

文章编号: 0258-7025(2003)08-0743-04

激光多普勒扭转振动测试技术的研究

桑波, 赵宏, 谭玉山

(西安交通大学激光与红外应用研究所, 陕西 西安 710049)

摘要 提出了一种差动式可辨向激光多普勒扭转振动测试仪, 计算并分析了激光多普勒技术的双相检测和矩形光栅的衍射光强分布。采用相位光栅作为光学混频器件, 提高了测量的信噪比并充分地利用了光能。实验表明, 该系统能有效地实现旋转轴可辨向扭转振动的测量, 并可获得较高的精度。

关键词 光学技术与仪器; 激光多普勒技术; 扭转振动; 差拍; 相位光栅

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

Research on the Torsional Vibration Measurement with Laser Doppler Technology

SANG Bo, ZHAO Hong, TAN Yu-shan

(Research Institute for Laser and Infrared Applications, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract In this paper, a new difference Laser Doppler Vibrometer with directional discrimination is introduced. Two-phase detecting technique used to distinguish the direction and the intensity distribution of the phase grating diffraction pattern is analyzed. The phase grating is a frequency-mixing device that can get high SNR signals. The experiments prove that the system can be used to measure torsional vibration and distinguish the rotating direction of the rotor, which can arrive at a high accuracy.

Key words optical technique and instrument; laser Doppler technology; torsional vibration; beat; phase grating

1 引言

扭转振动是轴类最基本的振动形式。机械、电气、动力或负荷等方面短暂的冲击和瞬变过程, 会造成所传递的扭矩发生短暂或持续的波动, 从而导致旋转轴系产生扭转振动。扭振产生的扭转应力使轴系各断面受到交变的剪切应力, 导致轴系材料的疲劳积累, 轻则引起较大的噪声并加速零件的磨损, 从而缩短其工作寿命。重则形成裂纹、切口, 并逐渐扩散, 导致轴系的断裂和崩溃, 其后果往往是毁灭性的恶性事故, 损失极为惨重。回转机械广泛应用在能源、交通等部门, 为此, 实时监测这些回转机械的扭转振动情况很有必要。扭振测量主要有两大类方法^[1]: 一类是接触测量, 它将传感器(应变片、加速度

计等)安装在回转轴上, 测量信号经过集流环或者无线电方式传送给接受方和分析仪。但对于高速大型回转体, 转轴表面线速度极高, 大部分传感器将失效或测量误差大大增加。另一类是非接触测量, 用得最多的是“测齿法”, 它借助安装在轴上的齿轮、码盘或均布的黑白反光带, 利用磁电传感器或光电传感器输出每转的脉冲数来测量扭振。上述两类方法都不同程度地需要在旋转轴系上添加或改装信息提取设备, 往往受到旋转轴系结构的限制, 况且许多回转设备(如大型发电机组)不允许停机安装传感器。因而, 给实时监测扭转振动带来了困难。

一般回转机械的旋转方向不会随时改变, 其扭转振动仅仅是转速在一定方向上的随机波动, 无需辨别其旋转方向。但在旋转方向随机波动的场合及

收稿日期: 2002-03-04; 收到修改稿日期: 2002-06-10

基金项目: “国家行动计划 MEMS 智能仪器及其基础理论与技术”基金资助项目。

作者简介: 桑波(1972—), 男, 现为西安交通大学在读博士研究生。主要研究方向为智能化光电检测、信号处理、微机测试与控制及电子设计自动化。E-mail: bsang@163.net 或 bsang@sohu.com

研究转动系统的起、停性能时,旋转方向的辨别就显得很有必要。目前,激光多普勒固体测量常常采用布拉格盒^[2]或旋转光栅实现频移来辨别运动方向。而这些方法光能的损失很大,且控制复杂、成本高,又产生了新的噪声干扰源,应用有一定的局限性。本文将相位光栅作为合束器应用于激光多普勒扭转振动测试系统,实现了可辨向测量扭振。

2 测量原理和理论分析

2.1 差动式扭转振动的多普勒频移

可辨向激光多普勒扭转振动测试系统如图 1 所示。在系统中,Laser 是波长为 632.8 nm 的 He-Ne

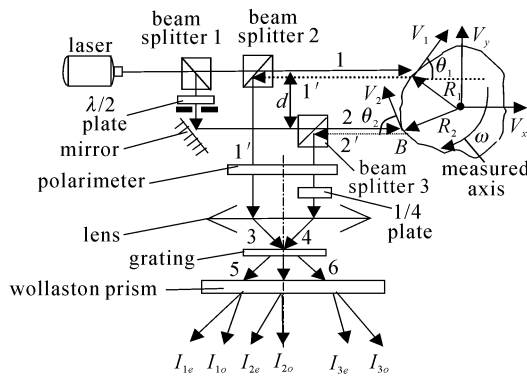


图 1 测试系统光路图

Fig. 1 Optical diagram of measuring system

激光器,激光经分光镜分成强度相等的两束光,其中的透射光束 1 通过分光比可调的分光镜 2 达到被测表面 A 点,反射光束经 1/2 波片、反射镜成为与透射光 1 完全平行光束 2,并到达被测表面 B 点。这两束平行光束分别在 A,B 两点被散射,其中一部分散射光沿原路返回,成为图 1 中的后向散射光束 1', 2'(虚线表示),通过调整分光比可调的分光镜 2 和 1/2 波片,使后向散射光束 1', 2' 强度相等,以得到较好的效果。根据激光多普勒频移原理^[3],两束光在 A,B 两点发生的频移值分别为

$$f_{AD} = \mp 2 \cdot (V_x + V_{Ax}) / \lambda \quad (1)$$

$$f_{BD} = \pm 2 \cdot (V_{Bx} - V_x) / \lambda \quad (2)$$

式中, V_{Ax} , V_{Bx} 分别为转轴 A,B 两点的线速度在 x 方向的分量, $V_{Ax} = R_1 \cos \theta_1 \cdot \omega \cdot \cos \gamma$, $V_{Bx} = R_2 \cos \theta_2 \cdot \omega \cdot \cos \gamma$, ω 为旋转角速度,“+,-”号取决于旋转轴的转向, λ 为激光波长, V_x 为旋转轴在 x 方向的平动分量, γ 为两平行光束平面与转轴横截面的夹角, θ_1, θ_2 为旋转轴 A,B 两点速度矢量与水平方向的夹角, R_1, R_2 为旋转轴 A,B 两点的半径。 d 为两

平行光束之间的距离,由图可知, $d = R_1 \cdot \cos \theta_1 + R_2 \cdot \cos \theta_2$, 是一个常量。

2.2 光学混频

相位光栅具有周期性的结构,差拍信号是连续的正弦波,具有很高的信噪比。本系统光学差频的元件采用如图 2 所示的矩形相位光栅。缝宽与光栅常数 g 之比为 0.5,相邻方波单缝之间的相位差均为 π 。它的透射函数^[4] $h(x)$ 为

$$h(x) = \begin{cases} 2\pi(n-1)t/\lambda, & 0 < x < g/2 \\ 0, & g/2 < x < g \end{cases}$$

式中 n 为光栅材料的折射率, t 为槽深。

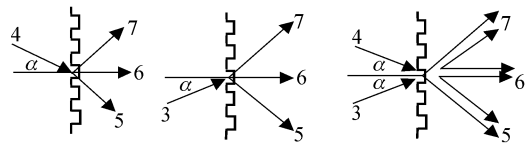


图 2 相位光栅作合束器的光学混频

Fig. 2 Optical mixing of the rectangular phase grating as a beam-combiner

一维相位光栅的透射函数 $h(x)$ 决定了衍射光各主极值 s 的相对功率,即衍射图样中能量的分布。该光栅主极值相对功率为

$$I = \begin{cases} 0 & s = 0 \text{ 和偶数} \\ (2/s\pi)^2 & s = \text{奇数} \end{cases}$$

由此,计算出矩形相位光栅各主极值的相对功率如表 1 所示。

表 1 矩形相位光栅各主极值的相对功率

Table 1 Normalized power of the principal maximum of the rectangular phase grating

Diffraction order	0	±1	±2	±3	±4	±5
Normalized power	0	40.5%	0	4.5%	0	1.6%

在测试系统光路图 1 中,沿原路返回的散射光束 1', 2' 分别经半透半反透镜成为两束平行光,经透镜成为会聚光束 3 和 4。为实现差拍,光束 3 和 4 以光栅 ±1 级入射角 α 对称入射到相位光栅,各衍射光对应重合,如图 2 所示。光束 3 的 +1 级衍射光, -1 级衍射光, -3 级衍射光分别与光束 4 的 +3 级衍射光, +1 级衍射光, -1 级衍射光相混频,差频 f_D 为

$$f_D = f_{BD} - f_{AD} = \pm (2/\lambda) \cdot \omega (R_2 \cos \theta_2 + R_1 \cos \theta_1) \cdot \cos \gamma = \pm (2/\lambda) \cdot d \cdot \cos \gamma \cdot \omega = (2d \cdot \cos \gamma / \lambda) \cdot (\pm \omega) \quad (3)$$

测试系统光路图 1 中的旋转轴不仅存在转动, 而且还存在平动。由(3)式可以看出, 差频 f_D 仅仅与旋转角速度 ω 成正比, 与轴的平动分量和横截面形状均无关。所以, 实现了旋转轴转动、平动的分离, 且测量的结果不受激光光斑在轴截面轮廓上位置的影响, 这是其他扭转测量系统无法比拟的一个优势。

由(3)式可推出

$$\omega = \pm (\lambda/2d \cdot \cos\gamma) \cdot f_D = k_1 \cdot f_D \quad (4)$$

旋转角速度 ω 的士号, 表示旋转轴的旋转方向, 它将由下面的辨向系统来决定。

本系统相位光栅常数 $g = 0.01 \text{ mm}$, 对于 He-Ne 光, 其士 1 级光栅衍射角为

$$\alpha = \arcsin(\lambda/g) = \arcsin(0.6328/10) = 3.63^\circ$$

将光束 3 和 4 汇聚于光栅的透镜焦距选用 $f = 100 \text{ mm}$, 两束平行光束间的距离 $d = 12.7 \text{ mm}$ 。

2.3 双相检测辨向原理

本测量系统利用双相检测法^[6]实现对旋转轴旋转方向的鉴别。图 1 中激光器输出的光束是线偏振的, 从被测面散射回来的两路光仍然是线偏振光。其中光束 2' 通过 1/4 波片后, 成为圆偏振光。光束 1' 通过偏振片后, 线偏振性更强。两束光经过透镜和相位光栅后, 射向渥拉斯顿棱镜, 它相对于线偏振方向成 45° 方向放置。以光束 3 的 -1 级衍射光、光束 4 的 +1 级衍射光相混频后的光束 6 为例进行分析, 线偏振光、圆偏振光在渥拉斯顿棱镜 e 光和 o 光偏振方向上的电场分量可写为

$$E_{le} = E_l \exp[i2\pi(f_0 + f_{AD})t + \varphi_l] \cos 45^\circ \quad (5)$$

$$E_{lo} = E_l \exp[i2\pi(f_0 + f_{AD})t + \varphi_l] \sin 45^\circ \quad (6)$$

$$E_{ce} = E_c \exp[i2\pi(f_0 + f_{BD})t + \varphi_c] \quad (7)$$

$$E_{co} = E_c \exp[i2\pi(f_0 + f_{BD})t + \varphi_c + \pi/2] \quad (8)$$

式中 φ_l, φ_c 分别为线偏振光、圆偏振光的初始相位, E_l, E_c 为两者的振幅。 o 光和 e 光的合成光强分别为

$$I_e = [E_{ce} + E_{le}]^2 \quad (9)$$

$$I_o = [E_{co} + E_{lo}]^2 \quad (10)$$

合成光强经光电器件 I_{2e}, I_{2o} 转化后, 光电流的交流部分为

$$i_{2e} = \sqrt{2} E_l E_c \cos[2\pi(f_{BD} - f_{AD})t + \varphi_c - \varphi_l] \quad (11)$$

$$i_{2o} = \sqrt{2} E_l E_c \cos[2\pi(f_{BD} - f_{AD})t + \varphi_c - \varphi_l + \pi/2] \quad (12)$$

比较式(11), (12)可以看出, 光电器件 I_{2e} 的光电流信号 i_{2e} 与光电器件 I_{2o} 的光电流信号 i_{2o} 之间具有 $\pi/2$ 的相位差。当 $(f_{BD} - f_{AD}) > 0$ 时, i_{2e} 比 i_{2o} 超前 $\pi/2$, 当 $(f_{BD} - f_{AD}) < 0$ 时, i_{2e} 比 i_{2o} 滞后 $\pi/2$ 。而 $(f_{BD}$

$-f_{AD})$ 的符号取决于旋转方向, 所以两路信号之间的相位关系包含了旋转轴旋转方向的信息。

如图 1 所示, 6 个光电器件 $I_{1e}, I_{1o}, I_{2e}, I_{2o}, I_{3e}, I_{3o}$ 光电流交流部分依次相差 $\pi/2$, 其中 I_{1e} 与 I_{3e}, I_{1o} 与 I_{3o} 相角相同。这样, 根据电信号在相位上所发生的超前和滞后的变化能够辨别旋转轴的旋转方向, 它尤其适合于旋转轴启停状态下复杂振动的测试。

3 测量信号的接收与处理

3.1 信号的处理

测量系统的信号处理如图 3 所示。光电器件 $I_{1e}, I_{1o}, I_{2e}, I_{2o}, I_{3e}, I_{3o}$ 光电流的交流部分含有旋转轴扭转信息, 它们分别被转化为电信号 $-\sin, \sin, \cos, -\cos$, 将其两两对应输入差动放大器, 消除直流分量, 得到 \sin, \cos 信号, 将其中一路信号反相, 这样就得到 3 束相位差依次为 $\pi/2$ 的正弦信号。电阻链 5 细分电路对信号进行相位细分, 积分与门式 4 细分辨向电路进行双相辨向。

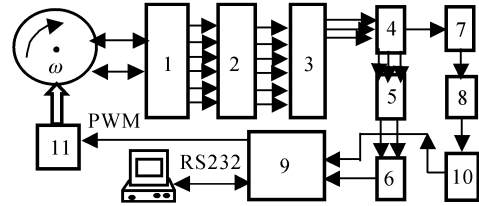


图 3 信号处理系统

1: 光路系统; 2: 光电转换; 3: 差动放大; 4: 锁相环路; 5: 细分电路; 6: 双相辨向; 7: 锁相解调; 8: 滤波; 9: DSP 处理器 TMS320f240; 10: 数据采集; 11: PWM 电源

Fig. 3 Signals processing system

1: optics system; 2: opto-electronic sensor; 3: difference amplifier; 4: phase-locked loop; 5: subdivision circuit; 6: two-phase detect; 7: PLL demodulation; 8: filter; 9: digital signals processor TMS320f240; 10: data sample; 11: PWM power

由于工作距离比较远(2 m), 被测表面的散射光非常微弱。散射多普勒效应接收到的光信号会出现丢失现象, 而扭转振动的测量需要连续的信号。为此, 采用锁相环路可实现对丢失信号的重构, 并能根据信号的相位特征对其进行检测, 提高了信号的信噪比。

数字处理器 DSP 选用 TMS320f240 型, 它以 PWM 方式控制电机的转速、转向。计数脉冲和解调信号送到 DSP 数字处理器 TMS320f240, 进行 FFT 分析、小波变换等相应的数据处理, 并通过串行口与 PC 机交换信息。

3.2 参数的标定

回转机械常常要求扭转测试仪,能输出与瞬时转速成正比的电压信号。为此,选择线性特性良好的锁相解调: $f_{BD} - f_{AD} = k_2 \cdot U_D(t)$, 式中的 $U_D(t)$ 为锁相解调器输出的电压信号。结合(4)式可推出

$$\omega(t) = k_1 \cdot k_2 \cdot U_D(t) = k \cdot U_D(t) \quad (13)$$

式中的 k 值在激光多普勒扭转振动测试中,不仅与系统的电路参数有关,还与待测旋转轴、光学测试部件间的相对位置有关^[6],一般难以精确测量。因此,只能通过高精度的标定来得出系统的 k 值。

在一次测量过程中,系统参数是不变的,因而对(13)式两边在时间段 $[0, T]$ 内积分,可推出

$$k = \int_0^T \omega(t) dt / \int_0^T U_D(t) dt$$

如果考察的时间区间 T 足够长,电机角速度 $\omega(t)$ 的波动就可以看成是一个准平稳过程。对于步

距角为 $2\pi/p$ (p 为转子的磁极数) 的步进电机,尽管转子每步所转过的角度存在误差,但长时间运行时,不存在误差积累。取 T 等于 m 步稳定时间(即电机启动一步一步 m 次),化简得

$$k = (2\pi \cdot m) / p \cdot \int_0^T U_D(t) dt \quad (14)$$

4 实验结果

先是标定实验,它采用如图3所示的实验装置标定系统参数。接着进行实际测量:针对从 200~6000 r/min 的不同转速,测试旋转轴相应的扭振振幅,每个转速下测量 10 次,取其平均值,测试数据如表 2 所示。参考值是丹麦 BK 公司 TYPE2523 型扭转测试仪对相同扭转状态的测试值。

表 2 旋转轴扭转振动振幅的测量数据(工作距离 2 m)

Table 2 Measurement results of the amplitude of rotating axis (at the distance of 2 m)

Rotate speed/r/min	440	700	1100	1500	1780	2300	3600	4500
Reference value/(°)	0.273	3.060	1.32	0.826	0.407	0.755	0.965	2.011
Measured amplitude value/(°)	0.2738	3.0423	1.3184	0.8362	0.4082	0.7632	0.9674	1.9958

与参考值相比较,扭转振动振幅的均方差为 0.008° ,达到了预期的效果,且能够准确地判别运动的方向。本测振仪对待测对象表面状况无特殊要求,可成功地用于任意横截面形状物体的测量,不必局限于圆形横截面部件的扭转测量,测量距离为 0.5~3 m,系统测量的相对精度优于 1×10^{-4} 。

参 考 文 献

- 1 Luo Deyuan, Ren Yaping, Chen Wenyi *et al.*. Research of torsional vibration measurement of high-speed rotating mechanical devices [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(9):809~813 (in Chinese)
- 2 Li Enbang. Three-dimensional laser Doppler velocimeter

- using frequency shift separation [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(7):768~772 (in Chinese)
- 3 Yang Guoguang. Modern Optics Measurement Technique [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997. 430~446 (in Chinese)
- 4 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineer Optics [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998. 262~273 (in Chinese)
- 5 L. E. Drain. The Laser Doppler Technique [M]. New York: John & Sons, 1980. 192~224
- 6 Zeng Zhoumo, Sun Jiazi, Yan Ming. Laser measurement and adaptive calibration of torsional vibration [J]. *Transactions of CSICE* (内燃机学报), 1998, **16**(1): 123~125 (in Chinese)