

离心泵转子系统可靠性分析及优化设计研究

崔海泉

沈阳格瑞德泵业有限公司 辽宁沈阳 110326

摘 要: 离心泵作为流体机械中的重要设备,广泛应用于工业、农业、市政及日常生活等多个领域。转子作为离心泵的核心部件,其可靠性直接关系到泵的整体性能和运行稳定性。本文首先对离心泵转子系统可靠性进行了分析,并在此基础上提出了优化设计方案。通过对转子材料、结构、润滑系统等方面的改进,旨在提高离心泵转子系统的可靠性和使用寿命,期望为离心泵转子系统的优化设计提供理论支持和实践指导。

关键词: 离心泵; 转子系统; 可靠性分析; 优化设计

引言

离心泵作为一种常见的流体输送设备,其工作原理是利用叶轮的旋转将机械能转化为流体的动能和静压能,从而实现流体的输送^[1]。转子系统作为离心泵的关键部件,其性能直接影响到泵的工作效率、稳定性和可靠性。因此,对离心泵转子系统进行可靠性分析及优化设计研究具有重要意义。

一、概述

(一) 研究背景及意义

离心泵因其结构简单、操作方便、适应性强等特点,在石油、化工、电力、水利等领域得到了广泛应用,然而,随着现代工业的发展,对离心泵的性能要求越来越高,特别是在高压、高温、高速等恶劣工况下,离心泵转子系统的可靠性问题日益凸显。转子系统的失效不仅会导致泵的工作效率下降,严重时还会引发安全事故,造成人员和财产损失^[2]。因此,对离心泵转子系统进行可靠性分析及优化设计研究,对于提高泵的性能、延长使用寿命、保障安全生产具有重要意义。

(二) 国内外研究现状

目前,国内外学者对离心泵转子系统可靠性分析及优化设计进行了大量研究。在可靠性分析方面,主要采用故障树分析(FTA)、故障模式及影响分析(FMEA)等方法,对转子系统可能发生的故障进行预测和评估。在优化设计方面,主要集中在转子材料的选择、结构优化、润滑系统的改进等方面。然而,现有的研究仍存在一些不足,如缺乏系统的可靠性分析模型、优化设计方法不够成熟等。因此,本文将在前人研究的基础上,进一步探讨离心泵转子系统的可靠性分析及优化设计方法。

(三) 研究内容及方法

本文主要研究内容包括离心泵转子系统的可靠性分析和优化设计两个方面。在可靠性分析方面,采用故障树分析(FTA)方法,对转子系统可能发生的故障进行预测和评估,建立可靠性分析模型。在优化设计方面,针对转子材料、结构、润滑系统等方面存在的问题,提出改进方案,评估优化效果。

本文的研究方法主要包括理论分析、仿真分析和实验验证三个方面。理论分析方面,通过查阅相关文献和资料,了解离心泵转子系统的工作原理和可靠性分析方法;仿真分析方面,采用ANSYS、CFX等仿真软件,对转子系统进行建模和仿真分析;实验验证方面,通过搭建实验平台,对优化前后的离心泵进行性能测试和对比分析。

二、离心泵转子系统可靠性分析

(一) 可靠性定义及指标

可靠性是指产品在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。对于离心泵转子系统而言,可靠性指标主要包括平均无故障工作时间(MTBF)、可靠度(R)等。其中,MTBF是指转子系统在两次故障之间的平均工作时间,反映了转子系统的耐久性和稳定性;可靠度(R)是指转子系统在规定时间内不发生故障的概率,反映了转子系统的可靠性和安全性。

(二) 故障树分析(FTA)

故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)是一种基于逻辑图形的系统可靠性分析方法,它以系统故障事件为顶事件,通过逐步分析故障原因,将系统故障事件与基本故障事件联系起来,形成故障树。在离心泵转子系统可靠性分析中,可以采用FTA方法,对转子系统可能发

生的故障进行预测和评估。

1. 故障树构建

故障树的构建是FTA方法的关键步骤之一。在构建故障树时，需要首先确定顶事件，即转子系统的故障事件。然后，通过逐步分析故障原因，将顶事件分解为若干中间事件和基本事件。中间事件是指导致顶事件发生的直接原因，基本事件是指导致中间事件发生的具体原因，通常是转子系统的零部件故障或环境因素等。

2. 故障概率计算

在构建故障树后，需要对各基本事件的故障概率进行计算。故障概率的计算可以采用统计方法、专家评估法、试验数据法等。对于统计方法，需要收集大量的历史数据，通过数据分析得到各基本事件的故障概率；对于专家评估法，需要邀请相关领域的专家进行评估和打分，通过综合专家的意见得到各基本事件的故障概率；对于试验数据法，需要通过试验得到各基本事件的故障概率。在计算得到各基本事件的故障概率后，可以采用布尔代数或概率论等方法，计算顶事件的故障概率。

（三）故障模式及影响分析（FMEA）

故障模式及影响分析（Failure Mode and Effects Analysis, FMEA）是一种系统化的可靠性分析方法，它通过对系统各零部件的故障模式进行分析，评估故障对系统的影响程度，从而确定系统的薄弱环节和改进方向。在离心泵转子系统可靠性分析中，可以采用FMEA方法，对转子系统的故障模式进行分析和评估，常见故障模式及影响详见表1。

表1 离心泵转子系统常见故障模式及影响分析

故障模式	影响分析
叶轮磨损	降低泵效率，增加能耗，可能引起振动和噪音
轴承损坏	导致转子失稳，增加径向和轴向振动，缩短泵寿命
机械密封失效	液体泄漏，污染环境，降低泵效率
轴弯曲或断裂	引发严重振动，导致泵无法正常工作，需停机维修
轴向力过大	影响转子系统的临界转速，增加振动和磨损，降低系统可靠性

故障模式识别是FMEA方法的第一步，在识别故障模式时，需要充分了解转子系统的结构和工作原理，分析各零部件可能发生的故障类型和原因，常见的故障模式包括磨损、腐蚀、断裂、变形等。在识别故障模式后，需要对故障的影响进行评估，评估的内容包括故障对转子系统性能的影响程度、对安全生产的影响程度以及对

维修成本的影响程度等，通过对故障影响的评估，可以确定故障的严重程度和优先处理顺序。在评估故障影响后，需要针对各故障模式制定相应的改进措施，改进措施的制定需要综合考虑技术可行性、经济性和安全性等因素，常见的改进措施包括改进材料、优化结构、加强润滑、提高制造精度等。

（四）可靠性分析模型建立

在离心泵转子系统可靠性分析中，需要建立可靠性分析模型。可靠性分析模型是对转子系统可靠性进行定量分析和评估的基础。可靠性分析模型可以采用马尔可夫模型、威布尔分布模型、指数分布模型等。

马尔可夫模型是一种基于状态转移的可靠性分析模型。在马尔可夫模型中，将转子系统的运行状态划分为若干状态，每个状态之间存在一定的转移概率。通过计算各状态之间的转移概率和稳态概率，可以评估转子系统的可靠性和稳定性。马尔可夫模型适用于具有多个运行状态且状态之间存在转移概率的转子系统可靠性分析。

威布尔分布模型是一种常用的可靠性分析模型，它适用于描述产品的失效分布。在威布尔分布模型中，通过拟合产品的失效数据，可以得到威布尔分布的形状参数和尺度参数。根据威布尔分布的形状参数和尺度参数，可以计算产品的可靠度和平均无故障工作时间等指标。威布尔分布模型适用于具有明显失效分布规律的转子系统可靠性分析。

指数分布模型是一种简单的可靠性分析模型，它适用于描述具有恒定失效率的产品的可靠性。在指数分布模型中，假设产品的失效率为常数，即产品在任意时刻发生故障的概率是相同的。根据指数分布模型，可以计算产品的可靠度和平均无故障工作时间等指标。指数分布模型适用于具有恒定失效率的转子系统可靠性分析。

三、离心泵转子系统优化设计

（一）转子材料优化

转子材料是影响离心泵转子系统可靠性和性能的关键因素之一。因此，在优化设计中，需要选择合适的转子材料。首先需要充分了解材料的力学性能、耐磨性、耐腐蚀性、热稳定性等。力学性能包括材料的强度、韧性、硬度等；耐磨性是指材料抵抗磨损的能力；耐腐蚀性是指材料抵抗化学腐蚀的能力；热稳定性是指材料在高温环境下的性能稳定性，对材料性能的分析 and 比较，选择具有优良综合性能的转子材料。其次在选择转子材料时，需要遵循以下原则：一是根据离心泵的工作条件和介质特性选择合适的材料；二是优先选择具有良好加

工性能和焊接性能的材料；三是考虑材料的成本和可获取性，在满足性能要求的前提下，尽量选择成本低廉、易于获取的材料。

（二）转子结构优化

不同轴向力下转子耦合系统临界转速变化是影响离心泵转子系统性能和可靠性的另一个重要因素，详见表2。因此，在优化设计中，需要对转子结构进行优化，考虑轴向力对转子系统临界转速的影响，通过调整转子结构或增加辅助支撑，提高转子系统的稳定性。在对转子结构进行优化前，需要对转子的结构进行分析。分析的内容包括转子的几何形状、尺寸参数、质量分布等。转子结构的优化可以采用有限元分析、拓扑优化、形状优化等方法。有限元分析是一种常用的结构分析方法，它通过对转子进行离散化处理，建立有限元模型，分析转子的应力分布和变形情况；拓扑优化是一种在给定设计区域内寻找最优材料分布的优化方法，它可以在满足性能要求的前提下，减少材料的使用量；形状优化是一种对转子几何形状进行优化的方法，它可以通过改变转子的几何形状，提高转子的性能和可靠性。

表2 不同轴向力下转子耦合系统临界转速变化

轴向力 (KN)	一阶临界转速 (r/min)	二阶临界转速 (r/min)	三阶临界转速 (r/min)
-10	降低	降低	降低
0	基准值	基准值	基准值
10	增加	增加	增加

（三）润滑系统优化

润滑系统对于离心泵转子系统的运行稳定性和可靠性至关重要。良好的润滑可以减少转子的摩擦和磨损，降低能耗，提高泵的效率。因此，在优化设计中，需要对润滑系统进行优化。离心泵转子系统的润滑方式主要有干摩擦、油润滑和水润滑等。干摩擦是指转子与轴套之间直接接触，摩擦阻力大，磨损严重；油润滑是指通过润滑油膜将转子与轴套隔开，减少摩擦和磨损；水润滑是指利用水润滑介质对转子进行润滑。在选择润滑方式时，需要根据离心泵的工作条件和介质特性进行选择。对于高速、重载的离心泵，通常采用油润滑方式；对于输送腐蚀性介质的离心泵，可以采用水润滑方式。针对现有润滑系统存在的问题，如润滑不良、油温过高等，可以采取以下改进措施：一是优化润滑油的供给方式，确保润滑油能够均匀、稳定地供给到转子与轴套之间；二是加强润滑油的冷却和过滤，降低油温，提高润滑油的清洁度；三是改进润滑系统的密封性能，防止润滑油

泄漏和介质侵入。

四、实验验证与分析

（一）实验平台搭建

为了验证优化设计的效果，搭建了离心泵实验平台。实验平台主要由离心泵、电机、流量计、压力表、振动传感器、噪声传感器等组成。通过调节电机的转速和流量计的流量，可以模拟不同的工况条件；通过振动传感器和噪声传感器，可以实时监测转子的振动和噪声水平；通过压力表和流量计，可以测量泵的扬程和效率等性能指标。

（二）实验方案设计

在实验验证阶段，设计了以下实验方案：一是对比测试优化前后的离心泵转子系统在相同工况下的振动、噪声、温度等参数以及泵的效率、扬程等性能指标；二是对优化后的离心泵转子系统进行长期运行测试，评估其可靠性和寿命。

（三）实验结果与分析

通过实验测试，得到了以下结果：一是优化后的离心泵转子系统在相同工况下的振动、噪声水平明显降低，温度分布更加均匀；二是优化后的泵效率有所提高，扬程稳定；三是长期运行测试结果表明，优化后的离心泵转子系统可靠性和寿命得到了显著提高。这些实验结果验证了优化设计的有效性。

五、结论与展望

文章对离心泵转子系统进行可靠性分析和优化设计研究，得出了以下结论：一是采用故障树分析（FTA）和故障模式及影响分析（FMEA）方法，对离心泵转子系统进行了可靠性分析，建立了可靠性分析模型；二是针对转子材料、结构、润滑系统等方面存在的问题，提出了改进方案，并通过仿真分析和实验验证，评估了优化效果；三是实验结果表明，优化后的离心泵转子系统在振动、噪声、温度等方面得到了显著改善，泵的效率有所提高，可靠性和寿命得到了提高。通过这些研究，期望未来在离心泵转子系统可靠性分析和优化设计方面进一步提高离心泵转子系统的可靠性和性能，为工业生产和日常生活提供更加安全、高效、可靠的流体输送设备。

参考文献

- [1] 许胜涛, 叶凡, 阙望, 等. 离心泵建模及其流场模拟分析研究[J]. 机械研究与应用, 2014, 27(3): 3.
- [2] 李大文. 高压离心泵转子系统可靠性分析及振动特性研究[D]. 兰州理工大学, 2022.