

螺杆式闸门启闭机安装精度控制技术分析

马彤彤 王春雨

水利部长春机械研究所 吉林 长春 130012

摘要: 本文分析螺杆式闸门安装精度控制技术,保障螺杆式闸门启闭机在水利工程中稳定可靠运行。研究内容包括启闭机的定义、分类、工作原理及工程应用,明确安装精度受环境状况、部件制造精度、安装工艺、测量校准准确性等因素综合影响。通过分析各因素的具体影响,提出优化设计、精确制造、把控安装过程等措施。结论表明,这些措施可有效提高安装精度,为水利工程安全稳定运行提供保障。

关键词: 螺杆式闸门启闭机;安装精度;制造误差;控制技术

引言

安装精度控制对螺杆式闸门启闭机的运行效能以及整个工程的安全有着直接的影响。螺杆式闸门启闭机通过螺杆传动实现闸门启闭,其机械结构对安装同轴度、垂直度及间隙配合等参数极为敏感,微小偏差即可引发振动、卡滞甚至结构失效^[1]。在水利工程中,因安装精度不足导致的启闭机故障占比达30%以上,成为制约工程可靠性的重要因素^[2]。目前,多数研究主要集中于启闭机结构优化以及故障诊断方面,对于安装全流程精度控制的技术体系,尚未开展系统性的分析工作^[3]。因此,搭建多参数协同调控的安装精度控制技术框架,对于提高水利工程设备的安装质量,有着不容忽视的理论价值与切实可行的实践意义。

1 螺杆式闸门启闭机概述

1.1 螺杆式闸门启闭机的定义与分类

螺杆式闸门启闭机依靠螺杆传动机制来完成闸门的开启与闭合动作。根据结构特征和应用场景的不同,启闭机能够划分为手动驱动型、电动驱动型以及液压驱动型三类。手动驱动型启闭机依靠人力来旋转螺杆,完成闸门的开、关动作,适合应用在小型水利工程或者处理紧急情况;电动驱动型启闭机借助电动机的力量驱动螺杆旋转,在中型水利工程里得到广泛应用;液压驱动型启闭机通过液压系统来传递动力,具备输出扭矩大、运行平稳的特点,用于大型水利工程或者高负荷的场景^[4]。在选择不同类型启闭机时,要结合工程规模大小、运行频率高低以及维护成本多少等因素,保证设备性能和工程需求相契合。

1.2 螺杆式闸门启闭机的工作原理

螺杆式闸门启闭机,它的核心传动方式乃是螺杆与螺母构成的副机构,工作原理是依托于螺旋传动理论。驱动装置运转起来,带动螺杆开始旋转,此时与螺杆相

配合的螺母,会把旋转运动转变为直线运动,再借助连接件把力传到闸门上,进而实现闸门的启闭。这种传动方式展现出机械结构简单明了、传动比平稳可靠以及自锁性能极为优良等特性,可以很好地防止闸门在非操作时段因水压起伏而出现意外移动,进而确保工程安全。螺杆在传动过程中,力的传递效率会受到螺杆导程、螺母齿形以及摩擦系数等因素的影响。以梯形螺纹构建的螺杆-螺母副机构在传动时展现出较高的效率,但是需要润滑装置来减少摩擦带来的损耗;矩形螺纹传动效率稍低,自锁性能十分出色,适合应用在对闸门定位精度有较高要求的地方。

1.3 螺杆式闸门启闭机的重要性

在水利工程体系里螺杆式闸门启闭机运行是否稳定,对工程整体的安全性产生重大影响。以防洪工程为例,螺杆式闸门启闭机在很短的时间内把闸门开启或者关闭,应对突然到来的洪水;若是安装精度不够,闸门密封出现问题可能会引发渗漏情况,甚至有溃坝的危险。螺杆与螺母的间隙留得过大,会加速磨损进程,使设备的使用寿命缩短;基础螺栓的预紧力不够可能致使启闭机振动超出标准范围,引发传动部件出现松动故障。此外,在水电站工程领域中,启闭机要和水轮机进水口闸门相互配合、共同作业,安装精度会对水轮机组的运行效率产生直接作用。

2 螺杆式闸门启闭机安装精度控制的关键因素

2.1 安装环境对精度的影响

温度、湿度以及地面平整度等环境因素是影响螺杆式闸门启闭机安装精度的外部因素。温度出现变化时,金属材料会发生热胀冷缩的情况,对部件间的间隙配合以及对齐精度产生影响。当处于高温环境时,螺杆和螺母因膨胀系数不同,二者间的配合间隙或会变大,对启闭机的传动效率以及稳定性造成影响。湿度出现变化

时,金属部件会发生腐蚀,润滑剂的性能会出现改变,对安装精度产生间接影响。地面平整度不够,会致使启闭机基础安装出现偏差,对整体结构的稳定性以及运行精度产生影响。为此,安装工作开展前,必须精准测量环境参数采取适宜的温控、防潮以及地面处理举措,将环境因素给安装精度带来的不利影响彻底消除。

2.2 启闭机部件的制造精度

螺杆、螺母以及轴承等部件在加工时产生的误差,会经由累积效应逐步传递至整体结构对启闭机的性能表现与运行稳定性造成影响。以螺杆为例,螺杆的直线度出现误差,会让螺母在运动时产生侧向力,摩擦阻力增大传动效率降低;螺母的螺纹精度不够,会造成螺杆和螺母配合间隙不均匀,对启闭机的同步性和精度产生影响。因此,制造部件时须要严格把控加工误差,选用高精度加工设备与工艺,保证各部件尺寸、形状及位置精度都契合设计标准。在大型的水利工程里,启闭机常开展批量安装以及更换工作,倘若部件不具备互换性,在安装过程中就可能出现配合不顺畅、间隙超出正常范围等问题,对安装精度和启闭机运行的稳定性造成不良影响。为提升部件互换性,制造过程中要实施严格质量控制流程,对尺寸分组管理并做好标识,保证同一批次部件能相互替换。此外,还需进行部件的互换性测试,验证其在实际安装中的适用性与精度保持能力^[5]。

2.3 安装工艺的精确性

定位、调整、紧固等安装步骤,严格依照设计要求与操作规程执行,保证各部件的位置、角度以及间隙等参数都精准符合设计标准。定位时要借助激光定位仪这类高精度测量工具,让螺杆轴线与闸门运动轨迹精准对齐;调整环节利用微调装置对部件位置调整将安装偏差消除掉;紧固操作采用扭矩扳手等专用工具把控好紧固力度,防止部件因过紧或过松而变形或松动。安装工艺实现标准化与规范化,是提升安装精度的一项重要举措。制定详细的安装操作规程以及严格的质量控制标准,明确各个安装步骤的技术要求与验收标准,能让安装过程更加规范且保持一致。此外,对安装人员开展专业培训并进行技能考核,以此提升他们的操作水平,强化质量意识,保证安装工艺能精准执行。安装环节要开展实时监控工作,详细记录各项数据,以便发现并纠正安装过程中出现的偏差,持续保障安装精度。

2.4 安装过程中的测量与校准

测量与校准工作是保障螺杆式闸门启闭机安装精度的重要环节。测量工具的挑选及正确使用和测量结果是否准确有着直接关系。水平仪、千分尺等高精度测量

工具检测部件的水平程度、垂直程度以及尺寸的精准度等;激光跟踪仪可以用于完成部件三维坐标的测量以及空间位置的校准。挑选测量工具严格按照操作规程开展测量工作,能确保安装过程中各个部件的参数被精准获取。安装时根据测量所得结果,对部件的位置、角度以及间隙等各类参数开展调整与校准工作,保证符合设计要求。校准方法包括机械校准、光学校准以及电子校准等多种不同的方式,可以根据具体的安装场景和测量需求来灵活选择。以激光校准仪发射出的激光束作为基准线,在螺杆轴线校准环节,调整螺杆位置让轴线与激光束重合达到轴线精确校准。此外,定期对测量工具开展校准与维护工作,保证测量精度和稳定性能够满足安装的具体要求。

3 提高螺杆式闸门启闭机安装精度的措施

3.1 优化设计

对螺杆式闸门启闭机而言,结构优化设计是提升其安装精度的关键首要环节。模块化设计理念的应用可显著简化安装流程,通过将启闭机分解为若干独立模块,每个模块具备标准化接口与互换性特征,可降低现场组装难度并减少装配误差累积。以模块化设计理念打造的螺杆组件,能提前做好轴向间隙校准工作,在安装现场只需进行模块对接以及螺栓紧固操作,就可有效防止传统整体式结构因现场加工而产生的形位偏差问题。在材料的选择上,优先考虑高强度合金钢以及低热膨胀系数的复合材料,这样能有效降低因温度变化而引发的结构变形风险。据工程实践数据,在温差超过20℃的情况下,普通碳钢螺杆的轴向伸长量可达0.15mm/m,采用Invar合金(热膨胀系数 $1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)可将变形量控制在0.0024mm/m以内提升传动精度。此外,借助有限元分析对结构刚度分布进行优化,能够防止局部应力集中引发永久变形,进而为安装精度奠定坚实基础。选用基孔制配合原则,针对螺杆和螺母间的配合间隙实施分级管控,启闭级的配合间隙需精准控制在0.02-0.05mm这个区间,确保传动效率防止卡滞情况出现。轴承座和机架相配合的连接部位需要设计定位销孔,明确标注出形位公差要求,保证多次拆装后定位的精准。借助现代设计软件实现三维装配模拟,利用干涉检查和运动仿真技术提前发现设计中的缺陷,降低现场返工的可能性。

3.2 精确制造

部件制造精度对启闭机的装配质量起着决定性作用。螺杆是启闭机里的核心传动部件,加工精度要求高,必须达到IT5级以上标准,表面粗糙度Ra值要小于等于 $0.8\mu\text{m}$,直线度误差控制在0.01mm/m的范围内。运

用数控滚轧成型工艺，能够取代传统的车削加工方式，借助多道次冷轧让金属流线保持连续分布的状态，在使表面硬度得以提升的同时，把螺距累积误差精准控制在 $\pm 0.03\text{mm}$ 的范围之内。螺母在制造过程中运用精密磨削工艺，针对内螺纹展开多线螺旋修正操作，保证其与螺杆的啮合接触率能超过75%，进而降低传动时产生的振动与噪声。制造商建立部件尺寸链数据库，针对螺杆、螺母、轴承等部件开展分组选配工作，保证装配后的传动间隙能够符合设计要求。以某跨流域调水工程为例，制造商针对300套螺杆组件开展分组管理工作，将螺杆直径划分成精度为 $\pm 0.01\text{mm}$ 的三个组别，螺母内径也相应分成三个匹配组，经组合装配后，每台启闭机的传动间隙偏差能控制在 $\pm 0.02\text{mm}$ 范围内。此外，运用激光跟踪仪针对大型结构件开展三维尺寸测量工作，能够达成 0.005mm 级别的高精度形位检测，为装配环节提供极为精确的数据保障。热处理工艺在部件制造过程中起着保持部件精度的作用。螺杆完成调质处理后接受深冷处理，温度设定在 -196°C ，有效消除残余奥氏体，组织结构更加稳定。运用真空淬火工艺能有效防止氧化脱碳情况发生，确保高精度轴承座配合面尺寸的稳定。

3.3 安装过程控制

安装操作规程实现标准化能有效控制安装精度。制定包含不少于20项控制点的作业指导书，明确每道工序所允许的偏差范围以及相应的检验方法。螺杆垂直度方面的安装标准为 $\leq 0.5\text{mm/m}$ ，测量时使用两台经纬仪，在两个相互垂直的方向上进行交叉测量；螺母与螺杆的啮合深度使用专用量规进行检测，确保其达到设计要求80%及以上的标准。现场质量监控落实“三检制”要求，操作人员开展自检、班组长组织互检、质检员实施专检，对关键尺寸实施全面检验，检验率需达100%，并做好数据记录。安装工具的精准程度，会对装配质量产生直接的影响。激光定位仪投点精度必须精准至 $\pm 0.05\text{mm}$ ，这一精度标准用于精确确定螺杆的轴线位置；而扭矩扳手的精度

等级，则需严格符合GB/T15729-2008标准，对于M24规格以上的螺栓，应采用数显式扭矩扳手进行紧固操作，以确保连接力矩能够精确控制在设计要求的 $\pm 5\%$ 范围之内。针对大型启闭机，需为其配备液压同步提升系统，借助压力传感器和位移传感器达成多吊点同步精准控制，把水平偏差严格把控在 2mm 的范围之内。使用三坐标测量机在部件出厂前展开检测，生成包含30多项形位公差数据的检验报告。现场所有安装工作完成后开展空载与负载试验，检测螺杆的轴向窜动量以及传动效率等各项性能指标。

结论

螺杆式闸门启闭机安装精度的精准控制依靠机械传动理论、误差累积模型及多参数协同优化策略，通过优化设计、精确制造、安装过程控制等系统性措施，提升设备运行稳定性与可靠性。采用模块化设计减少装配误差，选用特定材料降低温湿度对结构形变的影响，借助精密加工与测试保障关键部件精度，应用专业工具实现安装动态校准与误差补偿。严格执行规程并加强现场监控，可避免设备故障。未来数字化与智能化技术的融合，将推动安装精度控制向实时化、自适应化发展，为水利工程安全运行筑牢保障。

参考文献

- [1]葛亚辉.涵闸施工闸门安装启闭机施工技术分析[J].科学技术创新, 2025,11:128-131.
- [2]夏绍见.波形钢腹板PC箱梁桥悬臂施工波腹板安装精度控制技术分析[J].工程建设与设计, 2020,20:80-81.
- [3]唐寅兵.异型钢结构制作及安装精度控制技术分析[J].中国金属通报, 2020,17:121-122.
- [4]张禄.大跨度弧形闸门安装精度控制技术[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2017,A01:219-222.
- [5]徐晖,孙立宏.螺杆式双吊点启闭机安装技术[J].水利建设与管理, 2009,9:60-61.