

启闭机导向套内表面打磨装置关键部件改进与性能验证分析

王旺根 赵 锋 魏晓江

浙江征天机械股份有限公司 浙江 诸暨 311800

【摘要】：启闭机作为水利工程等领域的关键设备，其导向套的内表面精度对启闭机的运行稳定性和使用寿命有着直接影响。导向套内表面打磨装置是保障导向套加工精度的重要设备，然而当前该类装置的部分关键部件在实际运行中存在性能不足的问题，如打磨效率低、打磨质量不稳定等，制约了导向套加工的整体效果。本文针对启闭机导向套内表面打磨装置的关键部件展开研究，深入分析现有部件存在的缺陷，提出相应的改进方案，并对改进后部件的性能进行理论层面的验证分析。通过对关键部件结构、材料等方面优化，旨在提升打磨装置的打磨效率与打磨质量，为启闭机导向套的高质量加工提供有力支持。研究结果表明，改进后的关键部件在理论上能够有效改善打磨装置的运行性能，满足导向套内表面高精度加工的需求，对推动启闭机相关设备的技术发展具有一定的参考价值。

【关键词】：启闭机；导向套；打磨装置；关键部件改进；性能验证

DOI:10.12417/2705-0998.25.20.042

1 引言

在水利、电力等领域，启闭机负责闸门启闭，其运行性能关乎工程安全稳定，而导向套作为启闭机关键部件，外圆与机架过盈配合、内圆与活塞杆间隙配合，对其内表面精度要求极高。若导向套内表面粗糙度超标或存在形状误差，会增大活塞杆运动摩擦阻力、加剧磨损，影响启闭机运行效率与寿命，严重时甚至引发安全事故，因此对其进行高精度打磨至关重要。当前导向套内表面打磨装置长期使用后问题凸显：部分关键部件因结构设计不合理、材料选择不当，导致打磨力不稳定、打磨头磨损过快，既降低打磨效率，又难以保证打磨质量，无法满足工程建设要求。为解决这些问题、提升装置性能，对关键部件开展改进研究十分必要。通过分析现有部件工作原理与缺陷，结合现代机械设计理论和材料科学技术提出改进方案，并全面验证改进后部件性能，可为装置优化升级提供可靠理论依据，推动导向套加工技术进步，保障相关工程安全高效运行。

2 启闭机导向套内表面打磨装置关键部件现状分析

启闭机导向套内表面打磨装置的打磨头、传动、进给调节部件均存在性能缺陷，影响打磨质量与效率。打磨头作为核心部件，现有产品多为单一磨料结构，难适应导向套内表面硬度、材质差异，易出现打磨不均，且基体用普通钢材，高速打磨时易受热变形，磨料结合强度不足易脱落，不仅缩短寿命还可能划伤工件，其单一圆柱形状也对台阶孔等特殊结构存在打磨死角。传动部件方面，齿轮传动因啮合间隙易产生冲击振动，导致打磨头跳动，且润滑油易失效加剧齿轮磨损，增加维护成本与停机时间；皮带传动虽能缓冲减振，但传动精度低、皮带易松弛，使打磨头速度波动影响打磨均匀性，且皮带耐磨性差需频繁更换，影响作业连续性。进给调节部件的手动调节方式依赖操作人员经验，易致进给量不准，过大增加打磨头负荷与过度打磨，过小则降低效率；简单机械自动调节方式用弹簧、凸轮等机构，精度低且难实时响应工件参数变化，其复杂结构长

期使用还易因零部件磨损松动，进一步降低调节精度与可靠性。

3 启闭机导向套内表面打磨装置关键部件改进方案

3.1 打磨头部件改进

针对现有打磨头问题，可从三方面改进：磨料结构采用多层次复合式，按比例和顺序分层排列不同粒度、材质磨料，外层粗粒度耐磨磨料快速去余料提效率，中层中粒度磨料初步精磨改善粗糙度，内层细粒度抛光磨料精细抛光达设计要求，适配不同区域打磨需求，实现连续作业提升打磨均匀性。基体材料选用高强度、高耐热钛合金替代普通钢材，耐受高速打磨力且不易受热变形，保障结构稳定；搭配激光焊接技术连接磨料与基体，凭借高焊接强度、小热影响区优势，避免磨料脱落，延长寿命并降低划伤风险。形状设计依导向套结构定制异形打磨头：针对台阶孔导向套，设计台阶尺寸匹配的台阶式打磨头，确保全面打磨；针对异形曲面导向套，采用柔性材料基体的可变形打磨头，内置多小型调节机构，能随曲面自动调整形状贴合表面，消除打磨死角，提升打磨全面性与均匀性。

3.2 传动部件改进

为解决传动部件振动、传动精度低、磨损快等问题，可从传动方式优化与性能强化两方面改进。齿轮传动改用高精度谐波齿轮传动，其借柔性齿轮弹性变形传动力，啮合间隙极小，能大幅减少冲击振动，提升传动稳定性，保障打磨头平稳运行以降低打磨质量波动，且结构紧凑，可在小空间实现大传动比，利于减小装置体积。皮带传动采用同步带传动替代普通皮带，通过带齿与带轮齿啮合传力，传动精度高、比稳定、效率高且噪音低；同步带用高强度聚氨酯材质并内置钢丝骨架，能提升抗拉强度与耐磨性，减少松弛和磨损，延长寿命，且无需频繁加润滑油，降低维护成本与停机时间，提高作业连续性。此外，在传动系统中电机与传动部件、传动部件与打磨头间安装橡胶

减震器，可吸收运行振动，进一步提升打磨稳定性与质量；同时对齿轮和同步带轮表面做氮化处理，提高表面硬度与耐磨性，延长传动部件使用寿命。

3.3 进给调节部件改进

为提高进给调节部件的调节精度与自动化程度，可采用基于伺服电机和滚珠丝杠的自动进给调节系统，替代传统手动与简单机械自动调节方式。伺服电机控制精度高、响应快、运行稳，能按控制系统指令精准控速控转角，实现进给量精准调节；滚珠丝杠传动效率高、定位准、回程误差小，可将伺服电机旋转运动精确转为直线运动，带动打磨头精准进给。控制系统以PLC为核心，结合触摸屏实现人机交互：操作人员通过触摸屏设进给量、进给速度等参数，PLC依参数控伺服电机运行；装置还装位移与压力传感器，实时检测进给位置与打磨力，信号反馈至PLC后，PLC实时调整伺服电机——打磨力过大时自动减进给量，进给位置偏离时调整方向与速度，保障打磨精度与可靠性。此外，设计恒速、恒力、分段等多种进给模式：恒速模式适用于材质均匀、形状规则的导向套，保证打磨速度稳定；恒力模式适用于材质不均、有凸起凹陷的情况，借调整进给量保打磨力恒定；分段模式适用于不同区域需不同打磨精度的场景，分阶段设参数实现精细化打磨，提升部件适应性。

4 改进后关键部件性能验证分析

4.1 打磨头部件性能验证

从打磨质量、使用寿命和适应性三方面，对改进后的打磨头部件展开性能验证分析。打磨质量上，因采用多层复合磨料结构，打磨头可实现粗磨至精磨连续作业：外层粗粒度磨料快速去除表面多余材料，中层中粒度磨料初步修整表面，内层细粒度磨料精细抛光，经理论分析，能将导向套内表面粗糙度稳定控制在设计范围内，且不同区域粗糙度差异小，有效解决传统单一磨料结构打磨不均的问题，显著改善表面粗糙度均匀性。

使用寿命方面，打磨头以钛合金为基体，强度与耐热性高，可承受更大打磨力与更高温度，减少基体变形；搭配激光焊接技术提升磨料与基体结合强度，防止磨料脱落。相较传统打磨头，相同打磨条件下，改进后打磨头基体变形量大幅减小，磨料脱落率降低，使用寿命延长显著，且钛合金耐磨性好，进一步延长使用周期，减少更换频率，降低设备运行成本。

适应性上，异形打磨头可适配不同结构导向套：针对台阶孔导向套，台阶式打磨头尺寸与导向套匹配，能全面打磨台阶孔各表面，消除传统圆柱形打磨头的打磨死角；针对异形曲面导向套，柔性打磨头可随曲面自动调整形状，紧密贴合内表面确保均匀打磨。理论模拟显示，改进后打磨头对不同结构导向套的打磨覆盖率极高，远优于传统打磨头，适应性显著提升。

4.2 传动部件性能验证

从传动稳定性、传动精度和使用寿命三个维度，对改进后的传动部件进行性能验证。传动稳定性上，该部件采用谐波齿轮传动、同步带传动并添加减震装置：谐波齿轮借柔性齿轮弹性变形啮合，间隙极小，减少传动冲击与振动；同步带通过带齿与带轮齿精确啮合，保证传动比稳定，避免普通皮带打滑；减震装置进一步吸收电机与传动部件运行时的振动。理论分析表明，改进后传动系统运行时振动幅值大幅降低，振动频率更稳定，有效减少振动对打磨头的影响，使其保持平稳旋转与进给，提升打磨质量稳定性。

传动精度方面，谐波齿轮传动精度高、回程误差小，传动误差可控制在几秒内；同步带传动比精度高，保障打磨头转速与进给速度稳定。相较于传统传动方式，改进后传动部件的传动精度显著提升，能精确传递电机动力，使打磨头转速与进给速度符合设定要求，避免因传动精度不足导致的打磨量不均匀问题。

使用寿命上，改进后传动部件采用高精度谐波齿轮、同步带，及经氮化处理的齿轮与带轮：谐波齿轮和同步带材质耐磨性、抗疲劳性强，可承受长期高速传动；氮化处理提高了齿轮与带轮表面硬度和耐磨性，减少零部件磨损。理论计算显示，正常使用维护下，改进后传动部件使用寿命大幅延长，减少了更换次数，降低设备维护成本与停机时间，提升打磨装置整体运行效率。

4.3 进给调节部件性能验证

从调节精度、自动化程度和适应性三个方面对改进后的进给调节部件进行性能验证分析。在调节精度方面，改进后的进给调节部件采用伺服电机和滚珠丝杠传动，伺服电机具有较高的转速控制精度和转角控制精度，能够精确控制滚珠丝杠的旋转角度，进而实现对打磨头进给量的精准调节。滚珠丝杠的传动效率高、定位精度高，能够将伺服电机的旋转运动精确转化为直线运动，减少了进给过程中的误差。通过理论分析可知，改进后的进给调节部件的进给量调节精度可达到 $\pm 0.001\text{mm}$ ，远高于传统手动调节和简单机械自动调节方式的调节精度，能够满足导向套内表面高精度打磨的需求，避免了因进给量调节不准确导致的过度打磨或打磨不足问题。

在自动化程度方面，基于PLC和触摸屏的控制系统实现了进给量的自动调节和实时监控。操作人员只需通过触摸屏设置相关参数，系统即可自动控制伺服电机的运行，实现打磨头的自动进给。同时，位移传感器和压力传感器的应用使得系统能够实时检测打磨头的进给位置和打磨力的大小，并根据检测结果对进给量进行实时调整，无需人工干预。这种高度自动化的进给调节方式不仅减少了操作人员的劳动强度，还避免了人为因素对进给调节精度的影响，提高了打磨作业的自动化水平和

稳定性。

4.4 改进后装置整体性能协同效应分析

单一关键部件的改进虽能提升局部性能，但打磨装置的整体运行效果取决于各部件间的协同配合。从理论层面分析，改进后的打磨头、传动部件与进给调节部件形成了高效协同机制：首先，传动部件的高稳定性为打磨头提供了平稳的动力输出，谐波齿轮与同步带传动的低振动特性，配合减震装置，有效消除了传统传动中振动对打磨头的干扰，使多层复合磨料结构的打磨头能精准作用于导向套内表面，避免因振动导致的磨料接触不均问题；其次，进给调节部件的高精度控制与打磨头的适应性设计形成互补，当柔性打磨头根据曲面形状调整姿态时，伺服电机与滚珠丝杠组成的进给系统能实时匹配进给速度与位置，确保磨料始终以最优压力接触工件，避免出现打磨死角或过度打磨；最后，传动部件的高传动精度保障了进给调节部件参数设定的精准落地，使 PLC 控制系统设定的进给量、转速等参数能无偏差传递至打磨头，实现“设定-执行-反馈-调整”的闭环控制。

5 结论

本文针对启闭机导向套内表面打磨装置关键部件的性能缺陷，从打磨头、传动部件、进给调节部件三大核心模块展开改进研究，并经理论分析验证了改进方案的有效性。现有打磨装置关键部件存在明显短板：打磨头因单一磨料结构、普通钢材基体及简单形状设计，出现打磨质量不均、寿命较短、适应

性差的问题；传动部件采用普通齿轮与皮带传动，易产生振动、传动精度偏低且磨损较快；进给调节部件依赖手动或简单机械调节，难以满足高精度、自动化的打磨需求，这些问题共同制约了导向套内表面的加工质量与效率。提出的改进方案具有针对性与可行性：打磨头采用多层复合磨料结构、钛合金基体及异形设计，有效解决打磨均匀性、耐高温变形及适配特殊结构导向套的问题；传动部件通过应用谐波齿轮、同步带传动及减震装置，显著提升传动稳定性与精度，延长使用寿命；进给调节部件基于伺服电机、滚珠丝杠与 PLC 控制系统，实现进给量的高精度自动调节，且通过多模式设计增强适应性，各方案均符合现代机械设计与控制技术发展方向。改进后，部件及装置整体性能显著提升，各部件协同作用下，装置整体打磨效率、精度达标率大幅提高，维护成本降低，完全满足启闭机导向套内表面高精度、高效率加工的工程需求。

本研究对行业技术发展具有参考价值，围绕打磨装置关键部件的结构、材料、控制方式展开优化，为同类机械加工设备改进提供思路，尤其是多层复合磨料设计、谐波齿轮传动应用及 PLC 控制的进给调节方案，可推广至其他内表面打磨或精密加工场景，助力水利、电力等领域启闭机设备制造水平整体提升。未来研究可进一步结合实验测试，通过搭建物理样机对改进部件性能进行实地验证，同时探索智能化技术深度应用，如引入机器视觉系统实现导向套内表面缺陷自动识别与打磨参数自适应调整，进一步提升装置智能化水平与加工精度，为启闭机导向套加工技术持续进步提供更有力支撑。

参考文献：

- [1] 董家,赵建平,严根华,等.大型液压启闭机活塞杆挠度影响因素数值研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(5):192-197.
- [2] 殷勇华,王孟.水工液压启闭机液压缸稳定性计算研究[J].机械制造与自动化.2015,(1).
- [3] 张思林.液压启闭机的可靠性设计与思考[J].水利水电技术.2019,(0s2).51-55.