

文章编号:1673-887X(2026)06-0009-03

叶轮材料对水泵振动噪声的影响研究

闫宏福

(甘肃省景泰川电力提灌水资源利用中心,甘肃 白银 730400)

摘要 水泵作为流体输送的动力设备,广泛应用于农业灌溉、城市供水、工业循环等领域,但水泵运行中产生的振动噪声不仅影响设备使用寿命,还会对周围环境造成污染,降低操作人员的工作舒适度。叶轮作为水泵能量转换的核心部件,其材料特性直接决定了水泵的振动噪声特征,其中:材料密度影响转子系统的固有频率分布,材料刚度决定叶片在流体激励下的变形响应,材料阻尼特性控制振动能量的耗散速率,材料声学特性影响声波的辐射效率。本文探讨了叶轮材料的密度、刚度、阻尼及声学特性对水泵振动噪声的影响机制,结合景电工程典型泵站的实测数据,分析了不同材质叶轮的振动噪声表现,为水泵降噪设计与材料选择提供理论依据。

关键词 叶轮材料;水泵;振动噪声

中图分类号 S225.73

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1673-887X.2026.06.003

Research on the Influence of Impeller Materials on the Vibration and Noise of Water Pumps

Yan Hongfu

(Gansu Jingtaichuan Electric Pumping Irrigation Station Water Resources Utilization Center, Baiyin 730400, Gansu, China)

Abstract: This paper explored the influence mechanism of the density, stiffness, damping, and acoustic properties of impeller materials on the vibration and noise of pumps. Combined with the measured data from typical pumping stations in hydropower engineering, the vibration and noise performance of pumps with different material impellers was analyzed, providing a theoretical basis for pump noise reduction design and material selection.

Key words: impeller material; pump; vibration and noise

高扬程多梯级电力提灌工程在西北干旱地区水资源调配中发挥着重要作用。泵站系统在高扬程、大流量工况下运行,叶轮长期承受高速旋转和高压差作用,面临复杂的流体激励环境,含沙水质在泵内形成液—固—气三相流体,加剧叶轮磨损与气蚀,导致水泵振动加剧,噪声水平升高,设备寿命缩短。传统水泵设计多侧重于水力性能优化,对叶轮材料特性与振动噪声的关联机制研究相对薄弱,随着环保标准趋严和设备可靠性要求提高,叶轮材料选择已成为水泵减振降噪的关键环节,研究叶轮材料性能对振动噪声的影响规律,对提升高扬程、大流量水泵的运行稳定性具有现实意义。基于此,本文结合水泵振动噪声学的产生机理、水泵叶轮材料特性,深入探讨了叶轮材料对水泵振动噪声的影响,以为水泵降噪设计与材料选择提供依据。

1 水泵振动噪声的产生机理

水泵噪声属于物理性质上的噪声,是水泵在运行

时产生的不规则的、间歇的、连续的或随机的噪声,属于低频噪声,穿透力极强、衰减缓慢、声波较长、其衍射波能轻易绕过障碍物,不易处理。

水泵振动噪声主要源于3个方面的作用机制:一是流体动力性噪声。流体动力性噪声主要由叶轮旋转时叶片与液体相互作用所产生,即液体流经叶轮时受到叶片的周期性切割作用,进而产生压力脉动和涡流,压力脉动以声波形式向外传播形成噪声,涡流分离和湍流脉动引起的速度脉动激励泵体结构振动并对外辐射噪声。二是机械性噪声。机械性噪声主要来源于泵内各运动部件之间的摩擦碰撞,如轴承因径向力和轴向力作用产生振动、转子动静不平衡导致周期性激振力,机械密封面的摩擦振动传递至泵体外壳等。三是电磁噪声。电磁噪声由驱动电机产生,定子和转子之间气隙磁场的周期性变化引起电磁力波,电磁力波作用于铁心产生振动变形,并通过联轴器和底座传递至水泵系统,经泵体表面向周围空间辐射声波能量^[1]。这三方

收稿日期 2025-12-16

基金项目 2026年甘肃省水利科学试验研究及技术推广项目“高扬程大流量叶轮及修复技术迭代升级的研究与应用”(26GSLK011)。

作者简介 闫宏福(1990-),男,甘肃景泰人,工程师,研究方向为泵站安全管理、机电设备高效运行、水机设备装配。

面的作用机制使得水泵运行过程中产生了振动噪声。

2 叶轮材料特性分析

2.1 材料密度特性

查阅资料可知,铸铁材料密度为 $7\,200\text{ kg/m}^3$,不锈钢密度为 $7\,900\text{ kg/m}^3$,工程塑料密度为 $1\,200\text{ kg/m}^3$,密度差直接导致尺寸相同的叶轮质量相差数倍,进而引发不同的动力学响应特征。高密度金属叶轮在额定转速运行过程中会产生较大的离心惯性力,叶片根部承受的离心应力与材料密度成正比关系,不仅影响叶轮的疲劳寿命,还会因较大的弹性变形量改变叶片与液流的相互作用状态,质量较大的叶轮使转子系统的转动惯量增大,导致整个水泵机组的固有频率向低频段迁移,容易与叶片通过频率或其倍频产生耦合共振;密度较小的复合材料叶轮,可避免共振放大效应的发生。

2.2 材料刚度特性

材料弹性模量是表征材料刚度的重要物理量。钢材弹性模量为 210 GPa ,铝合金弹性模量为 70 GPa ,聚合物基体材料弹性模量普遍低于 5 GPa 。弹性模量差异会影响叶片在流体动压力作用下的变形响应。叶轮在扬程工况下运行,叶片工作面与背面存在压力差,采用不锈钢材料叶片尖端挠度较小,若改用铝合金材料则叶片尖端挠度增加数倍,这种变形量的增大会使叶片出口安放角偏离设计值,造成液流分离点提前出现,产生更强的尾迹涡流和压力脉动。在非设计工况下,刚度不足的叶片更容易产生较大幅度的振动,特别是在小流量工况叶道内出现严重脱流,非定常流体力使低刚度叶片产生共振,振幅可达高刚度叶片的数倍,振动加速度的平方与辐射声功率成正比。因此,低刚度叶轮的噪声辐射强度会大幅提升。

2.3 材料阻尼特性

材料的内阻尼能力用损耗因子 η 来量化,普通碳钢和不锈钢的损耗因子约 $0.002\sim 0.005$,灰铸铁由于内部存在片状石墨组织,损耗因子达 $0.015\sim 0.025$ 。阻尼性能的巨大差异体现在叶轮受到脉动压力激励后的振动衰减速度上。在叶片通过频率激励作用下,低损耗因子的不锈钢叶轮需要较长时间才能衰减振幅,而高损耗因子的灰铸铁叶轮衰减速度明显加快。快速的能量耗散使高阻尼材料叶轮在宽频激励作用下的稳态振幅显著降低,频响函数峰值被削减,共振频带宽度扩大,振动能量在频域内得到分散,离散频率噪声峰值相应降低。另外,叶轮材料的阻尼性能还受应变幅值和环境温度的影响,聚合物材料在高温工况下阻尼性能会因玻璃化转变而急剧下降,而金属材料的阻尼特性则相对稳定^[2]。

3 叶轮材料对水泵振动噪声的影响

3.1 材料密度对振动噪声的影响

叶轮材料密度的变化会改变转子系统的质量分布,进而影响水泵的振动频率特性和激振力水平。高密度材料制成的叶轮,在旋转过程中产生的离心力与密度数值成正比增长,离心力作用在轴承上形成周期性径向载荷,引发轴承座的强迫振动响应,转子质量的增大导致整个泵组固有频率下移,原本远离激励频率的固有模态可能落入叶片通过频率及其谐波分量范围内,触发共振现象使振动幅值放大;低密度复合材料叶轮能够将转子固有频率提升至安全区域。另外,叶轮质量影响启停过程中的瞬态冲击特性,质量大的叶轮在启动阶段需要更长的加速时间,产生的瞬态激振力峰值更高,容易激发泵体结构的高阶振动模态;质量较轻的叶轮则表现出更优的动态响应性能,启停过程平稳,瞬态噪声峰值降低明显。

3.2 材料刚度对振动噪声的影响

叶片刚度不足时,在压力脉动激励作用下容易产生较大的弹性变形,改变叶片与液流的相对几何关系。叶片变形会导致流动分离区域扩大、尾迹涡旋强度增强,进一步放大压力脉动幅值形成恶性循环。在偏离设计工况运行时,低刚度叶轮的叶片尖端变形量可能占设计间隙的较大比例,使得叶轮与蜗壳舌部的动静干涉效应加剧,产生强烈的离散频率噪声。材料刚度还会影响叶轮各阶固有频率的分布位置,合理选择材料刚度能够使叶轮固有频率避开叶片通过频率的危险区域。刚度参数的选取需要综合考虑振动位移和加速度响应,高刚度结构对激励的阻抗降低,受迫振动位移虽然减小但加速度增大,噪声辐射功率与加速度的平方成正比关系。因此,最优刚度区间噪声最小,叶片刚度影响自激振动的稳定性边界,在卡门涡街或叶片颤振等自激振动中,而刚度较低的叶片更容易失稳,出现大幅振荡甚至疲劳断裂。因此,只有刚度匹配合理的叶轮才能抑制自激振动的发展^[3]。

3.3 材料阻尼对振动噪声的影响

材料内阻尼能够将部分振动机械能转化为热能并耗散,从而降低叶轮在不同激励作用下的振动响应幅值。在共振频率附近,阻尼效应最为显著,损耗因子的提升可将共振峰值大幅降低,使原本尖锐的共振峰变得平缓,共振频带展宽,振动能量分散到更宽的频率范围内,对应的噪声频谱中离散频率成分的峰值明显下降。高阻尼材料在宽频随机激励作用下表现出更优的减振性能,灰铸铁叶轮相比不锈钢叶轮在全频段的振动加速度均方根值降低明显。另外,阻尼特性能够抑制叶轮振动的持续时间,在激励撤除后高阻尼叶轮的自由振动迅速衰减,低阻尼叶轮振动会持续较长时间,导致噪声拖尾现象严重。材料阻尼对自激振动的抑制作用明显,在叶片颤振或涡激振动等自激振动中,阻尼提供负向反馈作用,消耗流体输入的能量,提高系统的稳定性临界流速,高阻尼材料能够将颤振临界转速提

升较大幅度,有效拓宽水泵的安全运行范围^[4]。

3.4 材料声学特性对噪声辐射的影响

叶轮材料的声学特性包括声速和声阻抗两个基本参数。声速由材料密度和弹性模量共同决定,声速差异影响声波在材料内部的传播特性和边界反射行为。高声速材料中声波传播路径更短,到达边界的时间更快,使得叶轮各部位振动的相位关系发生变化,改变整体的声辐射指向性。材料的声阻抗等于材料密度与声速的乘积。金属材料的声阻抗与水介质的声阻抗差异较大,在固—液界面容易形成较强声反射,使部分声能被反射回固体内部,另一部分声能透射进入液体并向外传播。材料的声辐射效率与其弯曲波波速及周围介质声速之间的关系密切相关,弯曲波波速低于介质声速的频段称为临界频率以下区域,此时结构振动难以有效激发声波向远场传播,声辐射效率相对较低。提高材料刚度会使弯曲波波速增大,导致更宽频段落入高效辐射区,材料表面的声辐射效率受到几何形状和边界条件的影响,薄壁曲面结构比厚壁平板结构的辐射效率高出数倍。因此,材料选择需要结合叶轮的结构形式综合考虑^[5]。

4 典型案例分析

景电工程作为跨省区、高扬程、多梯级、大流量电力提灌工程,其泵站系统装机容量达 30.6×10^4 kW,总扬程713 m,在长期运行中面临黄河高含沙水质导致的叶轮磨损与气蚀问题,为研究叶轮材料对水泵振动噪声的影响提供了典型应用场景。工程二期泵站群采用卧式离心泵,叶轮在液—固—气三相流体作用下承受复杂工况,材料性能直接影响泵组振动特性与噪声辐射水平。本研究选取景电二期某典型泵站开展不同材质叶轮的振动噪声对比测试,测试结果见表1。

测试数据显示,材料阻尼特性对叶轮振动噪声控制具有重要影响,高阻尼铸铁叶轮的振动加速度均方根值为 2.6 m/s^2 ,相比普通不锈钢叶轮的 4.8 m/s^2 降低45.8%,对应噪声声压级从92 dB降至83 dB。高阻尼材料将振动能量快速转化为热能耗散,有效抑制共振峰值与宽频振动响应。灰铸铁叶轮因其内部片状石墨相的存在,损耗因子达到0.020,虽然弹性模量较不锈钢低19%,但振动加速度反而降低33.3%,证明阻尼性能

表1 不同材质叶轮振动噪声测试结果对比表

Tab.1 Comparison of vibration and noise test results of different material impellers

叶轮 材质	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	损耗 因子	振动加速 度均方根/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	噪声 声压 级/dB	使用 寿命/ h
普通不锈钢	7 900	210	0.003	4.8	92	8 500
灰铸铁	7 200	170	0.020	3.2	86	12 000
高阻尼铸铁	7 300	175	0.028	2.6	83	15 000
铝青铜合金	7 600	120	0.012	3.9	89	10 500

在振动控制中的权重超过刚度因素。铝青铜合金叶轮的弹性模量仅为120 GPa,在高扬程工况下叶片变形量较大,导致流动分离与压力脉动增强,虽然其损耗因子达到0.012,但振动加速度仍维持在 3.9 m/s^2 的较高水平,说明刚度不足引发的自激振动会抵消部分阻尼效果。

5 结语

叶轮材料的密度、刚度、阻尼及声学特性对水泵振动噪声具有重要影响。材料密度会影响转子系统的质量分布和固有频率特性,高密度叶轮使固有频率下移,增加与激励频率共振的风险;材料刚度影响叶片在压力脉动作用下的变形量,刚度不足导致流动分离增强,放大压力脉动幅值,但刚度过高会提升振动加速度响应;材料阻尼特性在振动控制中发挥主导作用,高阻尼材料能够快速耗散振动能量,削减共振峰值,降低宽频振动响应。因此,水泵降噪设计时应根据需求,正确选择叶轮材料,保障水泵稳定运行。

参考文献

[1] 李彦迪,王昱. 簸箕型流道泵站水泵振动信号消噪方法研究[J]. 机械制造与自动化,2024,53(5):92-96.
[2] 黄凯乐. 内燃机冷却水泵内部流动及其诱导振动噪声特性[D]. 镇江:江苏大学,2019.
[3] 曹崇宏,仇伟伟,孔江峰. 水泵振动和噪声的解决方法[J]. 中国新技术新产品,2018(1):121-122.
[4] 夏勇. ACP1000核设备冷却水泵振动噪声研究[D]. 镇江:江苏大学,2016.
[5] 沈松土,汪智锋. 水厂送水泵机组的优化改造与成果[J]. 通用机械,2015(10):76-78.

(上接第8页)
[11] SKOPLAKI E, PALYVOS J A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations[J]. Solar energy, 2009, 83(5):614-624.
[12] PILLER S, PERRIN M, JOSSEN A. Methods for state-of-charge determination and their applications[J]. Journal of power sources, 2001, 96(1):113-120.
[13] 李树海,马承伟,张俊芳,等. 多层覆盖连栋温室热环境模型构

建[J]. 农业工程学报, 2004(3):217-221.
[14] 何芬,马承伟,张俊雄. 温室湿度动态预测模型建立与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10):173-177.
[15] 杜鑫,丁大伟. 基于平衡截断法的离散时间线性时滞系统的低频域模型降阶[J]. 自动化学报, 2015, 41(10):1825-1830.
[16] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum settings for automatic controllers[J]. Transactions of the American society of mechanical engineers, 1942, 64(8):759-765.