

文章编号 1004-924X(2003)05-0487-05

大轴弯曲激光精密自动测量系统

关荣锋¹, 赵军良¹, 李凤云¹, 崔燕岭¹, 乔松²

(1. 焦作工学院, 河南 焦作 454000;

2. 中国矿业大学, 北京 100083)

摘要:提出了用激光扫描技术测量汽轮机转子弯曲量的新方法。测量系统用平面转镜进行扫描,采用双狭缝进行扫描自校准,由光电探测器完成光电转换,最后由微机完成数据处理、显示及打印。实验表明,该系统能远距离非接触测量大轴弯曲,测量精度达 $\pm 5 \mu\text{m}$,测量距离达 4 m。

关键词:大轴弯曲;激光扫描;非接触测量

中图分类号:TN247 文献标识码:A

Automatic measurement of turbine rotor bend using laser scanning technology

GUAN Rong-feng¹, ZHAO Jun-liang¹, LI Feng-yun¹, CUI Yan-ling¹, QIAO Song²

(1. *Jiaozuo Institute of Technology, Jiaozuo 454000, China;*

2. *China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China*)

Abstract: For the great importance of measuring turbine rotor bend for both inspection and repair of turbines, an automatic measurement system, which uses a rotating mirror for scanning, double slots for scanning speed calibration, an optoelectric detector for optoelectric change-over, and a microprocessor for processing, display and printing of data, is proposed for measuring turbine rotor bend using laser scanning technology. Experimental results show that the automatic measuring system is capable of doing remote non-contact measurements of turbine rotor bends with an accuracy of $\pm 5 \mu\text{m}$ from 4 m away.

Key words: turbine rotor bend; laser scanning; non-contact measurement

1 引言

汽轮机转子弯曲的测量是一项极其重要的工作。如果大轴弯曲超标,不但会引起汽轮机的振动,严重时还会导致大轴损坏的重大事故。因此,在汽轮机安装检修过程中,大轴弯曲是必测项目之一,而且弯曲度也是衡量机械质量的一项重要

技术指标之一。传统的汽轮机弯曲测量方法是架设百分表进行测量,该测量方法是一种接触式测量,由于汽轮机汽缸结构复杂,在某些部位架设百分表及对准非常麻烦,需耗费大量的人力和时间,人为因素影响也较大,测量精度也较低。特别是在直轴过程中转子的温度很高(600~700℃),用百分表直接接触表面很困难,即使是采取一些措施,也难以保证测量的准确性。

目前,大轴测量的方案有机械测径和光学测径两种主要技术^[1]。在光学测量技术中激光扫描测量方法是最有发展前景的技术^[1-2],此外还有涡流感测法^[3]和微电子技术检测法^[4]等。本文将激光扫描技术^[5-6]改进后用于测量汽轮机的大轴弯曲量,并提出了非接触自动测量的新方法,同时开发研制了测量装置。该测量系统不仅提高了冷态弯曲测量的精度,而且也解决了热态弯曲测量的难题。该方案也可推广到其他形式的大轴弯曲测量中,如大型风机、水泵等机械转轴。

2 测量系统及测量原理

测量系统由激光扫描、光接收、微机控制、打印、显示等几部分组成。系统结构框图如图 1 所示。

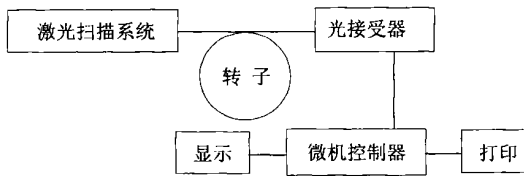


图 1 测量系统结构

Fig. 1 Measurement system structure

2.1 基本工作原理

激光精密测量的基本原理是基于激光扫描技术,如图 2 所示。平行扫描光束由凸透镜和平面旋转反射镜产生,用双狭缝扫描速度自校正,用光电探测器完成信号的光电转换,最后由单片机完成数据处理、显示与打印。在图 2 所示的扫描测量原理图中,平行扫描激光束,通过光阑 B 和物镜 C 后会聚到光电探测器 D 上,设平行光束匀速扫描的速度为 V , 则

$$X = V \cdot t, \quad (1)$$

其中, X 为通过光阑 B 的扫描平行光束的宽度, t 为平行扫描这一宽度所用的时间。经光电转换,由采样整形电路整形输出一定宽度矩形脉冲信号,送入计数器。设计数频率为 f , 计数数值为 N , 显然 $t = N \cdot f$, 所以

$$X = V \cdot f \cdot N, \quad (2)$$

将轴置于其中,遮挡部分扫描光束,则矩形脉冲的宽度会随之变化,即有

$$X_n = V \cdot f \cdot N_n, \quad (3)$$

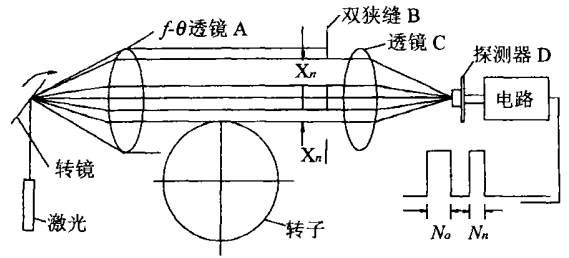


图 2 激光扫描测量转子弯曲原理

Fig. 2 Principle diagram of laser scanning measurement rotor bend

其中, X_n 为未被轴遮挡的扫描光束宽度, N_n 为检出脉冲的计数值。从式(3)中可以看出,当平行光匀速扫描时,扫描速度 V 为定值,只要检测出计数数值 N_n , 就能得到对应于轴上某断面等分点的 X_n 。

2.2 激光扫描速度实时检测原理

扫描速度精度不易获得 $1/10\ 000$, 因此它直接影响着测量精度,要获得较高的测量精度必须运用扫描速度实时检测原理。为此,为系统设计了一个双孔光阑 B,在整个测量过程中,转轴只遮挡住下孔的光束,这样在扫描器一次扫描周期中,从光电探测器 D 上将检测出两个连续脉冲,设上孔的宽度为 X_0 , 对应的检出脉冲计数值为 N_0 , 由式(2)可得:

$$X_0 = V \cdot f \cdot N_0, \quad (4)$$

由于透镜的通光孔径很小,因此可以认为激光束在一次扫描周期扫过光阑上下孔的速度不变,则将(4)式中得出的激光扫描速度代入(3)式得:

$$X_n = \frac{X_0}{f \cdot N_0} \cdot f \cdot N_n,$$

$$\text{即 } X_n = \frac{X_0}{N_0} \cdot N_n = K \cdot N_n, \quad (5)$$

其中 $K = X_0/N_0$, 称脉冲当量数。

因为光阑 B 的上孔尺寸定值 X_n , 所以只要实时地求出每次采样的 X_n , 并实时地校正每次采样的脉冲当量数 K , 所得结果与扫描速度 V 无关,因此对扫描光束的稳速精度的要求就可以相对地低一些,整个系统的测量精度更高。

2.3 最大弯曲量的计算及弯曲的拟合

从原理上看,激光测量系统与百分表两者的测量结果在变化趋势上是相反的。在测量中当转轴弯曲增大时,百分表的读数随之变大;而激光测量系统的测量值却随之变小。但通过数据处理软

件进行数据变换,使激光测量系统输出结果在变化上与百分表的一致。假设, X_n 为某点的晃动量,则有:

$$X = \frac{1}{2} (X_n - X_{n+4}), (n = 1, 2, 3, 4), (6)$$

上式表示弯曲量的箭头方向指向第 n 点。若用矢量表示弯曲的大小和方向,如图 3 所示。

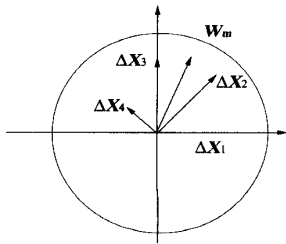


图 3 轴的弯曲矢量图

Fig. 3 Bending vector diagram of the axis

$$X_n = X_n e^{j4(n-1)}, (n = 1, 2, 3, 4), (7)$$

当轴无扭曲、变形等现象时,则最大弯曲矢量有如下关系:

$$W_m = X_1 + X_3 = X_2 + X_4, (8)$$

由于测量中出现的误差,式(8)左边的等号很难成立,因此在实际的数据处理中采取如下方法:

首先,根据 X_1 、 X_3 和 X_2 、 X_4 求得各自合成弯曲矢量

$$\begin{aligned} W_1 &= X_1 + X_3 = W_1 e^{j\theta_1}, \\ W_2 &= X_2 + X_4 = W_2 e^{j\theta_2}, \end{aligned} (9)$$

其中

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{X_1}{|X_1|} \sqrt{X_1^2 + X_3^2}, \\ \theta_1 &= \arctan \frac{X_3}{X_1}, \end{aligned} (10)$$

$$\begin{aligned} W_2 &= \frac{X_2}{|X_2|} \sqrt{X_2^2 + X_4^2}, \\ \theta_2 &= \arctan \frac{X_4}{X_2}, \end{aligned} (11)$$

其次,由 W_1 反推出 X_2 和 X_4 的估计值 X_2 和 X_4 ,即

$$X_2 + X_4 = W_1 = W_1 e^{j\theta_1}, (12)$$

所以,

$$\begin{aligned} X_2 &= W_1 \cdot \sin\left(\frac{3}{4} - \theta_1\right) \cdot e^{j\frac{3}{4}}, \\ X_4 &= W_1 \cdot \sin\left(\theta_1 - \frac{1}{4}\right) \cdot e^{j\frac{3}{4}}, \end{aligned} (13)$$

故 X_2 、 X_4 的离差平方和为

$$\begin{aligned} &= \left[X_2 - W_1 \sin\left(\frac{3}{4} - \theta_1\right) \right]^2 + \\ &+ \left[X_4 - W_1 \cdot \sin\left(\theta_1 - \frac{1}{4}\right) \right]^2, \end{aligned} (14)$$

当 不大于经验值 θ_0 时,认为轴是标准弯曲轴。无扭曲、变形等现象时大轴的 θ_0 的选取应根据以往的测量经验以及轴的长短、粗细、刚度的大小来选取。于是在工程计算中可以取 W_1 和 W_2 的平均值作为该测量点的最大弯曲矢量,即

$$W_m = \frac{1}{2} (W_1 + W_2) = |W_m| \cdot e^{j\theta_m}, (15)$$

其中 $|W_m| = \frac{1}{2} \sqrt{W_1^2 + W_2^2 + 2 W_1 W_2 \cos(\theta_2 - \theta_1)}$

$$\theta_m = \frac{1}{4} \left[2 - \frac{W_1}{|W_1|} - \frac{W_2}{|W_2|} \right] + \frac{1}{2} (\theta_1 + \theta_2)$$

以上公式推导省略了弯曲量为零时的情况。

为了解整个轴的弯曲状况,实际测量中通常沿轴向选取若干断面,约 8~10 个,特别要选择应力较大的部位。机组每次大修,轴向测点固定,并在最大弯曲断面的“高点”处做好记号,以便互相对照,发现有最大弯曲时,要增加测点。所有测点测量完毕后,可根据上述公式计算出每个测点的最大弯曲量值和角度。如果角度基本一致,表明轴没有扭转现象。采用曲线拟合和回归分析的方法,绘制出最大弯曲的弯曲曲线,可得出最大弯曲量值和判定何处发生最大弯曲。

3 实验与结果

3.1 热态测试

热态测试的目的主要是检验测试系统对转子弯曲量的监测能力。在现场热态直轴过程中,按要求必须在升温和降温过程中,对其弯曲量的变化进行测量。一般情况下,选择转子“弯曲高点”进行测量。

由于条件的限制,热态测试是在一根空心模拟试验轴上进行的。模拟试验轴长 850 mm,外径为 30 mm,内径为 25 mm,轴内空心孔用于放置硅碳棒,硅碳棒与外轴之间用柔性石墨进行绝缘。在对硅碳棒通电后,即可对空心轴进行加热,以模拟直轴过程中加热转子的情况。模拟试验轴是架设在特制的焊接支架上的。测试时,测量断面选在距左支点 400 mm 处,加热前,依次对该断面上的 8 个等分点进行了第 1 次测量;通电后,待测试轴表面温升至 700 ℃ 时,对

该断面进行第 2 次测量;断电后待测表面温度冷却至室温后,对该断面进行第 3 次测量。将 3 次测量

的数据整理并计算出相应弯曲量。测试结果如表 1。

表 1 测量数据记录表

Tab. 1 Measurement data record

测点 μm	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	CR
加热前	5 000	5 160	5 371	5 487	5 447	5 299	5 082	4 954	266
热稳态	5 000	5 001	5 216	5 443	5 399	5 257	5 148	4 992	225
冷却后	5 000	5 100	5 252	5 385	5 372	5 284	5 134	4 994	195

测量结果表明,从冷、热态晃动量数据看,加热前该断面弯曲量为 $266 \mu\text{m}$,加热后弯曲量减少为 $225 \mu\text{m}$,自然冷却后弯曲量进一步减为 $195 \mu\text{m}$,这表明对测试轴进行加热、冷却后,弯曲情况得到改善。显然这与实际直轴过程中的退火处理情况是相符的,转子加热后弯曲部分的应力得到释放,因而弯曲变形也随之减少了。

与此同时,监测了断面“高点”(或低点)的位置变化。试验中选择断面的“4”点进行了热态变化监测。测量时,接通硅碳棒电源,同时监测被测点的变化,每隔 20 s 测取一次数据,直至试验轴处于热稳态。然后切断碳棒电源,同时监测测量点的变化,仍每隔 20 s 测取一次数据。

将两次测量的数据由计算机进行处理,绘出相应测点位置随时间(即温度)变化的曲线。曲线如图 4、图 5 所示。

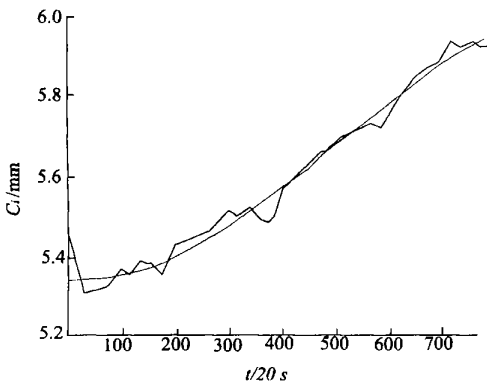


图 4 测量点位置随时间的变化曲线(升温)

Fig. 4 Variety curve of measuring point place with time(turn off the source)

从升温过程变化曲线来看,随温度的急剧升高,测点的位置也快速抬高,测试轴由凹变凸;从降温过程变化曲线来看,随温度的急剧下降,测点的位置则快速降低,测试轴由凸变凹。该结果与上面冷热态

晃动量测量数据的变化规律是一致的。

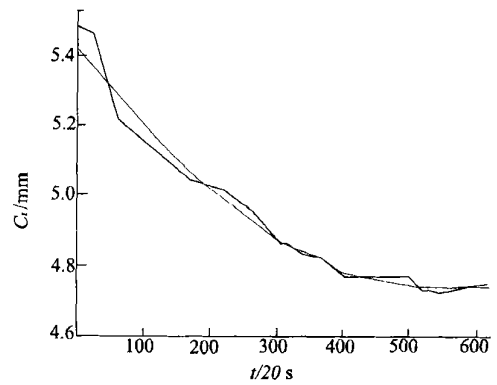


图 5 测量点位置随时间的变化曲线(降温)

Fig. 5 Variety curve of measuring point place with time(turn on the source)

3.2 冷态测试

冷态测试是在哈尔滨汽轮机厂生产的 51-50-1 型汽轮机组的转子上进行的。该转子为单转子,长为 4.7 m,轴瓦处轴颈为 300 mm,轴封套最大处直径为 800 mm,轴在径向尺寸上呈阶梯变化。测试时,沿轴向标记处测量断面位置 ($L_0, L_1 \dots L_9$),每个横断分为 8 等分,并标记为 (1, 2, 3, ...)。试验中,用激光扫描测试系统与百分表分别进行了测试,测试数据绘制成曲线如图 6 所示。

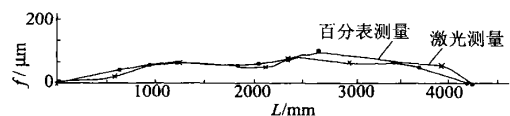


图 6 激光测量系统与百分表测量结果比较曲线

Fig. 6 Curve diagram of laser measuring system and percentimeter measurement

从试验曲线来看,转子最大弯曲量与百分表测量的结果基本一致。除个别点有差异外,曲线的整

体变化趋势与形状基本一致。大量的数据分析表明激光扫描测量系统已达百分表的测量精度,其测量精度为 $\pm 5 \mu\text{m}$,完全满足实际生产的要求。

4 结 论

通过模拟和现场测试,得出以下几点结论:

(1)激光精密测量系统性能优良,自动化程度高,可用于现场测试。磁场、温度及振动对测量结果影响较小。

(2)能远距离非接触测量大轴弯曲,测量精度较高,达 $\pm 5 \mu\text{m}$,测量距离达 4 m。

(3)能进行热态弯曲的测量,为直轴过程中的热态弯曲监测提供了一种非常有效的手段。

参考文献:

- [1] 尤政,冯其波,梁晋文.高精度大孔径测量系统的研究[J].实用测试技术,1994,3:2-7.
YOU ZH, FENG Q B, LIANG J W. Study on high precision big aperture diameter measurement system[J]. *Practical Measurement Technology*, 1994, 3:2-7. (in Chinese)
- [2] 张景和.激光扫描及对图像接收的影响分析[J].光学精密工程,1998,6(3):95-100.
ZHANG J H. The analysis of influence on scanner and reception of picture image[J]. *Optical and Precision Engineering*, 1998, 6(3):95-100. (in Chinese)
- [3] 刘树琪.大直径数显测量装置系统研究[J].现代计量测试,1994,4:9-14.
LIU S H Q. Study of major diameter numerical display measurement device system[J]. *Modern Metrologic Technology*, 1994, 4:9-14 (in Chinese)
- [4] 张景和.激光扫描显微镜中的扫描系统[J].光学精密工程,1995,3(2):62-65.
ZHANG J H. Scanning system in laser scanning microscope[J]. *Optical and Precision Engineering*, 1995, 3(2):62-65 (in Chinese)
- [5] 郑思义.大直径自动测量仪[J].国外计量,1991,3:64-68.
ZHENG S Y. Big diameter auto measurement instrument[J]. *Foreign Metrology*, 1991, 3:64-68. (in Chinese)
- [6] 郑思义.直径测量仪[J].国外计量,1991,6:60-67.
ZHANG S Y. Big diameter measurement instrument[J]. *Foreign Metrology*, 1991, 6:60-67. (in Chinese)

作者简介:关荣锋(1964-),男,湖北潜江人,副教授,现为华中科技大学光电子工程系博士研究生,研究方向为光电子与光通信技术,已在国内外学术刊物上发表论文十多篇,目前主要从事光电子集成与封装技术的研究。