

超重力模拟试验离心机振动特性的回归分析

王震林, 陈良军, 吕磊, 杨永生

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: **目的** 研究试验离心机轴承座以及主轴振动随运行工况的变化规律, 实现不同工况下离心机振动的预测。**方法** 通过试验方法分别获取不同工况下超重力模拟试验离心机的轴承座以及轴振数据。建立试验离心机的单自由度动力学模型, 基于该模型, 对不同工况下离心机基座振动加速度以及主轴振动位移进行回归分析。**结果** 离心机轴承座以及主轴振动基频均随着转速以及不平衡量的增大而增大。回归模型对轴承座以及机室基频振动数据的回归决定系数均在 0.9 以上, 对中导以及上导主轴振动位移的回归决定系数在 0.7 左右, 对下导主轴振动位移决定系数小于 0.1。**结论** 回归模型可以很好地解释和预测轴承座以及机室振动基频随着转速和不平衡量的变化规律, 可以部分预测中导以及上导处主轴振动位移随运行工况的变化。该分析结果为大型试验离心机振动监测系统的设计以及振动特性的预测提供了参考。

关键词: 土工离心机; 回归分析; 相关性分析; 参数辨识

中图分类号: TU62 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2023)01-0104-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.01.015

Regression Analysis on Vibration Characteristics of Supergravity Environmental Simulation Centrifuge

WANG Zhen-lin, CHEN Liang-jun, LYU Lei, YANG Yong-sheng

(System Engineering Institution, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621000, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the change law of vibration on the bearing housing and the shaft of centrifuges with operation conditions and achieve better prediction of centrifuge vibration under various operation conditions. The vibration data on the bearing housing and the shaft of a centrifuge under various operation conditions were obtained through experiments. The one-degree mathematical model for the centrifuge was established and regression analysis on vibration acceleration and shaft vibration displacement of the centrifuge was conducted based on the proposed model. The experiment results indicated that the fundamental harmonic component of bearing housing vibration rose with the increase of the unbalance and rotating speed. The determination coefficients between the proposed model and the obtained experimental data of bearing housing and pedestal were above 0.9. The determination coefficients of the shaft deflection measured at upper bearing and middle bearing were around 0.7 while it was below 0.1 for the shaft deflection measured at lower bearing. It can be concluded that the proposed regression model provide good explanations and predictions for the vibration of the bearing housing and pedestal and proper approxima-

收稿日期: 2021-09-21; 修订日期: 2021-12-09

Received: 2021-09-21; Revised: 2021-12-09

基金项目: 中国工程物理研究院创新发展基金 (PY20210053)

Fund: Innovation and Development Fund of China Academy of Engineering Physics (PY20210053)

作者简介: 王震林 (1989—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为离心机振动监测及故障诊断。

Biography: WANG Zhen-lin (1989-), Male, Doctor, Engineer, Research focus: vibration monitoring and fatigue diagnose of centrifuge.

引文格式: 王震林, 陈良军, 吕磊, 等. 超重力模拟试验离心机振动特性的回归分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(1): 104-111.

WANG Zhen-lin, CHEN Liang-jun, LYU Lei, et al. Regression Analysis on Vibration Characteristics of Supergravity Environmental Simulation Centrifuge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(1): 104-111.

tions for the deflection of the shaft under various operation condition. The analysis results provide references for the design of the vibration monitor system and the vibration prediction of the large experimental centrifuges.

KEY WORDS: geotechnical centrifuge; regression analysis; correlation analysis; parameter identification

离心机是利用离心力的一种通用机械设备,被广泛用于食品、医药、轻工业以及化工等领域^[1-2]。超重力环境模拟装置主要是指用于科研人员开展科学研究、试验检测的特种科学试验用离心机^[3],属于大型科学试验仪器。典型超重力环境模拟装置包括航空航天领域用于飞行器过载环境模拟的例行离心机^[4]、交通水利行业模拟塑性体时效性的土工离心机^[5]以及计量领域校验传感器的精密离心机等^[6]。近年来,随着我国新一代战斗机以及载人机的逐步服役,航空人用超重力模拟装置在训练和选拔飞行员方面的应用前景也得到广泛重视^[7-8]。另一方面,将离心机与振动台设备结合起来,开展缩模地震模拟,对于大型、超大型建筑物设计有着重要意义^[9]。可以预见,超重力模拟装置在土工模拟以及航空航天领域仍然具有相当大的发展潜力^[10]。

超重力模拟装置可以有效还原缩比模型与原型之间的应力-应变状态,从而产生显著的缩时效应,目前被国际公认为是岩土地震工程和土动力学最先进、最有效的科学试验平台^[11-12]。离心机的工作转速不断攀升,规模和设计容量也突破新高。这为超重力模拟装置的发展带来了重要的契机同时,也带来了一系列前所未有的设计挑战。大直径、高线速度动密封,高速非对称转子的临界转速,带间隙转子的轴系稳定性以及高速钝头体的产热机理^[13]等科学问题一直制约着大型离心装置的研制。因此,研究大型超重力环境模拟装置的动力学特性可以有效推动大型离心装置的研制,突破设计瓶颈,并提升设备性能^[14-15],对同类设备的运行状态监测,以及故障诊断更提供了重要的参考^[16]。

围绕大型超重力模拟试验用离心机的关键技术、运行安全与长期稳定性问题,国内众多高校以及研究机构开展了大量的研究工作,取得了一系列成果^[17]。鄂林仲阳等^[18]通过 SIMO 识别方法获得了离心机在振动-离心复合环境下的模态参数,为离心机-机载设备的整体结构设计优化提供了参考。郝雨等^[19]针对传统解析方法计算离心机风阻过于依赖试验数据、参数选择主观性较强等问题,基于多参考坐标系(MFR)的 CFD 方法,很好地解决了中低转速土工离心机稳态运行的风阻计算问题。郝泽睿^[20]对超重力离心机模型的前处理方法以及关键连接部位的约束关系开展了详细的研究,为离心机的临界转速计算提供了更为可靠的边界条件。陈学前等^[21]针对离心机中陀螺力矩

效应,以及预应力刚化效应对结构固有频率有较大影响的问题,通过理论方法推导了预应力效应,以及陀螺效应与结构固有频率之间的关系,并与试验数据进行了对比验证,为离心机的临界转速计算问题提供了一种可行方案。浙江大学陈建阳^[22]针对高真空度环境下高速土工离心机试验舱室的温控问题,探究了高速离心机的产热机理,以及高真空度环境下可行的散热模式,从而为大型土工离心机的温控设计提供了理论支撑。郭轶楠等^[23]为了解决试验离心机风阻试验数据缺乏的问题,基于 k - ω SST 湍流模型和 MFR 实现了对离心机风阻较高精度的模拟计算,有效地减少了离心机风阻计算时对试验数据的依赖。Aleksandrov^[24]基于径向平均方法,获得了气体离心机同位素分离效率上限与外部参数的显示表达式,该方法相较经典的迪拉克估计有着更高的精度。针对载人离心机无法完全真实地模拟飞行器在机动动作时的过载环境这一问题,Vladimir 等^[25]基于递归牛顿-欧拉方法实现了载人离心机座舱动力学的反解,从而有效提高了载人离心机运动控制的精度。为了解决载人离心机结构设计以及控制系统开发缺乏实践指导、开发效率低的问题,Mohajer 等^[26]提出了一种将运动学与动力学结合的系统设计框架,从而满足了飞行员的训练需求。Lee^[27]针对小型轻载离心机转子系统在高速下的稳定性问题开展了动力学建模及研究,其分析结果表明,轴承的交叉刚度对于转子的稳定性有着显著的影响,轻载状态下适当增加预载可以提高离心机转子系统在高速下的稳定性。本文针对离心机不同工况下基频振动的变化规律,建立了离心机单自由度动力学模型,通过回归分析方法研究转速以及不平衡量对离心机轴承座振动加速度以及主轴振动位移的影响,并对比了不同位置测点分析结果的异同。

1 试验离心机及测试系统简介

超重力模拟试验离心机(以下简称试验机)的主体结构如图1所示。该离心机属于立式转子,径向方向有3个轴承支承,转臂位于上导和中导轴承之间。中导轴承和下导轴承之间有一止推轴承,主轴通过磨片联轴器与下侧电机相连接。试验离心机的等效回转半径为1 m,最高设计转速为1 337 r/min,等效离心载荷为2 000 g。转臂的质量 M_r , 过直径转动惯量 J_x 、 J_y , 以及转动惯量 J_p 见表1。

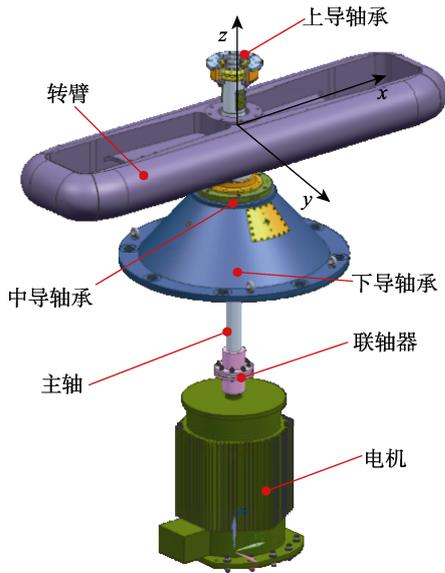


图1 试验离心机结构
Fig.1 Schematic diagram for structure of experimental centrifuge

表1 转臂的主要几何参数
Tab.1 Main geometrical parameters of arm rotor

参数	M_r/kg	$J_x/(kg \cdot m^2)$	$J_y/(kg \cdot m^2)$	$J_p/(kg \cdot m^2)$
值	1678	84.72	839.3	909.2

对于旋转机械,通常通过测试主轴的位移信号以及轴承座的加速度信号来评估设备的运行状态^[28]。为了评估不同类型的测试信号对试验机运行工况的敏感程度,分别在上导轴承座下方安装5#、6#位移传感器,在中导轴承座上方安装7#、8#位移传感器,在下导轴承座下方安装9#、10#位移传感器,用来完整监测主轴的振动情况,每个测试平面2个位移传感器正交90°安装。在各个导轴承座以及机室底部安装三向加速度传感器,其中1#、2#、3#传感器分别安装在上导、中导以及下导轴承座,用来测试轴承座的振动加速度,4#传感器安装在机室底部,测量机室的振动加速度。试验通过在转臂上安装不同大小的质量块来调整设备的运行状态。位移信号、加速度信号以及电机输出的转速信号通过数据采集系统统一处理,最终传输给分析系统,如图2所示。试验中使用的传感器型号、主要参数以及测试内容分别见表2和表3。

驱动部分采用永磁同步电机,并配合西门子S120型交流变频器进行转速闭环控制。驱动电机、数采设备以及中控计算机型号见表4。

2 振动回归模型

为了方便分析,将离心机主轴以及支承系统简化为弹簧-质点系统,离心机承受的载荷主要来自转臂上的不平衡质量。假设转臂上的不平衡质量为 M_u ,则系统所承受的不平衡载荷可以表示为:

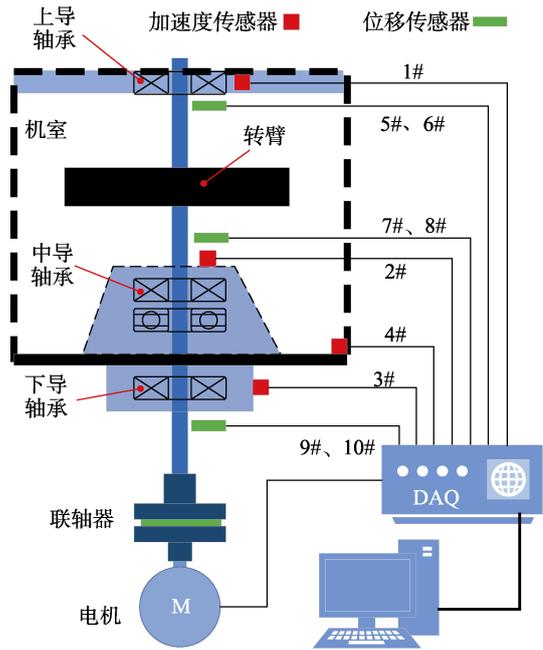


图2 离心机振动测试系统
Fig.2 Schematic diagram for vibration monitoring system of centrifuge

表2 测试用传感器参数
Tab.2 Parameter of test sensors

品牌	型号	精度	量程
Bently	3300XL	0.5% FS	±1 mm
PCB	3713F002G	1% FS	±2g

表3 传感器类型及位置
Tab.3 Types and locations of sensors

编号	测试信号类型	布置位置
1#	加速度	上导轴承座
2#	加速度	中导轴承座
3#	加速度	下导轴承座
4#	加速度	机室
5#、6#	位移	上导轴承座
7#、8#	位移	中导轴承座
9#、10#	位移	下导轴承座

表4 驱动及采集系统参数
Tab.4 Parameters of the drive and acquisition system

类型	参数	类型	参数
电机型号	TYDS052-42	数采设备型号	NI-CRIO-9048
额定电压	380 V	采集卡型号	NI-9239
额定转速	1 700 r/min	计算机型号	研华 EPC-P3066
电机额定电流	405 A	数据采集平台	LabVIEW 2017

$$F(t) = F_A e^{i\omega t} = M_u \omega^2 r e^{i\omega t} = G \omega^2 e^{i\omega t} \quad (1)$$

式中: F_A 为不平衡载荷的幅值; ω 为转动角频率; M_u 为不平衡质量; r 为不平衡质量的回转半径; G 为不平衡量, $G=M_u r$ 。考虑有阻尼的单质点系统,其运动微分方程可以表示为^[29]:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_A e^{i\omega t} \quad (2)$$

式中: M 、 K 、 C 分别为单质点系统的质量、刚度以及阻尼矩阵。式 (2) 是二阶非其次常微分方程, 其通解为该方程的一个特解与相应其次方程的通解之和, 可以表示为:

$$x = x_A e^{i\omega t} + x_B e^{-i\zeta\omega_n t} e^{i\omega(t+t_0)} \quad (3)$$

式 (3) 中第二项表示质点以固有频率 ω_n 自由振动, 由于阻尼 ζ 的作用, 该部分振幅将随时间逐渐衰减。第一项反映质点在不平衡力作用下的受迫振动, x_A 即是质点受迫振动的稳态振幅。考虑作简谐运动的单自由度线性系统, 有:

$$\dot{x} = i\omega x_A e^{i\omega t}, \quad \ddot{x} = -\omega^2 x_A e^{i\omega t} = A e^{i\omega t} \quad (4)$$

将式 (3)、(4) 代入到式 (2) 中, 消除两边的同类项, 可以得到带阻尼单质点系统的稳态振幅为:

$$x_A = \frac{F_A}{-M\omega^2 + i\omega C + K} = \frac{G\omega^2}{H(\omega)} \quad (5)$$

从式 (5) 可以看出, 单质点系统的振动位移、速度以及加速度均与不平衡质量成正比, 而与转速 ω 有着复杂的非线性关系。式中, $H(\omega)$ 为表征子结构刚度、阻尼以及质量属性的复阻抗。 x_A 是复空间上的矢量, 其模长可以表示为:

$$|x_A| = \frac{M_u \omega^2 R}{M \sqrt{(a^2 - \omega^2)^2 + 4a^2 b^2 \omega^2}} \quad (6)$$

其中:

$$a = \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad b = \frac{C}{2\sqrt{KM}} \quad (7)$$

式中: a 为弹簧质量系统的固有频率; b 为阻尼比。假设测试系统存在系统噪声 c , 则式 (6) 中的回归模型可以改写为:

$$|x_A| = \frac{M_u \omega^2 R}{M \sqrt{(a^2 - \omega^2)^2 + b^2 \omega^2}} + c \quad (8)$$

式 (8) 是振动位移的回归模型。对于振动加速度, 根据式 (4), 其幅值可以表示为:

$$|A| = \frac{M_u \omega^4 R}{M \sqrt{(a^2 - \omega^2)^2 + 4a^2 b^2 \omega^2}} + c \quad (9)$$

为了评估式 (8) 给出的回归模型与试验数据的符合程度, 采用无量纲系数 R^2 、 D_m 评估回归模型的质量。其中 R^2 为模型回归的决定系数, 表征参数模型对数据 x 的解释能力, 计算过程为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (x_i - x_i')^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

式中: x_i 为试验数据; x_i' 为模型预测值; \bar{x} 为试验数据的均值。 D_m 为预测值相对试验值的最大偏差, 定义为:

$$D_m = \max \left| \frac{x_i - x_i'}{x_i} \right| \quad (11)$$

3 分析结果

3.1 不同不平衡量下的分析结果

将旋转部件以及支承系统看作是一个刚性质点, 则 x_A 代表该系统的振动幅值, H 为质点与地面的机械阻抗。从式 (5) 可以看出, x_A 与不平衡量成正比, 不同不平衡量上导 (1#传感器)、中导 (2#传感器)、下轴承座位置 (3#传感器) 以及机室 (4#传感器) 的振动加速度基频测试结果以及拟合曲线如图 3 所示。具体回归分析以及评价参数结果见表 5, 其中下

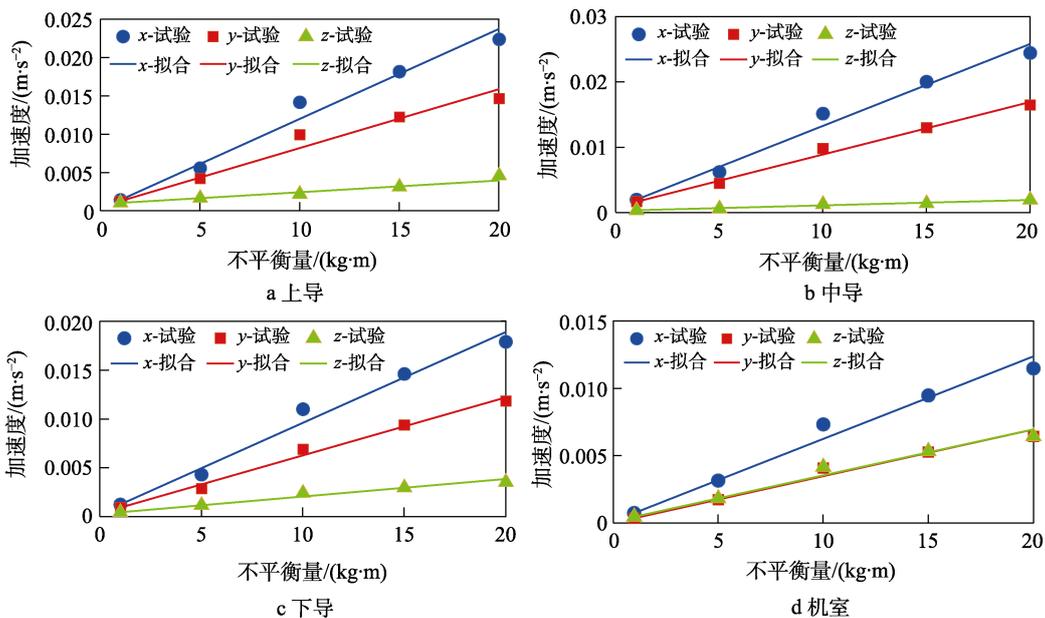


图 3 振动加速度基频幅值-不平衡量曲线

Fig.3 Vibration acceleration amplitude-unbalance: a) upper bearing pedestal; b) middle bearing pedestal; c) lower bearing pedestal; d) engine room bearing pedestal

表5 基座振动加速度幅值-不平衡量的回归分析结果
Tab.5 Regression analysis result of vibration acceleration amplitude of pedestal to unbalance

系数	$D_m/\%$	R^2	$ H /(\text{MN}\cdot\text{m}^{-1})$	$c/(10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2})$
A_{1x}	9.7	0.977	0.834	2.44
A_{1y}	11.9	0.963	1.27	4.97
A_{1z}	13.7	0.941	6.37	8.81
A_{2x}	7.72	0.982	0.780	6.75
A_{2y}	5.74	0.991	1.22	8.09
A_{2z}	8.29	0.969	11.8	2.19
A_{3x}	7.78	0.982	1.05	2.85
A_{3y}	5.33	0.991	1.65	2.99
A_{3z}	9.93	0.966	5.46	2.34
A_{4x}	9.36	0.975	1.60	1.14
A_{4y}	9.43	0.974	2.83	0.484
A_{4z}	9.61	0.973	2.87	1.08

标1、2、3、4分别表示1#、2#、3#、4#传感器的测试结果， x 、 y 、 z 分别指代振动在绝对坐标系 $OXYZ$ 下3个坐标轴方向的分量。

从结果可以看出，3个轴承座以及机室振动加速度幅值与不平衡量间存在显著的线性关系，回归决定系数均在0.94以上，表明回归模型是有效的。对比表5中数据可以看出，在上导、中导、下导轴承座以及机室位置， z 向振动加速度幅值关于式(5)的回归决定系数均是最小的，回归模型与实测数据的偏差率 D_m 也是最大的。表明相比 x 和 y 方向， z 向振动与不平衡力的线性关系最弱。4个测点位置 x 方向的振动幅值均大于 y 方向的振动幅值，回归模型识别参数识别结果也显示，4个测点 y 向阻抗要显著大于 x 向，该差异主要是由于混凝土基座上的电机口开在 x 方向所致。对比4个测点的识别结果可以看出，1#、2#、3#测点识别的 x 、 y 方向上的阻抗要小于4#测点，这是由于1#、2#、3#测点均是在轴承座附近，其刚度受到基座刚度以及轴承座连接刚度的共同影响，因此整体刚度要小于基座刚度。

上导(5#、6#测点)、中导(7#、8#测点)以及下导(9#、10#测点)径向轴承附近主轴振动位移在不同不平衡量下的回归模型与试验结果的对比曲线如图4所示。主轴位移关于不平衡量的回归分析结果见表6。由于存在轴承游隙，在不平衡量为0的情况下也存在着振动位移 b 。从结果可以看出，上导以及中导处主轴振动位移与不平衡量之间存在线性关系，回归决定系数为0.58~0.75，表明二者线性关系并不显著。下导处主轴振动位移与不平衡量的回归决定系数小于0.1。进一步进行相关性分析后得到，下导 x 、 y 方向振动位移与不平衡量之间的相关性系数仅为0.16和0.24，表明二者之间不存在线性关系。

3.2 不同转速下的分析结果

根据式(9)中的给出的预测模型，将旋转部件

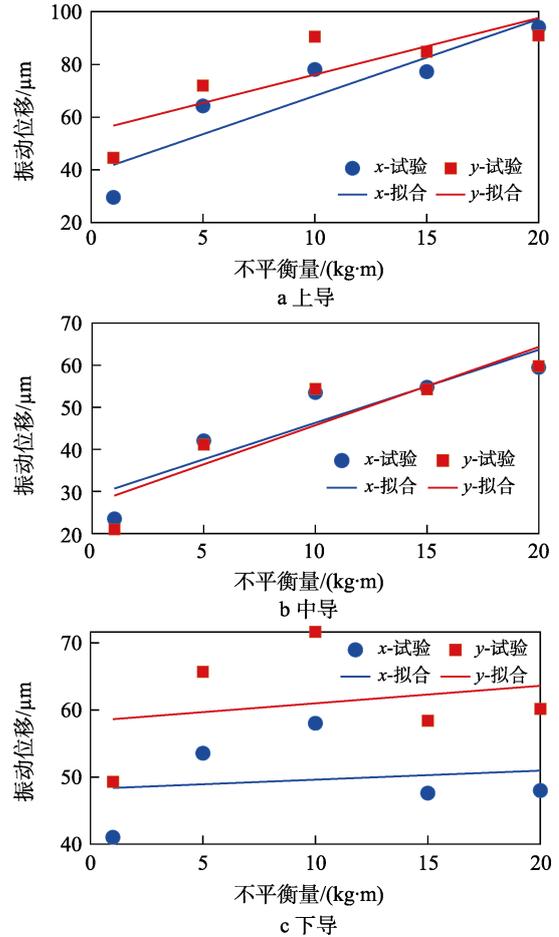


图4 主轴不同位置处振动位移-不平衡量曲线
Fig.4 Shaft deflection-unbalance curve at different positions of main shaft: a) upper bearing pedestal; b) middle bearing pedestal; lower bearing pedestal

表6 主轴振动位移-不平衡量的回归分析结果
Tab.6 Regression analysis results of the shaft deflection-unbalance

系数	$D_m/\%$	R^2	$H/(10^8 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1})$	$b/\mu\text{m}$
x_1	27.6	0.686	6.84	53.5
y_1	24.5	0.576	7.62	65.5
x_2	22.6	0.749	7.70	35.7
y_2	24.9	0.726	7.48	34.6
x_3	14.5	0.026	72.1	48.2
y_3	14.9	0.057	37.4	58.4

及机室看作是一个刚性质点，则回归参数 a 、 b 分别代表离心机整体平动的固有频率以及阻尼比。上导(1#测点)、中导(2#测点)、下导轴承座(3#测点)以及机室(4#测点)在不同转速下，振动加速度基频分量的回归模型拟合结果与试验数据的对比曲线如图5所示，具体的分析结果见表7。从结果可以看出，回归曲线与实际测试结果最大拟合偏差为11%，模型回归决定系数均在0.95以上，回归模型是有效的。对比各个测点的结果可以看出， x 方向的振动幅值均要大于 y 向。回归分析结果也显示，4个测点处离心机

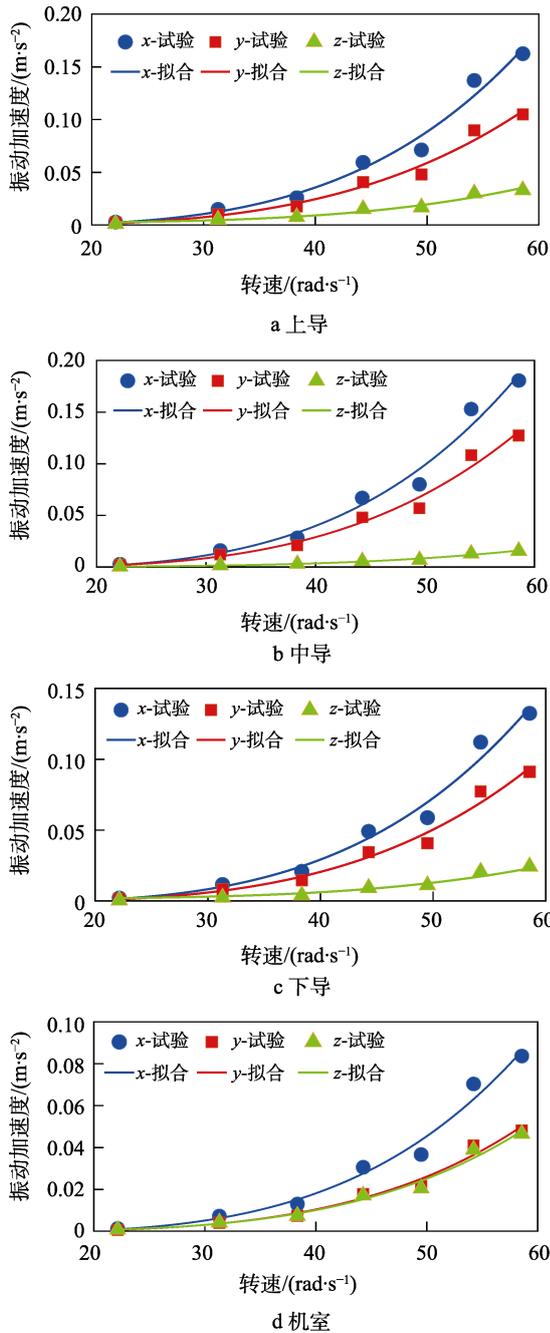


图 5 振动加速度基频-转速曲线

Fig.5 Vibration fundamental harmonic component-rotating speed: a) upper bearing pedestal; b) middle bearing pedestal; c) lower bearing pedestal; d) engine room bearing pedestal

x 方向整体平动的固有频率均要小于 y 方向, 与前面分析结果一致。

相同的, 以旋转部件为分析对象, 则回归参数 a 、 b 分别代表主轴的固有频率以及阻尼比。上导 (5#、6#测点)、中导 (7#、8#测点) 以及下导 (9#、10#测点) 径向轴承附近主轴振动位移在不同转速下的回归模型与试验结果的对比曲线如图 6 所示, 主轴位移关于转速的回归参数见表 8。从结果可以看出, 3 个位置主轴的振动位移与转速均呈正相关。利用式 (9) 模型进行回归分析时可以得出, 上导和中导位置振动

表 7 底座振动加速度-转速的回归分析结果
Tab.7 Regression analysis results of pedestal vibration acceleration-rotating speed

系数	$D_m/\%$	R^2	$a/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	b	$c/(10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2})$
A_{1x}	9.23	0.979	146	0.450	2.19
A_{1y}	9.65	0.977	185	0.161	1.40
A_{1z}	11.09	0.965	320	0.482	19.3
A_{2x}	9.38	0.979	140	0.185	3.95
A_{2y}	9.68	0.978	170	0.147	1.39
A_{2z}	9.02	0.980	465	0.138	1.89
A_{3x}	9.58	0.979	167	0.146	7.09
A_{3y}	9.31	0.979	197	0.159	4.62
A_{3z}	8.83	0.980	370	0.148	6.66
A_{4x}	9.07	0.980	205	0.223	-2.58
A_{4y}	9.15	0.980	264	0.221	-3.28
A_{4z}	8.61	0.980	270	0.191	-1.63

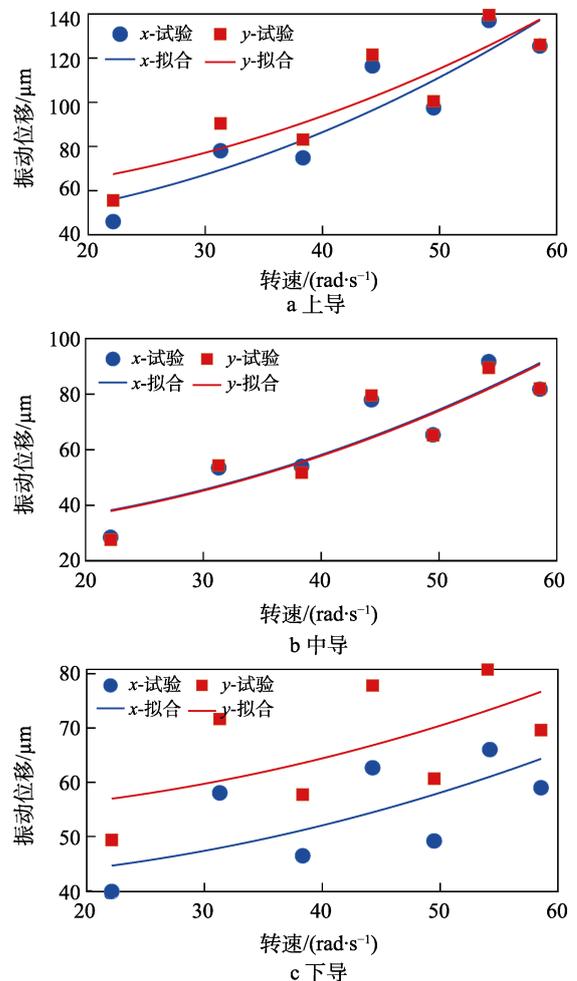


图 6 主轴振动位移-转速曲线

Fig.6 Shaft deflection-rotating speed curve: a) upper bearing pedestal; b) middle bearing pedestal; c) lower bearing pedestal

位移的回归决定系数为 0.76~0.82, 表明单质点模型大体反映了上导和中导振动位移与转速间的关系, 但显著性并不强, 拟合最大偏差在 13%~17%。下导振

表8 主轴位移-转速的回归分析结果
Tab.8 Regression analysis results of shaft deflection-rotating speed

系数	$D_m/\%$	R^2	$a/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	$c/\mu\text{m}$
x_1	14.6	0.821	495	42.7
y_1	13.8	0.760	533	56.0
x_2	14.6	0.796	611	29.4
y_2	17.1	0.781	612	29.2
x_3	13.6	0.383	1099	43.6
y_3	13.7	0.311	1058	55.1

动位移的回归决定系数在仅为 0.31 和 0.38, 表明单质点模型几乎不能反映下导振动位移随转速的变化情况。

4 结论

本文基于单自由度动力学模型, 采用回归分析的方法研究了不同转速以及不同不平衡质量下离心机振动特性的变化规律, 得到了以下结论:

1) 3 个轴承座以及机室振动加速度幅值与不平衡量间存在显著的线性关系, 与转速的关系是非线性的, 加速度幅值随着不平衡质量的线性增大, 随着转速的升高加速增大。

2) 单自由度模型对各个轴承座以及机室振动加速度数据的回归决定系数均在 0.94 以上, 表明该模型可以很好地解释和预测轴承座以及机室振动加速度随着转速和不平衡量的变化规律。

3) 上导、中导处主轴振动位移均与不平衡量及转速呈正相关, 上导及中导处主轴振动位移的回归决定系数为 0.76~0.82, 表明主轴振动位移与单自由度模型吻合程度相对较差, 无法准确地辨识不平衡量。下导处主轴振动位移与不平衡量的回归系数小于 0.1, 表明下导处主轴振动位移与不平衡量的相关性系数较小, 即该处主轴振动位移受不平衡力影响较小。

参考文献:

- [1] 张成吉, 崔富忠, 赵宝宁. 三相离心机在煤化工废渣处理中的应用[J]. 化工管理, 2020(33): 162-163.
ZHANG Cheng-ji, CUI Fu-zhong, ZHAO Bao-ning. Application of Three-Phase Centrifuge in Waste Residue Treatment of Coal Chemical Industry[J]. Chemical Enterprise Management, 2020(33): 162-163.
- [2] ABRAHAM PUNNOOSE J, HAYDEN A, ZHOU Li-feng, et al. Wi-Fi Live-Streaming Centrifuge Force Microscope for Benchtop Single-Molecule Experiments[J]. Biophysical Journal, 2020, 119(11): 2231-2239.
- [3] 黎启胜, 许元恒, 罗龙. 科学试验用离心机发展综述[J]. 装备环境工程, 2015, 12(5): 1-10.

- LI Qi-sheng, XU Yuan-heng, LUO Long. Review on Development of Centrifuge for Scientific Tests[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(5): 1-10.
- [4] 张翔宇, 甘晓松, 高波, 等. 固体火箭发动机火箭橇过载模拟试验方法[J]. 固体火箭技术, 2016, 39(6): 751-754.
ZHANG Xiang-yu, GAN Xiao-song, GAO Bo, et al. Rocket Sled Acceleration Experiment Method of SRM[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2016, 39(6): 751-754.
- [5] ZHU Bin, YING Pan-pan, ZHU Zhou-jie, et al. Centrifuge Modelling of Lateral Cyclic Behaviour of a Tetrapod Piled Jacket in Soft Clay[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2021, 174(1): 44-57.
- [6] 张睿哲, 刘玉县, 何春华, 等. MIMU 中加速度计组离心机标定补偿技术研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(10): 36-39.
ZHANG Rui-zhe, LIU Yu-xian, HE Chun-hua, et al. Research on Centrifuge Calibration and Compensation Technology of Accelerometer Group in MIMU[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(10): 36-39.
- [7] BURTON R R, MEEKER L J, RADDIN J H. Centrifuges for Studying the Effects of Sustained Acceleration on Human Physiology[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 1991, 10(1): 56-65.
- [8] 徐艳, 李宝辉, 张立辉, 等. 高性能载人离心机推拉效应模拟方法研究[J]. 航天医学与医学工程, 2010, 23(6): 425-430.
XU Yan, LI Bao-hui, ZHANG Li-hui, et al. Research on Simulation of Push-Pull Effect with High Performance Human Centrifuge[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2010, 23(6): 425-430.
- [9] GE L, BAO Yu, NI C K, et al. Seismic Centrifuge Modelling of Earth Dams[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2010, 5(4): 247-257.
- [10] ZHENG Gang, SUN Ji-bin, ZHANG Tian-qi, et al. Centrifuge Model Testing to Ascertain Vertical Displacements of a Pile under Cyclic Lateral Loads[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2021, 22(9): 760-766.
- [11] 贾普照. 稳态加速度模拟试验设备: 离心机概论与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
JIA Pu-zhao. Steady-State Acceleration Simulation Test Equipment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [12] 王永志, 王体强, 王海, 等. 我国土工离心机进展与研发关键技术[J]. 地震研究, 2020, 43(3): 592-600.
WANG Yong-zhi, WANG Ti-qiang, WANG Hai, et al. Geotechnical Centrifuge Progress and Key Technologies in China[J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(3): 592-600.
- [13] 郑传祥, 陈建阳, 蒋建群, 等. 低真空度下土工离心机产热机理试验研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(3):

- 84-88.
ZHENG Chuan-xiang, CHEN Jian-yang, JIANG Jian-qun, et al. Experiment of Heat Generation Mechanism of Geotechnical Centrifuge under Low Vacuum Degrees[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(3): 84-88.
- [14] 田昌会, 雷虎民, 朱长纯, 等. 离心机臂的摆振及其对振动台振动的影响[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(3): 370-372.
TIAN Chang-hui, LEI Hu-min, ZHU Chang-chun, et al. The Vibration of the Centrifuge Arm and Its Effect on the Shaking Table[J]. Mechanical Science and Technology, 2002, 21(3): 370-372.
- [15] 王海. 土工离心模型试验技术若干关键问题研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2019.
WANG Hai. Research on Several Crucial Problems of Geotechnical Centrifuge Modeling Techniques[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019.
- [16] 董芳玺. 大型离心机组运行状态监测与故障诊断应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
DONG Fang-xi. Application Research on Operation Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Large Centrifugal Unit[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [17] 沈润杰, 何闻. 离心机动力学特性分析及设计技术[J]. 工程设计学报, 2006, 13(3): 150-153.
SHEN Run-jie, HE Wen. Analysis on Dynamic Characteristics and Design of Centrifuge[J]. Journal of Engineering Design, 2006, 13(3): 150-153.
- [18] 鄂林仲阳, 杜强, 王玉军, 等. 振动-离心复合下土工离心机的工作模态试验分析[J]. 装备环境工程, 2019, 16(10): 105-109.
E L, DU Qiang, WANG Yu-jun, et al. Operational Modal Test of Geotechnical Centrifuge Combined with Acceleration and Vibration[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(10): 105-109.
- [19] 郝雨, 尹益辉, 万强, 等. 基于CFD的土工离心机风阻及流场特性分析[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 52-56.
HAO Yu, YIN Yi-hui, WAN Qiang, et al. Wind Resistance and Flow Field Characteristic Analysis of Geotechnical Centrifuges Based on CFD[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 52-56.
- [20] 郝泽睿. 超重力离心机整机结构振动特性分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
HAO Ze-rui. Analysis of Structural Vibration Characteristics of High-Gravity Centrifuge[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.
- [21] 陈学前, 沈展鹏, 杜强, 等. 综合预应力与陀螺效应的TLJ500 土工离心机模态分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7): 79-83.
CHEN Xue-qian, SHEN Zhan-peng, DU Qiang, et al. The Modal Analysis on the TLJ500 Centrifuge with the Pre-Stress and Gyroscopic Effect[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(7): 79-83.
- [22] 陈建阳. 大型土工离心机温升控制试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
CHEN Jian-yang. Experimental Research on Temperature Rise Control of Large Geotechnical Centrifuge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [23] 郭轶楠, 杨毅, 王亚林, 等. 基于 ZJU400 土工离心机的 CFD 模拟方法[J]. 装备环境工程, 2020, 17(11): 85-89.
GUO Yi-nan, YANG Yi, WANG Ya-lin, et al. CFD Simulation Method Based on ZJU400 Geotechnical Centrifuge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(11): 85-89.
- [24] ALEKSANDROV O E. The Upper Limit of the Separation Efficiency of a Gas Centrifuge[J]. Separation Science and Technology, 2013, 48(6): 833-839.
- [25] KVRGIC V M, VIDA KOVIC J Z, LUTOVAC M M, et al. A Control Algorithm for a Centrifuge Motion Simulator[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(4): 399-412.
- [26] MOHAJER N, NAHAVANDI D, WATSON M, et al. Motion and Dynamic Analyses of a Human Centrifuge System with an Efficient Design Configuration[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 117: 106972.
- [27] LEE A S. Design Analysis to Enhance Rotordynamic Stability of High-Speed Lightweight Centrifugal Compressor-Part I: Effects of Bearing Designs[J]. Journal of the Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, 2013, 29(6): 386-391.
- [28] 刘习军, 张素侠. 工程振动测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
LIU Xi-jun, ZHANG Su-xia. Engineering Vibration Testing Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [29] 盛美萍, 杨宏晖. 振动信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
SHENG Mei-ping, YANG Hong-hui. Vibration Signal Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.

责任编辑: 刘世忠