

涡旋压缩机轴向动态间隙的实验测量

杨启超, 李连生, 赵远扬, 束鹏程

(西安交通大学流体机械及压缩机国家工程研究中心, 710049, 西安)

摘要: 设计了采用电涡流位移传感器测量喷水涡旋空气压缩机轴向间隙的实验方案和步骤. 传感器采用偏移安装的方式, 避免了动涡盘可能对传感器探头造成的损坏, 并阐述了安装要点. 编制了基于虚拟仪器技术的数据采集系统来记录和保存实验数据. 测量结果表明: 喷水涡旋空压机的轴向间隙在不同转速下变化较大, 低转速和高转速下的典型值为 $75\ \mu\text{m}$ 和 $49\ \mu\text{m}$; 涡旋空压机轴向间隙比涡旋制冷压缩机的轴向间隙大. 测量结果输出波形的频率能够反映动涡盘掠过探头的时间间隔, 因此可以用电涡流位移传感器测量涡旋压缩机的转速, 提供了一种测量压缩机转速的方法, 可对变速压缩机动态特性研究时转速值的确定提供帮助. 总的来说, 电涡流位移传感器结构简单、灵敏度高、静态和动态性能好、输出信号强, 可以满足涡旋压缩机轴向间隙的小位移量的测量要求.

关键词: 涡旋压缩机; 轴向间隙; 电涡流位移传感器; 测量

中图分类号: TH455 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)07-0795-04

Measurement of Axial Dynamic Clearance in Scroll Compressor

YANG Qichao, LI Liansheng, ZHAO Yuanyang, SHU Pengcheng

(National Engineering Research Center of Fluid Machinery and Compressors, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An experimental procedure was designed to measure the dynamic axial clearance in a scroll air compressor with water injection by using an eddy current displacement sensor. To protect the eddy current sensor probe, the sensor was mounted with an offset installation method. The data acquisition system was programmed to record and save the experimental data. The experimental results show that the axial clearance varies with the rotational speed of the compressor and the typical value of axial clearance at low and high speed is $75\ \mu\text{m}$ and $49\ \mu\text{m}$, respectively. The axial clearance in the scroll air compressor is larger than that in the refrigeration scroll compressor. In addition, the frequencies of signal pulse can reflect the change of rotational speed on the basis of the output voltage signals. A new method that could accurately measure the rotary speed of scroll compressors was proposed.

Keywords: scroll air compressor; axial clearance; eddy current displacement sensor; measurement

涡旋压缩机因具有容积效率高、运行可靠、零部件少、噪声低等多方面的优点, 被广泛用于制冷、空调、动力及新能源领域. 作为一种间隙密封结构的容积式压缩机, 动静盘间密封间隙的大小和变化对压缩机的工作效率和可靠性影响很大, 它的合理设计与有效控制是涡旋压缩机研究的关键技术之一.

文献[1]对涡旋压缩机在工作过程中, 其动静涡盘在温度和应力双重负荷作用下的变形情况进行了理论分析和模拟, 讨论了变形对压缩机密封间隙的影响. 理论研究通常借助于三维分析软件, 但缺乏实验验证. 文献[2-3]分别对离心、轴流压缩机的叶顶间隙进行了实验测量. 与透平式压缩机相比, 涡旋式

压缩机的密封间隙要小得多,通常制冷涡旋压缩机的密封间隙为几微米至几十微米,因此对于这样一个小位移量的测量比较困难.在研究涡旋压缩机的绝大部分文献中,其密封间隙常都被假设为固定值,以此来计算和分析压缩机的工作过程、工作特性.涡旋压缩机密封间隙的实际测量不仅能够反映测试水平,而且其测量结果可以用来检验理论模型的准确性,从而推动理论研究的向前发展,因此需要寻求一种能够直接测量出运行时实际间隙的方法.

本文在进行了电涡流位移传感器的静态校正和动态模拟实验的基础之上^[4],进行了实际安装,设计了可行的实验方案及方法步骤,对喷水涡旋式空气压缩机的轴向间隙进行了实际测量.

1 实验样机

实验样机是为 50 kW 质子交换膜燃料电池供气系统研制的喷水无油涡旋空气压缩机,其结构如图 1 所示.涡旋空压机的主要零部件由直流电机、动静涡盘、平衡块以及小曲拐等部分组成.电机主轴通过平衡块与动涡旋盘连接,带动其做回转运动.防自转机构采用 3 个小曲拐形式,小曲拐两端通过自润滑轴承分别插入动涡盘和机架的销孔.少量的水从静盘上的喷水孔进入压缩机的吸气室,起着润滑、冷却和密封的作用.

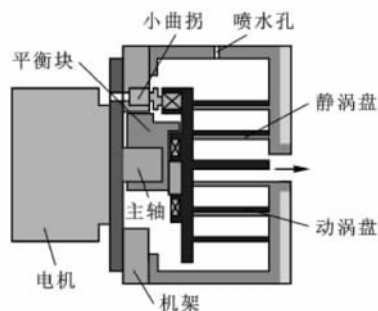


图 1 喷水涡旋空气压缩机的结构简图

涡旋式压缩机是依靠间隙密封的容积式机械,密封间隙包括动静涡盘端面形成的轴向间隙和侧面形成的径向间隙两种类型.由于轴向间隙的泄漏线长度要大于径向间隙,因此轴向间隙比径向间隙在更大程度上影响着泄露量.本文主要针对轴向间隙的测量进行论述.

如图 1 所示,涡旋空压机的静涡盘即是机壳的一部分,为安装位移传感器提供了可能,同时也方便进行传感器的拆装和调试.

2 实验研究

2.1 实验仪器

实验测量系统的流程如图 2 所示.位移传感器测得的物理信号经过放大器处理后变成电信号,通过 NI CB-68LP 接线端子和 NI SHC68-68-S 专用低噪声数据线接入多通道数据采集卡,最后进入计算机进行采集、分析和存储.

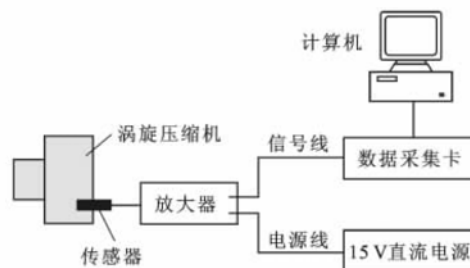


图 2 实验测量系统示意图

2.1.1 传感器模块 实验中所采用的电涡流传感器为德国米铨公司生产的通用型电涡流位移传感器 multiNC DT100-A,型号为 DT110-T-U05-A-C3,其主要参数如表 1 所示.

表 1 电涡流位移传感器主要性能参数

量程/mm	0.05~0.5
探头直径/mm	2
满量程误差/ μm	± 2.5
频率响应/kHz	10
静态分辨率/ μm	0.05
动态分辨率/ μm	0.5
供电电压(直流)/V	± 15
输出电压(直流)/V	0~10
温度补偿范围/ $^{\circ}\text{C}$	10~65
适用材质	铝

传感器模块中主要包括电涡流位移传感器探头、屏蔽电缆和前置放大器 3 部分.传感器工作时由 15 V 直流电源供电.位移传感器探头所测得的位移信号经放大器调理后输出 0~10 V 的直流电压.

2.1.2 数据采集系统模块 由传感器输出的 0~10 V 动态直流电压信号通过基于虚拟仪器技术的数据采集系统记录.实验中采用美国 NI 公司生产的型号为 NI PCI-6221 的高采样率数据采集系统.

它包括 NI PCI-6221 数据采集卡、NI CB-68LP 接线端子和 NI SHC68-68-S 专用低噪声数据线。数据采集卡的主要性能参数如表 2 所示。

表 2 NI PCI-6221 数据采集卡主要性能参数

模拟输入通道个数	16
模拟输出通道个数	2
最大采样率/ $10^3 \times \text{点} \cdot \text{s}^{-1}$	250
电压输入范围/V	± 10 、 ± 5 、 ± 1 、 ± 0.2
输入分辨率/b	16
精度/ μV	$3\ 100(\pm 10\ \text{V}) *$

*:输入电压为 $\pm 10\ \text{V}$ 时的精度。

根据采样定理,采集过程的采样频率必须大于被采集信号最高频率成分的 2 倍。实际中选择更高的频率,以得到较好的波形。本文设定采样率为每秒 1 000 个采样点。接线采用无参考地单端接线方式,依此来确定物理通道的连接。实验中编写了用于涡旋空气压缩机轴向位移测试系统的软件,包括数据的采集、分析、处理以及保存功能。

2.2 实验步骤

为了保护电涡流位移传感器的探头不被动涡盘碰坏,采用如图 3 所示的偏移安装方式。为了防止传感器探头附近的涡圈壁面上产生的电涡流对测量结果的影响,传感器探头必须要有足够的侧面间隙,因此在静涡盘安装传感器探头的附近挖去 3 倍探头直径大小的区域,并将传感器安装位置定在静盘相邻涡圈壁面的中间位置。测量按如下的步骤进行。

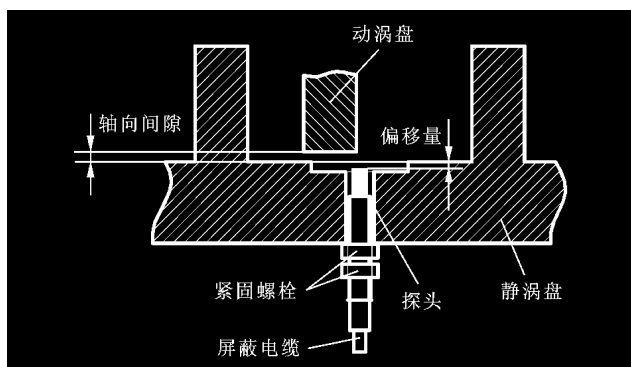


图 3 位移传感器非平齐安装示意图

首先,在进行实际测试之前,位移传感器通过静校仪进行校正,以获得准确的灵敏度和校准曲线。具体实验方法可参考文献[4]。

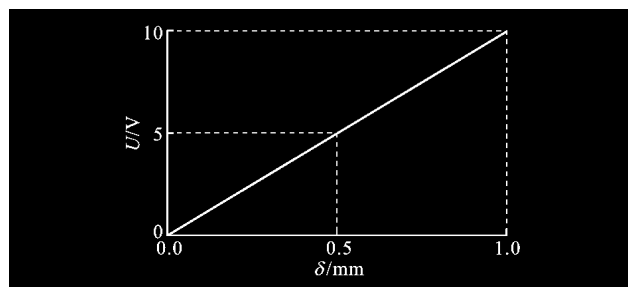
其次,应仔细确定校准后的位移传感器所需偏移量的大小,可通过试件实验得到。偏移量大小的确

定原则是保证探头不被动涡盘碰到,同时涡旋压缩机在工作时,其轴向间隙的变化范围在电涡流位移传感器的测量量程之内。偏移量是计算最终轴向间隙的一个参考值。涡旋空压机的轴向间隙的实际大小就是所测得的间隙值减去偏移量后的值。

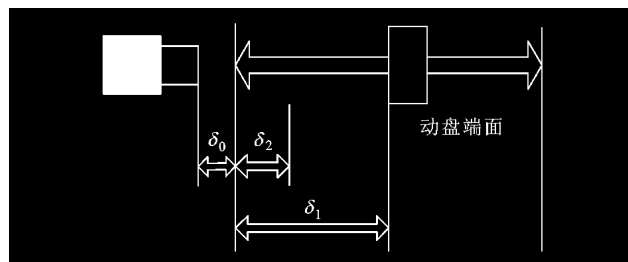
根据如图 4 所示的轴向间隙计算示意图以及校准的涡流传感器静态曲线,可用下式来计算实际的轴向间隙

$$\delta_a = \delta_1 - \delta_2 \quad (1)$$

式中: δ_a 为实际轴向间隙; δ_1 为实际测量的间隙; δ_2 为偏移量,由实验确定。



(a)传感器信号输出校准曲线



(b)传感器安装与校准曲线对应图示

图 4 轴向间隙计算示意图

实际测量的间隙可通过下式来计算,取决于电涡流位移传感器静态校正特性

$$\delta_1 = 0.05U + \delta_0 \quad (2)$$

式中: $\delta_0 = 0.05\ \mu\text{m}$ 为静态校正时的初始偏移量; U 为数据采集系统记录的位移传感器的输出电压。

涡旋压缩机实际轴向间隙计算公式为

$$\delta_a = 0.05U + \delta_0 - \delta_2 \quad (3)$$

2.3 安装要点

(1)为确保压缩机安全可靠运行及传感器探头不被运动的压缩机动盘所损坏,安装在静盘底部的传感器采用如图 3 所示的偏移安装方式,同时为保证机器运行时轴向间隙位于传感器量程范围之内,应谨慎确定探头偏移量并在实际测量之前将探头定位和紧固。

(2)根据电涡流的测量原理,传感器必须要有足够的侧面间隙,因此传感器安装位置应处于静盘相

邻涡圈壁面的中间位置,且在静涡盘安装传感器探头的附近挖去3倍探头直径大小的区域,以防止附近的涡圈壁面上产生的电涡流对测量结果的影响。

(3)传感器安装采用螺纹连接方式,为保证密封及安装可靠,螺纹用耐高温垫圈和密封胶密封,并用螺帽紧固以尽量减小振动造成的松动对测量结果的影响。

3 实验结果及分析

图5所示为用与涡旋压缩机材料相同的铝质试件实验得到的偏移位置量的输出信号波形。涡流传感器输出波形的幅值变化反映了间隙的改变。低电压信号表示试件覆盖在传感器探头之上的时刻,此时所对应的间隙即为偏移量。高电压信号表示试件不在探头之上,此时的电压信号理论上已经超出量程范围,会存在一个最大的静态电压值^[4],但图5所示电压为9.6 V,小于静态电压值,这是由于非平齐安装传感器时四周材料对探头的影响造成的。用低电压信号的平均值作为偏移量,根据式(3)可知,在输出电压平均值为0.68 V时,对应的偏移量为0.084 mm。

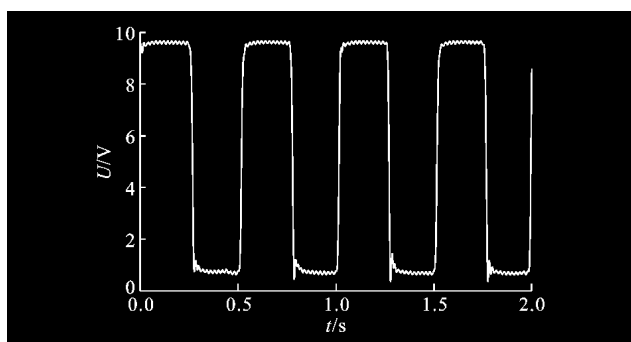


图5 偏移量实验输出信号波形图

涡旋压缩机在低转速和高转速情况下的轴向间隙的实际测量的输出波形如图6和图7所示,转速的高低为相对值。测量结果的输出电压随时间变化,波形的脉冲反映了探头处于不同的工作状态的情形,即动涡盘掠过探头瞬时和离开探头时刻,分别对应着最低电压和高电压,而最小电压反映的即为动涡盘和探头之间的间隙。

从图6和图7可以看出,其输出电压是不同的,根据式(3),涡旋空压机在这两种工况下的轴向间隙应为75 μm 和49 μm ,因此,轴向间隙可以通过电涡流位移传感器测量,结合压缩机性能测试手段,可以进一步研究涡旋压缩机的工况变化以及其性能参

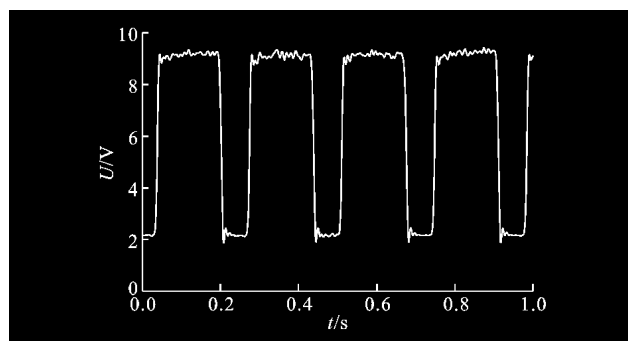


图6 低转速下实际测量输出波形图

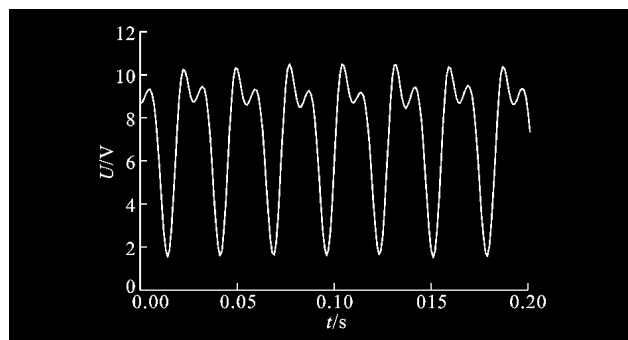


图7 高转速下实际测量输出波形图

数,如转速、排气量、排气压力、温度等与轴向间隙的关系。所测轴向间隙比涡旋制冷压缩机的轴向间隙要大,这是由于实验样机为空气压缩机,一方面其排气量、尺寸比制冷压缩机大很多,另一方面样机没有采用轴向密封装置,如密封条。涡旋压缩机的密封条一般为聚四氟乙烯材料,如何测量带有密封装置的涡旋压缩机间隙将是进一步需要解决的技术问题。

此外,图6和图7的波形频率也反映了动涡盘掠过探头的时间间隔,如两图中的横坐标所示。可通过分析波形的频率大小来计算涡旋压缩机的转速,因此提供了一种测量涡旋压缩机转速的方法。这对在变工况下准确测量涡旋压缩机的转速,以及进一步研究涡旋压缩机的动态特性有一定的帮助。

4 结论

(1)设计了采用电涡流位移传感器测量喷水涡旋空气压缩机轴向间隙的实验方案和步骤。传感器采用偏移安装的方式,避免了动涡盘可能造成的损坏。编制了基于虚拟仪器技术的数据采集系统来记录实验数据。

(2)对喷水涡旋空气压缩机的轴向间隙测量结果表明,其轴向间隙在不同转速下变化较大,低转速和高转速下的两种轴向间隙典型值分别为75 μm 和49 μm ,且空压机轴向间隙比涡旋制冷压缩机要

大许多。

(3)实验结果输出波形的频率能够反映动涡盘掠过探头的时间间隔,反映了涡旋压缩机转速的变化情况,提供了一种测量压缩机转速的方法,可对变速压缩机动态特性研究时转速值的确定提供帮助。

(4)电涡流位移传感器结构简单、灵敏度高、静态和动态性能好、输出信号强,可以满足涡旋压缩机轴向间隙的小位移测量要求。

参考文献:

- [1] ZHAO Yuanyang, LI Liansheng, YANG Qichao, et al. Research on heat and force deformations of large delivery scroll air compressor[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Compressor and Refrigeration. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University Press, 2005:249-255.
- [2] 席峰. 汽轮机汽封间隙检测初步研究[D]. 北京:华北

电力大学能源与动力工程学院,2003.

- [3] 贾智伟,姜涛,李应红. 压气机叶片顶端与机匣运动间隙的测量[J]. 航空精密制造技术,2002,38(4):44-46. JIA Zhiwei, JIANG Tao, LI Yinghong. Measurement of dynamic clearance between compressor blade-tip and case[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2002, 38 (4):44-46.
- [4] 杨启超,李连生,赵远扬,等. 电涡流法测量涡旋压缩机轴向间隙的可行性实验研究[J]. 中国机械工程,2007,18(17):2017-2020. YANG Qichao, LI Liansheng, ZHAO Yuanyang, et al. Experimental study on the feasibility of axial clearance measurement in scroll compressor using eddy current method[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(17): 2017-2020.

(编辑 荆树蓉)