

水利水电水轮机安装关键工艺与质量控制要点

李俊阳

河南轩尚人力资源服务有限公司 河南 郑州 200030

【摘要】：水轮机作为水力发电站的核心动力设备，其安装质量直接决定机组运行的稳定性、安全性与经济性。本文以现行国家标准 GB/T 8564—2023《水轮发电机组安装技术规范》为技术基准，系统梳理了水轮机安装的关键工艺环节，包括埋入部件安装、导水机构组装、转轮与主轴吊装、高强度螺栓联接等核心工序，并结合工程实践分析了各环节的质量控制要点与技术措施。研究表明，水轮机安装的核心控制维度集中于轴线同心度与垂直度、部件配合间隙、高强度螺栓预紧力以及焊接质量四个方面。本文同时介绍了垂直度智能控制、数值仿真预补偿、实时间隙监测等近年来的技术进展及其在实际工程中的应用成效，旨在为水电站机电安装工程提供系统的技术参考，助力提升水轮机安装整体质量水平。

【关键词】：水轮机安装；关键工艺；质量控制；轴线精度；高强螺栓联接；预补偿技术

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.058

1 引言

水力发电作为清洁能源的重要组成部分，在全球能源结构中占据着不可替代的地位。水轮发电机组是水电站的核心设备，其中水轮机承担着将水能转化为机械能的关键功能，其运行质量直接影响电站的发电效率与供电可靠。水轮机安装属于大型精密机电设备的现场装配工程，具有构件尺寸大、配合精度高、工序衔接紧密、施工环境复杂等特点，任何环节的安装偏差都可能引发机组振动、摆度超标、部件磨损加速乃至设备损坏等严重后果。

近年来，随着我国水电建设的持续推进，水轮机的单机容量和结构尺寸不断增大，对安装工艺提出了更高的要求。三峡工程单机容量达 700 MW，转轮叶片重达 400 吨，转轮与固定部件的安装间隙仅为 4 毫米，主轴重达上百吨，加工与安装精度要求极为严苛。在此背景下，系统研究水轮机安装的关键工艺并建立完善的质量控制体系，具有重要的工程实践意义。

现行《水轮发电机组安装技术规范》（GB/T 8564—2023）于 2023 年 11 月 27 日发布并实施，该标准替代了 2003 年版，适用于混流式、轴流式、水斗式、灯泡贯流式水轮发电机组以及混流可逆式抽水蓄能机组的安装及验收。标准系统规定了水轮机各部件安装调试、电气试验及启动试运行的技术要求。水利行业方面，《水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准——水轮发电机组安装工程》（SL 637—2012）也为单元工程的质量验收提供了细化依据。上述标准体系构成了水轮机安装质量控制的法规与技术基础。

本文将从埋入部件安装、导水机构组装、转轮与主轴安装、高强螺栓联接以及焊接等关键工艺入手，结合近年来的技术发展，系统阐述水轮机安装的核心质量控制要点。

2 水轮机安装前的施工准备工作

2.1 施工组织设计与技术交底

水轮机安装工序复杂、专业交叉密集，安装前必须编制详细的施工组织设计，明确各阶段安装顺序、施工方法、资源配置及进度计划。施工组织设计应覆盖从预埋件埋设到机组试运行的全过程。同时，应进行全面的技术交底，使全体施工人员充分理解安装工艺要求、质量标准及安全注意事项。安装过程中应严格执行相关规程规范，确保安装质量。

2.2 基础检查与预埋件验收

水轮机安装前，必须对混凝土基础进行全面检查，确认基础强度满足设计要求。预埋基础板的位置、高程与中心线均需复测，以确保管型座安装位置正确。机组的安装基础、沟道、孔洞、地脚螺栓孔及电缆管的质量、尺寸和位置均应严格对照设计要求进行审核验收。对于管型座等关键预埋件，需严格控制其高程、桩号位置和中心误差，确保法兰面垂直度及管型座高程和中心的准确性。

3 关键安装工艺与质量控制

3.1 埋入部件安装

埋入部件是水轮机安装的基准，其精度直接影响后续各部件的位置尺寸。立式反击式水轮机的埋入部件主要包括尾水管里衬、转轮室、基础环、座环及蜗壳等。座环作为承受水轮机全部重量的基础构件，其安装的水平度与高程偏差必须严格控制在设计允许范围之内。依据现行验收标准，座环安装的检验项目包括高程、中心位置、水平度及法兰面垂直度等。

蜗壳安装的质量控制重点在于焊缝质量与形位公差。金属蜗壳安装后必须进行焊缝外观检查和必要的无损探伤，确保蜗

壳的密闭性与结构强度。对于混凝土蜗壳的钢衬部分,同样需要进行焊缝检验。安装过程中,还需严格控制蜗壳与座环的连接精度,防止因连接偏差导致运行时产生异常应力。

3.2 导水机构安装与调整

导水机构由底环、顶盖、活动导叶及其控制机构组成,其安装质量直接关系到水轮机流量调节的精度与关闭的严密性。在主轴和转轮装入之前,底环、顶盖、活动导叶等需先在座环上进行预装,以调整顶盖、底环及止漏环的同心度和导叶活动的灵活性,并调整研磨导叶端面间隙和立面间隙,使其关闭时严密、漏水量小。

对于大型混流式或轴流式水轮机,由于转轮室空间较大,安装人员可在转轮室内直接进行导叶立面间隙调整和研磨工作,导水机构可不进行整体预装,而是在转轮吊入后用实物找正法进行调整定位安装。导叶的端面间隙和立面间隙是质量控制的关键指标,需按规范的要求认真调整。预装调整完毕后,应将顶盖、底环用销钉定位,然后拆出预装部件,待主轴、转轮吊入找正后按定位销钉进行正式安装。

导叶下轴颈装在其下面的底环内,上轴颈装在顶盖内,顶盖被安装在座环的上环上,它将转轮盖住。在顶盖和导水部件控制机构的控制环之间,装有支持环,用来支持控制环。活动导叶的安装应确保各导叶开度一致,控制机构动作灵活可靠。

3.3 转轮与主轴安装

3.3.1 转轮组装

转轮是水轮机直接进行能量转换的核心部件。对于大型混流式水轮机,转轮通常采用分瓣制造方式运至现场组装,涉及焊接、热处理、加工及静平衡试验等多道工序。拉西瓦水电站700 MW水轮机转轮即采用现场加工制造方案,经过进货检验、现场装配、整体加温预热、焊接、焊后消应、转轮加工及静平衡试验等全流程工艺控制,各项指标均达到优良等级。

对于轴流式水轮机,转轮体上的叶片可随工况变化而转动以调节出力。安装时需将叶片安装在叶片转臂上,把主轴安装在转轮体上,然后整体将转轮从机坑吊入转轮室,通过临时支撑件固定于准确位置。轴流式水轮机安装还包括导叶、座环、蜗壳等部件的安装,需确保各部件位置准确。

3.3.2 主轴安装与轴线调整

水轮机主轴是连接转轮与发电机的关键传力构件,由上法兰、轴身和下法兰三部分组成,其毛坯通常采用整锻或分段锻造方式制造。主轴通过它将水轮机转轮的机械能传递给发电机,同时承受转轮的轴向水压力及转动部件的重力。主轴的安装精度直接决定机组的轴线质量。

机组轴线的调整是安装过程中最为关键的环节之一。水轮发电机组在各种工况运行时,主轴会产生径向摆动,即摆度。摆度问题的根源在于机组中心、旋转中心和主轴中心线难以完全重合。安装过程中需通过盘车试验测量各部位的摆度数据,其变化规律遵循余弦或正弦定理。依据测量结果对轴承间隙和轴线进行精确调整,确保各部件间的同心度与垂直度符合GB/T 8564—2023的要求。

卧式水轮机安装时,需重点调整蜗壳与转轮的垂直度,确保轴线同心。安装过程中需重点控制轴瓦间隙和轴线同心度,防止运行中产生剪切应力。

3.4 高强度螺栓联接工艺

高强度螺栓具有高强度、高韧性、耐腐蚀、易加工等优点,在水轮机安装中应用广泛。水轮机各主要部件之间的联接,如座环与基础环、顶盖与座环、转轮与主轴的法兰联接等,均大量使用高强度螺栓。高强度螺栓预紧通常采用液压拉伸器,需按设计值进行拉伸,确保螺栓预紧力符合要求。

螺栓安装中容易出现螺纹咬死、异常声响等问题,需通过清理螺纹、合理加热、加强质量控制等措施加以解决。提高螺栓材料强度、优化受力结构、提高加工精度是确保联接质量的关键。在螺栓联接施工中,必须严格控制拉伸顺序和拉伸力,防止因预紧力不均匀导致法兰面变形或联接松动。

3.5 焊接工艺控制

水轮机焊接主要涉及蜗壳、转轮、尾水管里衬等钢结构的现场拼装与焊接。焊接质量直接影响水轮机的密封性、结构强度和运行安全性。金属蜗壳安装焊接应遵循《水轮机金属蜗壳安装焊接工艺导则》(DL/T 5070—1997)的技术要求。《水轮机现场焊接修复导则》(DL/T 2573—2022)对现场焊接修复的技术要求与操作流程进行了规范。

焊接质量控制要点包括:焊接材料的选型与复验、坡口加工与清理、焊前预热与焊后热处理、焊接参数监控以及焊缝的无损探伤检测。蜗壳安装焊缝应进行外观检查和必要的超声波探伤或射线探伤。对于分瓣转轮的现场组装焊接,应遵循《混流式水轮机分瓣转轮组装焊接工艺导则》(DL/T 5071—1997)的技术要求。

3.6 水轮发电机定子与转子安装

水轮发电机定子和转子的安装是水轮机安装工程的重要组成部分。发电机定子线圈嵌入定子槽内,构成绝缘导体,需进行直流电阻测试(偏差不大于2%)、绝缘电阻测试(吸收比 $R_{60}/R_{15} \geq 2$)等检测,以评估绝缘性能。

转子安装的核心难点在于定转子空气间隙的均匀性控制。

如果空气间隙不均匀,转子的轴线与定子的中心线不重合,会导致发电机转子在定子中偏心运行,产生径向磁拉力作用于转子全长,引起电磁振动;且空气间隙不均匀还会引起轴电流,导致定子线圈局部过热,影响使用寿命。安装过程中需使用专用工具精确调整空气间隙,确保其均匀性达标。近年来,华能水电获授权的“一种水轮发电机转子吊装的间隙监测方法”发明专利,通过在转子下降过程中实时采集定子与转子之间的最小距离并自动调整中心位置,有效保障了吊装安全与安装精度。

3.7 附属设备与系统安装

水轮发电机组的附属设备包括调速系统、主阀、励磁系统、静止变频启动装置(SFC)及辅助设备等。这些设备的安装调试应同步推进,施工单位需按施工进度合理安排附属设备的安装作业,注意密封和联接部位的处理。安装完成后需进行耐压试验等检验环节,确保各系统功能正常。

4 安装精度控制与质量检验

4.1 轴线与同心度控制

轴线控制是水轮机安装质量控制的核心内容。水轮发电机组在运行中,由于水力的不均匀性、机械制造误差以及安装误差的累积,机组“三线”——机组中心线、旋转中心线和主轴中心线——难以完全重合,由此导致轴线的摆动,影响机组运行的安全性和稳定性。安装过程必须通过盘车试验测量机组轴线的摆度数据,并对轴承间隙进行精确调整。

近年来,电建水电开发公司在垂直度智能控制技术方面取得了突破性进展,通过数值仿真技术模拟顶盖在外力作用下的变形趋势,提出“预补偿抵消”调整方法,在安装阶段即对顶盖与底环的配合面进行预先修正加工,使水轮机筒形阀接力器

垂直度一次调整到位。实施后,机组安装精度显著提升,垂直度精度提高50%。该方法的创新点在于:一是通过仿真真实还原运行工况,提升调整精度与合格率;二是依托仿真数据提前处理安装面,以抵消运行中的水力变形,杜绝卡阻问题。

4.2 配合间隙与密封质量控制

配合间隙的控制包括导叶端面间隙与立面间隙、轴瓦间隙、止漏环间隙、定转子空气间隙及主轴密封间隙等多个方面。安装过程中需按规范要求精确测量与调整各部位间隙值。推力轴瓦、导轴承轴瓦需进行研刮,确保接触面满足设计要求。主轴密封环与主轴之间的间隙需控制在合格范围内,防止运行中漏水超标。

对于发电机定转子空气间隙,优良标准要求按设计值的 $\pm 8\%$ 范围内控制。在实际工程中,可通过专用间隙调整工具保证间隙均匀性,消除电磁振动与局部过热隐患。

4.3 振动与摆度监测

水轮发电机组在试运行及初期运行阶段,必须对其振动和摆度进行全面测试和评价。《水轮发电机组振动摆度装置技术条件》(DL/T 1804-2018)规定了振动摆度装置的精度、稳定性、可靠性及安装调试要求。

振动与摆度测试的内容涵盖主轴弯曲度、轴承间隙、质量不平衡度及磁拉力不平衡度等。通过设置合理布点的振动传感器和摆度测量装置,收集运行工况下的振动信号,分析振动特性和规律,判断机组运行状态是否达标。监控系统还应具备检测压力脉动和机械不平衡的功能,为故障预警和维修决策提供依据。根据要求,振动摆度测点应依据部标 DL/T 556 系列标准进行合理布设。

参考文献:

- [1] 李彦斌.水轮机安装质量控制重点分析[J].农业与技术,2017,37(13):51-52.
- [2] 吴俊.水轮发电机组的安装质量控制措施核心要点构架分析[J].中国设备工程,2023,(24):227-229.
- [3] 周锐锋.混流式水轮机转轮更换安装施工技术[J].安装,2024,(S2):44-46.
- [4] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.水轮发电机组安装技术规范:GB/T 8564—2023[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [5] 国家能源局.水轮机现场焊接修复导则:DL/T 2573—2022[S].北京:中国电力出版社,2022.