

# 某连续式跨声速风洞压缩机轴系扭振仿真与测试

杨孝松, 刘宗政, 郭守春

(中国空气动力研究与发展中心 设备设计与测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为满足压缩机轴系扭振激励机理和抑制方法研究需要, 对某连续式跨声速风洞压缩机开展轴系扭振仿真分析和测试; 根据压缩机轴系参数, 对压缩机轴系进行建模仿真, 并得到一阶至四阶扭转振型及对应的转速; 分别采用无线应变扭矩测试方法和齿轮盘-电涡流扭振测试方法对压缩机轴系扭振情况进行测试, 并得到相应的扭矩幅值、扭角以及扭振转速点等数据; 测试结果表明, 理论建模仿真、无线应变扭矩测试方法和齿轮盘-电涡流扭振测试方法得到的压缩机轴系扭振数据一致性良好, 建模仿真方法和测试方法可行, 相关分析测试数据可作为后续压缩机轴系扭振激励机理和抑制方法试验验证的参考依据。

**关键词:** 压缩机; 轴系扭振; 建模仿真; 测试; 数据处理

## Simulation and Test of Torsional Vibration of Compressor for a Continuous Transonic Wind Tunnel

YANG Xiaosong, LIU Zongzheng, GUO Shouchun

(Facility Design&Test Technology Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Simulation and Test of Torsional Vibration of Compressor for a Continuous Transonic Wind Tunnel are carried out to meet the requirement of research on the excitation mechanism and restraint method. The parameters of the compressor shafting are used to model and simulate, and the torsional modes and rotational speed of first to fourth order are obtained. The data of torque amplitude, torsional angle and rotation speed are gotten by using the test method of wireless strain torque test and gear disk-eddy current test. The test results show that the data getting by simulating, wireless strain torque test and gear disk-eddy current test have good consistency, and all the three approaches are feasible. The data of analysis and test can be an important reference for the subsequent experimental verification of the excitation mechanism and restraint method.

**Keywords:** compressor; torsional vibration of shaft system; modeling and simulation; test; data processing

### 0 引言

扭转振动(以下简称扭振)是轴系常见的振动形式之一, 主要是由轴系的驱动扭矩和负载扭矩合成振荡引起的。扭振会引起轴系扭应力的快速变化, 进而加剧轴系的疲劳损伤, 影响轴系运行寿命, 甚至可能导致轴系损伤, 带来严重后果<sup>[1-5]</sup>。

压缩机系统作为风洞的动力源, 主要由变频器驱动电机, 进而拖动压缩机本体产生试验所需的气流, 整套压缩机系统存在机械、电气、流体等耦合, 且系统工作转速范围很大, 轴系承受的负载工况非常复杂。近年来, 随着空气动力试验技术的发展, 风洞尺寸越来越大, 要求风洞配套压缩机的功率也相应越来越大, 由于电机和变频器单机容量的限制, 单台大型压缩机一般由两台或两台以上电机串联拖动, 压缩机系统轴系长度大幅度增加, 且轴系连接更为复杂。例如, 在建的某大型连续式风洞压缩机由两台120 MW电机对拖驱动, 轴系总长近90 m, 轴系包括多个轴承、联轴器和中间轴, 轴系的扭振特性非常复杂; 由于

压缩机系统采用变频驱动方式, 变频器的控制方式、阻抗特性以及谐波分量都有可能放大压缩机轴系的扭振, 带来灾难性后果, 国内也出现过多次大容量风机改造成变频调速后, 出现轴系损坏的情况<sup>[6-8]</sup>。

为了保证大型压缩机轴系的运行安全性, 需要系统性地研究变频调速下的压缩机轴系振动激励机理以及扭振抑制措施。前期, 已经开展了压缩机轴系振动激励机理和振动抑制措施的相关工作, 需要开展相关试验验证。

而某连续式跨声速风洞作为某大型连续式风洞的引导风洞, 压缩机的布局形式和结构形式均与某大型连续式跨声速风洞类似; 且某连续式跨声速风洞压缩机在使用过程中发现, 1 000~1 500 rpm范围内存在较为明显的扭振现象, 正好可作为开展轴系振动激励机理分析和扭振抑制措施研究的试验验证平台。

为了获得轴系振动激励机理分析和扭振抑制措施研究的量化数据, 需提前对某连续式跨声速风洞压缩机的轴系扭振情况进行测试, 以作为压缩机轴系扭振建模仿真方法

收稿日期: 2023-12-12; 修回日期: 2024-01-21。

作者简介: 杨孝松(1983-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 杨孝松, 刘宗政, 郭守春. 某连续式跨声速风洞压缩机轴系扭振仿真与测试[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 28-34.

验证和在该风洞上开展轴系扭振抑制措施验证的数据支撑。

### 1 某连续式跨声速风洞压缩机系统基本架构及原理

某连续式跨声速风洞压缩机系统由压缩机、联轴器、主电机、变频器、控制系统、辅助系统以及旁通回流防喘振阀等组成, 压缩机为轴流式压缩机, 结构形式为水平剖分, 进排气型式分别为轴向进气和轴向排气。

压缩机通过两台额定功率为 2 500 kW 的异步电机对拖驱动, 压缩机总长约 13 m (含电机)。压缩机与电机由膜片联轴器联接, 转速范围为 60~3 600 rpm; 压缩机轴系共配置 B1~B6 共 6 个轴承座, 每个轴承座由辅助系统提供润滑油和顶升油, 以保证轴承运行安全。

压缩机轴系如图 1 所示。

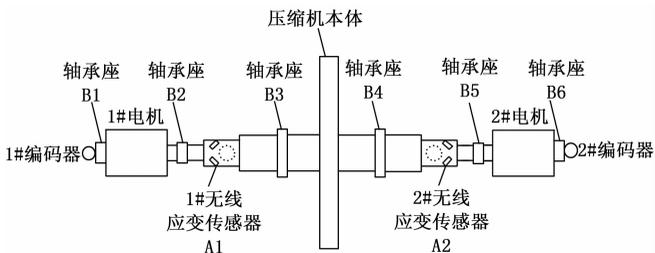


图 1 某连续式跨声速风洞压缩机轴系示意图

压缩机采用变频调速方式驱动, 变频器选用 H 桥功率单元级联型高压大功率变频器。风洞试验时, 压缩机控制系统启动辅助系统, 为压缩机提供运行必需的油、水、气等; 具备运行条件后, 压缩机控制系统启动变频器并设定目标转速, 变频器通过电机非驱动端安装的增量式光电编码器来检测每台电机的转速, 并通过矢量控制方式结合同步控制算法, 实现两台电机的转速同步控制, 进而实现压缩机转速的高精度控制, 从而获得风洞试验所需的流场参数; 在压缩机运行全过程, 控制系统均实行安全联锁保护, 根据运行情况, 对压缩机实行紧急停机保护或防喘振保护。

### 2 压缩机轴系扭振特性建模仿真

通常概念中, 电动机与负载间的机械轴是刚体, 轴两端的转速和转角相同。但实际上轴是有弹性的, 要扭转一定角度才能传递转矩, 轴两端的转速和转角不可能完全相同。若轴短粗, 它的弹性变形可以忽略, 能视之为刚体; 若轴细长, 弹性变形不可忽略, 轴系将变成一个振荡环节。由于本套压缩机轴系长约 13 m, 轴系长径比较大, 且采用双电机同步对拖, 轴系承受的转矩变化较大, 因而扭振现象比较明显。

为获得某连续式跨声速风洞压缩机轴系扭振的各阶振型, 并与最终的扭振实测结果进行对比, 以印证轴系扭振特性建模仿真方法的可行性, 作为某大型连续式风洞压缩机轴系扭振建模仿真的技术支撑, 对某连续式跨声速风洞压缩机轴系开展扭振特性建模仿真。

扭振特性建模仿真使用 Dyrobes 转子动力学软件, 该软件能够实现轴系横向振动、扭转振动以及轴向振动等分析功

能, 并能进行多振动型式的耦合分析, 还可以精确模拟分析轴承、齿轮等多种传动部件。

根据软件的输入参数要求, 结合压缩机轴系参数, 对电机转子、电机轴承、联轴器、压缩机转子、压缩机轴承以及中间轴等进行数据简化。

将压缩机轴系简化为 176 个单元, 分别对每个单元的单元长度、质量内径、质量外径、刚度内径、刚度外径、附加质量、附加直径转动惯量和附加极转动惯量等进行数据简化 (见表 1、表 2); 在此基础上, 对压缩机轴系的扭振情况进行仿真分析, 获得压缩机轴系扭振振型和固有频率。

表 1 压缩机轴系尺寸数据简化

单元号	单元长度 /mm	质量内径 /mm	质量外径 /mm	刚度内径 /mm	刚度外径 /mm
1	0.05	0	0.17	0	0.17
30	0.059	0	0.262	0	0.262
60	0.131	0.3	0.308	0.3	0.308
90	0.066	0	0.754	0	0.754
120	0.131	0.3	0.308	0.3	0.308
176	0.05	0	0.17	0	0.17

表 2 压缩机轴系质量及转动惯量数据简化

单元号	附加质量/kg	附加直径转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	附加极转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )
1	69	0	3.35
30	80	0	3.75
60	10.543 5	0	0.125 1
90	34.54	0	10.258
120	10.543 5	0	0.125 1
176	69	0	3.35

根据简化数据, 建立轴系扭振的系统模型, 如图 2 所示。



图 2 压缩机轴系扭振仿真模型

基于系统模型, 得到压缩机轴系扭振的固有特性, 包括扭振固有频率和振型, 如图 3~6 所示。

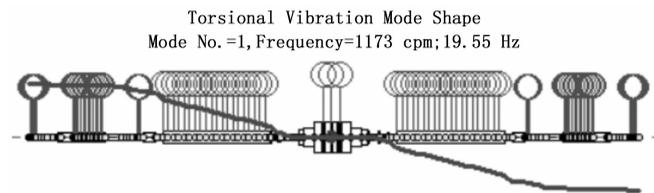


图 3 一阶扭振振型

根据仿真分析结果, 压缩机轴系扭振的前四阶固有转速分别为: 1 173、1 488、7 510 和 7 550 rpm。其中, 只有一阶和二阶落在压缩机运行转速范围内, 因此, 后文的测试分析

Torsional Vibration Mode Shape  
Mode No.=2, Frequency=1488 cpm; 24.79 Hz

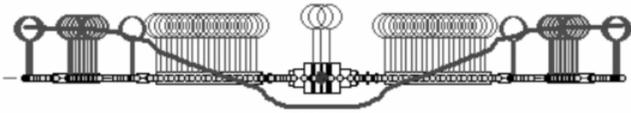


图 4 二阶扭振振型

Torsional Vibration Mode Shape  
Mode No.=3, Frequency=7510 cpm; 125.17 Hz

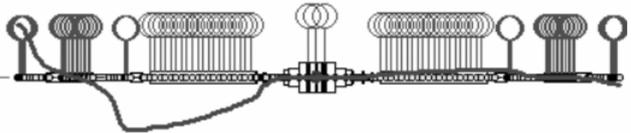


图 5 三阶扭振振型

Torsional Vibration Mode Shape  
Mode No.=4, Frequency=7550 cpm; 125.84 Hz

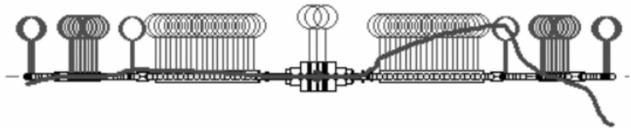


图 6 四阶扭振振型

主要针对一阶和二阶扭振开展工作。

### 3 压缩机轴系扭振测试方案

旋转机械轴的扭振测量有多种方法,但总体分为接触测量法和非接触测量法<sup>[9]</sup>。

接触测量法是将传感器安装在旋转机械轴上,信号通过集流环或无线发射方式传送给采集系统。通过测试传感器的应变信号得到轴系截面对应的剪切应变,然后由剪切应变得到轴系的施加扭矩,而轴系扭矩与扭角呈正比例关系,因此,可通过扭矩的变化间接得到轴系扭角的变化情况;同时,加入转速信号后,结合轴系扭矩和转速也可以计算得到轴系的功率<sup>[10-12]</sup>。

非接触测量法一般采用“测齿法”,即在机械轴上安装编码器或齿轮盘,通过测量角度的不均匀性来达到测量扭振的目的。其原理是利用装在轴上的等分齿轮盘,通过电涡流传感器,发出等角位移脉冲,然后通过采集系统测量得到相邻脉冲间的时间间隔,从而得到扭转的角度差和角速度差<sup>[13-15]</sup>。

本系统采用无线应变扭矩测试法和齿轮盘—电涡流测试法分别对压缩机轴系扭振情况进行测试,以获得可对比数据。

#### 3.1 无线应变扭矩测试方案

无线应变扭矩测试属于接触测量法,最突出的优点是可以直观地反映传动轴应变力情况。将无线应变传感器安装在压缩机传动轴上,当传动轴受力时会产生极为细微的扭力形变,应变传感器将扭力形变信号传送给采集系统进行分析处理,最终得到压缩机轴系扭振情况。

无线应变扭矩测试系统包括应变传感器、应变采集和转

速信号采集系统。应变传感器采用半桥方式连接,45°粘贴,可有效消除轴系拉压应变和温度影响;转速信号采用激光+标签码方式测量。

在图 1 中的 B1~B6 共 6 个轴承座处的转轴上,分别安装一个激光传感器,同时在转轴 360°方向上均布反射光标,用于各位置转轴的扭角测量。激光传感器通过检测反射光标,生成连串的脉冲信号,扭振采集系统对脉冲信号进行采集,测试得到每个反光光标的相位信息,经计算扭振特征信息(包括扭振频率和振幅等),并计算出扭振的频谱数据和时域波形。

在图 1 中压缩机中间轴 A1、A2 处分别安装一组应变片,用于测试该处的剪切应变。应变片信号连接到信号发射盒,信号发射盒通过无线的方式将应变信号传送给扭矩测试系统,扭矩测试系统对信号进行调理处理后,获得相应的扭矩数据。

无线应变扭矩测试系统选用东昊 DH5905N 型产品,用于旋转轴的扭矩和轴功率等物理量的测量,测试系统采用 WiFi 通信技术,可实时采集数据并无线传送给计算机,从而实现旋转轴扭矩和轴功率的实时计算分析和存储显示。

#### 3.2 齿轮盘—电涡流扭振测试方案

齿轮盘—电涡流扭振测试属于非接触测量法,系统由齿轮盘、电涡流传感器和采集分析系统等组成。齿轮盘设计加工成两半,通过螺栓拧紧固定于测试轴上,外置电涡流传感器探头。首先利用电涡流传感器探头采集安装在轴系上的等分齿形结构的类正弦信号,然后计算出齿盘上的每个齿经过传感器探头的时间间隔,再通过每个齿经过传感器探头的时间间隔以及对应的分度角求出每个齿经过传感器的瞬间角速度。根据瞬间角速度计算得到齿轮盘每个齿转过探头时轴系产生的扭角,叠加探头转过每个齿时产生的扭角,并对叠加后的扭角信号进行处理分析,进而得到轴系扭振信息。

由于压缩机轴系还存在弯曲振动情况,弯曲振动可分解为水平分量和垂直分量,水平分量对电涡流传感器的调制信号无影响,而垂直分量会使靠近电涡流传感器的齿轮线速度叠加上一个由该弯曲振动形成的附加分量,影响电涡流传感器的调频信号<sup>[16-18]</sup>。为应对此影响,每个测点安装两只相对 180°的电涡流传感器,180°对称的双电涡流传感器对弯曲振动的调频是相反的,对双传感器的信号进行合成,即可消除弯曲振动的影响。

因此,在图 1 中的 6 个轴承座处的转轴上分别安装一个齿轮盘,在齿轮盘对应的地基处 180°对称安装两支电涡流传感器。齿轮盘随着压缩机轴转动时,电涡流传感器实时测试每个齿的相位信息,数据采集及分析系统根据电涡流传感器传送的转速和齿数,计算得到扭转相位差,得到相应的扭振特征信息。

齿轮盘—电涡流扭振测试系统选用东昊 DH5972N 型产品,可完成电涡流传感器、磁电式速度传感器等传感器信号的监测。内置 DSP 实时处理系统,所有数据均可实时处理;采用 DMA 方式实时传送数据,可以实现对所有数据不间断

实时识别;支持通道卡分组,可根据测试需要对每组通道设置不同的采样频率。

### 3.3 两种测试方案的对比分析

#### 3.3.1 无线应变扭矩测试方法

采用无线应变扭矩测试方法测量轴系扭矩,半桥或全桥粘贴应变片方式可消除轴系弯矩、温度、拉压应力等其他因素干扰,直接测量轴系扭矩和转速,得到扭矩和转速关系,当发生轴系共振时,扭矩-转速图上出现扭矩峰值,表示该转速下轴系发生共振。

无线扭矩测试方法安装简单,可在不改变既有结构的前提下,加装反光标签、应变片、采集模块、供电模块等附件;采用无线信号传输方式,有效避免了轴系转动(旋转机械)应变信号传输问题;可以直接测试轴系扭矩,当在某个转速轴系扭矩出现急剧增加时,表示轴系发生共振,结合扭矩、轴系材料参数和几何尺寸可进一步得到轴系切应力。

无线扭矩测试方法主要优点为:通过测试切应力直接测试轴系扭矩,反映轴系受扭矩作用大小,测试准确度较高;信号采用无线传输方式,测试通用性强。

无线扭矩测试方法主要缺点为:无线信号传输距离有限,测试范围局限;供电模块固定于轴系上,无法长时间续航测量;无法进行阶次谱分析。

#### 3.3.2 齿轮盘-电涡流扭振测试

齿轮盘-电涡流扭振测试,通过计算齿轮盘时间间隔,可以有效测试轴系扭角,然后通过时域扭角信号进行傅里叶变化得到阶次谱、幅值谱,有效测量轴系扭振。但该方法不能直接测试轴系扭矩。

齿轮盘-电涡流扭振测试方法主要优点为:测试原理简单高效,可直接计算扭角,并进行阶次谱、幅值谱分析。

齿轮盘-电涡流扭振测试方法主要缺点为:对齿轮盘的加工精度和安装精度要求高,对安装环境要求较高,可能存在加工误差和安装误差。

#### 3.3.3 两种测试方法对比

无线应变扭矩测试方法和齿轮盘-电涡流扭振测试方法都可有效测量轴系扭振。无线应变扭矩测试方法通过直接测量轴系扭矩反映轴系扭振状态,齿轮盘-电涡流扭振测试方法通过测试轴系扭角变化情况来反映轴系扭振,以上两种测试手段都是常见的方法,只是测试原理不一样,可以用来相互验证和校准。

### 3.4 信号流程及数据处理分析方法

#### 3.4.1 信号流程

扭振测试主要按照监测点——传感器——数据采集——数据分析——图形曲线显示的流程执行,如图 7 所示。

传感器测得信号的信号通过相应的采集卡进行采集,采集卡采集到的信号经过信号调理、滤波,再通过进入数据采集系统进行处理分析,最终将分析结果在显示设备上显示。

#### 3.4.2 数据主要处理方法

压缩机扭振存在两种测试工况:压缩机升速过程中的

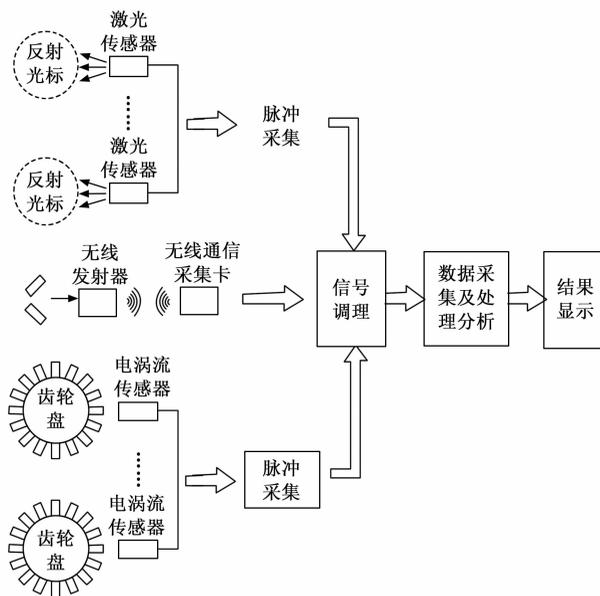


图 7 扭振测试信号流程图

扭振测试、压缩机稳定转速点的扭振测试,两种测试工况的区别主要体现在对采集系统的采样频率要求不同<sup>[19-20]</sup>,由于无线应变扭矩测试系统和齿轮盘-电涡流扭振测试系统的采样频率均可达 10 kHz 以上,远高于转速变化带来的轴系振动变化频率,因此,压缩机升速工况下和稳速工况下的扭振测试及数据处理方法类似。

扭振信号数据处理主要包括扭振信号提取、转速信号滤波、扭角时域信号获取和扭角频域信号获取等步骤。

#### 1) 扭振信号提取:

首先利用电涡流传感器探头采集安装在轴系上的等分齿形结构的类正弦信号,然后通过采集卡上传原始位移数字信号,采用过零检测法计算出齿盘上的每个齿经过传感器探头的时间间隔,再通过每个齿经过传感器探头的时间间隔以及对应的分度角求出每个齿经过传感器探头时的瞬时角速度  $n_i$ ,进而得到轴系平均转速  $n_c$ :

$$n_c = \frac{1}{Z} \sum_{i=0}^Z n_i \quad (1)$$

式中,  $Z$  为齿轮齿数,  $n_i$  为第  $i$  个齿的瞬时转速。

假设第  $i$  个齿经过电涡流传感器探头的时间间隔为  $T_i$ ,此时齿盘上的轮齿经过传感器探头时轴系产生的扭角  $\theta_i$  为:

$$\theta_i = 6(n_i - n_c) T_i \quad (2)$$

为得到轴系扭角时域变化,需要将探头转过每个齿时产生的扭角进行积分。例如探头经过第  $k$  个齿轮时的轴系扭角  $\theta_k$  为:

$$\theta_k = \int_0^{T_k} \theta_k dt = \sum_{i=1}^k 6(n_i - n_c) T_i \quad (3)$$

通过上述分析即可得到扭角时域信号,然后可通过快速傅里叶变化对轴系扭角时域信号进行后处理,得到轴系扭角的幅值谱、阶次谱等信息,实现对压缩机轴系扭振的

监测与信息提取。

#### 2) 扭振信号滤波:

在实际扭振测试环境中,存在负载变化、电机调速等引起的干扰,使得电涡流传感器测得的扭振信号存在较大的噪声,导致电涡流传感器输出的原始信号存在噪声干扰,为降低这些随机噪声信号对扭振测试结果的干扰,对采集的信号进行周期平均滤波。

将周期性波动的旋转轴系振动位移信号表示为:

$$y(n) = y(n) + K_z \quad (4)$$

式中,  $n$  为数据序列号,  $K_z$  为 0,  $\pm 1, \pm 2$ 。

为降低这些因素对采集的信息的干扰,可以使用周期平均来抑制这些误差因素对瞬时转速计算的影响,周期平均滤波公式如下:

$$n_{ci} = \frac{1}{z} \sum_{k=1}^z n_{k+Z(i-1)} \quad (5)$$

式中,  $n_{ci}$  为第  $i$  齿的平均瞬时转速,  $z$  为平均周期数,  $n_{k+Z(i-1)}$  为第  $1 \sim z$  周期第  $i$  齿的转速。

如果选取的周期数比较少,会降低周期平均滤波的效果,如果选取的周期数太多会导致扭振算法的运行速度显著下降,因此,需要根据实际情况,综合考虑滤波周期数的选取。

#### 3) 扭角时域信号获取:

通过瞬时转速和平均转速的计算,可得到齿盘上每个齿经过传感器探头时的瞬时转速信号、平均转速信号以及探头转过每个齿的时间;通过式(2),得到齿轮经过每个齿时轴系产生的扭角,然后通过式(3)将齿盘上每个齿对应的扭角进行积分得到轴系扭角,至此得到了等角域变化的扭角时域波形;最后使用插值重采样,将角域信号转化为等时间采样的扭角信号,对通过上述计算得到的扭角进行时域分析,就可以看到压缩机轴系产生的扭角变化,直观地感受扭角在时间域的变化状态。

#### 4) 扭角频域信号获取:

轴系扭角时域信号虽然能直观地显示压缩机轴系扭振的状态信息,但是实际运行工况下,轴系转角波动是由多谐次扭振以及噪声叠加起来的,在时域上看上去基本没有规律可言,不能得到充分的有用信息。

为进一步得到压缩机轴系扭振信号的频域信息,需将扭角时域信号进行频域变化得到扭角幅值谱,可采用快速傅里叶变化来实现这一过程。采用 Hanning 窗来对信号进行截断加窗处理, Hanning 窗具备良好的综合特性,它衰减快而且旁瓣小,适用于随机信号的加窗与截断,能有效降低能量泄露的影响<sup>[21-22]</sup>。

对等角度采样的扭角时域信号进行滤波后得到的时域采样的扭角信号采样频率为  $F_s$ , 经过加窗后的数据点数为  $N$ , 通过快速傅里叶变化后,扭角时域信号转化为频域上的扭角幅值谱,幅值谱的频率分辨率  $df$  为:

$$df = \frac{F_s}{N} \quad (6)$$

#### 3.4.3 扭振数据主要分析方法

对扭振数据处理完毕后,需要对相关数据进行分析以已获得相关扭振各阶模态和振型等参数,主要分析方法如下:

1) 使用数据采集系统,获得相关传感器的时域信号,根据 3.4.2 节的数据处理方法对相关信号进行处理,获得频响函数、相干函数等数据文件,分析频率段内相干函数曲线均在 0.8 以上,则表示试验的重复型号,结果可信;

2) 通过对曲线的分析可得到各阶固有频率数据,分析频响函数的幅值、虚部、实部的频域曲线与相位曲线的对比,当幅值的频域曲线峰值恰好对应相位突变到  $90^\circ$ ,可判定该点是固有频率点;

3) 通过模态分析系统中特征系统实现算法,将数据采集软件输出的频响函数导入到模态分析软件,选择分析的频率段,通过峰值计算可获得相应的频率点、阻尼比,还可查看模态确信指标 MAC 值计算结果(MAC 值范围为 0~1,对于不同阶模态的两个向量,MAC 值接近于 0,对于同阶模态的两个向量,MAC 值接近于 1);

4) 通过曲线拟合,由计算机进行参数识别,得到各阶模态参数(峰值、频率阻尼等)和相应的模态振型。

## 4 测试结果与分析

### 4.1 测试方法及步骤

根据第 2 章的仿真分析结果,得到在转速 1 173 rpm 和 1 488 rpm 附近存在扭振点。为避免实际发生扭振风险,扭振测试先在最低转速点(60 rpm)测试该点的扭矩数据;再对压缩机进行升速,并在升速过程中连续进行扭振测试;压缩机到达 2 000 rpm 后,稳定运行,并测试该点的扭矩数据。

主要测试步骤如下:

1) 测试装置和测试传感器安装完成后,在计算机上输入轴系内外径、弹性模量和泊松比等参数,启动系统数据采集;

2) 压缩机控制系统控制压缩机转速稳定在 60 rpm,扭振测试系统采集该转速点的扭振数据;

3) 控制压缩机逐渐由低速上升至约 2 000 rpm,在转速逐渐上升过程中,扭振测试系统实时采集轴系扭振数据;

4) 压缩机稳定运行在 2 000 rpm,扭振测试系统采集该转速点的扭振数据;

5) 采集完毕后,压缩机降速至 60 rpm,等待下次测试。

为了保证数据的可靠性,无线应变扭矩测试方法和齿轮盘-电涡流扭振测试方法各进行 3 次重复测试。

### 4.2 无线应变扭矩测试结果及分析

#### 4.2.1 升速过程中的扭振点测试

图 8 为无线应变扭矩测试方法获得的轴系转速和扭矩变化情况。图中可发现,在压缩机转速上升过程中存在两个明显扭矩峰值,约在 1 244 rpm 和 1 442 rpm 附近,而扭

矩峰值又与扭角峰值相对应, 这说明在这两个转速附近, 轴系发生较为强烈的扭振。

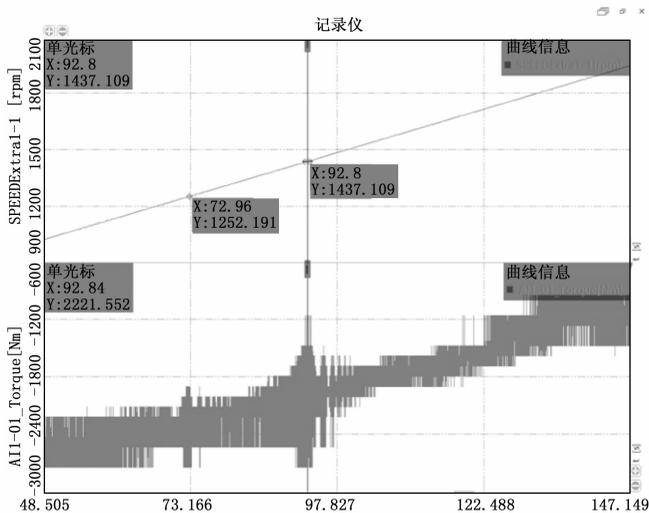


图 8 转速上升过程轴系转速和扭矩变化图

两个转速点的扭矩峰值如表 3。

表 3 压缩机轴系扭振点扭矩峰值表

测试次数	一阶转速 /rpm	扭矩峰值 / (N·m)	二阶转速 /rpm	扭矩峰值 / (N·m)
1	1 241	1 163.67	1 439	1 375.246
2	1 254	952.094	1 438	1 375.246
3	1 239	952.094	1 450	1 163.670
平均值	1 244.7	1 022.6	1 442.3	1 304.7

与轴系建模仿真分析结果对比发现, 无线应变扭矩测试得到的两个扭振转速点与建模仿真分析得到的一阶和二阶扭振转速点比较接近。

#### 4.2.2 稳定转速点扭矩测试

对最低测试转速点和最高测试转速点的扭矩进行测试, 作为后续实施扭振抑制策略试验验证的参考数据。

两个转速点的扭矩测试数据如表 4 所示。

表 4 稳定转速点的扭矩峰值表

测试次数	最低转速 /rpm	扭矩峰值 / (N·m)	最高转速 /rpm	扭矩峰值 / (N·m)
1	60	528.941	2 000	740.517
2	60	527.56	2 000	734.729
3	60	525.833	2 000	746.305
平均值	60	527.4	2 000	740.5

由表 4 可知, 在最低测试转速点和最高测试转速点的扭矩峰值均远小于扭振点的扭矩峰值。

#### 4.3 齿轮盘—电涡流扭振测试结果及分析

图 9 为齿轮盘—电涡流扭振测试方法获得的轴系转速和扭角变化情况。

可以看出, 在 1 225 rpm 和 1 473 rpm 附近出现扭角峰值 (两个转速点的扭角峰值如表 5 所示), 扭角急剧上升然

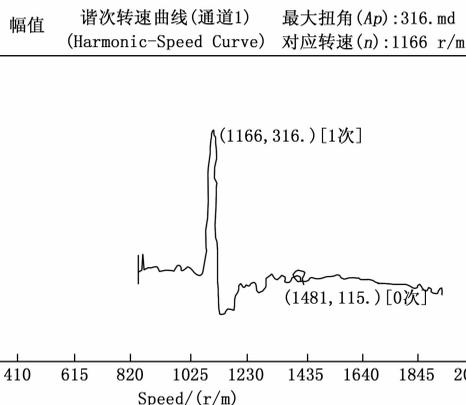


图 9 升速过程轴系转速与扭角变化关系

后下降, 峰值转速与无线应变采集扭矩峰值对应的转速基本一致, 也接近理论仿真分析得到的轴系一二阶共振转速, 表明测试结果可信度高。

表 5 压缩机轴系扭振点扭角峰值表

测试次数	一阶转速/rpm	扭角/md	二阶转速/rpm	扭角/md
1	1 213	359	1 449	357
2	1 282	350	1 483	347
3	1 180	356	1 489	350
平均值	1 225	355	1 473.7	351.3

## 5 结束语

通过对某连续式跨声速风洞压缩机轴系进行建模仿真, 得到了一阶~四阶扭振振型和固有转速, 并分别用无线应变扭矩测试方法和齿轮盘—电涡流扭振测试方法对落入转速范围区域的一阶和二阶扭振进行了多次重复测试, 两种测试方法得到的结果基本一致, 也接近轴系扭振建模仿真分析结果, 验证了建模仿真分析和测试方法的可靠性和可行性。

测试结果可对后续在某连续式跨声速风洞针对性地开展压缩机轴系扭振激励机理分析和扭振抑制措施试验验证提供重要的数据参考。

#### 参考文献:

[1] 高崇一, 魏云平, 秦红星, 等. 轧机主传动机电耦合扭振系统激励分析及影响因素研究 [J]. 机械强度, 2020, 42 (4): 966-970.

[2] 肖忠会, 王学军, 胡永, 等. 离心压缩机组轴系扭振分析技术与应用 [J]. 风机技术, 2013 (3): 30-37.

[3] WACHEL J C. SZENASI F R. Analysis of torsional vibration in rotating machinery [C] //Proceedings of the Twenty-Second Turbo Machinery Symposium, 1993: 127-151.

[4] 李建科, 何国华, 兰涌森, 等. 风力发电机组传动系统轴系扭振测量与抑制 [J]. 船舶工程, 2019, 41 (1): 252-255.

[5] 张晓玲, 沈韶华, 谷文港. 基于虚拟仪器的转子扭振特性测试系统研究 [J]. 机械设计与研究, 2007, 23 (5): 77-86.

- [6] 赖成毅. 高压变频器驱动大容量风机轴系扭振抑制技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [7] 冯西桥, 陈伟. 1000MW 机组引风机变频改造扭振的分析 [J]. 中国电力, 2016, 49 (6): 61-66.
- [8] 吴小丹, 王凯, 马志恒, 等. 大型发电机组转子轴系扭振抑制策略研究 [J]. 电力电子技术, 2019, 53 (11): 50-54.
- [9] 郭力, 李波. 轴系扭振测量方法评述 [J]. 磨床与磨削, 2000, 33 (3): 53-56.
- [10] 何青, 杜冬梅. 机组轴系扭振智能测量系统研究 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28 (4): 708-713.
- [11] 安军, 唐东炜, 林云峰, 等. 基于虚拟仪器的旋转机械振动测试系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2009 (2): 20-22.
- [12] 熊晓燕. 高分辨率扭振测量方法及其应用 [J]. 振动·测试与诊断, 2003, 23 (1): 41-44.
- [13] SHEPPARD D J. Torsional vibration resulting from adjustable-frequency AC drives [C] //IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 24 (5): 812-817.
- [14] 乐开端, 唐经源, 张文定. 同转机械扭振测量技术研究 [J]. 光子学报, 2001, 7 (30): 868-870.
- [15] TUSTINW. Torsional vibration testing [J]. Test Engineering & Management, 2006, 68 (6): 14-15.
- [16] 张勇, 蒋滋康. 旋转轴弯曲振动与扭转振动耦合的分析 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2000, 40 (6): 80-83.
- [17] 姜兴安. 变频电机驱动的齿轮轴系的弯扭耦合分析 [D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [18] ALEXANDER G, BECKFORD, MANCUSOB A. Restraining torsional vibration [J]. The Magazine of Power Generation and Plant Energy Systems, 2010, 154 (3): 16-20.
- [19] 朱利民, 钟秉林, 黄仁. 离散频谱多点卷积幅值修正法的理论分析 [J]. 振动工程学报, 1999, 12 (1): 120-125.
- [20] 徐敏强, 张嘉钟. 一种提高周期信号谱分析质量的方法 [J]. 动态分析与测试技术, 1995, 13 (3): 10-15.
- [21] 朱小勇, 丁康. 提高扭转振动信号分析精度的方法研究 [J]. 汕头大学学报, 2012, 34 (3): 27-33.
- [22] 王恒宇, 田中旭, 邓康耀. 发动机曲轴系扭振测量的谐波提取及精度分析 [J]. 柴油机, 2000, 15 (2): 33-36.

~~~~~

(上接第 27 页)

#### 参考文献:

- [1] 李维. DME 模拟器随机脉冲和回答概率功能的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [2] STEINGASS A, HORNBOSTEL A, DENKS H. Airborne measurements of DME interferers at the European hotspot [C] //Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. IEEE, 2010: 1-9.
- [3] 张素敏. 对塔康导航系统的对抗技术研究 [J]. 无线电工程, 2009, 39 (10): 28-31.
- [4] 刘立盛, 刘靖. 塔康导航系统地面专用检测设备校准方法研究 [J]. 国外电子测量技术, 2012, 31 (7): 15-19.
- [5] 徐敬舟, 刘新强, 陈明权, 等. DME/VOR 导航设备的应用研究 [J]. 中国新技术新产品, 2019 (11): 8-9.
- [6] 杨炯. 基于 DME/DVOR 导航设备的监控系统 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [7] WANG H, LIU R. DME/TACAN interference mitigated by mixed blanking in B2 band [C] //IEEE International Conference on Communication Technology, Jinan, 2011: 897-900.
- [8] 成勇进. 基于 FPGA 的 DME 机载接收机设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [9] OBERHOLZER G, SOMMER P, WATTENHOFERR. SpiderBat: augmenting wireless sensor networks with distance and angle information [C] //International Conference on Information Processing in Sensor Networks. IEEE, 2011.
- [10] 管伟. 民航空管 DVOR/DME 导航台信号覆盖与飞行程序综合分析及应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [11] 钟伦珑, 王颖. 飞管综合导航功能虚拟实验教学平台开发 [J]. 工业控制计算机, 2021, 34 (7): 47-49.
- [12] 刘贵行, 魏国, 赵世伟. 机载测距机测试平台设计与开发 [J]. 现代电子技术, 2019, 42 (11): 165-168.
- [13] 杨银. 基于 DVOR 和 DME 区域导航的仿真研究及性能分析 [D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [14] 罗伟, 王平. DME-42 测距仪及其在运七-100 型飞机上应用的研究 [J]. 南昌大学学报 (理科版), 1997 (4): 77-81.
- [15] 任晋林, 张文喆, 卫沁池, 等. 基于 FPGA 的脉冲信号参数测量仪设计 [J]. 运城学院学报, 2018, 36 (6): 52-55.
- [16] 周卫东. 组合导航系统应用软件可靠性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [17] 肖雅梅. 对基于 DME/DVOR 导航设备的监控系统的分析 [J]. 数字通信世界, 2018, 160 (4): 108.
- [18] 李德明, 胡君辉. 基于 FPGA 的脉冲信号参数测量系统设计 [J]. 实验技术与管理, 2019, 36 (5): 101-106.
- [19] 高英杰, 陈婕, 刘飞, 等. 基于 FPGA 和单片机的实时脉冲信号参数测量仪 [J]. 金陵科技学院学报, 2018, 34 (1): 6-9.
- [20] 李梓瑜, 葛芬, 张劲东, 等. 基于深度强化学习的雷达智能抗干扰决策 FPGA 加速器设计 [J]. 数据采集与处理, 2023, 38 (5): 1151-1161.
- [21] 李娜. FPGA 在导航设备中实现 AGC 控制 [J]. 硅谷, 2013, 5 (2): 43-44.
- [22] 昌鹏, 高瑾. 基于 FPGA 的永磁同步电机电流环带宽拓展的比较研究 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45 (1): 89-93.
- [23] 李金阳. 基于 FPGA 平台的同步磁阻电机转矩脉动抑制方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [24] TUFEKICB, ONALB, DEREH, et al. Efficient FPGA implementation of field oriented control for 3-phase machine drives [C] //IEEE East-West Design & Test Symposium, 2020: 1-5.