

超速试验机主轴的模态分析与研究

王浩琦, 沈景凤

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 采用有限元分析法对超速转子试验台的模拟转子系统进行模态分析,较全面地分析了整机的振动特性,并根据仿真和试验结果分析了可能造成系统破坏的因素,为试验的动态分析提供理论依据,从而实现设计方案的优化和升级。

关键词: 超速; 试验机; 模拟转子; 模态分析

中图分类号: TH 122 **文献标志码:** A

Modal Analysis on the Mainshaft of an Overspeed Test Machine

WANG Haoqi, SHEN Jingfeng

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology Shanghai 200093, China)

Abstract: Overspeed test is a test in which the powerful centrifugal force generated by high speed rotation, is utilized to preload a high speed rotating workpiece at its normal operating speed or 20% overspeed in order to check whether the workpiece is safe and reliable. In order to assist the design of an overspeed rotor test machine, the rotor system of the overspeed rotor test bed was simulated by using the finite element method. The vibration characteristics of the machine were analyzed comprehensively and the factors that may cause damage to the system were investigated according to the simulation and experiment results, which provides a theoretical basis for the dynamic analysis of the test, so as to achieve the optimization and upgrading of the design scheme.

Keywords: overspeed; testing machine; simulated rotor; modal analysis

在电动工具行业中,能够利用 Ansys 软件对旋转工件进行适当的理论计算和强度分析,然而对于电机转子、换向器、叶轮、锯片等形状复杂的旋转工件,仿真过程中会由于存在材料或加工缺陷、应力集中等不可预知因素,难以仿真出这些旋转工件的实际工作情况。因此,超速试验就成为检验旋转工件在高速大应力旋转条件下能否安全可靠工作的唯一手

段^[1]。对于汽车电机、航空航天电机以及家用电器用电机等安全要求高的电机转子,需要了解转子本身及其上的换向器、电磁线、风叶和砂钢片等部件在电动机超过规定转速一定值时的运行状态下的机械强度,因此,对高速旋转件的生产企业来说,超速试验机就成为必不可少的检测试验设备。超速试验机整机在使用时要求不能发生爆破和无法接受的形状变

收稿日期: 2017-03-23

第一作者: 王浩琦(1993-),男,硕士研究生,研究方向:机械优化设计, E-mail: wqhj5436@sina.cn

通信作者: 沈景凤(1968-),女,副教授,研究方向:机械设计及理论, CAD/CAE, 虚拟设计等, E-mail: 799441296@qq.com

化,所以,在设计过程中需要使用一定的分析方法,辅助和优化设计,以得到安全稳定的试验平台。

目前,浙江大学化工机械研究所高速旋转机械实验室是国内唯一具有研制系列化超速试验机能力的单位,为一些国有大中型企业研究、制造了多种型号的超速试验装置,已经拥有成熟技术的超速试验机有 ZUST 系列、ZUSTD 系列、C15 系列,允许的超速试验件(包括工装)最大质量可达 6 t,最高转速可达 10 万 r/min,叶轮最大直径可达 3.2 m. 上海菱菱平衡机公司、清华大学等也有部分超速试验机产品. 国外超速试验台的研究工作随着航空燃气轮机工业的发展在 20 世纪 50 年代就起步,并随着机械加工技术和电子控制技术的发展,整体性能得到了提高和完善,其中,较先进的公司有德国 Schenck 公司、美国 TDI 公司^[2-3]。

本文利用 Ansys 软件对超速试验机进行适当的模态和强度分析,了解试验机中模拟转子系统的固有频率和振型,使工作转速避开共振频率的转速,防止机械振动引起零件间产生共振,破坏结构的情况发生. 模拟转子系统的模态分析也将为评价现有结构的动态特性、诊断及预报结构系统的故障、新产品的动态性能的预估及优化设计提供科学的依据。

1 转子系统模态分析理论

将转子试验系统组件离散成有限的单元体,根据弹性力学有限元理论,其动力学微分方程可以表示为

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

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; $\mathbf{x}(t)$ 、 $\mathbf{F}(t)$ 分别为 t 时刻的位移向量和结构激励力向量^[4]。

在无外力作用的情况下,系统的振动方程为自由振动方程,系统为刚性系统时,可以忽略阻尼因素的影响,得到无阻尼自由振动方程,用以求解结构自由振动的固有频率和振型。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = 0 \quad (2)$$

设方程的解为 $\mathbf{x}(t) = \mathbf{X}\exp(j\omega t)$ 的简谐运动, ω 为频率,代入式(2),可得对应的特征方程

$$(\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M})\mathbf{X} = 0 \quad (3)$$

在结构自由振动的情况下,振幅不全为 0,因此,式(3)具有非零解的唯一条件是系数行列式为 0,即

$$|\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M}| = 0 \quad (4)$$

将式(4)所示的行列式展开,可得到 n 个特征值 $\omega_i^2 (i = 1, 2, \dots, n)$, ω_i 称为转子系统的第 i 阶固有频率,将满足式(3)的非零向量 $\mathbf{X}$ 称为第 i 阶主振型。

2 转子系统的有限元模型

有限元方法是按照一定的方法将复杂的结构或者连续的整体离散成有限个单元,并按照一定的原则在每个单元中设定有限个节点,各单元彼此在节点处连续,先对单个的单元进行特性分析,然后根据各单元在节点处的协调条件建立平衡方程或者刚度方程,综合后作整体分析. 按照有限元分析的一般步骤,利用 Ansys 有限元软件对试验机的模拟转子系统进行模态分析,确定其固有频率和振型^[5-6]。

2.1 系统结构

本超速试验台为刚性系统设计,如图 1 所示. 直接采用电主轴作为驱动机构,将电主轴通过法兰固定在保护桶的盖子上;用刚性传动轴带动模拟转子高速旋转,传动轴与电机用圆柱销连接,轴与模拟转子用刚性联轴器连接,竖直悬挂在保护桶的桶体内。

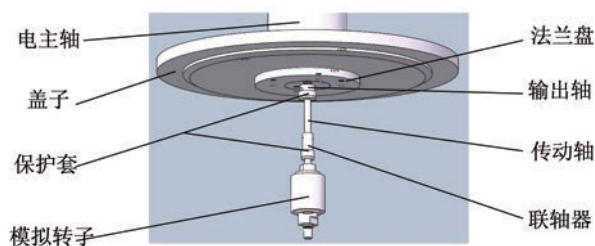


图 1 超速转子试验机构三维模型

Fig.1 3D model of the overspeed rotor experimental mechanism

传动轴材料为线弹性材料 45 号钢,进行调质处理,其弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 800 kg/m³。

2.2 有限元模型

首先利用 Solidworks 软件对模拟转子系统进行三维实体建模,然后将模型导入 Ansys 软件中进行网格划分,如图 2 所示. 为了简化计算,在分析建模过程中忽略了倒角、销钉、螺纹及防护套等一些细节的结构。

在装配体中,零件与零件之间的连接视为刚性连接. 在划分网格时用布尔操作 add 将零件连接在一起. 采用 SOLID185 单元进行网格划分, SOLID185 单元通过 8 个节点来定义和构造三维固体结构. 单元具有超弹性、塑性、蠕变、大变形和大应变变能力,适合用来对本机构采用的材料进行单元划

分和模拟。

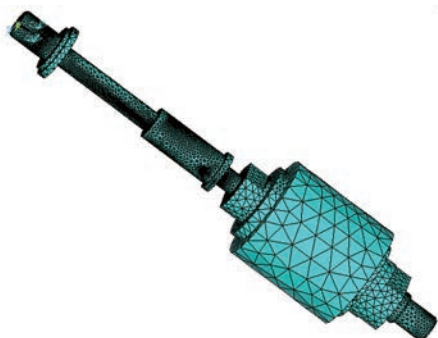


图2 模拟转子系统的网格划分结果

Fig.2 Results of meshing of the simulated rotor system

2.3 加载与求解

由于本系统为刚性系统的结构,因此,对电机与传动轴的连接部分采用刚性约束,并约束其全部自由度.系统不施加其他外力,重力、空气阻力等忽略不计.

选择 Block Lanczos 法对模型进行自由模态计算,由于试验中更容易出现低阶共振,为此只计算模型的前 6 阶模态,得出模拟转子系统低阶模态时的固有频率和临界转速,为试验结构的破坏分析和后续的结构设计改进提供理论指导和参考. Block Lanczos 法采用稀疏矩阵方程求解器,其求解精度高、计算速度快,而且适合大型对称特征值求

解问题.

3 计算结果及分析

通过模态分析得到的结果是模拟转子系统模型对激励的频率响应函数,各阶固有频率表示频响函数出现峰值的频率^[7-8].其频率峰值时对应的转子转速是模拟转子系统的临界转速.在临界转速下运行时,模拟转子系统会发生剧烈的振动,如果长时间运行会造成主轴部件不可修复的弯曲变形,甚至折断.

模拟转子系统模态分析结果如表 1 所示,模态分析的前 6 阶振型如图 3 所示,各阶振型的相对应力分析如图 4 所示(见下页).

表 1 转子模态分析结果

Tab.1 Results of the rotor modal analysis

阶数	系统频率/Hz	临界转速/(r·min ⁻¹)	主要阵型
1	48.339	2 900.3	弯曲振动
2	49.175	2 950.5	弯曲振动
3	292.370	17 542.2	径向振动
4	704.370	42 262.2	弯扭及头部摆动
5	704.770	42 286.2	弯扭及头部摆动
6	1 927.20	115 632.0	轴向振动

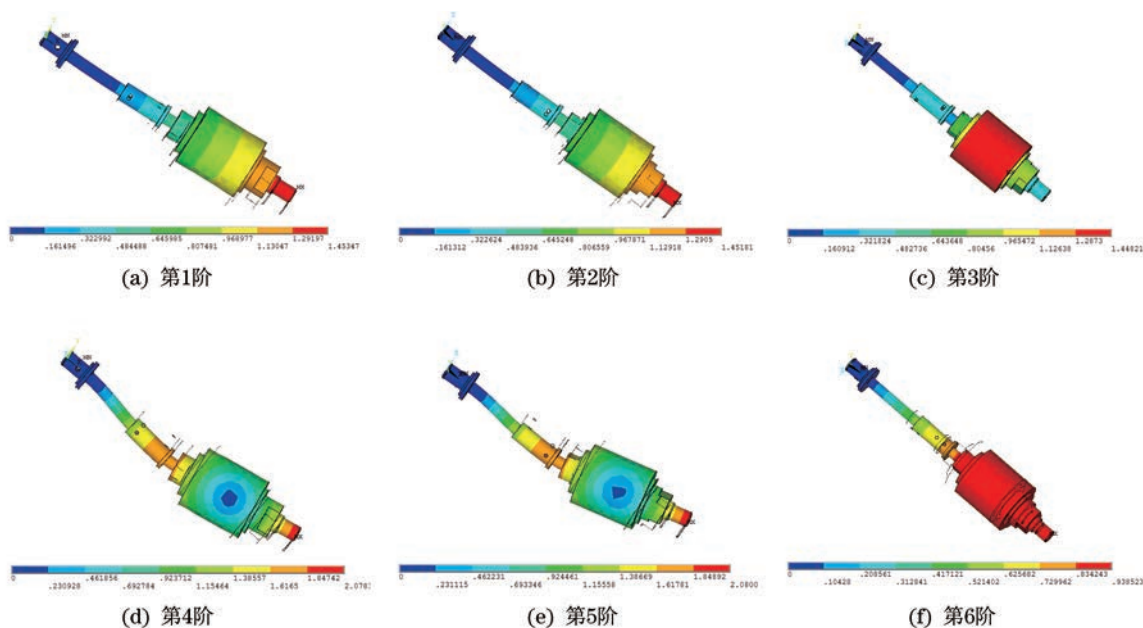


图3 模拟转子系统的振动模态图

Fig.3 Vibration mode of the simulated rotor system

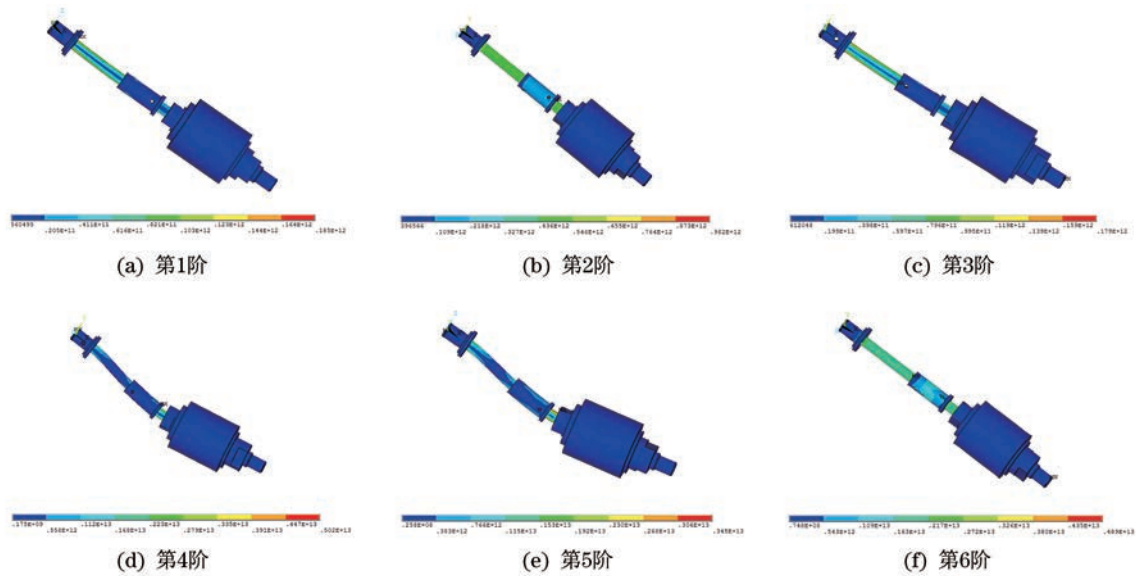


图 4 模拟转子系统的相对应力分布图

Fig.4 Relative stress distribution of the rotor system

通过对前 6 阶固有频率振型的研究可得:模拟转子系统的第 1 和 2 阶振型分别为 oxy 和 oxz 平面内的一阶弯曲振动,且对应的固有频率相差不大;第 3 阶振型主要表现为转子的径向振动;第 4 和 5 阶振型为 oxy 和 oxz 平面内的二阶弯曲振动;第 6 阶振型为轴向的伸缩振动。

4 试验结果及分析

通过仿真软件建立一个等效于实际工况的模拟转子系统简单模型,并在 Ansys 系统下采用有限元模态分析法近似定性、定量且直观地得到超速模拟转子的振型和频率。并根据仿真模型建立试验平台,试验台如图 1 所示,安装在防护桶上,通过工控机以及变频器控制电主轴的频率,并通过摄像装置观察系统的运行情况。传动轴结构尺寸如图 5 所示,通过圆柱销与联轴器以及电主轴的输出轴连接,并加装防护套防止圆柱销的脱出。

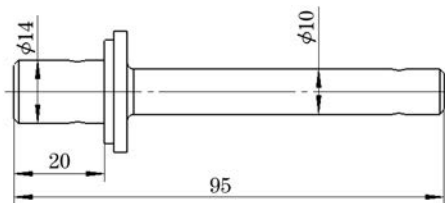


图 5 传动轴结构尺寸

Fig.5 Size and structure of transmission shaft

在试验过程中,通过变频器控制电主轴,以 10 Hz/min^2 的加速度进行测试,并记录转速,在电主

轴频率升高到 50 Hz 时,系统发生剧烈振动,传动轴发生了弯曲,如图 6 所示。测试系统发生破坏时的电机频率与仿真试验中一阶弯曲振动的频率相差很小,即传动轴在系统的固有频率的一定范围内发生了弯曲破坏,说明了仿真结果的正确性,对试验台结构优化设计及控制系统设计具有一定的指导意义。

根据仿真的振动模态结果以及试验平台的初步试验测试可知,在试验机的控制系统设计时,需要在转速上升控制中快速通过临界状态的系统频率,达到需要的转速;需要在试验台的结构改进设计中提高轴的强度并添加适当的支撑装置,避免传动轴弯曲情况的发生。



图 6 轴的弯曲破坏情况

Fig.6 Bending failure of the shaft

5 结论

基于有限元模态分析基本理论,建立了模拟转

子试验系统的模态分析有限元模型,通过计算,得到了转子系统的振型和频率,并通过试验验证了理论分析的正确性和设计的不足之处,为试验台的改进设计和系统的控制方案设计提供依据,并指导试验,大大减少试验次数,从而节省了设计时间。

参考文献:

- [1] 林乐新. ZUSTD 型倒挂式叶轮超速试验机的设计与开发[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- [2] 毛乐园,尹健昭. 立式超速试验台轴系动力特性分析[J]. 火箭推进,2016,42(1):88-94.
- [3] 宣海军. EORD 支承转子动力学特性分析及其在超高速旋转机械中的应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.

- [4] 曹妍妍,赵登峰. 有限元模态分析理论及其应用[J]. 机械工程与自动化,2007(1):73-74.
- [5] 常利辉,胡宇达. 超导发电机转子模态分析[J]. 计算机辅助工程,2016,25(1):35-40.
- [6] 代颖,崔淑梅,宋立伟. 车用电机的有限元模态分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(9):100-104.
- [7] 杨永峰,任兴民,徐斌. 国外转子动力学研究综述[J]. 机械科学与技术,2011,30(10):1775-1780.
- [8] SHAIK K, GUPTA R K, GOUTHAMAN G. Design and development of high speed spin test facility [C]// Vetomac-IV, International Conference on Vibration Engineering and Technology on Machinery. 2007: 169-177.

(编辑:石 瑛)

(上接第 322 页)

3 结 论

a. 介绍了能量分析的 3 种方法及其特点,得到了余热回收的评价指标,为后续分析印染工艺设备用能系统的合理性打下了基础。

b. 提出了利用锅炉烟气余热蒸发退浆废水和碱减量水洗废水,回收冷凝水的方案. 对锅炉烟气及印染废水进行热平衡分析,计算得到烟气每天的排放量为 2.14×10^7 kJ,每天可用于回收 6.826 t 的低压蒸汽,使退浆废水和碱减量水洗废水的浓度提高 12.7%. 若计算得到的烟气利用率按 80% 来计算,则每年可节约 5 123.7 t 的标煤,每吨标煤按 800 元来计算,则每年可节省 4 098 960 元^[7-8]。

c. 提出了利用燃煤烟气中的酸性气体中和碱性废水的方案. 经过计算分析,利用流量为 13 000 m³/h 的烟气,每天可以中和高温印染废水 58 680 t,一般废水 580 800 t, pH 值可降至 7~9. 此外,烟气 SO₂ 去除率达 85% 以上,烟尘去除率达 97%~98%,每年可减少中和硫酸 207.75 t,约 8.1 万元。

在印染工艺流程中,对蒸汽余热进行最大化回收利用,以及工艺废气和废水处理过程中更加准确

地掌握其物性特点及所用能量比例,这两点是印染工艺流程中有效合理用能亟待解决的关键技术问题。

参考文献:

- [1] 瓮亮,吴赞敏,李洪霞. 印染废水的处理方法及进展[J]. 印染助剂,2005,22(11):7-10.
- [2] 沈维道,童钧耕. 工程热力学[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
- [3] 吴勃,王伟东. 煤化工废水零排放处理方法研究[J]. 应用能源技术,2013(3):1-4.
- [4] 刘精今,牛秋雅. 印染废水与烟气脱硫联合治理技术[J]. 节能与环保,2002(6):30-31.
- [5] 王益静. 印染行业废水余热回收[J]. 科学之友,2011(24):152-153.
- [6] 王毅霖,杨雪莹,张晓飞,等. 污水“零排放”技术发展现状[J]. 绿色科技,2014(8):189-191.
- [7] 朱和林,来东奇. 印染废水处理及回用工程实例[J]. 印染,2017(7):35-38.
- [8] 许丹宇,石岩,张洪雷. 印染废水处理与回用的工艺设计与应用[J]. 给水排水,2015,41(3):49-53.

(编辑:石 瑛)