

阀杆螺纹加工精度控制及其对启闭性能的影响研究

李景焘 章浩然

哈电集团哈尔滨电站阀门有限公司 黑龙江哈尔滨 150060

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15754

[摘要] 本文针对阀门阀杆螺纹在启闭过程中对性能的关键影响,深入研究其加工精度控制方法及其对启闭性能的具体作用机制。通过理论分析与实验对比,探讨了不同加工误差(如螺距误差、螺纹圆柱度、表面粗糙度)对启闭扭矩、密封性能及使用寿命的影响。结合数控车削、螺纹磨削等加工方式,提出了一种多参数综合优化的加工精度控制策略。实验结果表明,提高螺纹精度可显著降低启闭阻力并延长使用周期。该研究对提升阀门制造质量及运行可靠性具有重要的理论与实际意义。

[关键词] 阀杆螺纹; 加工精度; 启闭性能; 控制策略; 阀门工程

引言:

阀门在各类流体管道系统中具有举足轻重的作用,其启闭性能直接关系到系统的安全与效率。作为核心传动部件,阀杆螺纹的加工精度对启闭过程中的扭矩传递、密封效果及使用寿命产生深远影响。现有研究多集中于材料选择与设计结构,而对加工误差控制与性能关联的系统研究相对较少。本文从阀杆螺纹的加工精度入手,分析其对启闭性能的关键影响因素,并提出优化策略,为高可靠性阀门制造提供理论支持与技术路径。

1. 阀杆螺纹在启闭性能中的作用机制

1.1 阀杆螺纹传动机理分析

阀杆螺纹作为连接手轮与阀瓣之间的关键传动结构,其作用是将旋转运动转化为直线运动,实现对阀门启闭的控制。螺纹副在工作过程中承受着较大的轴向载荷与摩擦阻力,其传动效率直接影响启闭所需的操作力大小。一般采用梯形螺纹或矩形螺纹,这些螺纹型式具有良好的承载能力与相对较高的传动效率。传动过程中的摩擦不仅影响力的传递,还会导致磨损和热变形,从而影响启闭的平稳性。若螺纹副之间存在间隙或加工偏差,容易造成启闭过程中“爬行”现象,降低操作舒适性和定位精度。此外,当阀门在高频启闭或高压介质下运行时,螺纹结构的受力均匀性和扭矩传递路径的稳定性变得尤为重要。

1.2 启闭性能关键指标与影响因素

阀门的启闭性能主要体现在启闭扭矩、启闭时间、启闭平稳性以及启闭后的密封可靠性等方面。启闭扭矩是衡量操作负载的主要指标,受到螺纹摩擦系数、配合间隙及阀门结构形式等多种因素的影响。当螺纹副的加工精度不高,螺距

不均匀或表面粗糙度较大时,会导致摩擦阻力显著上升,使得启闭扭矩波动明显,甚至出现卡滞现象。启闭时间则与传动效率及执行机构速度密切相关,螺纹传动效率低下会延长整体启闭周期,影响紧急情况下的响应速度。此外,启闭平稳性直接关联于螺纹副运动过程中的阻力变化和同心度偏差,若存在轴向偏摆或同轴度不良,会引起启闭时的抖动和冲击,影响密封副的贴合质量。

1.3 螺纹精度对性能的敏感性研究

螺纹加工精度对阀门启闭性能具有高度敏感性。首先,螺距误差会引起阀杆运动的步长不均,导致阀瓣启闭速度发生非线性变化,严重时可能出现控制滞后或过冲现象。其次,表面粗糙度作为摩擦副的重要指标,若过高则会导致摩擦系数增大,不仅增加操作力,还可能在微动过程中造成粘滑效应,加剧局部磨损。再次,螺纹的轴向跳动和径向圆柱度误差会造成受力不均,产生偏载,从而影响传动稳定性,导致阀杆发生偏斜甚至断裂。在精密阀门或电动执行器驱动系统中,螺纹精度的微小偏差也会放大成启闭误差,影响控制精度和反馈响应。通过大量实验数据对比发现,螺纹副精度达到 ISO 4 级以上时,其启闭扭矩波动率可降低 20%以上,阀门密封失效率显著下降。

2. 阀杆螺纹加工误差类型与成因分析

2.1 常见几何误差类型

阀杆螺纹在加工过程中可能出现多种几何误差,这些误差直接影响其与螺母之间的配合质量与传动稳定性。其中,螺距误差是最常见且影响较大的类型,表现为实际螺距与设计螺距之间的不一致,导致螺杆在传动时产生步长偏差,严重时会出现轴向推力不稳定现象。另一个典型误差为螺纹的

累计偏差,当加工过程中存在周期性或累积性偏移时,整个螺纹段将产生错位,降低啮合精度。此外,圆柱度误差和螺纹同轴度偏差也是较为常见的问题,它们导致螺杆在旋转过程中发生偏心运动,进而引起阀瓣的偏载或密封面偏磨。螺纹中径误差会影响配合紧密度,间隙过大造成间动冲击,间隙过小则可能卡死;而螺纹牙型角误差则会改变接触面积和受力方向,从而引起局部应力集中,缩短使用寿命。

2.2 加工设备与工艺因素

加工设备性能与工艺安排是影响螺纹精度的根本性因素。首先,加工设备的主轴精度与导轨稳定性决定了螺纹成形的几何一致性。如果车床存在主轴跳动或导轨磨损,则会在加工过程中引入周期性误差。其次,数控系统的伺服滞后或插补误差也会导致螺距不匀与定位不准,特别是在高速加工过程中,机床响应滞后会放大细微误差。再者,刀具的磨损状态与几何角度直接影响切削质量,钝化刀具常常造成牙型变钝、毛刺增加,从而影响啮合质量。工艺参数选择不当,如切削速度、进给量及切削深度设定不合理,也可能引起振动、表面撕裂或金属堆积。此外,冷却液的供应方式和压力也影响表面温升与加工稳定性,若冷却不充分,易引发热变形,导致螺距收缩或变形。夹具夹紧力不足会造成工件在加工中微位移,引起同轴度或螺距变化。

2.3 检测误差及其误判风险

在螺纹精度控制中,检测环节至关重要,但检测过程中也容易引入误差甚至造成误判。首先,常用的螺纹环规虽然简便快速,但其只能反映是否“通止”,无法准确量化中径或螺距的具体偏差,适用性受限。采用三针法、投影仪或轮廓仪测量虽然精度高,但对操作环境及人员技能要求较高,易受光照、对焦、测量姿态等因素干扰,产生读数偏差。检测过程中若未控制温度或忽略热胀冷缩影响,也可能导致实际测量值偏离标准值。夹具刚性不足或测量工件未充分固定时,轻微震动也可能使读数波动明显,影响判断。此外,数据处理过程若使用非线性拟合算法不当,会在误差修正过程中反向放大微小波动,导致误判。对于智能检测设备,如激光干涉仪、三坐标测量仪等,虽然具备高精度,但其误差模型建模需定期校准,若校准频率不足或传感器老化,将直接影响检测结果可靠性。

3. 加工精度控制技术与策略

3.1 高精度加工工艺优化

为了提高阀杆螺纹的加工精度,必须从工艺设计和设备性能两个方面入手进行系统优化。在加工方式上,应优先选择精密数控车削结合精密螺纹磨削的复合工艺,以实现高形位精度和稳定表面质量。对于大批量生产,可采用滚压加工技术,其通过金属塑性变形方式形成螺纹,不仅表面粗糙度低、硬度高,而且加工一致性好,能显著提升耐磨性。在刀具选择方面,应使用高硬度、高耐磨性的整体硬质合金刀具,保持刀具几何角度一致性,并定期更换以避免磨损对加工精度的影响。加工参数应根据材料特性与设备能力精细设定,例如在保证切削稳定性的前提下选用较小进给量与合适切削速度,以减少振动和热变形。此外,采用高刚性夹具系统可有效降低工件装夹变形,并确保同轴度与定位重复精度。在冷却方式上,应用恒压恒温冷却液系统不仅可有效带走热量,防止热变形,还能改善表面质量。

3.2 智能检测与误差补偿方法

在加工过程中引入智能检测系统,可以实现对关键几何参数的实时监控与误差反馈调节,从而形成闭环控制。以在线测量系统为例,其可在机床加工完成后直接采集螺距、螺纹中径、表面粗糙度等参数,通过高精度激光或电感传感器实现微米级测量。数据由软件系统进行动态分析,发现偏差后立即调整刀具路径或进给量,提升加工的一致性与稳定性。在数控系统中集成误差补偿功能也尤为关键,通过建立机床热变形模型、丝杆间隙补偿模型和刀具磨损曲线等数据,可在程序运行前自动修正位移误差,提高最终轮廓精度。此外,对于高端加工中心,还可以利用三维视觉检测系统,对成品螺纹进行整体扫描,从而检测累积误差与形貌偏差,并追溯其成因。通过将检测系统与制造执行系统(MES)集成,实现对每一件工件的加工状态和质量特征进行记录与追踪,为后续质量改进和失效分析提供依据。

3.3 质量一致性控制体系

保障阀杆螺纹加工质量的稳定性和一致性,需建立完善的质量控制体系,并落实到全过程管理。首先,在工艺文件标准化方面,应明确每道工序的加工参数、设备设置、检测方法及操作规范,减少人为因素造成的波动。其次,应建立严格的首件检验制度,对每批产品的第一件进行全参数测量,以验证设备稳定性和程序正确性。批量生产过程中,可引入统计过程控制(SPC)技术,通过对中径、螺距和圆柱度等关键指标进行持续监控和趋势分析,及时发现偏移趋势并进行

工艺调整,防止不合格品扩大。针对多批次、跨班次的产品一致性控制,还需开展设备能力指数(Cpk)分析,评估生产线的稳定性与可控性。在人员管理方面,应组织定期培训,确保操作人员掌握正确的装夹、对刀与检测方法,并通过技能考核形成激励机制。在数据管理层面,应建立统一的质量追踪平台,所有检测数据自动上传、归档,便于后续追溯、对比与优化。

4. 加工精度对阀门启闭性能的实验研究

4.1 实验方案设计

为了深入分析阀杆螺纹加工精度对阀门启闭性能的实际影响,本研究设计了系统性的实验方案,涵盖多等级加工精度、典型阀门结构和标准启闭工况。实验对象选取三组螺纹精度不同的阀杆试样,分别代表普通加工(ISO 8级)、中高精度加工(ISO 6级)和精密加工(ISO 4级)水准,采用统一材质和热处理工艺,确保试样在除螺纹精度外的其他参数一致。试验所用阀门型号为DN50直通截止阀,并配置电动执行机构以保证启闭操作的一致性。启闭工况模拟常规压力等级(1.6MPa)和温度环境(常温25°C),并在标准测试平台上进行启闭循环试验,每组样品测试不少于100个启闭周期。实验主要采集启闭扭矩、启闭时间、启闭过程的平稳性曲线、启闭后密封泄漏率以及启闭过程中产生的振动加速度等多项数据。数据采集系统包括力矩传感器、位移编码器与激光干涉仪,用于实时监控和记录启闭过程中微小变化。

4.2 启闭性能对比分析

实验结果表明,螺纹加工精度对阀门启闭性能具有显著影响。普通加工样品(ISO 8级)在启闭过程中表现出明显的扭矩波动,最大启闭扭矩平均为28Nm,启闭时间为5.4秒,密封后泄漏率为 1.2×10^{-3} mL/s。在启闭动作初期及末端阶段,出现了明显的“卡阻”现象,启闭力矩曲线呈现出不连续的跳跃特征。中高精度样品(ISO 6级)在各项指标上均有改善,其最大扭矩降至22Nm,启闭时间缩短至4.7秒,泄漏率下降至 4.6×10^{-4} mL/s,启闭过程平稳性增强。精密加工样品(ISO 4级)启闭性能最为优越,最大扭矩仅18Nm,启闭时间为3.9秒,泄漏率低至 7.2×10^{-5} mL/s,同时启闭过程曲线平滑,无明显异常点。从加速度传感器获取的振动数据分析,普通加工样品启闭时产生的机械冲击频率高达每秒60次以上,而精密样品仅维持在每秒20次以下,体现出更

好的机械传动稳定性。此外,多次循环测试中,普通样品在第70个循环后出现明显磨损及螺纹啮合变松现象,而高精度样品至100次仍保持良好状态,耐久性优势明显。

4.3 实验结果讨论与工程意义

从实验结果可见,阀杆螺纹的加工精度不仅影响启闭所需的操作扭矩与时间,还直接决定了启闭动作的平稳性与密封可靠性。高精度螺纹具有更好的啮合性和更低的摩擦系数,使得阀门在启闭过程中阻力均匀,避免了局部卡阻与抖动现象,同时对密封副的压紧力分布更加均匀,从而降低了泄漏风险。在工程应用中,这意味着通过提升阀杆螺纹的加工精度,可有效延长阀门的使用寿命、降低维护频次,并在自动化控制场景中获得更高的启闭响应速度和控制精度。尤其在高压、高温及关键控制环节(如石化、电力、核电等行业),启闭可靠性直接关系到系统安全性与运行效率,因而对螺纹精度提出更高要求。从经济性角度看,虽然精密加工成本相对较高,但通过其显著提升的性能和寿命,可在全生命周期内降低故障率和维修成本,实现工程效益最大化。

结语:

综上所述,阀杆螺纹的加工精度对阀门启闭性能具有决定性影响。高精度螺纹不仅显著降低启闭扭矩与运行阻力,还提升了密封性能与结构稳定性,延长使用寿命。通过优化加工工艺、引入智能检测与误差补偿机制,以及建立完善的质量控制体系,能有效控制螺纹几何误差,实现批量制造过程中的质量一致性。本研究为阀门制造企业提供了可靠的技术路径,对提升关键零部件加工水平和推动阀门产品高端化具有重要的理论与工程意义。

[参考文献]

- [1]王治民.三偏心硬密封蝶阀加工工艺优化设计及密封副有限元分析[D].兰州理工大学,2024.
- [2]蒋亦楠.基于车铣复合中心的针阀接头数控加工探析[J].中国机械,2023(32):42-45.
- [3]樊向松,郑东宏,吴勇.常规岛汽轮机高压调节阀油动机阀杆咬死处理[J].电工技术,2022(07):170-172+175.
- [4]靳其龙,范伟,胡泽丰.600MW亚临界机组高调门新型阀杆连接方式应用[J].热力透平,2018,47(03):209-212.
- [5]张稳,姜大海.EVA装置用超高压控制阀阀杆断裂分析及改进[J].石油化工自动化,2025,61(01):92-94.