

## 机械工程

## 机械阀门与汽车零部件机电性能优化及可靠性分析

朱洪强

桐乡辰宇机械股份有限公司 314000

**【摘要】**在高端装备制造与汽车产业协同升级的发展趋势下，机械阀门与汽车核心零部件的机电耦合特性及服役可靠性，直接决定整机系统的运行稳定性与安全边界。传统设计与制造模式难以适配复杂工况、多物理场耦合及长周期服役要求，易引发性能衰减、结构失效与运行故障。本文通过界定机电性能与可靠性的核心内涵，系统梳理当前零部件研发与应用中存在的结构设计冗余、材料匹配失衡、机电协同不足、可靠性评价滞后、运维体系缺失等现实问题。从结构参数优化、材料体系改良、机电控制策略升级、可靠性模型构建、全生命周期保障机制完善五个维度，提出机械阀门与汽车零部件机电性能提升与可靠性强化的实现路径，为推动关键零部件技术升级、保障装备服役安全提供理论支撑与工程实践范式。

**【关键词】**机械阀门；汽车零部件；机电性能；结构优化；可靠性分析；服役寿命

Optimization of Electromechanical Performance and Reliability Analysis for Mechanical Valves and Automotive Components

Zhu Hongqiang

Tongxiang Chenyu Machinery Co., Ltd. 314000

**【Abstract】** Under the collaborative upgrading trend of high-end equipment manufacturing and the automotive industry, the electromechanical coupling characteristics and service reliability of mechanical valves and core automotive components directly determine the operational stability and safety boundaries of entire systems. Traditional design and manufacturing approaches struggle to meet complex operating conditions, multi-physical field coupling requirements, and long-term service demands, often leading to performance degradation, structural failures, and operational malfunctions. This study defines the core concepts of electromechanical performance and reliability, systematically addressing practical challenges in component R&D and application such as structural design redundancy, material mismatching, insufficient electromechanical coordination, delayed reliability evaluation, and missing maintenance systems. Through five strategic dimensions—structural parameter optimization, material system improvement, electromechanical control strategy upgrades, reliability model development, and lifecycle assurance mechanisms—we propose implementation pathways for enhancing electromechanical performance and reliability in mechanical valves and automotive components. These findings provide theoretical foundations and practical frameworks to drive technological advancements in critical components and ensure equipment operational safety.

**【Key words】** mechanical valve; automotive component; electromechanical performance; structural optimization; reliability analysis; service life

高端装备制造与汽车产业的迭代升级，对核心零部件的机电性能与服役可靠性提出更高要求。机械阀门与汽车零部件作为流体控制、动力传动系统的关键载体，长期处于多场耦合与交变载荷工况，易出现性能衰减、疲劳失效等问题，制约整机运行安全<sup>[1]</sup>。本文立足工程实际，剖析性能与可靠性的制约因素，构建多维度优化机制，为提升零部件稳定性、延长服役周期、推动装备制造业高质量发展提供理论与技术支撑。

### 一、机电性能与可靠性内涵

机电性能是机械结构、材料特性与电气控制系统协同作用所呈现的综合运行能力，涵盖动态响应、载荷适配、能量转换、精度保持与环境耐受等核心维度，是零部件功能实现的基础保障。可靠性则指零部件在规定工况与使用周期内，持续完成预设功能而不发生失效的概率，依托失效机理、寿命分布、故障规律与维护策略形成完整评价体系。在机械阀

门与汽车零部件工程应用场景中,二者相互耦合、彼此约束,结构强度与刚度决定机械承载边界,驱动与传感精度影响机电响应一致性,材料稳定性与工艺质量则直接作用于长期服役可靠性。精准把握机电性能演化规律与可靠性衰减机制,是开展优化设计、提升产品品质的前提,可为零部件全生命周期管理提供科学依据<sup>[2]</sup>。

## 二、机电性能优化与可靠性提升的重要性

### (一) 推动零部件供给体系提质升级

机械阀门作为流体控制与压力调节系统的核心部件,广泛应用于能源、化工、装备制造等领域,对密封精度、启闭稳定性与介质耐受性提出严苛要求。汽车零部件长期承受交变载荷、振动冲击与温度循环,其疲劳强度、传动效率与机电协同性能直接关联整车安全与驾乘体验。传统零部件开发依赖经验设计,结构冗余与强度不足并存,材料选型与工艺匹配缺乏量化依据,难以满足高端装备与新能源汽车对轻量化、高可靠、长寿命的需求<sup>[3]</sup>。通过机电性能优化与可靠性提升,可实现结构轻量化、功能集成化与运行高效化,推动零部件从满足基础使用向高品质、高稳定性供给转型,缩小与国际先进水平的差距。

### (二) 保障装备系统安全稳定运行

零部件失效是引发整机停机、性能衰退乃至安全事故的主要诱因。机械阀门密封失效易导致介质泄漏、压力失控,诱发生产安全与环境风险;汽车制动、传动、转向相关零部件性能劣化,会直接威胁道路交通安全。开展机电性能优化能够提升响应精度与载荷适配能力,降低异常磨损与应力损伤概率;可靠性分析则可提前识别薄弱环节,预测寿命周期,制定预防性维护策略。二者协同实施,可显著降低故障发生率,延长无故障运行时长,减少停机损失与维修成本,为工业装备与汽车产品持续稳定运行提供坚实保障。

### (三) 支撑产业技术创新与绿色发展

在智能制造与双碳目标背景下,零部件轻量化、高效化、长寿命化成为行业共识。机电性能优化有助于降低能耗、提升能量利用率,契合绿色制造发展方向;可靠性提升可延长产品服役周期,减少材料消耗与废弃物排放,推动全生命周期低碳化。同时,性能优化与可靠性研究过程中形成的仿真方法、试验标准、评价模型与工程经验,可反哺设计理论与制造工艺创新,促进多学科交叉融合,为关键零部件国产化替代、核心技术自主可控提供支撑,助力装备制造与汽车产业向高端化、智能化、绿色化转型。

## 三、机械阀门与汽车零部件现存问题分析

### (一) 结构设计不合理,性能冗余与短板并存

结构形态与几何参数设计缺乏多物理场耦合仿真支撑,未充分考虑复杂工况下应力分布、变形规律与流体特性协同关系。机械阀门阀体、阀芯、密封副结构匹配度不足,易出现应力集中、流阻过大、密封压力不均等问题,影响调节精度与密封可靠性。汽车零部件过渡结构、支撑布局与受力路径设计不合理,在交变载荷作用下易形成疲劳裂纹源,引发早期失效。同时,结构公差与装配精度控制体系不完善,同轴度、平行度、间隙配合偏差超出合理范围,加剧运行振动与摩擦损耗,降低机电系统稳定性。

### (二) 材料体系失衡,环境适应性不足

材料选型未结合工况特征开展系统化匹配验证,强度、韧性、耐磨性、耐蚀性、耐高温性等指标难以协同满足服役需求。机械阀门在腐蚀、高温、高压介质环境中,材料易出现氧化、剥落、塑性变形,导致密封性能衰减。汽车零部件在低温、交变载荷与化学介质作用下,易发生疲劳损伤、摩擦磨损与老化失效。材料内部缺陷与表面处理工艺管控不足,微观组织不均、残余应力过大、涂层结合力弱等问题,会加速性能退化,降低长期服役可靠性。在交变载荷、腐蚀介质及高温环境等复杂工况作用下,缺陷处易形成应力集中,诱发微裂纹萌生与扩展,最终引发疲劳失效、渗漏乃至断裂等恶性故障。同时,表面防护层过早剥落会使基体直接暴露于恶劣环境,进一步加剧氧化、磨损与腐蚀损伤,大幅缩短设备使用寿命,增加运维成本与安全隐患,严重制约装备整体服役效能。

### (三) 机电协同性差,动态响应与控制精度不足

机械结构与电气驱动、传感检测、控制算法之间缺乏深度耦合设计,信号采集、传输、处理与执行环节存在延迟与偏差。机械阀门执行机构响应速度慢、定位精度低,难以实现流体参数精准调节;汽车零部件电控系统与机械执行端匹配不佳,出现响应滞后、动作漂移、同步性差等问题。复杂工况下电磁干扰、温度漂移、振动扰动会进一步放大控制误差,导致性能波动与运行失稳,难以满足高精度、高一一致性的使用要求。

### (四) 可靠性评价体系缺失,寿命预测精准度不足

传统可靠性分析多依赖静态试验与经验判断,未建立覆盖设计、制造、装配、服役、维护全流程的动态评价模型。缺乏多物理场耦合下的失效机理深度解析,对疲劳、磨损、腐蚀、老化等主导失效模式的演化规律认知不充分。数据采集维度单一,未能整合结构力学、材料性能、机电参数、工况环境等多源信息,寿命预测与可靠性评估结果与实际服役状态存在偏差。可靠性数据库与标准体系不完善,同类零部件对比分析与优化迭代缺乏数据支撑。

### (五) 制造与运维管控薄弱,全周期保障能力不足

制造工艺精度不稳定,切削、热处理、焊接、装配等环节质量波动大,残余应力、尺寸偏差、表面缺陷难以有效控

制。缺乏全过程质量追溯体系,异常问题难以精准定位与闭环整改。后期运维依赖定期检修,缺乏在线监测、状态评估与预防性维护机制,无法及时识别早期故障信号。运维数据记录不完整、分析不深入,难以支撑失效原因追溯、寿命预测与优化方案迭代,全生命周期可靠性保障能力不足。

#### 四、机电性能优化及可靠性提升实现机制分析

##### (一)开展结构拓扑与参数协同优化,平衡性能与可靠性

以多物理场耦合仿真为技术支撑,构建结构应力、变形、流体特性、机电响应联合分析模型,识别性能薄弱区域与应力集中部位。对机械阀门阀体、阀芯、密封面等关键结构进行拓扑重构与参数迭代,优化流道形态、壁厚分布与配合间隙,降低流阻与冲击载荷,提升密封稳定性与调节精度。针对汽车零部件受力特征与运动规律,优化支撑结构、过渡圆角与受力路径,使应力分布趋于均匀,消除局部峰值,提升抗疲劳与抗变形能力。建立公差匹配与装配精度管控标准,强化尺寸链核算与过程控制,降低装配偏差对运行性能的负面影响,实现结构轻量化与高可靠性协同发展。

##### (二)优化材料选型与改性工艺,提升环境耐受能力

基于服役工况与失效模式,构建材料性能需求矩阵,开展强度、韧性、耐磨性、耐腐蚀性、耐高温性等指标综合比对,完成基材精准选型。对核心受力部件与摩擦副构件实施表面改性处理,通过涂层沉积、渗氮、淬火等工艺提升表面硬度、结合力与耐损伤性能,延缓磨损与腐蚀进程。严格管控材料制备与加工过程,降低内部缺陷率,优化微观组织均匀性,减少残余应力。通过材料体系与表面工艺双重优化,提升零部件在极端温度、腐蚀介质、交变载荷等复杂环境下的稳定性,延长有效服役周期。

##### (三)升级机电耦合控制策略,提升动态响应与运行精度

整合机械结构特性与电控系统需求,构建机电协同仿真平台,优化驱动模块、传感检测与控制算法参数。提升信号采集精度与传输稳定性,降低噪声干扰与延迟误差,实现位移、压力、转速、温度等参数实时感知与闭环反馈。引入自适应调节算法,根据工况变化动态修正控制输出,缩小执行偏差,提升响应速度与定位精度。强化电磁兼容设计与抗干

扰措施,保障复杂环境下电控系统稳定运行,实现机械性能与电气控制深度融合,提升整机动态性能与运行一致性。

##### (四)构建全维度可靠性评价模型,实现精准寿命预测

整合结构力学、材料性能、机电参数、工况环境等多源数据,基于失效物理与概率统计理论,构建多模态可靠性分析模型。系统解析疲劳、磨损、腐蚀、老化等主导失效机理,确定关键影响因子与演化路径,建立寿命分布函数与故障概率模型。搭建加速寿命试验与工况模拟平台,获取真实可靠的性能衰减数据,修正模型参数,提升寿命预测与可靠性评估精度。建立可靠性数据库与评价标准,实现同类产品横向对比与迭代优化,为设计改进、质量管控与运维决策提供量化依据。

##### (五)完善制造运维全周期保障机制,巩固长期可靠性

优化精密制造与热处理工艺,构建全过程质量管控体系,实现加工参数、装配扭矩、表面质量等关键指标在线监测与闭环控制。建立产品唯一标识与全流程追溯系统,实现从原材料到成品的质量数据可查询、可分析、可整改。搭建在线监测与智能运维平台,实时采集运行参数与状态信号,开展异常识别、故障预警与健康评估。制定预防性维护策略与标准化操作规程,定期开展性能检测、润滑保养与精度校准。通过制造端质量强化与运维端科学管控,形成全生命周期可靠性保障闭环,持续稳定维持零部件高性能运行。

#### 五、结论

本文围绕机械阀门与汽车零部件机电性能优化与可靠性提升问题,系统阐释核心内涵与工程价值,深入剖析结构、材料、机电协同、评价体系、制造运维等层面的现实短板。通过结构拓扑与参数优化、材料体系改良、机电控制升级、可靠性模型构建、全周期保障机制完善五大路径,形成覆盖设计、制造、服役、维护全过程的技术体系。研究表明,多物理场耦合优化可有效改善应力分布与动态响应,材料与工艺升级能够显著提升环境适应性,机电协同与智能控制有助于强化精度与稳定性,全维度评价与全周期保障可实现可靠性精准管控与长期维持。

#### 参考文献

- [1]刘惠超,黄文甫,刘奎龙. 汽车铝合金异型零部件车铣联合加工技术研究 [J]. 汽车维修与保养, 2026, (04): 63-64.
- [2]梅仁友,沈毅,翟政林. 汽车零部件行业的装备自动化项目管理研究 [J]. 机械管理开发, 2026, 41 (03): 241-242+245.
- [3]牛力,吴帆,江拼. 汽车零部件机械加工工艺优化与精度控制研究 [J]. 汽车维护与修理, 2026, (07): 87-88.

作者简介:朱洪强,出生年月:1988年8月,男,汉族,籍贯:浙江嘉兴,学历:本科,职称:中级工程师,研究方向:机电方向。