

基于偏微分方程的高速滚动轴承 振动控制系统设计

郭元春

(西安思源学院 基础部, 西安 710038)

摘要: 振动行为是导致高速滚动轴承出现谐振位移的主要原因, 而谐振位移过于明显则会使轴承敏感性下降, 从而影响机械元件的回转精度; 为有效抑制轴承谐振位移, 设计基于偏微分方程的高速滚动轴承振动控制系统; 按需连接滚动轴承振动换能器、轴承振幅控制电路与滚动速率计量装置, 完成高速滚动轴承振动控制系统的硬件模块设计; 设置偏微分边界, 计算偏微分方程数值解, 完成偏微分方程表达式的定义, 再通过离散化振动信号的方式, 确定振动信号参数的数值范围, 实现基于偏微分方程的高速滚动轴承振动信号参数求解; 搭建前馈补偿控制器模型, 完善振动行为的补偿控制算法, 以实现对控制向量的容错处理, 对轴承振动行为进行补偿性控制, 联合硬件模块, 完成高速滚动轴承振动控制系统设计; 实验结果表明, 该控制系统的应用可将高速滚动轴承的谐振位移控制在 $0\sim 0.5$ mm 内, 不会因明显振动问题使轴承敏感性下降, 故机械元件的回转精度能够得到保障。

关键词: 偏微分方程; 高速滚动轴承; 振动控制; 偏微分边界; 前馈补偿控制器

Design of High Speed Rolling Bearing Vibration Control System Based on Partial Differential Equation

GUO Yuanchun

(Fundamental Department, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Vibration behavior is main reason of resonance displacement in high-speed rolling bearings, and significant resonance displacement will reduce the sensitivity of bearings, thus affecting the rotary accuracy of mechanical components. In order to effectively suppress the resonance displacement of bearings, a vibration control system for high-speed rolling bearings based on partial differential equations is designed. Connect the vibration transducer of rolling bearing, bearing amplitude control circuit and rolling rate metering device as needed to complete the hardware module design of high-speed rolling bearing vibration control system. Set the partial differential boundary, calculate the numerical solution of the partial differential equation, complete the definition of the partial differential equation, and then determine the numerical range of the vibration signal parameters by discretizing the vibration signal, so as to achieve the vibration signal parameters of the high-speed rolling bearing based on the partial differential equation. Establish the feedforward compensation controller model, and improve the compensation control algorithm of vibration behavior, so as to achieve the fault-tolerant treatment of control vectors, compensate the control of bearing vibration, and combine hardware modules to complete the design of vibration control system for high-speed rolling bearings. Experimental results show that the control system can control the resonant displacement of high-speed rolling bearing within the range of $0\sim 0.5$ mm, and the bearing sensitivity will not decrease due to its vibration, ensuring the rotary accuracy of mechanical components.

Keywords: partial differential equation; high speed rolling bearing; vibration control; partial differential boundary; feedforward compensation controller

0 引言

轴承是一种重要的机械零部件, 其主要功能是支撑

机械旋转体, 在降低其运动过程中摩擦系数的同时, 使得设备元件的回转精度得到保障。滚动轴承是一种特殊

收稿日期: 2024-02-01; 修回日期: 2024-03-12。

作者简介: 郭元春(1980-), 女, 硕士, 副教授。

引用格式: 郭元春. 基于偏微分方程的高速滚动轴承振动控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(4): 115-122.

的轴承结构,可将运转的轴与轴座之间的滑动摩擦力转化为滚动摩擦力,减少摩擦损失,一般由保持架、滚动体、外圈结构及内圈结构 4 部分组成^[1]。一般来说,滚动轴承的摩擦系数仅为滑动轴承的 1/2,在相同载荷与转速水平的情况下,其所消耗能源仅为滑动轴承的 1/3 左右。对于滚动轴承的维护可以采用注油润滑的方式,以确保其运动学特性不会发生改变。此外,滚动轴承可以适应多种不同的温度、湿度与压力条件,且由于其径向跳动量相对较小,所以在应用过程中能够有效保障机械设备的旋转精度与性能水平。

轴承振动是一个复杂问题,其表现过于明显会导致轴承敏感性下降,从而使机械元件的回转精度受到影响。岳壮壮等人^[2]提出了基于干扰观测器的磁轴承转子振动抑制系统,通过将比例微分(PD)控制和干扰观测器(DOB)相结合,对扰动信号进行观测和抵消。并建立了转子系统动力学模型,实现轴承转子振动抑制。仿真实验证明,该方法具有较好的振动抑制效果,但是对于高速滚动轴承来说,谐振位移偏大,不能有效保障机械元件的回转精度。刘云山^[3]提出了基于模糊 PID 的轴承振动控制系统,建立了机电耦合动力学模型,推导滚动轴承在各个方向上的位移响应方程,又结合模糊 PID 控制算法与主从控制策略,设计了同步控制器闭环结构。实验结果表明,该方法能够实现转速和相位的同步控制,但是高速运转下,轴承谐振位移较大。全宇等人^[4]提出了基于模型参考自适应系统的轴承振动抑制方法,根据 Popov 超稳定性理论设计自适应律,并通过相位补偿角保证辨识算法全转速范围内稳定性。实验结果表明,该方法能快速准确地抑制不平衡引起的转子振动,但是不能满足转子高回转精度要求。谢凌溪等人^[5]提出了基于主动舵支承的推进轴系横向振动抑制方法,该方法将舵轴承支承方式由面支承改为点支承,并利用六个主动作动器来抑制螺旋桨横向激励力传递到壳体。结合自适应控制算法,实现振动传递抑制。实验结果表明,该方法有效降低了壳体表面法向振动,但是对于高速运行状态来说,其适用性不佳。

为了解决上述问题,设计基于偏微分方程的高速滚动轴承振动控制系统。偏微分方程是包含未知函数的偏导数方程计算式,其中所出现未知函数偏导数的最高阶数就是该方程的阶向量。将其应用于对高速滚动轴承振动行为的控制,可以实现对水平及竖直谐振位移数值的准确计算。

1 高速滚动轴承振动控制系统硬件模块设计

高速滚动轴承振动控制系统的硬件模块单元由滚动轴承振动换能器、轴承振幅控制电路、滚动速率计量装置三部分共同组成,本章节针对其具体设计方法展开研究。

1.1 滚动轴承振动换能器

滚动轴承振动换能器可将轴承部件的振动信号转换为可供系统主机识别的电力信号,振动压敏效应是滚动轴承振动换能器的特有属性,根据作用效果的不同,压敏效应呈现两种表现形式,一种是正向压敏效应,一种是逆向压敏效应。当谐振平面受到高速滚动轴承的振动作用时,它的内平面上会产生敏感性负荷,而且外加振动作用与敏感性负荷密度之间存在一定的线性关系,这一振动行为与敏感负荷之间的转化现象就是正向压敏效应。由于滚动轴承振动换能器处于力学作用场之中,它受到轴承振动作用力的影响,力学作用场使谐振平面的外平面产生形变弯曲,也就是产生一定的应变力,而且这种振动行为与力学作用场的强度存在一定的关系,振动行为越突出,换能器的能效转换能力越强,这一现象被称为逆向压敏效应。具体的滚动轴承振动换能器连接结构如图 1 所示。

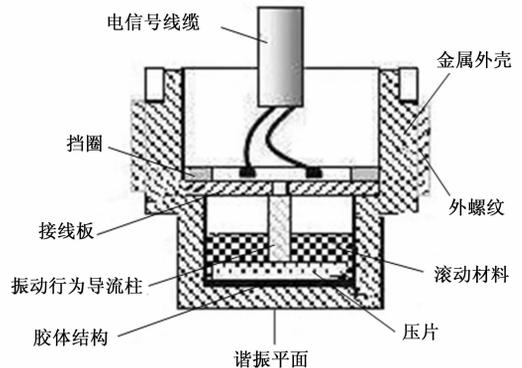


图 1 滚动轴承振动换能器结构简图

随着高速滚动轴承振动行为等级的增强,滚动材料会向着明显振动侧不断汇集,而这种行为必然导致振动行为导流柱的接入长度发生变化^[6]。当滚动材料把振动行为导流柱的某一侧完全填满时,另一侧区域内柱体结构完全显露出来,此时即便高速滚动轴承继续表现出高强度的振动行为,谐振平面也不会继续上升,由振动信号转换而来的电力信号只能经由接线板,传输至电信号线缆之中,以供控制系统主机的调取与利用。

1.2 轴承振幅控制电路

高速轴承在运转过程中产生的微小振动若无有效控制可能引发噪音、磨损甚至故障,因此,通过设计轴承振幅控制电路控制滚动轴承所产生的微小振动,其基本工作原理为通过 CT 控制单元和独立的输电回路进行连接,并实现数据接收、存储和分析。CT 控制单元利用数据寄存能力接收电气参量和振动行为数据,根据控制指令有效地管理轴承振幅;而输电回路传输电力信号并进行即时分析,以确保控制指令的实时性和准确性,从而最终实现对滚动轴承振动的有效控制。轴承振幅控制

电路可以有效地降低系统的振动水平，提升轴承性能和整体设备的稳定性。

控制电路的 CT 控制单元分别与电动机设备和独立的输电回路相连，其中，CT 控制单元具有一定的数据寄存能力，既可以接收核心供电设备输出的电气参量，也可以对与高速滚动轴承振动行为相关的数据信息进行存储。由于该部件结构所制定的控制执行指令遵循偏微分方程表达式，所以每一类寄存信息都必须对应一项已输入的轴承振动信号对象^[7]。输电回路负责传输驱动滚动轴承振动换能器与滚动速率计量装置的电力信号，且在传输的同时，可以对轴承振动行为进行即时分析，以确保系统主机所制定控制指令的实时性与准确性。轴承振幅控制电路结构如图 2 所示。

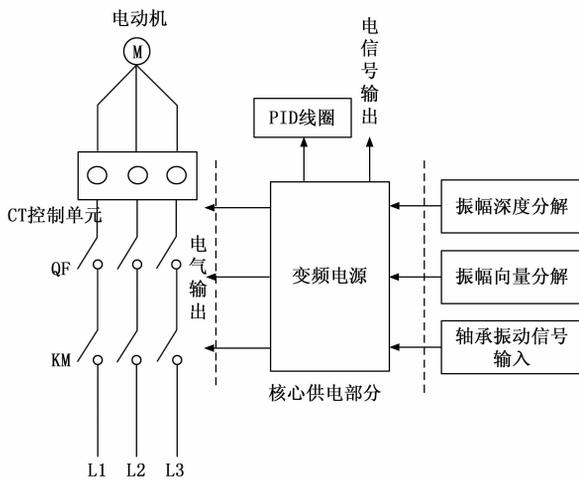


图 2 轴承振幅控制电路连接结构

PID 线圈具有独立运算的能力，当其接收到变频电源所输出的电力信号参量时，表示轴承部件的振幅深度与向量已发生明显变化^[8]，振动换能器谐振平面已经处于无法继续上升的行为状态，当前情况下，线圈组织会按照偏微分方程表达式对高速滚动轴承振动行为进行拆分处理，以确保系统主机可对轴承振动行为进行有效控制。

1.3 滚动速率计量装置

高速滚动轴承滚动速率计量装置是用于测量高速旋转时轴承部件实时滚动速率的专用设备，通常包括传感器、数据采集装置等多个应用部件，能够实时监测轴承的振动、转速等参数，并将所测的数据传输至系统计算机中进行处理和分析。详细的滚动速率计量装置结构模型如图 3 所示。

传感器是滚动速率计量装置的核心部件，它能够将高速滚动轴承的转动信号转换为电信号并进行传输。为适应高速滚动轴承的多样性行为特点，可以采用磁电传感器、光电传感器等设备作为传感部件单元，它们具有高稳定性、高精度、高灵敏度的运行特点，即便在连续

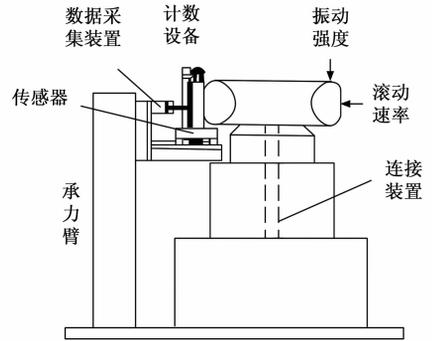


图 3 滚动速率计量装置结构模型

高速旋转的情况下，这些部件结构也可以准确地测量轴承的滚动速率。

数据采集装置负责接收传感器单元输出的电信号参量，并将其转换为数字信号，以便于系统主机对其进行处理^[9]。数据采集装置通常具有低噪声、高分辨率、高速采样等特点，在监测高速滚动轴承振动行为的过程中，利用这些部件结构可以确保测量结果的准确性和可靠性。

滚动速率计量装置可以同时获取振动强度与滚动速率信号，当这些数据信息在连接装置的作用下，传输至计数设备单元时，传感器设备、数据采集装置同时进入运行状态，一方面，可使控制系统主机准确监测到每一个细微的高速滚动轴承振动行为，另一方面，可以保证控制指令的有效执行。

2 基于偏微分方程的高速滚动轴承振动信号参数求解

在基于偏微分方程的高速滚动轴承振动控制系统设计研究中，振动信号参数的求解与振动控制系统密切相关。通过利用偏微分方程对振动信号进行分析和处理，可以提取出频率、幅值和相位等物理量，并将其作为输入传递给振动控制系统，从而实现对高速滚动轴承振动行为的准确控制。因此，为对高速滚动轴承振动信号的提取，在偏微分方程的基础上，对信号参量实施离散化处理，确定振动信号参数的取值范围。

2.1 偏微分方程表达式定义

2.1.1 偏微分界域设置

偏微分界域就是指依照偏微分界条件所定义的数据取值区域^[10]，对于高速滚动轴承振动控制系统而言，偏微分界域的设置涉及两个处理步骤：1) 构造标准试验解，利用轴承振动行为数据，将微分方程的试验解用两部分之和来表示。其中，第一部分满足统一的边界定义条件，但不包含可调节的参数；第二部分包含以权重、偏置值为基础的可调节参数，能够在前馈神经网络的配合下，构造不影响轴承振动行为数据偏微分表达式形

式的边界条件,使得系统主机对轴承振动行为的控制有效性得到保障。2) 构造偏微分损失函数,将试验解代入偏微分方程表达式中,得到具体的损失函数^[11-12]。设置偏微分界域的过程中,利用损失函数可使试验解实部、虚部同时达到较高的计算精度,而这也能够避免系统主机错误选取高速滚动轴承振动信号。

设 q_0 为高速滚动轴承振动行为数据的标准试验解, α_1 为实部参数, α_2 为虚部参数, β 为轴承振动行为数据的偏微分损失系数, \vec{W} 为数据样本的可调节特征, \vec{E} 为振动行为数据的分界向量, 联立上述物理量, 可将偏微分界域定义式表示为:

$$Q = \frac{q_0}{\alpha_1 \alpha_2} + \beta \left(\frac{1}{\vec{W}} \right)^2 \vec{E} \quad (1)$$

偏微分方程表达式作为控制系统提取高速滚动轴承振动信号的核心约束条件,其偏微分界域中必须包含大量的数据样本参量,且这些数据信息之间的数值关系应满足统一的损失函数定义式。

2.1.2 偏微分方程数值解计算

偏微分方程数值解就是高速滚动轴承振动行为数据在偏微分方程表达式中的运算结果,控制系统所提取的每一个振动信号,都符合偏微分方程表达式的数值定义条件。对于系统主机而言,其在控制高速滚动轴承振动行为时,在同一指令周期内有可能提取多种不同的数据样本,且这些数据参量所对应的振动表现行为也有所不同,这就表示即便在相同的偏微分界域之中,只要输入数据的取值不同,就必然求得不同的偏微分方程数值解^[13]。由于单一偏微分界域所能承载的数据样本数量相对有限,所以在计算偏微分方程数值解时,高速滚动轴承振动行为数据可输入对象的个数值也就不可能为无穷多个。

规定 e 为高速滚动轴承振动行为数据的输入值, r 为偏微分界域中输入数据与运算解之间的数值对应参数, ΔY 为高速滚动轴承振动行为数据的单位输入量, χ 为基于偏微分标准的高速滚动轴承振动行为数据取样系数。在上述物理量的支持下,联立公式 (1), 推导偏微分方程数值解计算式如下:

$$R = \frac{1}{(e-r)^2} \cdot \sqrt{\frac{\chi |\Delta Y|}{Q}} \quad (2)$$

控制系统依照偏微分方程表达式提取高速滚动轴承振动信号,不可避免地会出现数据样本重复取样的情况,所以偏微分方程数值解有可能出现相互覆盖的情况,但这种数值替代关系可以通过优化处理的方式来消除,而最常见的优化处理方式就是离散化处理^[14]。

2.2 轴承振动信号离散化

基于偏微分方程离散化处理高速滚动轴承振动信号,可以有效消除取样振动行为数据样本中的重复部

分,最大化保障控制系统所提取振动信号对象与偏微分方程数值解之间的一致性对应关系,避免非准确性控制行为的出现。所谓离散化,可以理解为在离散条件下对轴承振动信号所进行的重排处理,离散等级越高,控制系统所取样信号对象的分布间距就越大。高速滚动轴承振动控制系统所要求的离散化并不是偏微分界域内数据样本的完全离散化,而是只针对个别重复对象的指向性离散化处理^[15]。不同于区域性操作,指向性离散化意在对偏微分方程数值解进行赋值利用,将重复的振动信号作为命名对象,对其进行针对性赋值,再将该物理量代回原偏微分方程之中,以确保求得不同的运算结果^[16]。

对于高速滚动轴承振动信号偏微分方程离散化运算式的计算如下:

$$U = \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{[\gamma \dot{u} (i_{\max} - i_{\min})^2]}{\hat{y} \times R} \quad (3)$$

其中: \hat{y} 为高速滚动轴承振动信号的指向性取样特征, γ 为基于偏微分方程的振动信号数值解赋值系数, \dot{u} 为偏微分界域内数据样本的不完全离散值, i_{\max} 为重复振动信号离散化认证向量的最大取值, i_{\min} 为离散化认证向量的最小取值。

经过离散化处理后,控制系统所取样高速滚动轴承振动信号的重复部分被完全消除,偏微分方程表达式数值解与信号对象的一致性对应关系也就能够得到保障。

2.3 轴承振动信号参数求解

求解振动信号参数,就是根据偏微分方程表达式定义,计算频率、幅值、相位三项物理量,首先需要离散化处理后的轴承振动信号进行分析和处理,然后再进行集中运算。振动信号频率可用于对高速滚动轴承振动行为进行频谱分析,一个完整的频率周期内,至少包含一个极大幅值、一个极小幅值和一个规律的相位表现。幅值可以用来表示高速滚动轴承振动信号的振幅与强度,能够反映出振动行为的平均表现能力,对于控制系统而言,幅值还可以在在一定程度上表示轴承部件的磨损程度^[17]。相位表示高速滚动轴承振动信号在不同时间点的相对位置,不同相位条件下,振动信号的标值结果也会有所不同。

设 φ 为高速滚动轴承振动信号的行为频率, φ 为基于偏微分方程表达式所定义的轴承振动信号幅值, \tilde{O} 为单位控制周期内的振动信号初始相位标记值,联立公式 (3), 推导基于偏微分方程的高速滚动轴承振动信号参数求解表达式为:

$$I = \frac{\varphi \cdot U}{\sqrt{(\varphi \tilde{O})^2 + P^2}} \quad (4)$$

振动信号参数是一项全域性指标,其取值不但影响系统主机对高速滚动轴承振动行为的控制能力,还影响

取样信号在数值区间内的分布情况^[18]。因此，基于偏微分方程求解振动信号参数时，还要求频率、幅值、相位三项物理量必须属于同一行为区域，且每一项指标参数的取值都不应该等于其在该区间内的极限值。

3 高速滚动轴承振动行为的补偿性控制

为实现对高速滚动轴承振动行为的补偿性控制，基于轴承振动信号参数求解结果，建立前馈补偿控制器模型，并在此基础上，完善补偿控制算法，以实现控制向量的容错处理。

3.1 前馈补偿控制器设计

前馈补偿控制器的工作原理包括以下几个关键步骤：首先，控制器接收扰动或给定值的变化信号，并进行相应的补偿计算；其次，根据被控变量的数值变化规律，调节控制指令的执行强度，以消除外部扰动的影响；最后，在控制指令执行过程中持续监测被控变量的数值变化，随时更新控制器参数以实现系统主机的实时控制，从而提高系统的稳定性和性能表现^[19-20]。前馈补偿控制器的设计参考图 4 所示的原则。

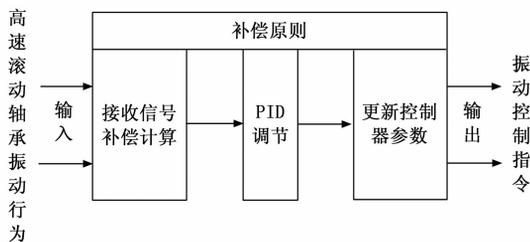


图 4 前馈补偿控制器设计原则

根据图 4 可将前馈补偿控制器作用表达式定义为：

$$u(t) = I[K_p \times e(t) + K_i \times \int e(\tau) d\tau + K_d \times dK_d/dt] \quad (5)$$

其中： K_p 、 K_i 和 K_d 分别为比例增益、积分时间常数和微分时间常数， $e(t)$ 为误差信号，是期望输出与实际输出之差， $u(t)$ 为输出信号， $e(\tau)$ 为 PID 控制器的传递函数。

只有在有输入信号的情况下，系统主机中才会生成控制指令，所以前馈补偿控制器模型对于高速滚动轴承振动行为的控制满足单一性调节原则。

3.2 轴承振动行为补偿控制

补偿控制是一种在控制系统中常用的策略，旨在改善控制指令的执行性能，从而在减小误差的同时，提高控制系统的稳定性水平与响应速度。基于偏微分方程的高速滚动轴承振动控制系统在补偿控制机制的作用下，引入额外的振动信号来补偿系统的扰动性缺陷，既保障了振动信号在控制系统中的传输完整性，也不会因前馈补偿控制器的不及时调节，而使控制指令的执行出现滞

后性^[21]。在补偿控制过程中，控制系统基于偏微分方程表达式对前馈补偿控制器模型进行二次调试，且完成调试后，振动信号可被直接加入系统主机之中。

设置 \bar{j} 为补偿控制条件下所定义的轴承振动信号对象， $F(\bar{j})$ 为针对参数 \bar{j} 的高速滚动轴承振动信号补偿运算函数， η 为控制系统对轴承振动信号的取样效率， \bar{h} 为振动信号的波长均值， λ 为补偿控制系数，联立公式 (5)，推导高速滚动轴承振动行为补偿控制表达式如下：

$$K = \left[1 + \frac{F(\bar{j})u(t)}{\eta} \right] - (\lambda\bar{h})^2 \quad (6)$$

为保障系统主机对高速滚动轴承振动行为的准确控制，在定义补偿控制算法时，还需要充分考虑振动信号的动态特性与稳定性需求，例如按照偏微分方程表达式进行控制行为建模，并根据具体计算值，制定执行指令，以避免控制向量容错处理结果出现偏差^[22]。

3.3 控制向量容错处理

容错处理的目的是消除控制向量的计算误差，从而最大化保障系统主机对高速滚动轴承振动行为的控制准确性。控制向量是一项矢量性指标，其取值大于零表示轴承部件在信号传输正方向上表现出振动行为；反之，若控制向量取值小于零，则表示轴承部件在信号传输反方向上表现出振动行为^[23]。针对控制向量的容错处理既要求控制信号取样方向与振动行为传输方向保持一致，也必须按照偏微分方程表达式对取样信号的容错能力进行计算。

设置 d_1 、 d_2 、 \dots 、 d_n 为基于偏微分方程所定义的 n 个不相等的振动行为控制向量（如果控制向量取值方向不一致，默认以更多向量指标所在方向为标准运算方向）， f 为标准容错系数， ΔT 为系统主机对高速滚动轴承振动行为的单位控制周期， A 为高速滚动轴承振动信号的行为能力定义值， μ 为控制指令执行阈值。在上述物理量的支持下，联立公式 (6)，可将控制向量容错处理表达式定义为：

$$G = f \times \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}{K \cdot \int \frac{|\Delta T|}{\mu \times A^{-1}}}} \quad (7)$$

至此，完成对相关参数指标的计算与处理，联合各级硬件应用结构，实现基于偏微分方程的高速滚动轴承振动控制系统设计。其具体控制过程如下：

- 1) 硬件模块单元搭建：安装滚动轴承振动传感器（振动换能器）、轴承振幅控制电路和滚动速率计量装置，确保它们能够正常工作并连接到控制系统。
- 2) 振动信号提取与处理：根据偏微分方程对振动信号参数进行离散化处理，确定取样范围，消除重复部分。对离散化处理后的振动信号进行分析，计算频率、幅值和相位等物理量。

3) 前馈补偿控制器建模: 设计并搭建前馈补偿控制器模型, 完善振动行为的补偿控制算法, 以提高控制指令的执行性能, 减小误差并提高系统稳定性。

4) 振动信号参数求解: 根据偏微分方程的定义, 计算振动信号的频率、幅值和相位等物理量, 通过集中运算实现。

5) 容错处理: 实施容错处理, 消除可能出现的控制向量计算误差, 确保系统准确控制高速滚动轴承振动行为。

通过以上过程, 可以实现对高速滚动轴承振动的控制, 提高控制系统的稳定性, 从而有效改善振动行为的控制效果。

4 实验分析与研究

选择基于偏微分方程的高速滚动轴承振动控制系统、基于干扰观测器的轴承振动控制系统、基于模糊 PID 的轴承振动控制系统 3 组不同的技术手段进行实验, 根据所应用系统对轴承谐振位移的控制能力, 判断其实用性价值。其中, 基于干扰观测器的轴承振动控制系统将 PD 控制与 DOB 相结合, 抵消扰动信号以确保系统稳定, 同时建立了转子系统动力学模型与干扰观测器, 实现振动控制。PD 控制器的 $K_p = 2$, $K_d = 1.5$, 干扰观测器的截止频率为 10 Hz。基于模糊 PID 的轴承振动控制系统将 PID 和模糊控制结合设计了模糊 PID 控制器, 实现振动控制, 其转子质量 $m = 0.1$, 摩擦阻尼 $c_f = 0.2$, 弹簧刚度 $k_s = 500$ 。

4.1 实验准备

将 6201-2Z 型号的金属密封滚动轴承放置在 980G-SKPB2 数控装置中, 进行振动控制实验。

闭合控制开关, 谐振器开始自主振动, 这种振动行为带动高速滚动轴承进行谐振, 其具体谐振波形如图 5 所示。

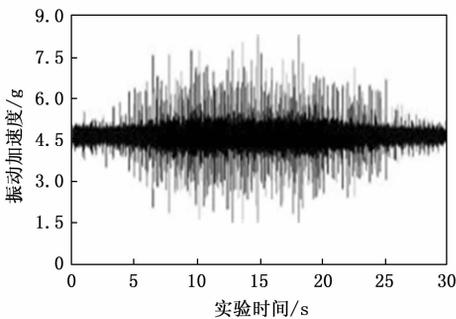


图 5 高速滚动轴承的振动波形

根据图 5 可知, 在 5~25 s 之间, 谐振器的振动行为相对较为稳定, 其所能提供的振动加速度水平也就相对较高, 第 15 s 时, 达到了最大值 8.75 g; 在 0~5 s 之间, 谐振器处于初始运行阶段, 其所能提供振动行为

很难保持稳定的数值状态, 故其所能提供的振动加速度水平也就相对较低; 25~30 s 之间, 谐振器处于即将结束运行的阶段, 其所能提供的振动行为也不能保持稳定状态, 故其所提供的振动加速度水平也较低, 在该时间阶段内, 振动加速度最大值仅能达到 5.5 g。

4.2 实验流程

本次实验的具体实施流程如下:

1) 如图 5 所示, 在振动波的作用下, 记录高速滚动轴承的谐振位移曲线, 如图 6 所示。

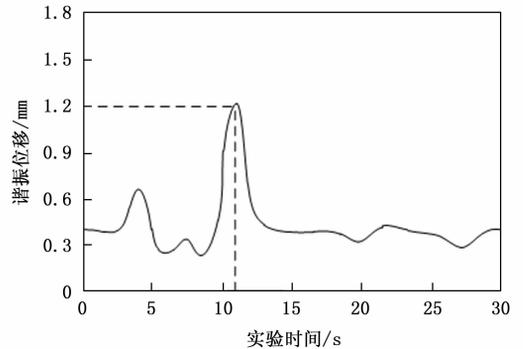


图 6 高速滚动轴承的谐振位移

根据图 6 可知, 在第 10~15 s 之间, 高速滚动轴承的谐振位移取得最大值为 1.2 mm, 其他实验时间内, 谐振位移保持波动, 整个实验过程中, 谐振位移最小值为 0.28 mm。

2) 分别应用基于偏微分方程的高速滚动轴承振动控制系统、基于干扰观测器的轴承振动控制系统、基于模糊 PID 的轴承振动控制系统对振动波下的轴承谐振位移进行控制, 记录控制处理后, 轴承谐振位移的数值变化情况, 所得实验结果分别为第一组、第二组、第三组变量。

3) 在不考虑其他干扰条件的情况下, 经不同控制系统作用后, 轴承谐振位移的实际数值水平越低, 就表示当前所应用系统对轴承振动行为的控制能力越强。

4.3 数据处理

振动行为是导致高速滚动轴承出现谐振位移的主要原因, 因此根据所应用系统对谐振位移数值的控制情况, 就可以判断出所应用系统对轴承振动行为的控制能力。

图 7 反映了经第一组、第二组、第三组系统的控制作用后, 高速滚动轴承谐振位移的具体数值变化情况。

对比图 6、图 7 可知, 在第一组、第二组、第三组控制系统作用下, 轴承谐振位移均出现了一定程度的下降。从极限值角度来看, 由于基于偏微分方程的高速滚动轴承振动控制系统通过搭建前馈补偿控制器模型, 完善了振动行为的补偿控制算法, 实现了对控制向量的容错处理和轴承振动行为的补偿性控制。这种控制策略可以有效地抑制谐振位移, 提高轴承的灵敏

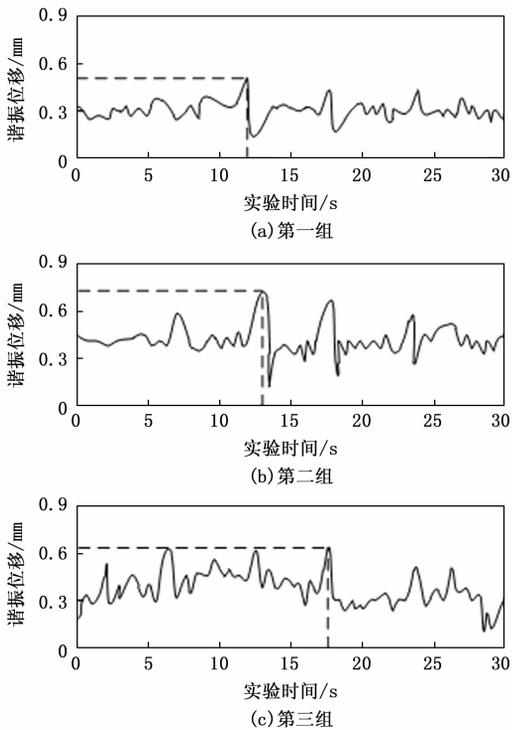


图7 轴承谐波位移对比

度，并改善机械元件的回转精度。因此，第一组最大值为 0.49 mm，低于第二组的最大值 0.74 mm 和第三组的最大值 0.63 mm。与图 6 所示的谐波位移最大值 1.20 mm 相比，分别下降了 0.71、0.46、0.57 mm。综上所述可知，基于干扰观测器的轴承振动控制系统、基于模糊 PID 的轴承振动控制系统的应用，虽然也可以对轴承谐波位移进行控制，但是对于高速滚动轴承来说，谐波位移偏大，相较于基于偏微分方程的高速滚动轴承振动控制系统，其控制能力相对较弱，这就表示该系统可以对高速滚动轴承振动行为进行有效控制，能够更好地保障机械元件的回转精度。

5 结束语

在基于偏微分方程的高速滚动轴承振动控制系统的设计过程中，深入探索了轴承振动的内在机制，并充分利用偏微分方程在描述物理现象中的独特优势。通过对高速滚动轴承的动态特性的精确建模，将复杂的振动问题转化为可求解的数学问题，而这也为控制系统的设计提供了坚实的理论基础。在实际控制系统的构建中，应注重理论与实践的结合，充分考虑系统的稳定性、响应速度和振动抑制效果等关键指标。在先进控制算法和优化技术的作用下，可以有效地抑制高速滚动轴承在运行过程中产生的振动，从而显著提高机械设备的运行效率和可靠性。随着科技的不断进步和工程应用的深入发展，基于偏微分方程的高速滚动轴承振动控制系统将在更广泛的领域发挥更大的作用，相关组织结构也可以在

此系统的基础上，致力于对相关技术进行推广与研究，从而为提升机械设备性能作出更大的贡献。

参考文献：

- [1] 丁东升, 刘永强, 杨绍普. 外圈滚道剥离故障对滚动轴承动力学响应的影响分析 [J]. 振动与冲击, 2022, 41 (8): 141-148.
- [2] 岳壮壮, 欧阳慧珉, 张广明, 等. 基于干扰观测器的磁轴承转子系统振动抑制 [J]. 计算机仿真, 2020, 37 (11): 255-259.
- [3] 刘云山. 基于模糊 PID 的三机驱动振动系统控制同步研究 [J]. 中国工程机械学报, 2023, 21 (4): 308-312.
- [4] 仝宇, 田中梁, 孙岩桦, 等. 基于模型参考自适应系统的电磁轴承支撑转子不平衡量辨识及振动抑制 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56 (4): 147-156.
- [5] 谢溪凌, 任明可, 黄修长, 等. 基于主动舵支撑的推进轴系横向振动抑制仿真与实验研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39 (15): 271-276.
- [6] 伊子旭, 莫喜平, 柴勇, 等. Janus-Helmholtz 换能器的弱辐射耦合机理与带宽特性 [J]. 声学学报, 2022, 47 (1): 69-75.
- [7] 郝勇, 刘尚宗, 吴文辉. 振动图像结合 CNN 的轴承振动信号分析方法研究 [J]. 机械科学与技术, 2022, 41 (12): 1943-1949.
- [8] 徐方超, 王政鑫, 赵川, 等. 磁-球轴承复合支撑电主轴振动特性分析 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (19): 275-282.
- [9] 杨路春, 胡迟, 高阳, 等. 基于多目标优化和多属性决策的数据采集装置总体优化设计 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43 (1): 164-169.
- [10] 张凤山, 杨祖豪, 邹永魁. 带跳随机偏微分方程分裂算法收敛性研究 [J]. 计算数学, 2023, 45 (4): 401-414.
- [11] 李远飞, 肖胜中, 石金诚. 一类偏微分方程在半无穷区域上的空间渐近性质 [J]. 四川师范大学学报 (自然科学版), 2022, 45 (2): 195-201.
- [12] 郭晓斌, 袁冬芳, 曹富军. 基于深度神经网络的复杂区域偏微分方程求解 [J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48 (6): 149-157.
- [13] 余荣玉, 吴华. 五阶偏微分方程的时空谱方法 [J]. 高等学校计算数学学报, 2022, 44 (2): 159-174.
- [14] 陈永堂, 王琦. 带 Neumann 边界条件的延迟泛函偏微分方程线性 θ -方法的稳定性 (英文) [J]. 应用数学, 2022, 35 (1): 137-146.
- [15] 仓敏, 王静怡, 吴霜, 等. 基于聚类离散化的 Dep-Miner 函数依赖发现方法 [J]. 南京理工大学学报, 2023, 47 (3): 318-329.
- [16] 刘晓悦, 项心茹, 康健, 等. 基于动态元件离散化的柔性直流电网故障电流计算方法 [J]. 科学技术与工程,

2022, 22 (34): 15171 - 15179.

- [17] 沙云东, 赵宇, 栾孝驰, 等. 基于多参数信息融合筛选的滚动轴承振动信号特征提取与表征方法 [J]. 推进技术, 2023, 44 (7): 243 - 253.
- [18] 韩春红, 伊洪彬, 薛涛, 等. 基于 LE-DBN 故障诊断模型的滚动轴承振动信号特征提取 [J]. 机械设计与研究, 2023, 39 (3): 131 - 134.
- [19] 杨亮亮, 张晖, 张华, 等. 执行器约束下基于数据驱动的参数化前馈控制器设计 [J]. 控制理论与应用, 2022, 39 (9): 1733 - 1744.
- [20] 苑磊, 何仁. 泰勒级数前馈迟滞补偿电液复合 ABS

滑移率控制 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2023, 44 (1): 29 - 36.

- [21] 张正道, 杨佳佳, 谢林柏. 基于辅助信息补偿和控制信号编码的重放攻击检测方法 [J]. 自动化学报, 2023, 49 (7): 1508 - 1518.
- [22] 曾小莉, 王维庆, 王海云. 基于新型电压控制律的永磁同步电机滑模补偿控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (10): 153 - 162.
- [23] 刘广轩, 黄山, 胡佳丽, 等. 面向 Flink 流处理框架的主动备份容错优化 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2022, 56 (2): 297 - 305.

(上接第 23 页)

序网络, 能够捕捉时序中的故障特征, 进一步挖掘时间序列中的特征信息, 从而实现故障的提前判断。在此基础上, 进一步引入 CBAM 注意力模块, 形成了一种能关注输入特征重要性的机制, 有效地增强了磨煤机在不同工况下典型故障样本的特征, 提升了模型的分类效果。仿真结果验证了新算法在磨煤机故障分类上的优越性, 与 GRU, TCN 和 GRU-TCN 这 3 种分类方法相比, 它不仅提高了故障分类的准确性, 减少了误报, 而且实现了故障的早期预警。

参考文献:

- [1] 樊帅, 肖军. 锅炉制粉系统故障诊断方法 [J]. 热力发电, 2015, 44 (2): 13 - 17.
- [2] AGRAWAL V, PANIGRAHI B K, SUBBARAO P M V. Intelligent decision support system for detection and root cause analysis of faults in coal mills [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2017, 25 (4): 934 - 944.
- [3] 安吉振, 乔世超, 陈衡, 等. 基于多元状态估计和向量相似度的电站磨煤机故障智能预警研究 [J]. 热力发电, 2022, 51 (12): 64 - 71.
- [4] 张焯, 黄伟. 基于天牛群算法优化 SVM 的磨煤机故障诊断 [J]. 机电工程, 2022, 39 (3): 411 - 418.
- [5] ZHANG H, PAN C, WANG Y, et al. Fault diagnosis of coal mill based on kernel extreme learning machine with variational model feature extraction [J]. Energies, 2022, 15 (15): 5385.
- [6] 张进. 基于回声状态网络的磨煤机故障预警 [J]. 发电设备, 2021, 35 (01): 53 - 57.
- [7] HU Y, PING B Y, ZENG D L, et al. Research on fault diagnosis of coal mill system based on the simulated typical fault samples [J]. Measurement, 2020, 161: 107864.
- [8] 曾德良, 崔泽朋, 田亮, 等. 基于灰色关联和 D-S 组合规则的磨煤机故障诊断 [J]. 动力工程, 2007, 27 (2): 207 - 210.
- [9] HAN X J, JIANG X. Fault diagnosis of pulverizing system

based on fuzzy decision-making fusion method [J]. DBLP, 2009: 1045 - 1056.

- [10] 刘定平, 叶向荣, 陈斌源, 等. 基于核主元分析和最小二乘支持向量机的中速磨煤机故障诊断 [J]. 动力工程, 2009, 29 (2): 155 - 158.
- [11] 钱虹, 张现涛. 基于 PCA-FINCH 的磨煤机故障诊断方法 [J]. 热力发电, 2023, 52 (9): 147 - 154.
- [12] 袁存波, 田亮. 基于改进证据理论的中速磨煤机故障诊断 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2022, 49 (6): 84 - 91.
- [13] HU Y, PING B Y, ZENG D L, et al. Modeling of coal mill system used for fault simulation [J]. Energies, 2020, 13 (7): 1784.
- [14] WANG K, LI K, DU F, et al. Research on prediction model of coal spontaneous combustion temperature based on SSA-CNN. Energy, 2024, 290: 130158.
- [15] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. Neural Computation, 1997, 9 (8): 1735 - 1780.
- [16] ZHANG J, ZHANG M, FENG Z, et al. Gated recurrent unit-enhanced deep convolutional neural network for real-time industrial process fault diagnosis [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023: 175: 129 - 149.
- [17] GUO Q, ZHANG X, LI J, et al. Fault diagnosis of modular multilevel converter based on adaptive chirp mode decomposition and temporal convolutional network [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 107: 104544.
- [18] QU J, SUN Q, QIAN Z, et al. Fault diagnosis for PV arrays considering dust impact based on transformed graphical features of characteristic curves and convolutional neural network with CBAM modules [J]. Applied Energy, 2024; 355: 122252.
- [19] 孙栓柱, 江叶峰, 董顺, 等. 基于灰箱模型的中速磨煤机故障诊断方法 [J]. 动力工程学报, 2018, 38 (3): 211 - 220.
- [20] 焦嵩鸣. 基于融合相似度的制粉系统健康预警及故障诊断 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30 (2): 595 - 604.