

振动-离心复合下土工离心机的工作模态试验分析

鄂林仲阳, 杜强, 王玉军, 罗昭宇, 魏晓贞, 孙爱军

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 获得离心机静止及不同运行状态下的动态特性。**方法** 通过离心机常规模态试验, 采用 SIMO 识别方法, 利用力锤产生瞬态激励, 计算出激励点与响应点之间的频响函数, 通过模态拟合, 得到结构的模态参数(频率、阻尼和振型)。进行离心机工作模态试验, 测量结构响应并经放大变换, 选择 2 个以上参考点进行互谱分析, 获得工作模态参数。**结果** 离心机静止时前两阶模态为绕 y 轴和绕 x 轴偏摆, 频率分别为 3.23、9.94 Hz, 本身一阶弯曲频率为 11.17 Hz。不同转动加速度下, 离心机一阶工作频率为转动频率; 二阶工作模态振型为绕 y 轴偏摆, 频率随着转速的升高而增大。**结论** 通过模态试验分析, 获得了该离心机静止及不同运行状态下的模态参数, 可为有限元模型修正、结构设计及优化提供参考。

关键词: 模态试验; 土工离心机; 振动离心复合

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.10.018

中图分类号: TJ05; V416

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)10-0105-05

Operational Modal Test of Geotechnical Centrifuge Combined with Acceleration and Vibration

E Lin-zhong-yang, DU Qiang, WANG Yu-jun, LUO Zhao-yu, WEI Xiao-zhen, SUN Ai-jun

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;

2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: Objective To obtain dynamic characteristics of centrifuge in static and different operating states. **Methods** In modal test with SIMO identification method, force hammer was used to generate transient excitation, calculate the frequency response functions between excitation point and response points, and obtain the modal parameters (frequency, damping and mode of vibration) of the structure by modal fitting. In operational modal test, structure responses were measured and amplified. Two or more reference points were selected for cross-spectral analysis to obtain operational modal parameters. **Results** When the centrifuge was stationary, the first two modes were deflection around Y axis and X axis; the frequencies were 3.23 Hz and 9.94 Hz respectively; and the first order bending frequency was 11.17 Hz. With different rotational accelerations, the first working frequency was rotational frequency, and the second working mode was deflection around Y axis. The frequency increased with the increase of rotational acceleration. **Conclusion** Modal parameters under the static and different operating conditions of the centrifuge are obtained through modal test analysis, which can provide reference for modification, structural design and op-

收稿日期: 2019-03-23; 修订日期: 2019-05-05

基金项目: 中国工程物理研究院总体工程研究所科技专项(2018KJZ04)

作者简介: 鄂林仲阳(1988—), 男, 吉林人, 助理研究员, 主要研究方向为结构动力学。

通讯作者: 杜强(1968—), 男, 湖北人, 高级工程师, 主要研究方向为结构动力学。

timization of finite element model.

KEY WORDS: modal test, geotechnical centrifuge, vibration and centrifugal field

土工离心机是土力学研究的重要试验设备,利用高速转动产生模拟的重力场,通过增加土体应力的方式,使缩比模型与原型应力应变相等,变形相似,进而模拟波浪、潮汐等环境,解决复杂岩土等问题。其试验结果通常用来验证数值仿真分析方法与计算,是一种重现土工物理过程的有效方法。

在1931年,美国哥伦比亚大学建造了第一台科学试验土工离心机^[1]。1982年南京水科院的小型离心机和1983年长江科学院的大型离心机,开启了我国土工离心机的历史^[2]。中国工程物理研究院总体工程研究所具有近50年研制应用离心机的经验,开展了一系列不同规格的土工离心机研制工作,并可以根据用户需要,配置动、静态数据采集系统以及模拟地震波的振动系统等,极大地拓宽了试验范围^[3]。随着科技的不断发展,环境模拟从多个单因素简单叠加,向复合环境试验模拟转变,加速度与振动复合是最基本的因素,温度、气压、噪声等可在此基础上复合^[4]。离心机的动态特性对其正常运行、设备及试验安全有着重要意义,因此需要对离心机进行模态试验分析,了解其整体及不同运行状态下的动态特性,为后续相关结构设计及优化提供支持,为结构动力学分析及模型修正提供试验数据。

董龙雷^[5]结合模态试验结果,将离心振动复合环境实验系统的转臂简化为单自由度系统,建立了振动台的数学模型,分析了振动台与转臂间连接刚度和阻尼对隔振的影响,并设计了具有较好隔振效果的减振器。沈润杰^[6]采用有限元法,对离心机的动力学特性进行了分析,得到各阶模态随转速变化的规律,并进行了静止状态下的模态试验,验证了计算结果的可靠性。李峰^[7]采用理论计算和试验分析方法,得到了大型土工离心机前几阶模态,并进行了比较,分析表明,连接刚度对计算结果影响较大,在两个方向上激振可以避免漏阶。赵宝忠^[8]通过对传感器、实验设备等合理配置,较好地完成了土工离心机模态试验。胡森^[9]采用非线性动力学建模,结合模态试验、仿真、结构动态优化,提出了一套双质体共振式离心机优化设计方案,并进行实例应用。陈怡^[10]采用有限元法,进行了卧螺离心机转鼓的刚度强度校核和整机动力学分析,研究了复杂装配结构的建模方法,并分析了双转子结构振动耦合规律,以模态试验数据为依据,进行了参数化模型修正,获得了更为精确的模型。

文中针对某大型土工离心机,运用模态试验方法,分析离心机静止及不同转动加速度下振动台激励时的动态特性。

1 模态试验分析基本理论

模态试验^[11]是理论模态分析的逆过程,其基于系统激励和响应的动态测试技术,实际测量输入和输出,经信号处理和参数识别,确定整体的动态特性,建立数学模型。大多情况下,人工进行激励很困难,基于对测点响应的自功率谱和互功率谱进行峰值检索,近似估计共振频率,即为工作模态试验。

连续体结构可离散为一个多自由度系统,其振动方程^[12]为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为质量阵; \mathbf{C} 为阻尼阵; \mathbf{K} 为刚度阵; \mathbf{x} 为位移向量; \mathbf{f} 为力向量。

考虑线性时不变系统, \mathbf{x} 表示为多个线性无关主振型的线性组合:

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\xi} \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\Phi}$ 为模态矩阵,每列对应一个主振型; $\boldsymbol{\xi}$ 是模态坐标。

工程问题中,高阶模态对响应的影响通常很小,可在满足精度要求的前提下,只保留低阶模态。对式(1)进行坐标变换,得到一系列互相独立的方程组:

$$\bar{m}_i\ddot{\xi}_i + \bar{c}_i\dot{\xi}_i + \bar{k}_i\xi_i = \bar{f}_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \bar{m}_i &= \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i \\ \bar{c}_i &= \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varphi}_i = 2\xi\omega_i \bar{m}_i \\ \bar{k}_i &= \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{K} \boldsymbol{\varphi}_i = \omega_i^2 \bar{m}_i \end{aligned} \quad (4)$$

$$\bar{f}_i = \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{f}(t)$$

$$\omega_i^2 = \bar{k}_i / \bar{m}_i$$

式中: n 为自由度数; ω_i 是第 i 阶固有圆频率。

在第 r 个点,作用激励力为 $f_r = f_{r0}e^{j\omega t}$, 则第 s 个点的响应为:

$$x_{sr} = \sum_{i=1}^n H_{sr} \cdot f_r = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_{ri}\varphi_{si} \cdot f_r}{k_i - m_i\omega^2 + j\omega c_i} \quad (5)$$

式中: H_{sr} 是测量点与激励点间的传递函数。

对工作模态进行平均处理, H_{sr} 由测量响应的互功率谱和自功率谱求出:

$$H_{sr}(\omega) = \frac{G_{sr}(\omega)}{G_{rr}(\omega)} \quad (6)$$

在频域内定义一个类似的无量纲数表示随机函数的相关程度,即相干函数。

$$\gamma_{sr}^2(\omega) = \frac{|G_{sr}(\omega)|^2}{G_s(\omega)G_r(\omega)} \quad (7)$$

相干函数可用来检查系统是否有随机或非线性

干扰。如果其接近于 1，表示系统非线性程度很小，噪声干扰也很小，反之干扰比较大，谱密度函数不可信，因为输出不完全由输入引起。

2 常规模态试验

离心机机械系统主要由基座组件、轴承、胀套、转臂、吊篮、配重等部分组成（如图 1 所示），整体安装在基础上。常规模态试验中，离心机处于静止非工作状态，含振动台的吊篮自然下垂。试验采用 SIMO 识别方法，利用力锤产生瞬态激励，可以不产生附加质量，不影响整体的动态特性，以此获得激励点与响应点之间的频响函数。通过模态拟合，得到结构的动态特性参数。



图 1 离心机静态试验状态

以离心机主轴中心为坐标原点，以转臂长度方向为 x 轴，以垂直地面方向为 z 轴，按右手法则建立直角坐标系。在两根转臂上各布置 5 个测点，共计 10 个测点。每个测点均测量 z 向加速度响应，测点布局如图 2 所示。

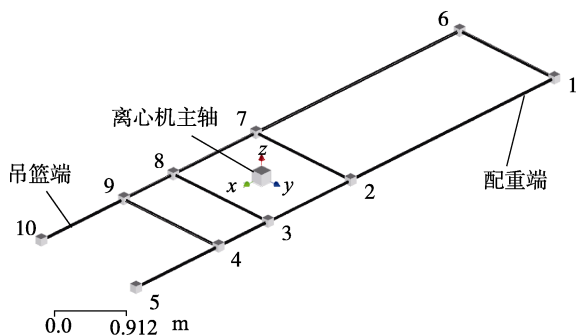


图 2 离心机测点布局

通过预试验确定正式试验分析频率为 100 Hz，激励点及方向为 $10z^-$ ，进行正式试验。为减少泄漏和噪声误差，分别对激励信号与响应信号加力指数窗和加速度指数窗，如图 3 所示。同时取采样帧数为 5 帧，即敲击 5 次激励点来平均传递函数以消除噪声干扰。各测点频响函数集总平均曲线如图 4 所示。

试验结果见表 1，模态振型如图 5 所示。可以看

出，离心机前两阶模态振型表现为绕 y 轴和 x 轴的偏摆，频率分别为 3.23、9.94 Hz，而转臂自身一阶弯曲频率为 11.17 Hz。

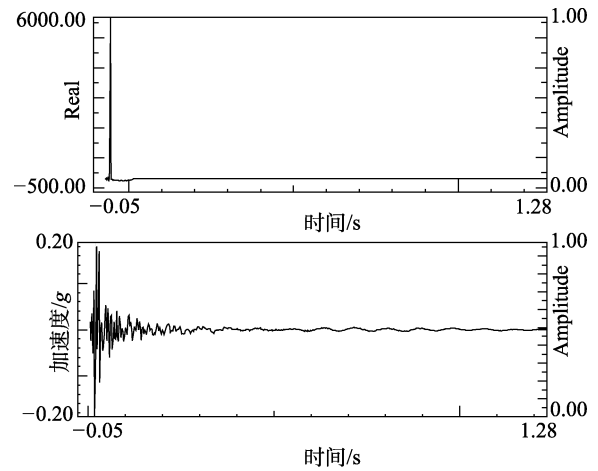


图 3 加窗后 10 号点的激励和响应时域信号

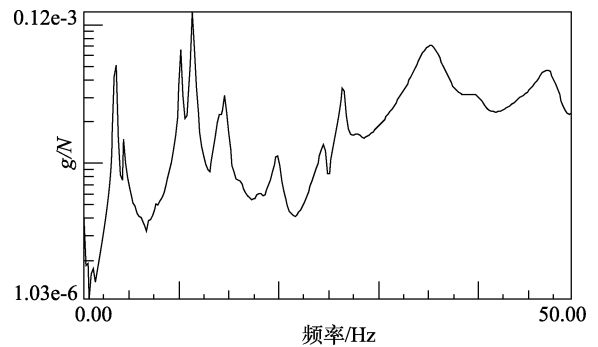


图 4 各测点频响集总平均曲线

表 1 静止时模态试验结果

| 阶数 | 频率/Hz | 阻尼比/% | 振型描述 |
|----|-------|-------|---------------|
| 1 | 3.23 | 0.54 | 绕 y 轴偏摆 |
| 2 | 9.94 | 1.05 | 绕 x 轴偏摆 |
| 3 | 11.17 | 0.80 | 一阶弯曲 |
| 4 | 26.60 | 1.08 | x 向偏摆与配重端扭转 |
| 5 | 35.62 | 4.37 | x 向偏摆与吊篮端扭转 |

3 工作模态试验

工作模态试验时，吊篮与转臂基本保持在同一水平面上，不再呈自然下垂状态。加速度传感器测量结构工作状态下的响应，经适当放大变换后，输入计算机，选择 2 个以上参考点（节点除外）进行软件互谱分析处理，获得工作模态参数。离心机控制转动加速度分别为 10g、30g、50g、80g 和 100g， $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。振动台施加地震波激励，持续时间为 3 s。

振动台上布置了 1 个测点（ $15z^+$ ），加速度为 10g 和 100g 时，15 和 10 号测点的加速度时域曲线如图 6 所示。

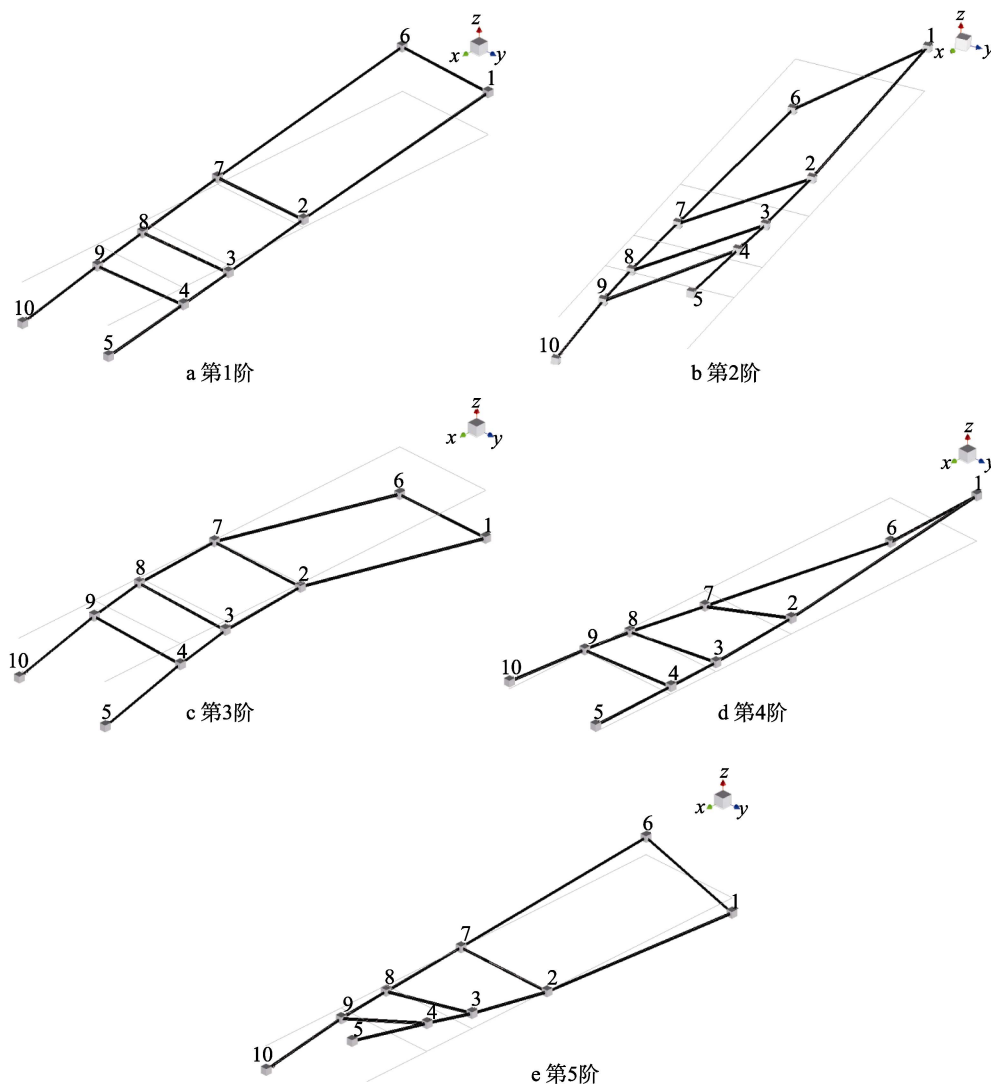


图5 常规模态振型

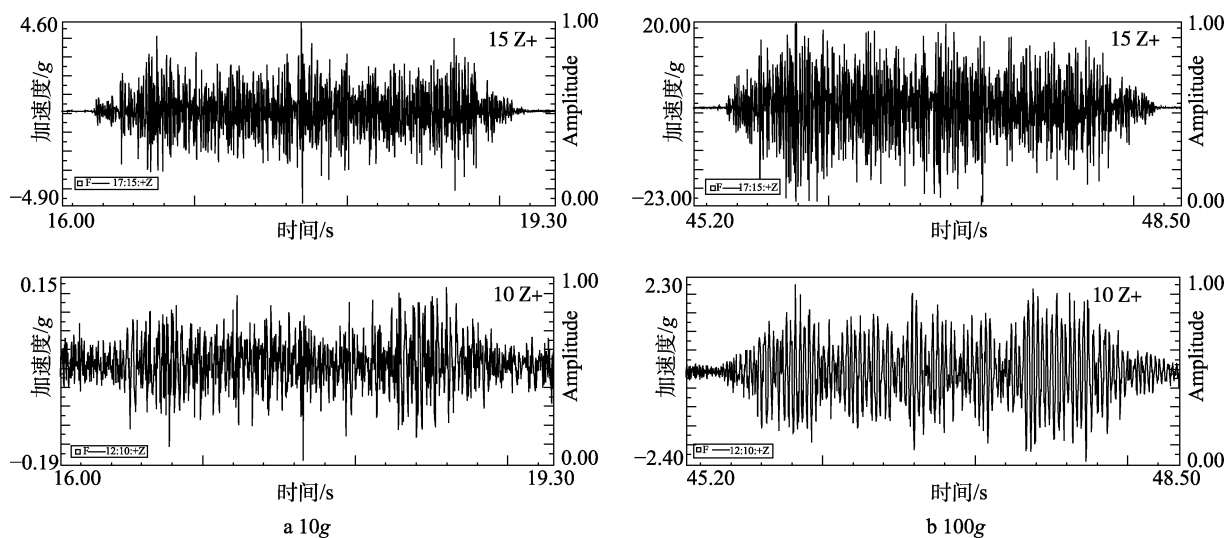


图6 振动台上与转臂上的测点加速度时域曲线

以测点5和测点10为参考点,获得结构不同转动加速度下工作模态试验结果,见表2。前二阶工作

模态振型(10g时)如图7所示。根据有效转动半径计算,不同转速下离心机一阶工作模态频率即为转动

频率, 模态振型表现为结构的耦合振动; 二阶工作模态振型表现为绕 y 轴偏摆, 频率随着离心机转速的升高而增大, 从转动加速度 $10g$ 到 $100g$, 频率增大了 28.41% 。

表 2 离心机转动时工作模态试验结果

| 转动加 速度/ g | 一阶 | | 二阶 | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| | 频率/Hz | 阻尼比/% | 频率/Hz | 阻尼比/% |
| 10 | 0.74 | 0.62 | 2.71 | 0.63 |
| 30 | 1.29 | 0.42 | 2.89 | 0.84 |
| 50 | 1.66 | 0.26 | 3.12 | 0.45 |
| 80 | 2.10 | 0.25 | 3.29 | 0.96 |
| 100 | 2.35 | 0.37 | 3.48 | 0.74 |

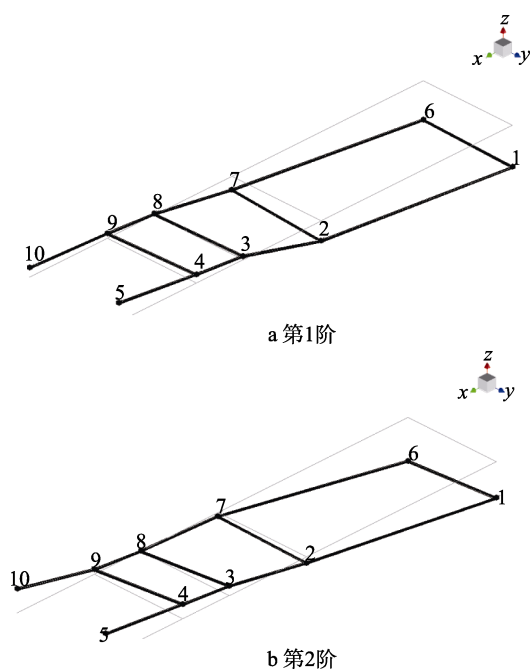


图 7 工作模态振型

3 结论

1) 某土工离心机静止时前两阶模态表现为绕 y 轴和绕 x 轴偏摆, 模态频率分别为 3.23 、 9.94 Hz, 自身一阶弯曲频率为 11.17 Hz。

2) 不同转动加速度下, 该离心机一阶工作模态频率为转动频率, 模态振型表现为结构整体的耦合振动; 二阶工作模态振型表现为绕 y 轴偏摆, 频率随着转速升高而增大, 从 $10g$ 到 $100g$, 频率增大了 28.41% 。

3) 与静止状态相比, 转动时吊篮由竖直状态变成水平状态, 绕 y 轴偏摆模态的频率。 $10g$ 时转臂变长的影响大于离心力刚度硬化效应, 频率下降了 16.1% ; $100g$ 时离心力刚度硬化效应使得频率又上升了 7.74% 。

4) 通过模态试验分析, 获得了该土工离心机整体及不同运行状态下的模态参数, 试验结果可为有限元模型修正、结构设计及优化提供参考。

参考文献:

- [1] 冉光斌. 土工离心机及振动台发展综述[J]. 环境技术, 2007(3): 26-29.
- [2] 赵玉虎, 罗昭宇, 林明. 土工离心机研制概述[J]. 装备环境工程, 2015, 12(5): 19-28.
- [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.
- [4] 何阳, 蒋春梅, 张建全. 振动离心复合试验系统发展概述[J]. 装备环境工程, 2016, 13(6): 95-103.
- [5] 董龙雷, 闫桂荣, 余建军, 等. 离心机振动台复合环境实验系统的隔振研究[J]. 应用力学学报, 2002, 19(1): 23-26.
- [6] 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.
- [7] 李锋, 杜强, 王玉军, 等. 大型土工离心机 TLJ-500 模态分析与试验[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(3): 91-94.
- [8] 赵宝忠, 徐有刚, 杜强, 等. TLJ-500 土工离心机动力学特性研究[C]// 第 21 届全国结构工程学术会议论文集. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
- [9] 胡森. 振动式离心机动态性能优化设计关键技术与方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [10] 陈怡. 磁悬浮轴承支承的卧螺离心机动力学分析及优化设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [11] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [12] 邹经湘, 于开平. 结构动力学[M]. 第二版. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2009.