

泵站机组振动成因与稳定性改善措施

王 权¹ 陈海锋²

1. 射阳水建水利建设有限公司 江苏盐城 224300

2. 江苏九天工程项目管理有限公司 江苏南京 210000

摘要: 泵站运行过程中出现的振动问题不仅影响设备的使用寿命,还可能对操作人员的安全构成威胁,其稳定性和可靠性直接影响到整个系统的运行效率和服务质量。为此本文深入探讨了导致泵站机组振动的主要原因,并提出相应的减振措施,以期降低振动带来的风险并提高工作效率。

关键词: 泵站机组; 振动成因; 稳定性改善

前言

泵站机组运行稳定性是衡量水泵机组工作性能的重要指标,所以振动是机组运行不稳定的基本表现形式,振动的大小成了描述机组运行稳定与否和加工质量安装质量好坏的主要技术指标之一。当振动超出一定限度时,对机组设备的基础,甚至周围建筑物都会带来危害。因此,减少机组振动,克服机组运行的不稳定性使振动控制在允许范围之内,是机组制造、安装、检修中要解决的一个重要问题中,有关人员应当引起重视。

一、泵站机组振动的主要成因分析

(一) 水力因素引起的振动

水力振动是泵站机组振动当中最为复杂的类型之一,其主要根源在于水泵内部的流场非常流动及压力脉动。这种类型振动和泵的运行状态紧密相关,是设计与运行过程当中需要重点关注的环节^[1]。第一,汽蚀振动。如果泵内局部压力降低到输送于液体在该温度下的饱和蒸气压时,液体就会出现汽化现象,并且产生大量的蒸汽气泡,这些气泡随水流动至高压区域会瞬间消失。其振动信号通常表现为连续宽带频谱上叠加有高频峰群,同时伴有明显的爆裂声,是机组稳定性和寿命的主要威胁之一。第二,涡带振动。产生涡带振动主要是在水泵偏离最优工况运行时才会产生,在这一状态下,叶轮出口水流角与导叶或蜗壳的进口安装角出现不匹配,进而产生湍流和漩涡。在此过程当中,漩涡在蜗壳和尾水管当中汇集成周期性的空腔涡带。在此过程当中,窝带通常是以低于转频的频率在尾水管当中进行旋转,这样就会导致作用在转轮上的水流压力呈周期性不对称分布,进

一步引发强烈的低频压力脉动问题。这种低频脉动会通过水流和结构传递至整个机组及基础,引起机组的低频率大幅度晃动,严重时甚至可能引发功率摆动和厂房结构共振,危害极大。第三,叶轮与导叶的动静干涉。旋转的叶轮叶片与静止的导叶叶片或蜗壳隔舌之间存在极小的间隙。当每个叶轮叶片周期性扫过导叶或隔舌时,会对间隙内的流体产生周期性的挤压和释放,导致该区域的流速和压力发生剧烈变化。这种动静部件间的相互作用会产生强烈的压力脉动,其主频率为“叶片通过频率”,即转频乘以叶片数量。不当的叶栅配合会显著放大此干涉效应,加剧振动和结构疲劳。

(二) 机械因素引起的振动

机械因素是引起泵站机组振动最直接、最常见的原因,其根源是在旋转件自身存在的缺陷、安装错误、运行磨损等。第一,转子质量不平衡。这是最常见的振动源,当泵的转子的质心与其旋转中心不相重合,即产生质量偏心,在高速旋转的情况下,偏心质量会形成巨大的、周期性变化的离心力,其频率为转频。其在径向产生的振动最大,它的振幅与转速的平方成正比。不平衡可由于叶轮的铸造缺陷、流动介质分配不均匀引起的磨损、结垢以及在安装时产生误差引起的。第二,对不良。即泵轴与驱动电机的轴的中心线未在一齐,主要有平行不对中、角度不对中或者是两者兼有。不良的对中将在联轴器上产生附加的弯矩和径向剪切力,不仅迫使轴承承受不正常的载荷,还会引发以转频的二倍频为主的振动,长期在不对中情况下运行,会快速加剧轴承、机械密封及联轴器本身的疲劳破坏。第三,轴承故障。轴承是旋转件的支柱,其好坏决定着机组的稳定性。滚

动轴承在运行中会产生高频冲击振动，振动频率对应各元件特征频率。滑动轴承通常由于间隙过大产生油膜失稳而引发低频的“油膜涡动”或“油膜振荡”，其严重性对设备的威胁很大。

(三) 电气因素引起的振动

机械电气源的振动由电动机内的磁场不均匀或交变电磁力引起，振动频率一般与电源频率及其倍频有关。一是电磁振动，这是最常见的电气振动，主要由于定子与转子之间的不均匀电磁气隙以及交变电磁力所引起，在电机的转子导条处存在断裂缺陷时，将引起转子的电阻不对称，产生不平衡磁拉力，其频谱中包含转频及其边频带^[2]。此外由于定子硅钢片叠压不牢固或产生局部短路，引起铁芯振动加剧，同时由于制造、安装或磨损

等原因使得定子与转子之间的气隙不均匀导致的气隙偏心，即定子与转子之间的气隙静偏心与动偏心也会引起单边磁拉力作用于转子和定子上，在其频谱中主要包含2倍的电源频率，而且造成定转子摩擦，机械磨损加剧。二是转矩脉动。在运行过程中，电机输出的电磁转矩不是完全均匀的，会存在一定微弱周期性波动的转矩脉动现象，也称转矩摆动现象。该脉动振动经转轴传递到泵体，会形成扭振振动或者径向振动（见图1）。转矩脉动产生的原因主要是电源中的高次谐波，由于这些谐波电流，会产生不同频率的谐波磁场，经过磁场间的相互作用形成频率不同的脉动转矩。在运转过程中如果转矩脉动频谱中的某些分频接近于泵组轴系固有扭振频率将引起轴系的危险扭转共振，给轴、键、叶轮等部件造成巨大伤害。

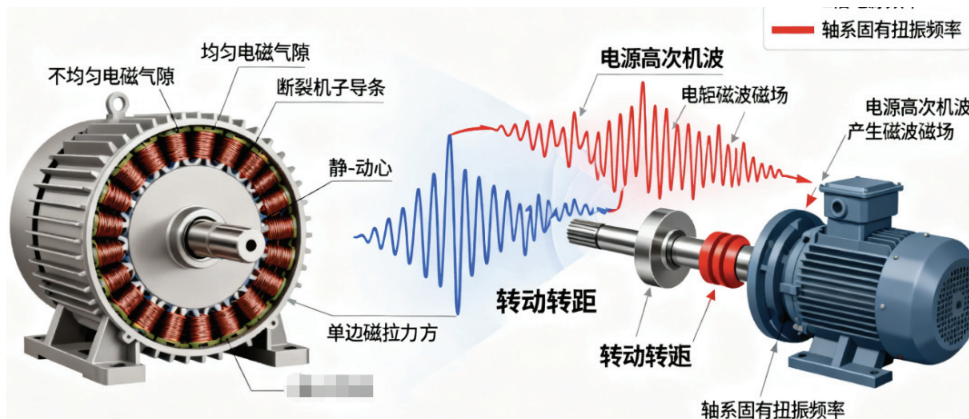


图1 振动原理

二、泵站机组稳定性改善综合措施

(一) 设计与选型阶段的优化措施

设计选型阶段的前瞻性优化，是从根本上提高泵站机组稳定性和运行质量的重要环节。第一，水力优化。高效、低脉动水力模型是保证稳定的前提。利用计算流体动力学技术对叶轮几何、叶片安放角、叶片数匹配等准确模拟和优化，关键在于拓宽高效范围，最大限度消除或者减弱叶频脉动压力，从本质上来降低水力激振引起的不平衡力和不平衡力矩，保证机组所有工况稳定运行。第二，结构动力学设计。结构动力学分析和设计必须贯穿于设计阶段。通过有限元对转子轴系结构进行准确临界转速计算，其额定工作转速要避开轴系的临界转速区，以避免发生共振；同时对泵座、基础等支撑结构进行刚强度与模态分析，使其有足够的刚度和阻尼以削弱振动传递。第三，进水流道优化。水泵的进水流道往往是最容易引起机组振动的因素。应该通过CFD模拟和

模型试验优化进水流道的型线，使来流均匀、平顺，避免出现漩涡、脱流和进气，力争水流到达叶轮入口时具有尽可能小的预旋和均匀的速度分布和压力分布，为水泵提供一个最优化的进水环境，防止由于进口流场的畸变所引发的汽蚀和水力振动^[3]。

(二) 制造、安装与检修阶段的精度控制

严谨的制造和规范的安装是保证设计方案实现、机组安全稳定运行的基础。首先，严格制造质量和动平衡精度。对关键部件严格控制制造公差和材料质量。加工后的转子必须动平衡，校正转子的质量。按照机组的转速和转子的结构，除刚性转子阶段动平衡需要双面外，高速的和细长的转子需要做到ISO G2.5或者更高的动平衡等级，充分地消除残余质量不平衡量，从源头上减少最主要的一次机械振动激振力。其次，高精度对中。泵的安装，采用激光对中仪等精密仪器保证泵与电机轴线冷态对中偏差必须在设计允许范围内。必须充分考虑运

运行时设备热膨胀、升温后的热变型，需要进行准确的预偏移补偿，以确保机组热态运行工况时仍处于一个良好的对中状态，以避免由于对中不良引起大的附加弯矩和振动。最后，规范安装。建立规范的安装作业指导书。工作流程包括：基础复查、零部件清洁、间隙配合，科学的安装工具和方法。规范的流程是保证一切可靠连接、间隙合理、避免人为的安装误差而造成松脱或变形的基本保证。

（三）运行管理与维护策略的调整

合理的运行和主动检修是保障泵组长期稳定运行、延缓性能恶化的关键。其一，合理运行。运行调度尽量将水泵工况设于高效区，防止水泵长时间运行于低流量小开度、大流量大开度等不正常工况区内，这些工况区易引起水泵脱流、喘振，产生剧烈的水力振动，对机组造成损伤。其二，防患于未然。汽蚀是造成机组振动、材料破坏的关键因素。应加强对进水水位的监测，保证泵的有效汽蚀余量（NPSHa）远大于泵必需的必需汽蚀余量（NPSHr），同时留有足够的安全裕度。从泵进水口消除引起泵内产生汽蚀的来源，加强前池流态的优化、杜绝漩涡裹进空气、定期疏通进水口拦污栅。从源头上避免汽蚀的出现。其三，状态监测诊断。建立起以在线振动监测系统为核心的预测性维护体系，对振动、温度、噪声等参数等进行实时连续性的采集，并通过谱分析、趋势分析方法在早期就发现转子的不平衡、对中不良、轴承的磨损等故障信息，做到从“事后维修”到“事先预警”，指导检修工作精确执行。其四，定期巡视和维护。建立起定期维护计划并严格执行维护计划。计划的定期性包括：对地脚螺栓、结构等连接件进行检查并重新进行紧固，防止产生松动的情况；更换润滑油。定期进行更换以保证轴承得到良好的润滑；测量泵的轴向间隙、密封处间隙以及磨损；通过系统性的维护尽快消除已经暴露的问题，恢复设备的性能。

（四）针对特定问题的技术改造

当机组在运行中出现特定振动问题时，针对性的技术改造是快速有效提升稳定性的重要手段。第一，补气法。该方法是将少量的空气补入机组蜗壳、尾水管等低

压区，使流场出现动力特性的改变。空气泡注入流道，打破了不稳涡带，使不稳涡带引起的脉动峰值大幅降低，起到“减震器”的作用，这种方法补气量和位置把握不好会影响机组效率。第二，加强筋加固。经诊断查明振动问题主要由于结构刚度低引起激振和结构变形导致共振的，应采取加强筋加固手段。在受振部位采用焊接加强筋板、增焊横向拉杆或增大与混凝土基础接触面积等方式增强结构固有频率和刚性，远离主激振力频率，从而减小结构响应或降低结构振动的传递，该方法经济实用见效快^[4]。第三，更换或优化关键部件。当查明故障和振动问题主要是由于设计缺陷或磨损严重的关键部件原因引起的，应从根部解决问题，直接更换或对其关键部件进行改造。如用高效率、高汽蚀性的新叶轮代替旧叶轮；用角接触轴承代替旧结构容易失效或承载能力差的普通深沟球轴承，结构松动引起振动，采用稳定性好的机械密封取代原填料密封。更换或对关键部件的优化能直接消除故障点，改善机组性能和可靠性。

结语

总而言之，泵站机组振动是一个多因素耦合的复杂问题，根治需系统施策。必须从设计、制造、安装、运行到维护进行全过程控制，将精准的水力与结构设计、高质量的安装工艺、科学的运行调度以及以状态监测为基础的预测性维护结合，这样方能有效抑制振动，全面提升机组的稳定性与可靠性，保障泵站的长周期安全经济运行。

参考文献

- [1] 陈宏松, 刘焘, 蔡信, 等. 盲源分离技术在泵站机组振动信号中的应用[J]. 机电产品开发与创新, 2025, 38(02): 125-128.
- [2] 董倪葳, 徐露, 蒋伟. 基于DSP的泵站动力机组振动测量系统[J]. 物联网技术, 2024, 14(05): 24-26.
- [3] 赵国勋. 泵站水泵机组振动的原因分析及处理措施[J]. 新疆有色金属, 2023, 46(04): 107-108.
- [4] 唐全民, 肖剑. 泵站机组振动成因分析及应对措施[J]. 四川水利, 2009, 30(04): 20-21.