

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.04.012

基于2D激光测量技术的矿用通风机 叶尖间隙测量方法研究^{*}

李学哲, 李清林, 韩 宇, 黄亚坤
(华北科技学院 机电工程学院, 河北 三河 065201)

摘要:针对矿用通风机叶尖间隙测量方法存在精度和自动化水平低等问题,对间隙测量技术、表征及评价方法等进行了研究,提出了一种基于2D激光测量的矿用通风机叶尖间隙测量方法。采用LS-100CN激光轮廓测量传感器采集了叶尖间隙几何信息,然后通过投影变换、特征提取等技术实现了叶尖间隙的高精度测量;采用叶片形位偏差、机壳形状偏差、综合叶尖间隙等参数,综合地表征和评价了通风机叶尖间隙的实际几何状态,得到了更全面、更科学的评价结果。研究结果表明:该方法具有精度高、非接触等特点,显著提高了测量的效率、精度和智能化水平。

关键词:2D激光测量;矿用通风机;叶尖间隙;精度优化;表征与评价

中图分类号:TH432;TH741.1

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)04-0405-05

Measurement method of tip clearance of mine ventilator based on 2D laser measurement technology

LI Xue-zhe, LI Qing-lin, HAN Yu, HUANG Ya-kun
(College of Mechanical and Electrical Engineering, North China Institute
of Science and Technology, Sanhe 065201, China)

Abstract: Aiming at the problems of low accuracy, low automation level in the measurement methods of tip clearance of mine ventilator, a measurement method for tip clearance of mine ventilator based on 2D laser measurement was proposed. The geometric information of tip clearance was collected by a laser profile measurement sensor of LS-100CN, and the high-precision measurement of tip clearance was achieved by technologies of projection transformation and feature extraction. The parameters of form and position deviation of blades, form deviation of ventilator case and comprehensive tip clearance were used, the authentic geometric state of tip clearance was characterized and evaluated, and the more comprehensive and scientific evaluation results were obtained. The results show that the method has the characteristics of high accuracy and non-contact, and it can significantly improve the efficiency, accuracy and intelligent level of measurement.

Key words: 2D laser measurement; mine ventilator; tip clearance; precision optimization; characterization and evaluation

0 引 言

通风机安全、可靠、高效运行对保障矿井安全生产、井下工作人员身体健康和生命安全等具有重要作用^[1]。通风机的结构模型主要由静子、转子和机壳构

成,叶尖间隙 δ 是指通风机转子叶片与机壳之间的最小径向距离^[2]。为了优化风机的工作性能,叶尖间隙必须设计合理。 δ 值过大,泄漏风量、冲击和容积损失也随之增大,进而降低了通风机的运行效率; δ 值过小,由于温度变化引起叶片膨胀或者机壳收缩,都会导

收稿日期:2019-07-28

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(3142018054,3142015094)

作者简介:李学哲(1976-),男,朝鲜族,吉林通化人,硕士,副教授,主要从事精密测量技术与仪器方面的研究。E-mail:xuezheli@sina.com

致叶片与机壳产生摩擦,进而严重影响通风机的安全运行^[3]。因此, δ 值过大或过小都不利于通风机的稳定运行,通风机叶尖间隙的检测对于提高通风机运行效率、优化通风机性能、确保安全稳定运行等具有重大意义^[4-5]。

在航空领域,叶尖间隙测量技术研究起步较早,并且取得了丰富的研究成果,常见的间隙测量方法有^[6-10]:放电探针法、超声波法、电容法、电涡流法等。但矿用通风机叶尖间隙检测技术相对比较落后,国内外鲜有研究。目前,煤矿现场对叶尖间隙的检测主要利用塞尺人工完成,测量的效率和精度低,智能化水平差,难于满足通风机性能优化和安全预警的技术要求。

为了解决叶尖间隙高精度、智能化测量的问题,本文将提出一种基于 2D 激光测量技术的通风机叶尖间隙测量方法,采用新型 2D 形状测量传感器,采集叶尖间隙几何信息,然后通过投影变换、特征提取、数据处理与分析等技术得到间隙值。

1 2D 激光测量技术的优势与现状

因具有非接触、响应快、精度高等特点,激光测量技术在几何量计量中有广泛的应用^[10]。一维激光测量技术采用点激光入射,该方法测量精度高,可以达到微米级,但是一次只能采集单点的坐标数据,测量信息有限,适合于长度、宽度等简单几何量的测量。尽管利

用激光扫描技术,克服了上述不足,使一维激光位移传感器在形状、位置等复杂几何量测量中得到了应用,但是受扫描分辨率的限制,一维激光测量技术存在丢失测量信息的问题,难于实现叶片等大曲率变化对象的高精度测量。

二维激光测量技术采用线激光投射于被测物体表面,同时测量一段直线上各个像素点到传感器的距离,可以输出光幕宽度方向和距离方向两个轴的位置数据。

二维激光测量技术如图 1 所示。

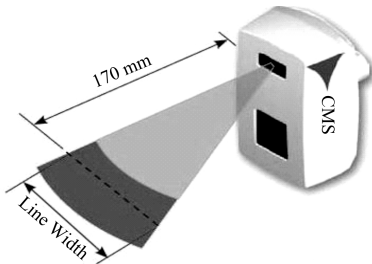


图 1 二维激光轮廓测量传感器

该方法测量效率和精度高,一次采样可以获取被测对象的二维坐标信息,适合于形状测量、特征识别等复杂应用。目前,2D 激光测量技术已经取得了长足的发展,测量精度、可靠性、智能化水平都显著提高,市场上有多种成熟的商用产品可供选择。

常见的 2D 激光轮廓测量传感器如表 1 所示。

表 1 常见的 2D 激光轮廓测量传感器

型号	LJ-V7200	LS-100CN	ZLDS200HS-50	OPTIMESS® 2D-300
品牌	KEYENCE/基恩士	Optex/奥泰斯	ZSY/真尚有	OPTIMESS/奥特迈斯
工作距离/mm	200	100	80	400
测量范围/mm	± 48	± 25	± 25	± 150
线激光宽度(参考距离)/mm	62	22	36	150
Z 轴重复精度/ μm	1	2	5	130
X 轴分辨率/ μm	20	30	60	150
特点	高精度、高智能化,适合在科研、航空叶片测量等精度要求较高的场合使用。	高速、高精度、小型化、低价格,适合在自动化生产线上,对零部件的质量检查。	技术参数可按用户要求定制、无需控制器、光学适应性强,适合于各类二次开发系统。	测量范围大,环境适应性和可靠性强,适合在工业、铁路等强电磁干扰环境使用。

2 2D 激光轮廓测量传感器

国家安全生产行业标准 AQ1011 - 2005《煤矿在用主通风机系统安全检测检验规范》和煤炭行业标准 MT222 - 2007《煤矿用局部通风机技术条件》中,对叶尖间隙的检测精度、量程范围等技术参数作了明确规定:主通风机叶片与机壳的单侧间隙值应不小于

2.5 mm,仪器测量精度要小于 0.05 mm;压入式轴流通风机叶轮的叶片与机壳之间的径向间隙应为叶轮直径的 1.5‰ ~ 3.5‰^[12-13]。

通过分析,日本奥泰斯公司 LS-100CN 轮廓测量传感器的各项技术参数可以满足矿用通风机叶尖间隙检测要求,其工作原理如图 2 所示^[14]。

该传感器采用基于三角测量的光平面相交法,由

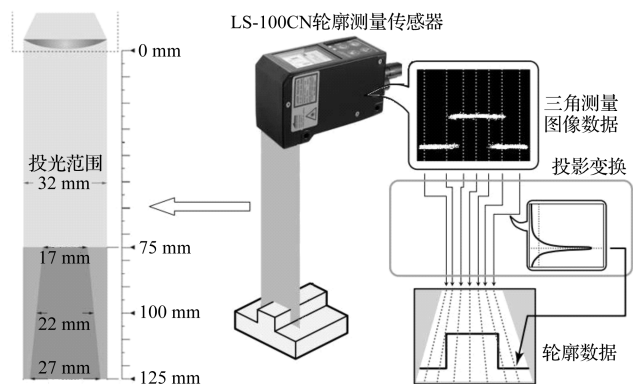


图2 LS-100CN 轮廓测量传感器的工作原理图

接收元件接收发射出的带状激光束的反射光,然后根据所得图像数据,通过投影变换得到测量轮廓。

该传感器具有如下技术特点,非常适合矿用通风机叶尖间隙的测量和分析:

- (1) 高速、高精度、小型化、低成本;
- (2) 快门速度自动调节,可以根据受光量自动调节曝光时间,提高成像质量;
- (3) 传感器提供4种拍摄模式,可以选择最佳设置来匹配测量环境和目标状态;
- (4) 内置图像处理算法,实现轮廓自动补偿;
- (5) 软件功能强大,数据自动处理与分析。

3 基于2D激光测量的矿用通风机叶尖间隙测量方法

3.1 总体测量方案

通风机的轴测图如图3所示。

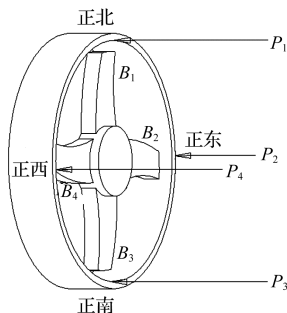


图3 通风机轴测图

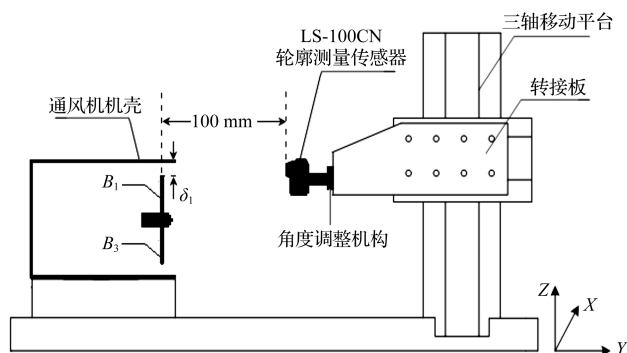
具体步骤是:分别在正北、正东、正南、正西4个方向,沿轴向选择4个测量位置 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 。首先将LS-100CN轮廓测量传感器定位到位置 P_1 ,分别测量叶片 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 在正北方向的间隙值 $\delta_{1,1}$ 、 $\delta_{1,2}$ 、 $\delta_{1,3}$ 、 $\delta_{1,4}$;然后依此类推将LS-100CN轮廓测量传感器定位到位置 P_2 、 P_3 、 P_4 ,分别测量叶片 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 在正东、

正南和正西方向的间隙值 $\delta_{2,1}$ 、 $\delta_{2,2}$ 、 $\delta_{2,3}$ 、 $\delta_{2,4}$ 、 $\delta_{3,1}$ 、 $\delta_{3,2}$ 、 $\delta_{3,3}$ 、 $\delta_{3,4}$ 、 $\delta_{4,1}$ 、 $\delta_{4,2}$ 、 $\delta_{4,3}$ 、 $\delta_{4,4}$;最后基于采集的间隙测量值和评定算法,综合表征和评价通风机叶尖间隙的实际状态,为通风机状态监测和故障预警提供科学、准确的叶尖间隙参数。

3.2 测量系统的组成及工作原理

为了提高测量的精度,传感器与被测间隙的轴向距离设定为100 mm。

P_1 位置叶尖间隙测量示意图如图4所示。

图4 正北方向叶尖间隙测量示意图(P_1 位置)

由图4可知:测量系统由三轴移动平台、角度调整机构、LS-100CN轮廓测量传感器、测控计算机、被测通风机等组成,其中:

- (1) 三轴移动平台由 X 、 Y 、 Z 这3个直线运动轴系组成,负责传感器测量位置的选择和控制,通过三轴运动的控制,可以方便地定位4个测量位置 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 ;
- (2) 角度调整机构负责传感器测量姿态的设定,根据被测间隙的几何特征,灵活调整测量姿态,优化间隙测量结果;
- (3) 轮廓测量传感器是测量系统的核心,负责基于三角测量和投影变换高精度提取叶尖间隙的几何特征,LS-100CN传感器的各项技术指标保证了测量结果的精度和可靠性;
- (4) 测控计算机上运行专用的测量分析软件,负责测量流程的控制、数据传送和结果处理与分析。

3.3 叶尖间隙表征评价方法

传统的叶尖间隙测量方法以某一固定点的单次间隙测量结果作为评价的依据,评价结果片面,无法全面、科学地表征通风机叶尖间隙的实际几何状态。利用本文提出的间隙测量方法,可以得到测量参数,基于间隙测量值和数据处理算法,可以实现通风机叶尖间隙的综合表征与评价。

叶尖间隙测量结果如表2所示。

表 2 叶尖间隙测量结果

	B_1 间隙	B_2 间隙	B_3 间隙	B_4 间隙	最小值	最大值	标准差	平均值
P_1 位置	δ_{1_1}	δ_{1_2}	δ_{1_3}	δ_{1_4}	δ_{1_min}	δ_{1_max}	δ_{1_sd}	δ_{1_mean}
P_2 位置	δ_{2_1}	δ_{2_2}	δ_{2_3}	δ_{2_4}	δ_{2_min}	δ_{2_max}	δ_{2_sd}	δ_{2_mean}
P_3 位置	δ_{3_1}	δ_{3_2}	δ_{3_3}	δ_{3_4}	δ_{3_min}	δ_{3_max}	δ_{3_sd}	δ_{3_mean}
P_4 位置	δ_{4_1}	δ_{4_2}	δ_{4_3}	δ_{4_4}	δ_{4_min}	δ_{4_max}	δ_{4_sd}	δ_{4_mean}

(1) 叶片形位偏差的表征和评价。基于采集的叶尖间隙测量值,求解 $P_1、P_2、P_3、P_4$ 这 4 个测量位置的间隙标准差,并以间隙标准差 $\delta_{1_sd}、\delta_{2_sd}、\delta_{3_sd}、\delta_{4_sd}$ 表征和评价通风机电叶片的形状和位置偏差。间隙标准差越小越好,间隙标准差越大,表明通风机电叶片变形或位置偏移越严重;

(2) 机壳形状偏差的表征和评价。基于采集的叶尖间隙测量值,求解 $P_1、P_2、P_3、P_4$ 这 4 个测量位置的

$$\delta_{mean} = \frac{\delta_{1_1} + \delta_{1_2} + \delta_{1_3} + \delta_{1_4} + \delta_{2_1} + \delta_{2_2} + \delta_{2_3} + \delta_{2_4} + \delta_{3_1} + \delta_{3_2} + \delta_{3_3} + \delta_{3_4} + \delta_{4_1} + \delta_{4_2} + \delta_{4_3} + \delta_{4_4}}{16} \quad (1)$$

式中: $\delta_{1_1},\delta_{1_2},\delta_{1_3},\delta_{1_4}$ — $B_1 \sim B_4$ 在 P_1 位置的间隙测量值; $\delta_{2_1},\delta_{2_2},\delta_{2_3},\delta_{2_4}$ — $B_1 \sim B_4$ 在 P_2 位置的间隙测量值; $\delta_{3_1},\delta_{3_2},\delta_{3_3},\delta_{3_4}$ — $B_1 \sim B_4$ 在 P_3 位置的间隙测量值; $\delta_{4_1},\delta_{4_2},\delta_{4_3},\delta_{4_4}$ — $B_1 \sim B_4$ 在 P_4 位置的间隙测量值。

4 实验分析

笔者利用本文提出的叶尖间隙测量方法,对某型矿用通风机进行了测试分析,实验原理如图 5 所示。

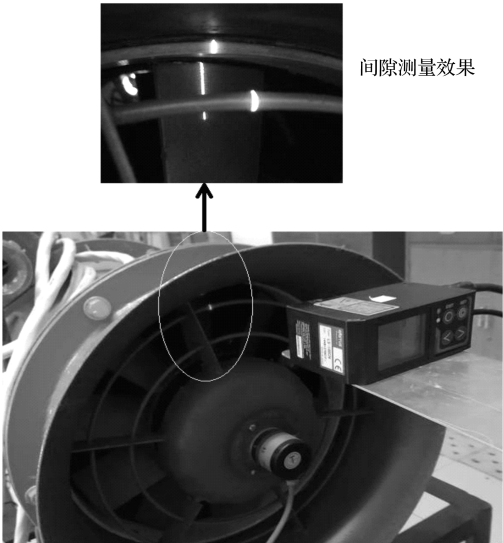


图 5 叶尖间隙测量实验图

P_1 位置叶片 B_1 的间隙测量轮廓如图 6 所示。

间隙平均值 $\delta_{1_mean}、\delta_{2_mean}、\delta_{3_mean}、\delta_{4_mean}$,进而得到间隙平均值标准差 δ_{mean_sd} ,并以 δ_{mean_sd} 表征和评价通风机电壳的形状偏差, δ_{mean_sd} 越大,表明通风机电壳变形越严重;

(3) 综合叶尖间隙的表征和评价。基于采集的叶尖间隙测量值,求解叶尖间隙总的平均值 δ_{mean} ,并以 δ_{mean} 表征和评价通风机电综合叶尖间隙。

通风机电综合叶尖间隙如下式所示:

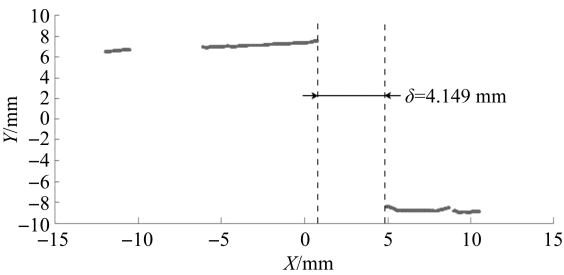


图 6 叶尖间隙 δ_{1_l} 测量结果

由图 6 可以看出:

叶尖间隙的几何信息被有效采集,间隙测量值 $\delta_{1_l} = 4.149 \text{ mm}$ 。利用本方法测量间隙 5 次,计算间隙平均值 $\delta_a = 4.121 \text{ mm}$ 。间隙的约定真值为 4 mm (游标卡尺测得),则计算得到间隙测量相对误差 $E = 3.0\%$ 。

传感器测量姿态、数据处理算法、被测间隙的光学特性等都是影响该方法测量精度的重要因素,通过相关优化设计,可以进一步提高测量的精度。

实验结果表明:

该文提出的基于 2D 激光轮廓传感器的通风机电叶尖间隙测量方法,可以实现叶尖间隙的快速、自动测量,具有精度高、非接触、智能化等优点。

5 结束语

为了解决叶尖间隙高精度、智能化测量的技术问题,本文提出了一种基于 2D 激光测量技术的矿用通风机叶尖间隙测量方法,并详细分析了测量的原理、总

体方案和评价方法,具体有:

(1)该方法采用LS-100CN激光轮廓测量传感器,结合三轴移动平台和姿态调整机构,采集叶尖间隙几何信息,然后通过投影变换、特征提取、数据处理与分析等技术,实现了叶尖间隙几何特征的高精度测量;

(2)该方法采用叶片形位偏差、机壳形状偏差、综合叶尖间隙等参数,综合地表征和评价通风机叶尖间隙的实际几何状态,评价结果更全面、更科学;

(3)实验结果表明:该方法测量相对误差为3.0%,满足矿用通风机叶尖间隙测量的技术要求。该方法可以实现叶尖间隙的快速、自动测量,具有高精度、非接触、智能化等优点。

参考文献(References):

- [1] 石瑞鹏. 基于模糊数学的姚桥煤矿矿井通风系统评价[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院, 2013.
- [2] 杨富贵, 刘体龙, 魏效玲, 等. 轴流式通风机径向间隙的分析[J]. 煤矿机械, 2000(7): 19-21.
- [3] 张卫国. 径向间隙对风机性能影响及调节[J]. 矿业安全与环保, 2002, 29(4): 23-24.
- [4] 潘华辰, 郑灵超, 花聪聪, 等. 离心风机叶轮径向间隙对其

泄漏及性能的影响研究[J]. 流体机械, 2016, 44(11): 36-40.

- [5] 巨广刚. 煤矿在用主通风机系统安全检测难点分析[J]. 煤炭技术, 2016, 35(6): 248-250.
- [6] 李永继. 燃气轮机叶尖间隙监测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 2017.
- [7] 龙 成. 电容调频式叶尖间隙测量技术研究[D]. 天津: 天津大学精密仪器及光电子工程学院, 2009.
- [8] 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, 36(13): 41-45.
- [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.
- [10] 郑 颖, 郑锋星. 发动机测试台中差压变送器输出影响研究[J]. 液压气动与密封, 2018, 38(11): 33-35, 39.
- [11] 吴振刚. 基于激光三角法的几何量在机测量方法研究[D]. 天津: 天津大学精密仪器及光电子工程学院, 2016.
- [12] AQ1011-2005. 煤矿在用主通风机系统安全检测检验规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [13] MT222-2007. 煤矿用局部通风机技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [14] FASTUS. 2D displacement sensor LS series User's manual [M]. Kyoto: OPTEX FA Co., Ltd., 2015.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

李学哲, 李清林, 韩 宇, 等. 基于2D激光测量技术的矿用通风机叶尖间隙测量方法研究[J]. 机电工程, 2020, 37(4): 405-409.

LI Xue-zhe, LI Qing-lin, HAN Yu, et al. Measurement method of tip clearance of mine ventilator based on 2D laser measurement technology[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(4): 405-409.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>