

水力部件翻转台设计研究

侯立巍，顾为柏，杜阳阳，周铁铮，童俊力，赵佳禹

(中核核电运行管理有限公司，浙江 嘉兴 314000)

摘要 为提升水力部件的抗磨损、抗腐蚀能力，保障水力系统设备运行稳定，本文针对水力部件翻转台设计方案开展研究，提出了水力部件翻转台的设计方法，同时基于水力部件翻转平台的功能要求，重点研究了支座的稳定性设计、支座的受力分析及抱箍与抱箍轴的强度校核要点，以期为水力部件翻转台的实际设计与应用提供参考，进一步提升水力系统辅助设施的运行稳定性。

关键词 水力部件；翻转台；支座；抱箍；安全支架

中图分类号：TM62

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.036

0 引言

随着水力机械向大型化、高效率方向发展，部件尺寸与重量持续增加，这意味着对于翻转设备的稳定性、准确性以及自动化程度都有了更高要求。水力部件翻转台作为适配此类需求的专用设备，可通过机械结构和控制系统实现部件翻转、定位、姿态保持等功能，能在一定范围内解决传统翻转方式的弊端。因此，开展水力部件翻转台的设计研究，优化其承载能力、翻转角度控制精度与操作安全性，能提高水力机械生产效率，提高产品质量，降低作业风险。

1 水力部件翻转台设计概述

本设计专为泰山核电站主泵水力部件维修翻转场景开发，是适配该核电站主泵水力部件维修作业的专用设备。

核电站反应堆主冷却剂循环泵（简称核主泵），被誉为反应堆冷却系统的“心脏”，其核心功能是克服主冷却剂的流动阻力，保障循环流量稳定。核主泵作为核电站主回路中唯一的能动旋转设备，其稳定运行直接关系到整个核电站的安全运营。而水力部件即主泵转子组件，是核主泵的核心构成部分，在电厂大修期间，常需对其进行解体检修。拆出水力部件以后会带有一定的放射性污染，所以其维修工作要比一般的维修工作更难。在解体过程中，需要先将整个水力部件竖直放置，并拆卸掉一部分，然后将其翻转180°进行拆卸，此类翻转操作需反复进行多次。此外，随着零件的逐步拆除，水力部件的重心会随之发生动态变化，也就意味着翻转的转矩、翻转的功率都会随之发生变化，这就对翻转设备提出了更高的要求^[1]。

2 水力部件翻转台设计要点

2.1 翻转台参数

基于泰山核电站主泵水力部件重量大、体积大的特点^[2]。在翻转台上进行了围绕“结构稳定、适配性强”设计目标展开的相关参数设定及试验验证，翻转台设计图如图1所示。在主体结构的设计上，先用高强度构件制作出笼架并考虑进行水力部件的重量和体积比的基础上再做力学分析，通过分析计算出各种不同重量的部件翻转时所受的力，并且保证在该过程中整个框架可完全承载各个翻转部件的总重，不出现因为受力不均造成的结构变形等问题。此外，为降低操作风险，在翻转执行阶段需额外设置缓冲装置，通过缓冲装置吸收翻转过程中的冲击力，防止对翻转台本体或水力部件造成损伤。具体翻转台参数如表1所示。

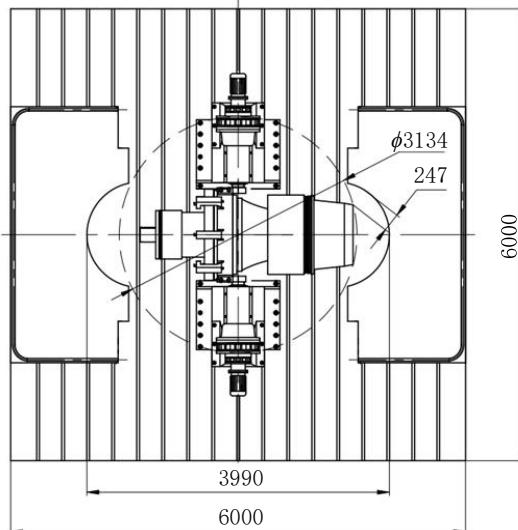


图1 翻转台设计图

表 1 翻转台参数

项目	数值 / 描述
主体尺寸 (长 × 宽 × 高)	6 000×6 000×2 800
操作台尺寸 (长 × 宽 × 高)	3 400×3 410×1 782
总重	11 274 kg
滑轨长度	6 m×2
翻转角度	0 ~ 180 度
最大翻转扭矩	12 000 N·m
制动扭矩	20 000 N·m
翻转速度	0.28 rpm
功率	2.2 kW×2 (备用 1 台)

2.2 支座的稳定性设计

支座的稳定性是保障水力部件翻转过程安全、部件完好的关键，支座稳定性设计过程中，需从结构材料选型与功能机制两方面重点突破，确保满足核主泵水力部件维修的严格要求。

一方面，需精准匹配支座的结构形式与制作材料。由于水力机械部件自重较大，在翻转的过程中会产生一些复杂力矩，所以选用高质量的钢或者合金为支座材料，并依靠材料本身力学性能来抵挡翻转过程中的巨大荷载，如此避免支座发生变形或者断裂。同时，针对部件的重量分布及受力的特点，合理设计出适合该工作的支座结构，保证传给组件上的荷载均匀，以提高承载的稳定度。另一方面，需为支座设计自适应调整与平衡机制，并配套减振缓冲功能。在支座设计中，需设置可调节支撑点，或安装液压、气动等自动调节装置，能根据维修需求灵活调整支座的角度与位置，确保翻转过程中部件始终处于平衡状态；同时，为削弱翻转时的振动冲击对支座的损害，需在支座关键部位加装减振垫或缓冲装置，通过吸收振动能量，减少冲击对支座及翻转台整体运行的影响，全面保障稳定性与安全性^[3]。

2.3 支座的受力分析

在支座受力设计过程中，支座的受力分析需依托设计文件与实际运行工况开展。分析人员首先需构建设计图纸模型，明确支座的结构参数、材料型号及承载要求等核心设计指标，为后续受力计算提供基础依据。本次分析针对 Q235 材质支座，结合其在支架系统中的

安装位置与承载功能，展开系统性受力核验。在支架运行过程中，支座承受的荷载需通过力学计算精准界定，所有外部应力均集中传递至支座的轴承座部位，该部位的受力由抱箍自身重量与所承载工件重量共同构成，经核算其总受力值为 57 513.3 N。为确保受力分析的准确性，分析人员采用有限元分析方法，搭建与实际工况一致的力学模型，对轴承座及支座整体的应力分布情况进行模拟计算。有限元分析结果显示，支座的应力分布呈现明显的集中特性，应力最高点集中于轴承座与支座主体的连接部位，该点的应力值为 23.1 MPa。为验证支座受力的安全性，分析人员调取 Q235 钢材的力学性能参数，其抗拉强度标准值为 370 ~ 500 MPa，取最小值 370 MPa 计算安全系数，即 $S=370/23.1=16$ 。分析人员对比设计规范中关于支座安全系数的要求，确认该支座 16 的安全系数远超最低限值，表明支座在 57 513.3 N 的荷载作用下，不会发生拉伸破坏或塑性变形，完全符合支架系统的受力设计要求。

2.4 抱箍及抱箍轴强度校核

2.4.1 抱箍的强度校核

因抱箍需要支撑的总体重达 57 513.3 N，故对抱箍结构以及抱箍材料要求相对较高，为检验设计合理性，通过有限元数据来模拟抱箍工作过程中不同应力的工况，最后得出抱箍能够承受的最大应力值。由上述模拟分析可得，在抱箍的设计选材上，采用 304 不锈钢最为合适，其抗拉强度达 515 MPa。而根据受力情况分析可知，抱箍的应力集中峰值得到有效控制，并且处于合理的范围之内，即 $55.6 \text{ MPa} < \text{抗拉极限强度}$ ，抱箍的工作应力小于实际运行最大值。此外，从抱箍运行的安全性角度而言，抱箍的安全系数 $S=9.3$ 大于抱箍工作安全系数临界值 7，在实际生产过程中抱箍是有足够的安全余量的，有效避免过载导致的结构损坏，在抵抗疲劳效应方面也具有较高的实用价值^[4]。

2.4.2 抱箍轴的强度校核

为确保抱箍轴在实际工况下的结构可靠性，设计人员围绕抱箍轴的强度参数展开专项分析，通过强度模拟与数值计算相结合的方式，系统掌握抱箍轴投入使用后的受力条件及运行状态，具体分析结果如表 2 所示。

进一步对安全系数展开分析后可知，抱箍轴具备较高的结构强度，且安全裕量充足，能够稳定应对多种工况条件下的运行需求，从强度层面为其长期可靠工作提供了保障^[5]。

表2 抱箍螺栓的强度校核参数

序号	参数 / 项目	数值 / 描述
1	螺栓规格	M30*300 (8.8 级)
2	螺栓数量	4 颗
3	抗拉强度 (σ_b)	800 N/mm ²
4	屈服强度 (σ_s)	640 N/mm ²
5	工件最大重量 (G)	5 868.7kg
6	抱箍抱紧力设定 (F1)	$3G=17\ 606.1\ kg \approx 172.5\ kN$
7	螺栓拉力 (F2)	$F2=F1=172.5\ kN$ (注: 原文)
8	螺栓半径 (r)	13.5 mm (M30 螺栓, 半径为直径的一半)
9	螺栓拉应力 (σ_1)	$172.51\ 000/(43.14*13.5^2)=75.36\ N/mm^2$
10	安全系数 (n1)	$\sigma_s/\sigma_1=640/75.36 \approx 8.5$

2.5 抱箍螺栓的强度校核

抱箍螺栓作为水力部件翻转台抱箍结构的核心紧固构件，直接承载抱箍传递的工件重量及翻转过程中的动态荷载，其强度可靠性是避免翻转过程中部件脱落、晃动等安全事故的关键保障。本次校核以秦山核电站主泵水力部件最大重量为基础，结合翻转台运行时的受力特性，确定螺栓需承受的抱箍抱紧力及拉力载荷。校核过程中先明确螺栓规格、数量等基础参数，再通过力学公式计算螺栓拉应力，结合材料屈服强度核算安全系数，确保螺栓强度满足翻转台在重心动态变化、最大荷载等严苛工况下的使用要求。

2.6 安全支架的设计

根据本项目的相关要求以及安全支架实际工况，采用两套独立安全支架的设计方案，每套安全支架系统包含 4 件构造支架单元。在支架单元进行设计时便对其设置了微调的功能，利用系统所配装的安装调节螺栓来实现一定的高度变化，在不同工况条件当中能够更好地满足支架运转的要求，并保证支架运转之后可以达到理想的效果。在进行翻转之前，将支架台移动到对应的位置，并进行支撑，保证翻转台的受力稳定性，在这个过程中的操作步骤很重要，可预防翻转作业过程中意外事故的发生。此外，为了能够提高支架系统的安全性，在设计过程中充分考虑现场安装误差以及结构变形的不确定因素，对于每套支架设计均

采用高强度的结构进行制造，而对于关键连接位置采用加工精力的方式以及放松措施应对整体性提高其支撑能力，而微调机构在垂直设计方向考虑高度调节的需求，设计了一定水平的微调节功能，从而应对基础不平整的现象出现。在进行翻转作业之前，操作人员需根据规程做好支架的定位以及锁紧、荷载确认，并且采用可视化标记以及限位装置进行验证，提高支撑结构的受力准确点。同时，支架系统预留了监测接口便于后续加装传感器，实现对支撑状态的实时监控与预警。整套设计兼顾安全性、可操作性与可维护性，提升重型设备翻转作业的稳定性和施工效率。

2.7 操作台设计

在操作台主体结构设计中，操作台主体结构被分成了两个对称的半体，两者的尺寸分别为长 1 700 mm、宽 1 400 mm，整体总重量控制在 133 kg 以内，便于后期的搬运与安装操作。在两个半体操作台的安装过程中，在并拢状态下使用锁扣配合结构实现紧固连接。对于翻转台而言，则是采用旋转的方式进行操作台的位置调节，在松开锁定的状况下，可以用手推动，从而使得两个操作台沿一条 12 m 长、9 kg/m 负荷量的轻轨平滑移动到指定的位置。在设计该轻轨时，通过轨道压板与 T 型槽螺钉牢固固定在基础面，确保操作台移动过程中满足平稳性要求。

3 结束语

水力部件翻转台作为核电站主泵等大型水力机械维修中的关键辅助设施，其设计合理性直接决定了维修作业的安全性、效率及部件完好性。本文针对秦山核电站主泵水力部件维修需求，探究了翻转台结构稳定与适配基本目标，从参数设定、支座稳定性设计及抱箍与抱箍轴强度校核方面总结关键点，并且通过有限元分析等方法验证支座、抱箍等结构安全裕量。

参考文献：

- [1] 孔令义. 大型贯流式水轮机调速器机械液压系统设计 [J]. 今日制造与升级, 2022(05):31-33.
- [2] 潘凯, 沈浩. 水利泵站供配电设计中自动化设备的应用研究 [J]. 内蒙古水利, 2021(09):75-76.
- [3] 赵学贤. 某水利枢纽电气优化设计研究 [J]. 新型工业化, 2021,11(01):151-152,161.
- [4] 徐海林. 淮东水利枢纽泵闸改扩建工程电气主接线及设备选型设计 [J]. 机电信息, 2020(11):9-11.
- [5] 李显蓉, 任海霞, 李大伟. 《水利水电工程钢闸门设计规范》修订探析 [J]. 东北水利水电, 2020,38(06):55-58,68,72.