

文章编号:1006-1355(2015)06-0197-05+214

转子扭振与故障模拟多功能试验台设计

张 希, 静 波, 李富才

(上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘 要:为改进普通转子试验台功能单一的不足,设计一套转子扭振与故障模拟多功能试验台。基于有限元分析软件 ANSYS,对转子系统进行模态分析,经过反复计算与修改,完成转子的结构尺寸设计。针对转子圆盘、碰摩试验支座等组件设计特定外形,并开发专用的数据采集与分析应用软件。该平台可用于转子动力学分析与转子多故障的模拟和振动测试分析。

关键词:振动与波;转子故障;试验台;扭振;有限元分析

中图分类号:TH113.1;TN911.7

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2015.06.042

Design of Multi-functional Test Bench for Torsional Vibration and Fault Simulations of Rotors

ZHANG Xi, JING Bo, LI Fu-cai

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract : A multi-functional test bench for rotor's torsional vibration and fault simulations was designed to overcome the defect of unitary function of the traditional rotor test benches. Based on the finite element analysis software-ANSYS, modal analysis was carried out for the rotor system. Design of the structural geometry of the rotor system was completed after several simulations and modifications. According to the special shapes of rotor disc, rubbing test support and some other components, special software for data acquisition and analysis was developed. This test bench can be used for rotor dynamics analysis, multiple fault simulation and vibration test and analysis of rotor systems.

Key words : vibration and wave ; rotor fault ; test bench ; torsional vibration ; finite element analysis

轴承转子系统(简称轴系)是诸多旋转机械的核心部分,是转子动力学和机械故障诊断的重要研究对象。因制造与装配过程中不可避免的误差、运行中的磨损以及工况变化等问题,转子在运行中可能会出现不平衡、碰摩等故障现象,这些故障引发的振动通常对机械设备是有害的,可能影响设备运行的可靠性,甚至还会因共振造成严重事故^[1,2]。

扭转振动(简称扭振)是作用在轴上的扭矩发生变化时轴系的一种特殊振动形式。扭振发生时,轴

的应力状态周期性变化,这可能会影响到机械设备的正常运行,振动严重时甚至会引起材料的疲劳变形,导致断轴等恶性事故发生^[3]。转子在运转过程中,通过转子质心的惯性轴与旋转轴线不重合时产生的离心惯性力(力矩)会在系统中产生周期性动压力,这将会引起转子系统的振动,造成零部件磨损^[4]。这种因不平衡引起的振动无法单纯地依靠结构的对称性来消除,多种动平衡方法为转子动平衡的检测和校正提供了理论技术依据^[5]。轴系常见故障还有松动、不对中、碰摩、裂纹等,为了综合研究转子系统的动力学特性和故障机理,对旋转机械进行故障诊断与早期预防,特设计该转子故障模拟多功能试验台。该试验台集成扭振、动平衡以及其他多种转子故障模拟功能,弥补普通动平衡试验台、扭振测试分析试验台功能单一的不足,为研究转子多种故障的特征与机理、转子故障耦合的动力学特性提供了方便。

收稿日期:2015-05-06

基金项目:科技部国家科技支撑计划(2015BAF07B03);

国家自然科学基金(11372179)

作者简介:张希(1990-),男,云南人,硕士生,主要研究方向:振动数据分析、结构健康监测。

通讯作者:李富才(1976-),男,博士生导师。

E-mail: fcli@sjtu.edu.cn

1 试验台的结构组成及特点

转子故障模拟多功能试验台以扭振测试分析为基础,兼具动平衡的检测与校正功能,同时能实现转子常见故障(如松动、不对中、碰摩、裂纹)模拟的试验。该试验台主要由以下系统组成:

- (1) 扭振激励系统;
- (2) 转子系统;
- (3) 支承系统;

(4) 数据采集与分析系统。轴承-转子部分是两跨三滑动轴承的支承结构,通过扭振电气控制柜控制三相异步交流电机驱动转子运动,其结构如图1所示。

(1) 扭振激励控制系统

采用电控方式实现扭振发生,该系统不需复杂或者昂贵的扭振电机,通过扭振电气控制柜、变频器即可控制电机产生扭振激励。控制柜上的旋转手柄可以调节扭振参数,实现一台电机将传动、调速与激励三个功能合一;

(2) 转子系统

转子系统由阶梯轴、动平衡圆盘和测速齿盘组成。阶梯轴的设计需综合考虑实验的安全性以及交流电机的额定转速,兼顾KMT扭振遥测系统与机械式扭振测试装置的测量条件,经过有限元分析计算得到转子的1阶临界转速低于3 000 r/min。动平衡圆盘不仅可以降低扭振共振频率,还能进行转子动

平衡的检测与校正试验;

(3) 支承系统

支承系统由三个滑动轴承组成,滑动轴承采用滴油润滑方式,在满足轴承正常使用的条件下,使得试验台结构简单明了。各个轴承座可在小范围内沿轴向移动调整,便于试验台的安装与调试。另外,轴承座还可在垂直于轴向的水平方向上进行轻微移动调整,实现转子不对中的故障模拟;

(4) 数据采集系统

数据采集系统主要包括磁电式传感器,电涡流传感器,扭振测量传感器,KMT遥测装置及数据采集卡。传感器主要将检测到转子的转速、扭振、回旋振动等信息转换成电信号,经过数据采集系统对信号进行调理、采样、量化、编码等处理后传输到计算机进行数据分析。其中,试验台上安装的KMT遥测装置、机械式扭振测试装置和齿盘-磁电式传感器测试装置,可实现多种方式对扭振信号测试,便于对比分析。

2 试验台的设计

以扭振分析为基础进行试验台设计与研制,转子是整个系统的关键部件,其特性对系统影响最为直接。转子特征需同时满足扭振共振频率、数据采集条件、平台尺寸等方面的要求,基于有限元分析软件ANSYS对转子进行模态分析,获得其固有频率与主振动模态,初步确定转子的结构尺寸。对阶梯轴

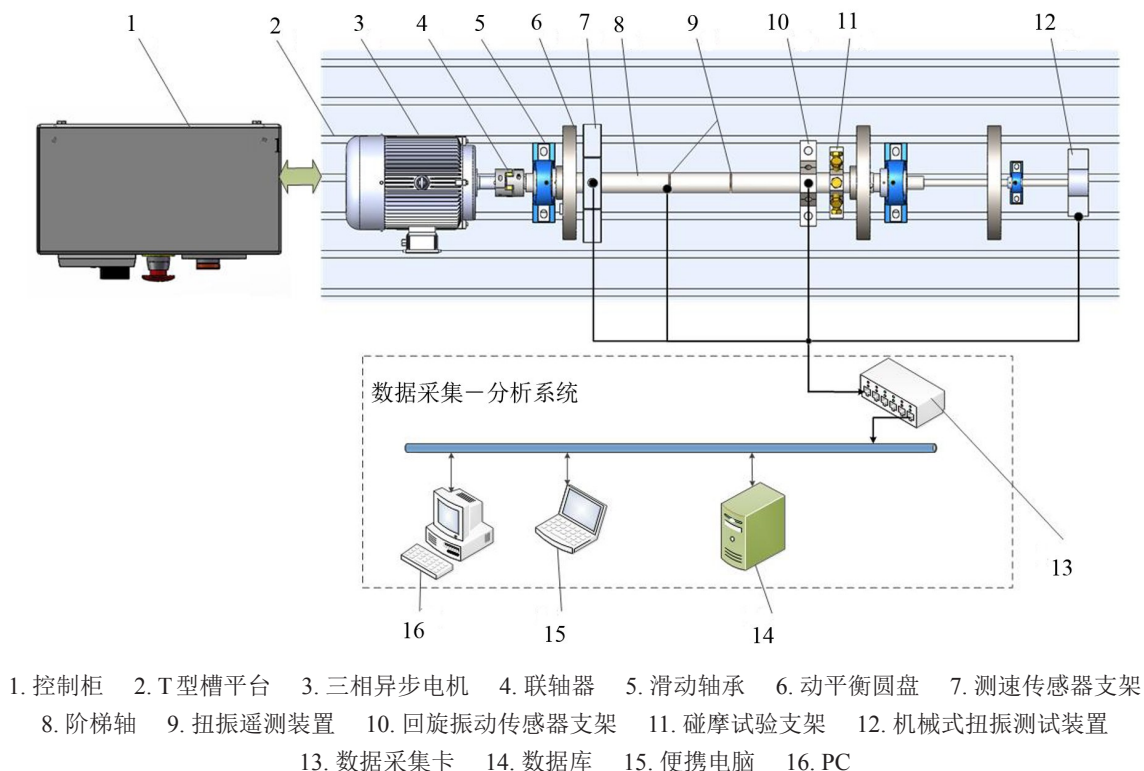


图1 试验台结构图

进行强度校核,反复调整轴和转子圆盘的结构尺寸,满足扭振试验的要求,同时保证转子满足强度要求。动平衡圆盘在符合转子扭振特性前提下,其圆周方向加工了关于轴心对称的螺纹孔,方便螺栓的平衡配重。碰摩试验支座的结构利于进行单点碰摩和多点碰摩试验,传感器安装支座的结构可以减小因传感器安置对测量结果带来的误差。

2.1 阶梯轴的设计

阶梯轴是转子试验台设计的核心,除根据轴的强度初步估算最小轴径,还需考虑轴的扭振特性。该试验台设计首先要满足以下三个条件:

(1) 1阶扭振的频率不高于50 Hz(电机的转速不超过3 000 r/min);

(2) 至少有600 mm长的光轴段直径为 $\phi 60$ mm(满足KMT遥测系统供电装置和信号线圈的安装要求);

(3) 轴长不超过2000 mm(T型槽平台长度限制)

轴的形状和几何尺寸与其承担载荷的匹配关系需通过强度校核计算确定。具体地,转矩对轴强度影响估算轴的最小直径 d ,计算公式为^[6]

$$d \geq C \sqrt[3]{\frac{P}{n}} \quad (1)$$

式中 P ——轴所传递的功率,kW。

n ——轴的额定转速,r/min。

C ——与材料有关的系数,查阅机械手册。

选定轴的材料为45钢,根据轴的额定功率与转速,获得最小轴径的理论计算值。通过计算,确定满足强度要求的最小轴径为 $d_{\min} = 17$ mm。

2.1.1 阶梯轴的有限元分析

有限元法是一种非常适合于工程应用的数值解法,是进行结构动力学分析的有效手段,也是模态分析的常用方法。在工程应用中,借助有限元分析软件ANSYS进行扭振特性分析,可减少因转子尺寸参数调整带来的重复计算量,提高计算效率^[7]。

影响转子扭振特性的结构参数有扭转刚度、转动惯量、直径和长度,计算转子扭振特性,主要是获得扭振固有频率和主振动模态。采用分布质量模型,忽略孔、键槽、工艺圆角和倒角影响,将动平衡圆盘用质量单元3D_MASS_21简化为转动惯量模块,阶梯轴用Timoshenko梁单元建模,ANSYS中创建转子有限元模型如图2所示。

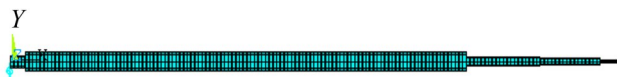


图2 转子的有限元模型

转子在轴承中受到径向约束,其刚度相对于轴承刚度非常小,理论上可简化为一简支梁。进行扭振特性分析,以铰支模拟轴承与轴的约束关系,不考虑轴承弹性,在轴颈处直接添加径向约束(约束 y 、 z 平动自由度)。模型部分参数设置如下:弹性模量 $E = 201$ GPa,泊松比 $\mu = 0.3$,材料密度 $\rho = 7\,800$ kg/m³。经分析求得1阶扭振频率(41.77 Hz)对应的主振动模态,用VECTOR方式表示,如图3所示。观察图3,可看出扭振引起形变的最大值位于阶梯轴最右端,此处布置机械式扭振测试装置,能够获得明显的振动量测量结果。另外,尽管KMT扭振遥测系统测量的位置并没位于扭振形变的最大值处,具有高精度与高灵敏度的遥测装置依旧可以获得明显的振动测量结果。可见,扭振测试的传感器布置符合试验台的设计要求。

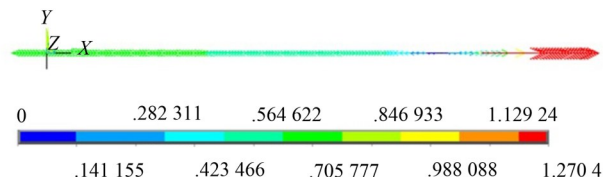


图3 1阶扭振主振动模态

联轴器的扭转刚度对转子的模态有一定影响,分别求解忽略联轴器扭转刚度和考虑扭转刚度的模态,固有频率求取结果如表1所示。根据参考文献[8]的计算结果,试验台选用双绕线弹性联轴器,联轴器扭转刚度取 $C = 1 \times 10^6$ N·m/rad。首先分析忽略联轴器扭转刚度的各阶固有频率,23阶固有频率基本相等,由转子结构对称性可知,23阶振型是转子1阶弯曲振动变形,结合图3转子变形的矢量图,可确定1阶振型是转子的扭转振动变形。当考虑联轴器扭转刚度时,成对出现的弯振频率不变,非成对出现的扭振频率减小。由此可见,联轴器的扭转刚度主要影响到扭振频率。总之,无论是否考虑联轴器

表1 前10阶模态固有频率

阶次	忽略联轴器扭转刚度 各阶模态频率/Hz	考虑联轴器扭转刚度 各阶模态频率/Hz
1	41.77	29.95
2	73.555	71.32
3	73.56	73.555
4	104.73	73.56
5	104.74	104.73
6	116.08	104.74
7	116.08	116.08
8	119.08	116.08
9	229.74	149.38
10	229.79	229.74

扭转刚度,阶梯轴的扭振频率均低于 50 Hz,满足试验台设计要求。

2.1.2 阶梯轴强度校核

在满足扭振特性要求的前提下,初步设计轴结构,确定外载荷作用点、大小、方向和支承位置,绘制轴受力简图。将外载荷分解,求出水平和垂直面的支反力,并绘制水平和垂直面的弯矩图,获得合成弯矩图 $M-x$ 。根据电机和传动系统的参数,绘制扭矩图 $T-x$ 。按照强度理论进行当量弯矩求解,找到危险截面结合强度,校核公式为^[6]

$$\sigma_b = \frac{\sqrt{M^2 + (\alpha T)^2}}{0.1d^3} \leq [\sigma_{-1b}] \quad (2)$$

式中 σ_b ——弯曲应力,MPa;

M ——轴的合成弯矩, $N \cdot m$;

T ——轴所传递的转矩 MPa, $T = 9.55 \times 10^6 P/n$;

α ——应力校正系数,查阅机械手册;

$[\sigma_{-1b}]$ ——许用弯曲应力,MPa。

代入数据,最终求得轴工作的弯曲应力 $\sigma_b = 31.52 \text{ MPa}$, 小于许用弯曲应力 $[\sigma_{-1b}] = 180 \text{ MPa}$, 强度校核通过。经过反复计算与修改,轴的外形尺寸设计如图4所示。

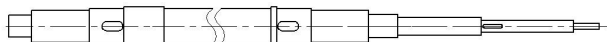


图4 阶梯轴外形尺寸

2.2 动平衡圆盘设计

动平衡试验是模拟旋转机械振动的试验装置。转子系统中一共三个圆盘,选择轴段直径为 $\phi 60 \text{ mm}$ 上的圆盘进行动平衡的检测和校正。圆盘周向有平衡螺纹孔,使用标准螺栓作平衡配重,按中心对称设计不同直径的螺纹孔,方便进行平衡校正试验,圆盘的设计如图5所示。

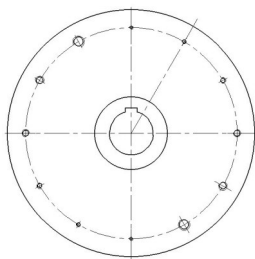


图5 动平衡圆盘

2.3 碰摩试验支座的设计

转子振动超过许用间隙时,转子与定子接触发生碰摩,常见的碰摩形式有单点碰摩、多点碰摩、局部碰摩及整周碰摩^[9]。试验台主要模拟单点碰摩和多点碰摩,用黄铜螺栓模拟定子,研究转定子轻微或严重碰摩时转子系统的故障特征。转子与定子发

生单点碰摩或多点碰摩时,碰摩过程会发生碰撞反弹的冲击,碰摩试验支座一方面要保证多点安装黄铜螺栓,另一方面还需具备一定强度和刚度。支座如图6所示,上方五个通孔可以安装黄铜螺栓,底座两个通孔可将支座与T型槽平台连接。

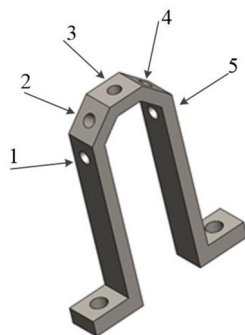


图6 碰摩试验、回旋振动传感器安装支座

动平衡的检测与校正、碰摩试验需测量轴心轨迹和回旋振动,采用电涡流传感器测试。传感器安装支架可按碰摩试验支架的外形设计,如图6所示,只需将两个电涡流传感器正交布置,即任选以下一种安装组合:1-3、3-5、2-4。

2.4 测速传感器安装支座的设计

扭振激励电气控制柜控制电机驱动转子系统运转,控制柜起调速作用,为测量转子实际转速,采用磁电式传感器,通过60齿齿盘进行测量,如图7所示。另外,传感器一齿盘测试装置还可用于扭振测试。

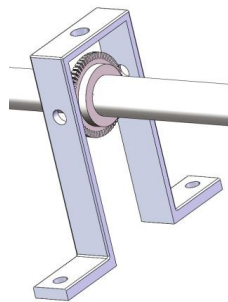


图7 传感器安装支座

3 应用软件设计

VB.NET 是一种为高效地生成类型安全应用程序而设计的语言,具备多线程(Multi-Thread)技术、面向对象编程(OOP)技术、结构化处理(Structured-handling)技术等优点。根据所需采集数据内容制定相应采集方法,综合时域、频域、时频等数据分析方法,基于 VB.NET 进行应用软件的设计开发^[10, 11]。多功能试验台的应用软件主要是由数据采集模块、数据分析模块、系统管理模块、辅助功能模块、数据库组成,软件系统的架构如图8所示。

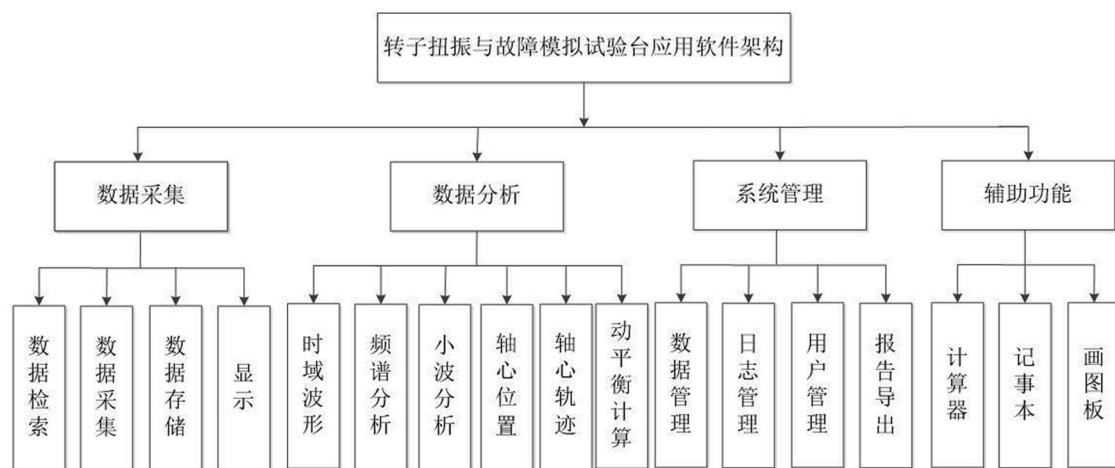


图8 转子扭振与故障模拟多功能试验台应用软件架构

3.1 数据采集

传感器测量获得振动加速度等物理量转换成电信号后,通过数据采集系统采集,再转换为计算机可识别接收的数字信号。多通道的数据采集卡将磁电式传感器、电涡流传感器、机械式扭振测试传感器以及扭振遥测系统转换获得的电信号传送到客户端,经应用软件的数据采集模块对原始信号进行存储、预处理、显示等操作。为方便用户处理历史数据,软件还添加了数据检索功能。

数据采集方面,采样频率的设置决定了采集得到的数据是否真实有效。根据Nyquist采样定理,采样频率超过信号最高频率两倍时,采集的数字信号才能完整地保留原始信号的信息,而工程应用中采样频率通常设置为原始信号最高频率的5—7倍。电机转速为3 000 r/min(50 Hz),软件中采样频率的设置要求在300 Hz以上。

3.2 数据分析

扭振分析最简单直接的方法是观察扭转角的频谱图,数据分析模块的频谱分析可将时域信号滤波后,经傅里叶变换得到频谱图,可获得扭振频率。对振动信号还可采用时频分析方法,软件提供小波分析功能,小波变换不仅能提取振动信号特征,还能提取信号的奇异性特征。对电涡流测量获得两个方向的位移信号进行处理,得到轴心位置和轨迹,可通过轴心的形状进行故障分析。针对动平衡试验,特增加动平衡计算模块,方便动平衡的计算与校正。

3.3 系统管理

系统管理模块由数据管理、日志管理、用户管理及报告导出组成。数据管理功能方便用户查询、编辑、删除和调用历史数据。日志管理可记录用户的登录登出时间、用户对数据的操作情况,只有获得管

理员权限的用户才能使用该功能。用户管理为软件的安全使用提供方便,管理员可增加新用户,编辑、删除普通用户并对普通用户进行权限设置。报告导出功能按照需求定制规范的报告模板,用户可将信号分析结果(波形图、试验数据等)一键导出为Word格式文档。

3.4 辅助功能

为方便应用软件使用,在数据分析过程中,用户可能需要进行简单的数学计算、文本记录和简单的图形绘制,应用软件提供便捷调用Windows系统自带的计算器、记事本和画图板的功能按钮。

4 结 语

本文对多功能试验台设计方法进行介绍,提供了一个转子试验台设计的参考方案。试验台以扭振测试分析为基础,兼顾动平衡检测与校正功能,并具备转子其他常见故障(如碰摩)的模拟与分析功能。

平台设计方面,介绍了基于ANSYS的转子系统动力学分析过程方法,对阶梯轴强度进行必要校验,以保证试验台在满足设计参数要求前提下可安全运行。扭振试验方面,遥测系统与普通机械式扭振测试传感器对比测试,以便多方面进行转子扭振振动信号分析。软件系统方面,针对试验台,特设计基于VB.NET的数据采集与分析应用软件,可进行转子振动特性分析。该试验平台改善普通转子试验台功能单一的缺陷,节省试验空间,提高设备利用率,为转子多种故障的模拟与分析提供了便利。

参考文献:

- [1] 贺国强,杨涛,黄树红. 600 MW汽轮机轴系综合试验平台的研发[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(2): 8-10.

(下转第214页)