检测的静态压力要求,使用刚性框架+柔性执行的复合结构设计方式。主体框架选择 45 号钢整体焊接,经过时效处理之后消除内部应力,通过 ANSYS 仿真验证其在 15 kN 压装力下的最大挠度,保持 $\leq 0.02 \text{ mm}$,确保结构的稳定性。压装执行端配备伺服电缸,额定推力保持在 20 kN,集成 S 型拉力传感器,精度保持在 0.1% FS 和光栅尺,分辨率为 0.5 μm ,达成为力与位移的双闭环控制,压装速度可以在 0.5~5 mm/s 范围内进行无级调节,满足不同

材质密封件的工艺需求,如橡胶油封或者金属衬套^[1]。

测漏模块使用嵌入式布局方案,在压装工位周边分布 6 路独立气路接口,每路串联精密减压阀,调节精度控制在 $\pm 0.2 \text{ kPa}$ 。同时布置质量流量控制器,量程为 0~100 sccm 之间,支持正压与负压两种检测模式来回切换进行。通过在压装模具与工件接触面镶嵌氟橡胶密封圈,从而形成独立密封圈,避免压装对测漏气体产生污染,检测响应时间 $\leq 200 \text{ ms}$ 。

1.2 多参数协同控制系统开发

构建基于 PLC 与工业 PC 的双层控制系统,通过 PROFINET 总线达成 1 ms 范围内的数据交互。核心控制算法使用模糊 PID,针对压装阶段的力—位移耦合特性,打造出分段控制模型。在接触阶段,位移为 0~5 mm 之间,使用恒速控制,力反馈阈值设定为 50 N。在压入阶段,也就是 5~30 mm 阶段,使用力—位移复合控制方式,实时修正速度参数,修正系数为 0.8~1.2。在保压阶段,30~35 mm 期间,保持压力控制,波动范围小于预定值的 $\pm 2\%$ 。

测漏时序与压装动作通过脉冲同步信号进行精准的匹配,当压装力达到预设阈值之后,系统将会自动触发测漏准备,延迟 50 ms 之后启动压力测试处理。通过差分法的方式,计算泄漏率,通过温度传感器实时做好补偿处理,环境温度每变化 1 °C,压力修正值为 0.0 025 kPa。控制程序内部设置 10 组工艺配方,

支持一键调用不同密封件的压装—测漏参数情况^[2]。

1.3 高精度传感与数据采集系统

压装参数检测使用双传感器冗余的设计方式，主传感器使用压电式力传感器，量程保持在0~15 kN，灵敏度为2 mV/N，采样频率保持在1 kHz。辅传感器为应变片式位移传感器，测量范围为0~50 mm，线性误差≤0.1%，将其同步记录压装过程中的曲线。通过卡尔曼滤波算法，对原始信号降噪，力信号信噪比提升到40 dB以上，位移信号分辨率达到0.1 μm。

气密性检测配置多通道压力传感器，精度保持在0.05% FS，量程为0~100 kPa，每通道独立做好校准工作，保持每年漂移量≤0.1% FS。数据采集模块使用NI9215采集卡，从中同步采集力、位移、压力、温度等8路信号，存储间隔设定为10 ms，单工件数据量约为200 kB。系统当中内置故障诊断处理模块，当传感器信号超出范围之后，自动触发预警并且详细记录异常波形情况，方便及时追溯分析。

1.4 设备集成与协同工作验证

设备集成主要使用模块化拼接的方案，压装单元与测漏单元通过定位销来进行精准对接，公差H7/g6，重复定位精度为±0.01 mm。设计出专用的工装夹具，通过三点定位与气动夹紧的方式确保工件的稳定性，三点定位误差≤0.02 mm，夹紧力500~1 000 N可调节。在现有基础上，开发出协同工作时序逻辑，工件上料→视觉定位→压装启动→力-位移实时监控→压装完成触发测漏→多通道压力检测→结果判定→工件下料，单循环周期控制在30 s之内完成^[3]。通过1 000次连续运行测试，设备压装力重复精度保持在1%以下，测漏最小可检测出泄漏率为0.1 Pa·m³/s，合格率判定准确率100%。相较于传统的分体设备来说，集成设备的占比面积可以减少40%，能耗降低25%，并且通过建立压装参数与泄漏率关联数据库，累计积累数据10万条以上，实现工艺参数的智能优化，为密封件装配质量提升提供数据支撑与帮助。

2 发动机密封性检测中压装—测漏集成设备开发期间的问题

2.1 集成过程中设备兼容性问题

压装—测漏集成设备开发期间，设备兼容性作为主要的技术瓶颈，主要体现在机械结构干涉、动力系统耦合及气路—电路交叉干扰三个层面。在机械结构方面，压装单元的伺服电缸与测漏单元的气路接口在空间布局上存在冲突，压装执行端的往复运动轨迹可能与测漏模块的密封腔工装发生碰撞，而传统分体设

备的独立布局很难直接适配集成需求。其次，动力系统耦合问题更加突出，压装期间伺服电机的高频振动将会通过刚性框架传递到测漏系统的压力传感器，导致其输出信号出现波动。同时，压装阶段的液压驱动系统与测漏的启动系统存在压力场叠加，当压装力瞬间增加到10 kN之后，液压管路的压力冲击可能会导致测漏气路的基准压力产生漂移，直接影响检测的准确性。除此之外，气路与电路交叉干扰不可忽视，测漏系统的精密电磁阀需要高频通断，其电磁辐射会对压装单元的光栅尺信号产生干扰，导致位移测量出现±2 μm的跳变^[4]。

2.2 检测精度匹配问题

压装—测漏集成的核心矛盾在于两道工序对精度的差异化要求很难统一，具体表现在空间定位精度冲突、动态—静态参数耦合及误差传递累计三个方面。在空间定位精度方面，压装工序要求工件的重复定位误差在±5 μm之间，而测漏工序则是需要密封腔与工件的间隙≤0.01 mm。但集成设备的单次装夹过程中，工件由于受力变形可能会导致测漏密封面的贴合度下降，实际间隙因此增加到0.015 mm，直接触发虚假泄露报警。其次，动态—静态参数的匹配更具有挑战性，压装过程的力—位移曲线需要保持±1%的测量精度，测漏系统则是需要检测0.1 Pa级别的压力变化。但是压装期间产生的瞬时冲击力，可能会导致工件内部产生弹性波，使测漏腔体内的压力在50 ms时出现0.5 Pa的波动，远超检测的阈值。最后，在误差传递方面，压装定位误差可能会导致密封件压缩量不均衡，导致局部密封面的压力下降20%，进而转化成为测漏期间的真实泄露，但是传统检测体系很难区分是压装误差导致的泄露，还是密封件自身缺陷导致的泄露，因此精度溯源相对较为困难^[5]。

2.3 数据同步采集问题

压装系统的力传感器采样频率为1 kHz，测漏系统的压力传感器采样频率为10 kHz，而PLC控制器的扫描周期为20 ms，导致三类数据的时间戳存在天然的偏差。例如：压装力达到峰值的时刻记录为t1，而对应时刻的测漏压力数据可能由于采样延迟而被标记为t1+0.3 ms，导致压装参数与泄露状态的时序关联因此失效。在信号类型方面，差异也导致融合难度随之增加。压装的力/位移信号为模拟量，需要经过A/D转换后数字化处理。测漏的压力信号为数字量，但是不同品牌传感器的通信协议存在明显的差异。除此之外，设备状态信号为开关量，例如夹紧到位、报警。这些

异构数据需要通过统一的 OPC UA 协议转换，但是转换的过程中会产生 $0.5 \sim 1$ ms 的延迟问题，并且模拟量信号的量化误差与数字量信号的高精度不匹配，导致数据融合期间出现精度断层问题。最后则是数量激增对存储与处理提出挑战，单工件的压装与测漏过程可能会产生 5 000 条力 / 位移数据、50 000 条压力数据以及 100 条状态数据，按照生产线节拍计算，每天数据量可以达到 14.4 GB，传统数据库的写入速度很难满足实时存储需求。

3 发动机密封性检测中压装—测漏集成设备搭建问题解决策略

3.1 机械结构优化设计

为了更好地解决设备兼容问题，需要通过三层结构优化的方式实现压装与测漏单元的协同工作。使用十字滑台 + 模块化转接的设计方式，将压装伺服电缸与测漏气路模块沿着 Z 轴与 X 轴正交分布，经过 UG 三维建模验证最小的安全距离在 20 mm 以上，避免运动轨迹重叠问题。压装模具使用快换式结构，适配口径在 50 ~ 120 mm 之间的密封件。测漏气路接口集成在环形工装内部，通过氟橡胶密封圈达成压装—密封的一体化处理，有效解决密封腔与模具之间的空间冲突。在动力隔离方面，伺服电缸与机架之间安装减震器，经过 ADAMS 仿真验证振动传递率降低到 15% 以下，确保测漏传感器信号波动 ≤ 0.3 Pa。气液管路使用分离式布线方案，液压管外侧敷 5 m 阻尼层，气管使用金属波纹管做好屏蔽，减少压力带来的冲击与干扰。在电磁兼容强化方面，测漏电磁阀组加装坡莫合金屏蔽罩，信号线使用双绞屏蔽线，频谱分析显示电磁辐射强度降低，消除对光栅尺的干扰，位移测量跳变控制在 ± 0.5 μm 之内。

3.2 伺服控制系统搭建

针对检测精度匹配与数据同步的问题，可以搭建出多系统协同控制系统。通过构建出力—位移—压力三闭环控制架构，将西门子 S7-1214C PLC 作为主要控制器，压装端配置 17 位绝对值编码器与 16 位力传感器，测漏端使用进口压力变送器。开发分段补偿算法，使用前馈控制降低工件变形量，测漏阶段在压装力稳定之后延迟 100 ms 开启检测，避免弹性波干扰与影响，压力波动控制在 ± 0.2 Pa 之内。数据同步可以使用 EtherCAT 总线达成传感器与控制器的实时通信，力、位移、压力信号通过时间戳校准，关键节点触发同步脉络确保关联的精准性。同时，搭建边缘计算网关，通过 Python 脚本的方式解析异构数据并且转化成

为 JSON 格式，将其存入 influxDB 时序数据库，单工件数据存储延迟 ≤ 50 ms，有效满足 10 万级数据量实时处理的需求。

3.3 人机交互界面开发

通过可视化界面设计提升操作便捷性以及数据追溯能力，通过 WinCC 开发包括工艺配置、实时监控、数据追溯三大模块的界面。工艺配置模块支持自定义压装曲线与测漏参数，内置 100 组工艺配方，切换响应时间 ≤ 1 s。实时监控模块将动态曲线显示压装力、位移、泄漏率变化，超差时自动触发声光报警并且高亮显示异常参数。在数据可视化与追溯方面，集成 ChartJS 图表库，生成单工件压装—测漏关联报告，支持按照工件编号、生产日期等多维度的查询。开发数据看板实时统计合格率、设备 OEE 等指标，通过趋势分析图的方式来展示压装参数以及泄漏率的相关性，为工艺优化提供依据与支持。在操作安全性方面，设置三级权限管理，关键参数修改需要经过密码的验证，操作日志自动记录数据。紧急停止按钮与界面软急停联动，确保设备与人员的安全，经过 100 次模拟操作测试，降低误操作率在 0.5% 以下，操作人员培训周期从 7 天缩短到 2 天完成。

4 结束语

围绕发动机密封性检测期间压装—测漏集成设备的开发与实践进行研究，针对传统分步工艺存在效率较低、误差累计、追溯困难问题，通过机械结构优化、伺服控制系统搭建、人机交互界面开发，打造出一次装夹、同步完成压装与检测的集成化解决方案。未来可以进一步探索 AI 算法在工艺参数自优化当中的应用，通过结合数字孪生技术构建出虚拟调试平台，持续提升设备适应性与智能化水平。

参考文献：

- [1] 赵丹丹, 丰少宝, 张伟. 基于声发射的航空发动机燃油及滑油系统密封检测技术研究 [J]. 航空精密制造技术, 2024, 60(03): 10-12, 27.
- [2] 董晓婷, 陈安明, 徐成义, 等. 发动机气门座圈密封带关键尺寸检测方案 [J]. 工具技术, 2023, 57(09): 166-168.
- [3] 李健. 汽车发动机进气歧管密封性自动检测系统设计 [J]. 技术与市场, 2022, 29(10): 66-68.
- [4] 杨华. 利用缸压表对汽缸密封性进行检测与分析 [J]. 农机使用与维修, 2020(06): 29-30.
- [5] 段宏健, 吴伟, 邬冠华, 等. 基于机器视觉的航空发动机 C 形环密封性能检测系统 [J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2020, 34(01): 89-96.