

叶尖间隙测量技术在离心压气机 试验件上的应用

李 磊¹, 张 俊², 蔡 歆¹

- (1. 中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所 压气机研究部, 湖南 株洲 412002;
2. 中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所 测试技术研究部, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 主要介绍了电容式叶尖间隙测量系统的各组成部分, 间隙测量设备在离心压气机试验件上的安装方式和标定方法。通过对离心压气机试验件的叶尖间隙进行实时监测, 获得了离心叶轮进口、中间和出口截面叶尖间隙随转速增加而减小的关系, 保证了试验的安全性和试验件的完整性。分析叶尖间隙和转速关系可以为后续减小叶尖的冷态间隙和优化离心叶轮叶尖流道和叶轮外罩流道提供试验数据支持, 叶尖间隙测量技术在离心压气机试验件上的应用为确定最佳的叶轮间隙及以后的型号研制提供了重要的数据支持。

关 键 词: 叶尖间隙; 间隙测量技术; 离心叶轮; 压气机; 试验件

中图分类号: V235.12

文献标志码: A

Application of blade tip clearance measurement technology on centrifugal compressor test rig

LI Lei¹, ZHANG Jun², CAI Xin¹

- (1. Compressor Research Department, Hunan Aviation Powerplant Research Institute,
Aero Engine (Group) Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China;
2. Measurement and Test Technology Research Department,
Hunan Aviation Powerplant Research Institute,
Aero Engine (Group) Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: Each part consisted of the capacitive blade tip clearance measurement system was introduced. The install method and check method of blade tip clearance measurement on centrifugal compressor test rig were mentioned. While the blade tip clearance on centrifugal compressor test rig was monitored in real time, the blade tip clearance decreased with the increase of speed on inlet, middle and outlet sections. The test safety and test rig integrity were ensured. Relationship between blade tip clearance and speed is able to help to further reduce cold blade tip clearance and gain the optional flow path of centrifugal impeller tip and impeller cover. The application of blade tip clearance measurement technology on centrifugal compressor test rig can help ensure the optimal clearance and also provides important data support.

Key words: blade tip clearance; clearance measurement technology;
centrifugal impeller; compressor; test rig

收稿日期: 2016-09-03

作者简介: 李磊(1984—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事压气机结构设计工作。

引用格式: 李磊, 张俊, 蔡歆. 叶尖间隙测量技术在离心压气机试验件上的应用[J]. 航空动力学报, 2017, 32(9): 2260-2264. LI Lei, ZHANG Jun, CAI Xin. Application of blade tip clearance measurement technology on centrifugal compressor test rig[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(9): 2260-2264.

航空发动机的叶尖间隙一般是指发动机转子叶片与机匣之间的间隙,叶尖间隙是发动机研制过程中的一项基本的测量参数,同时,也是发动机在运转过程中主动叶尖间隙控制、健康管理以及故障诊断等的重要组成部分^[1-2]。

在现代航空发动机中,叶尖间隙对压气机和涡轮的效率、发动机的油耗以及稳定性的影响相当显著。引起叶尖间隙变化的主要原因有:尺寸公差、各种载荷的影响,温度和过渡状态转速变化^[3-5]。然而动态间隙是很难靠理论计算来确定的,主要应依靠实测来获得。只有通过通过对发动机各个运行周期内的叶尖间隙进行测量,才能了解叶片间隙在各个状态下的变化,才能对发动机的叶尖间隙进行控制。

叶尖间隙测量的准确性对发动机的整体性能影响很大,叶尖间隙过大会使发动机工作效率降低,发动机运转时涡轮前温度增高,叶尖间隙过大还降低了增压比以及喘振裕度。叶尖间隙过小将诱发碰磨现象,导致损坏发动机零部件,危机发动机安全^[6-8]。在不发生零部件碰磨的前提下,应尽量减小叶尖间隙,因此,准确、快速地检测发动机叶尖间隙在发动机研制、装配、试验过程中具有重要意义^[9]。

在离心压气机的研制中通常所说的叶尖间隙指的是离心叶轮和叶轮外罩之间的间隙。在试验件的装配过程中一般是通过修磨相应的调整垫来保证离心压气机的离心叶轮和叶轮外罩的冷态间隙值,在试验过程中一般是通过监控试验件的前、后振动和前、后弹支的应力来判断离心叶轮和叶轮外罩是否碰磨。在试验完成后,一般通过窥视孔使用孔探针进行检查来确认离心叶轮和叶轮外罩的状态。

叶尖间隙测量技术能够在试验过程中实时判断离心叶轮与叶轮外罩的间隙,为试验的进一步进行提供安全保证,同时也可以为后续设计改进提供依据。

1 设备简介

1.1 叶尖间隙测量系统

目前,航空发动机叶尖间隙测量技术主要有放电探针(火花放电)法、电涡流法、激光光学法、电容法、X 射线法、微波法和超声波法^[10-13]。

电容法是一项实用的叶尖间隙测量技术,现已广泛应用于燃气涡轮发动机叶尖间隙的测量^[14-18]。电容法的特点是灵敏度高,固有频率高,

频带宽,动态响应性能好,能在数兆的频率下正常工作,功率小,阻抗性能好,安装简单,适合在恶劣的环境中各种转速下的叶尖间隙测量等。

电容式叶尖间隙测量系统是由电容传感器、基准转速传感器、电容测量仪和数据采集器四部分组成,如图 1 所示。电容传感器用于检测叶尖和传感器之间的电容。旋转轴每旋转一周,基准转速传感器输出一个脉冲信号用于定位每一片叶片。电容测量仪将被测电容转换成电压,并经 A/D(analog/digital)转换后送数据采集器计算处理。

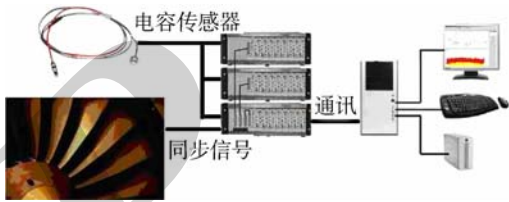


图 1 电容式叶尖间隙测量系统
Fig. 1 Capacitive blade tip clearance measurement system

- 电容式叶尖间隙测量系统使用要求如下:
- 1) 测量范围为 0~2 mm;
 - 2) 精度优于±0.05 mm;
 - 3) 所测量的叶片必须是金属材料或镀金属的陶瓷材料,且必须裸露并接地;
 - 4) 被测叶轮叶片叶尖厚度大于 0.5 mm。

1.2 电容传感器及安装

本次离心压气机试验件试验时使用的电容传感器外形尺寸如图 2 所示。

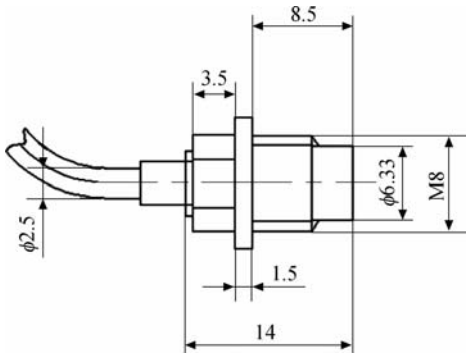


图 2 电容传感器的外形尺寸图(单位:mm)
Fig. 2 Dimensions of capacitive sensor shape (unit:mm)

电容传感器在叶轮外罩上的安装方式如图 3 所示。电容传感器通过螺纹安装在叶轮外罩的螺纹孔上。将电容传感器安装到叶轮外罩上时,要求电容传感器的感受面低于叶轮外罩流道面,其

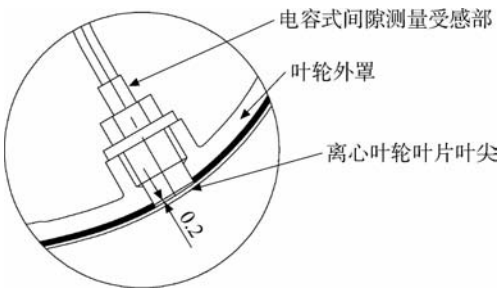


图 3 电容传感器在叶轮外罩上的安装方式图
(单位:mm)
Fig. 3 Install figure of capacitive sensor on impeller cover (unit:mm)

距离应该在 0.2~0.4 mm 范围内。

1.3 测量仪

测量仪由法国 FOGALE 公司提供,其中高频电容模块的型号为 MC902P-T-C,是采用微处理器控制技术专门针对高温叶尖间隙测量设计,带宽为 5~200 kHz,并带有自动线损补偿功能。

采集通道为 9 通道,每通道采样率为 2.5×10^6 Hz,分辨率为 14 位。电容测量仪与计算机之间的数据交换通过光缆传输。

1.4 数据处理软件和采集系统

软件功能:能进行硬件设置;数据采集及存储;能进行叶尖间隙计算,能显示逐个叶片平均/最大/最小间隙;能显示出转速变化过程;通过图形显示叶尖间隙;并能对测量数据进行后处理。

2 间隙测量的标定和试验

2.1 离心叶轮的标定

由于离心叶轮每一级叶片的大小、形状都不一样,因而使得叶尖表面积也不一样,叶尖与传感器之间的电容值也不一样,因此在进行测量间隙之前必须先对该离心叶轮叶片进行标定,得到每片叶片叶尖间隙与输出电压的校准曲线,以确保试验件在车台试验时获得更准确的叶尖间隙测量值。

叶尖间隙的标定将采用需要进行试验的离心叶轮和叶轮外罩,将电容传感器安装在叶轮外罩上,通过调节离心叶轮与叶轮外罩之间的距离来进行叶尖间隙标定。图 4 所示为本次试验的离心叶轮和叶轮外罩标定时的图片。

标定系统的工作原理:将电容传感器安装到叶轮外罩上,通过调节离心叶轮径向位移和离心叶轮的轴向位移来改变电容传感器与叶尖的位移

大小,根据调节的位移计算出叶尖间隙的换算值。根据叶尖间隙的理论值以及在该间隙下电容测量模块输出的电压值,可拟合出叶尖间隙与间隙测量模块输出电压之间的关系的标定曲线。

此次间隙测量试验的测点的安排根据测量技术要求及发动机离心叶轮的情况布置在离心叶轮叶片的进口、中间和出口三个部位(图 5),用来测量不同部位的离心压气机叶轮的间隙变化。在同一部位的周向位置各布置三个测点,互为 120° 夹角安装。这样不仅可测量叶尖间隙的变化情况,还可分析试验件转子轴运转情况。

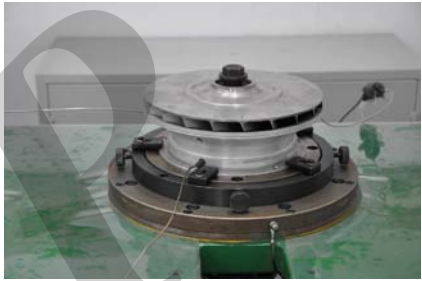


图 4 离心叶轮间隙标定示意图
Fig. 4 Schematic map of centrifugal impeller clearance calibration

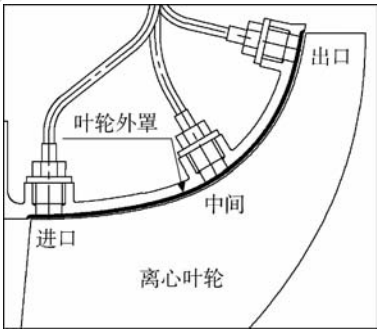


图 5 叶轮外罩进口、中间和出口探针安装位置示意图
Fig. 5 Schematic map of probe install position on inlet, middle, outlet positions of impeller cover

离心叶轮进口位置传感器采用叶轮径向位移的方式进行标定;中间和出口位置传感器采用叶轮轴向位移的方式进行标定。

改变叶轮径向(或轴向)位移,记录电容模块的输出电压,求出位移与电压的倒数的关系曲线。将位移与电压的倒数的关系曲线代入测量系统中,叶轮旋转,改变叶轮径向(或轴向)位移,验证测量结果与位移是否一致,如不能满足要求,重新标定。将位移与叶尖间隙的关系曲线代入到位移与电压的倒数的关系曲线中,求出叶尖间隙与电压的倒数的关系曲线,完成标定。

2.2 离心叶轮的试验过程

在试验开始前需要调节测量模块的增益使之与标定时一致;将传感器与对应的测量模块连接好,将数据记录在数据表中。并调节各通道的相关参数平衡;建立测量模型,包括有叶片数、测点位置、直径、测量模块分配、各通道的标定系数等等。

试验过程中可随时观察各测点处的最小间隙,发现异常情况即时报警;记录试验过程中各测量通道的间隙值;测量数据即时保存,试验完成后可对保存的数据进行分析,为后续试验提供参考。

此次试验为同一个离心叶轮在其进口、中间和出口三个不同部位的叶尖间隙(δ)随无量纲转速(N)的变化关系如图 6、图 7、图 8 所示。

该试验件在车台进行试验时,转速从零逐渐达到设计转速。分析图 6、图 7 和图 8 中间隙随转速的变化图,当试验件为冷态时,离心叶轮的间隙在进口部位、中间部位和出口部位的间隙依次增大。

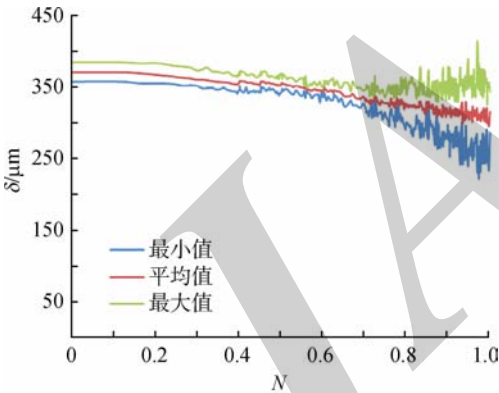


图 6 进口部位间隙随转速变化
Fig. 6 Clearance varying with speed at inlet

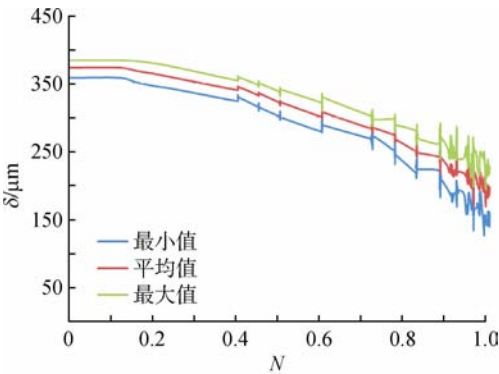


图 7 中间部位间隙随转速变化
Fig. 7 Clearance varying with speed at middle

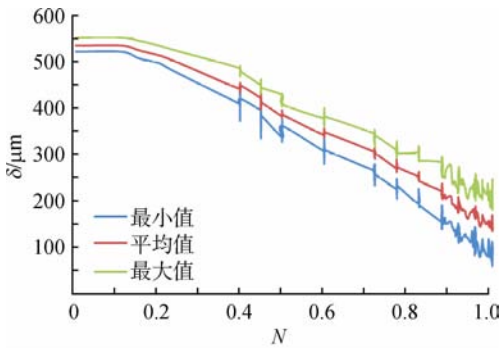


图 8 出口部位间隙随转速变化
Fig. 8 Clearance varying with speed at outlet

通过分析本次试验,从图 9 离心叶轮和叶轮外罩的平均间隙值可以发现:在冷态时,离心叶轮的进口截面和中间截面间隙相当,至出口截面的间隙逐步增加,与叶轮外罩流道和离心叶轮叶尖流道设计保持一致。随着转速的不断提高,进口截面、中间截面和出口截面的间隙都相应减小,进口截面间隙减小的相对量最小,中间截面间隙的减小量比进口截面明显增大,出口截面间隙的减小量最大,且当达到设计转速时,出口截面的间隙最小,中间截面次之,进口截面最大。和设计最小间隙相比,进口截面和中间截面间隙仍偏大,分析图 6、图 7 和图 8 中间隙的最小值可以看到最小间隙还可以进一步减小。

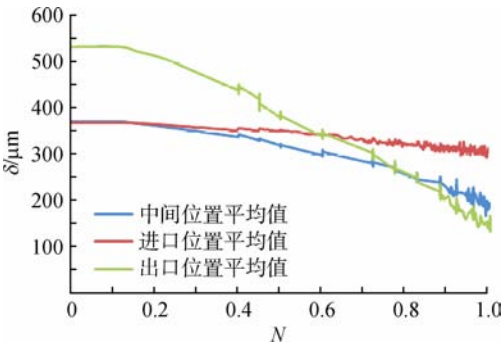


图 9 进口、中间和出口部位平均间隙随转速变化
Fig. 9 Averaged value of clearance varying with speed at inlet, middle, outlet

3 结 论

从图 6、图 7 和图 8 可以得到随着转速的不断提高,离心叶轮和叶轮外罩之间的间隙逐渐减小,当达到最大转速时,叶尖间隙也同时达到最小值,并且在各部位始终有一定的间隙。试验始终在安全的前提下进行。试验件下台分解后检查离心叶轮与叶轮外罩之间没有刮磨。间隙测量技术

在本次试验件试验中成功得到应用。

各截面的间隙减小量和结构、温度、热膨胀等多种因素有关。后续可以进一步安排适当的减小离心叶轮冷态间隙继续进行试验,同时分析和优化离心叶轮叶尖流道和叶轮外罩流道。验证减小间隙对压气机性能的影响。

参考文献:

[1] 黄春峰,侯敏杰.航空发动机叶尖间隙测量技术研究[J].测量技术,2008,27(增刊):27-32.
HUANG Chunfeng, HOU Minjie. Technology for measurement of blade tip clearance in an aero-engine[J]. Measurement Technology, 2008, 27 (Suppl.): 27-32. (in Chinese)

[2] 张娜,黄春峰.航空发动机叶尖间隙测量技术[J].航空制造技术,2010(13):41-45.
ZHANG Na, HUANG Chunfeng. Measuring technology of blade tip clearance of aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(13): 41-45. (in Chinese)

[3] 熊宇飞.航空发动机转子叶尖间隙测量[J].测控技术,2004,23(1):5-7.
XIONG Yufei. Rotor tip-clearance measurement aero-engine[J]. Measurement and Control Technology, 2004, 23 (1): 5-7. (in Chinese)

[4] 张宝诚.航空发动机试验技术和测试技术[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005.

[5] 张少平,苏廷铭,罗秋生,等.航空发动机压气机径向间隙设计方法研究[J].燃气涡轮试验与研究,2011,24(4):25-27.
ZHANG Shaoping, SU Tingming, LUO Qiusheng, et al. Design method for compressor radial clearance of an aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2011, 24 (4): 25-27. (in Chinese)

[6] 陈炳贻.叶尖间隙对航空发动机性能的影响和测量技术[J].燃气涡轮试验与研究,1996,9(2):40-44.
CHEN Bingyi. Performance effect and measurement technology of tip clearance on aeroengine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1996, 9(2): 40-44. (in Chinese)

[7] 黄春峰,侯敏杰,石小江.航空发动机叶尖间隙测量技术研究[J].国际航空,2009(9):77-79.
HUANG Chunfeng, HOU Minjie, SHI Xiaojiang. Measurement of blade tip clearance in aeroengine[J]. Interna-

tional Aviation, 2009(9): 77-79. (in Chinese)

[8] 熊宇飞.转子叶尖间隙测量在风扇和压气机性能试验中的应用[J].航空发动机,2002(1):20-25.
XIONG Yufei. The rotor tip-clearance measurement in fan/compressor performance rig testing[J]. Aeroengine, 2002 (1): 20-25. (in Chinese)

[9] 邱立新,王振华.航空发动机叶尖间隙测量研究[J].航空发动机,2001(4):26-29.
QIU Lixin, WANG Zhenhua. Research and measurement of blade tip clearance in an aero-engine[J]. Aeroengine, 2001(4): 26-29. (in Chinese)

[10] LAKSHMINARAYANA B. Method of predicting the tip effect in axial flow turbomachinery[J]. Journal of Fluids Engineering, 1970, 92(3): 480-481.

[11] ANDREAS V F, MATHIEU M, PETER T. Health monitoring and prognostics of blades and disks with blade tip sensors[C]// Aerospace Conference Proceedings. Big Sky, MT, US: IEEE; 2002, 433-440.

[12] HENNECKE D K, TRAPPMANN K. Turbine tip clearance gas turbine engine[R]. NASA N83-29254, 1983.

[13] HEATHS S, IMREGUN M. A review of analysis techniques for blade tip-timing measurement[R]. ASME Paper 1997-GT-0213, 1997.

[14] MUELLER D. Capacitive measurement of compressor and turbine blade tip to casing running clearance[R]. ASME Paper 1996-GT-0349, 1996.

[15] SHEARD A G, KILLEEN B. Blade by blade tip clearance measurement system for gas turbine applications[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1994, 117 (2): 326-331.

[16] FABIAN T, PRINZ F. Capacitive blade tip clearance measurements for a micro gas turbine[C]// Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Anchorage, US: IEEE, 2002: 1011-1015.

[17] STEINER A. Technique for blade tip clearance measurements with capacitive probes[J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(7): 865-869.

[18] 李飞行,王涛.电容式叶尖间隙测量系统标定技术[J].工程与试验,2011,51(1):11-13.
LI Feixing, WANG Tao. Calibration on capacitive blade tip clearance measurement system[J]. Engineering and Test, 2011, 51(1): 11-13. (in Chinese)

(编辑:陈 越)