

文章编号: 0253-2239(2006)03-0389-4

## 基于激光多普勒技术扭振测量的研究\*

黄 震<sup>1</sup> 刘 彬<sup>1</sup> 董全林<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 燕山大学信息科学学院光电子工程系, 秦皇岛 066004)  
(<sup>2</sup> 北京航空航天大学光电技术研究所, 北京 100083)

**摘要:** 提出一种基于激光多普勒技术和光学外差原理对高速回转机械进行扭振测量的新方法, 分析了工作原理, 推导出光路部分的数学模型, 并通过实验分别验证了测量方法的可行性和准确性。高相干激光投射到转轴同一个截面上 2 点, 反射光的多普勒频移正比于转轴转速, 通过光学配置, 使前后两个时刻的多普勒频移光信号在光探测器上发生光学混频, 光电流拍差正比于转轴在两个时刻的速度差, 控制两个时刻时间差很小, 直接得到角加速度。与其他激光多普勒扭振测量方法相比, 该方法直接测量转动角加速度, 在保证测量精度的前提下, 提高了扭转振动测量的实时性, 极大地扩展了扭振测量的动态范围, 对大型回转机械运行状态监测和故障诊断具有重要意义。

**关键词:** 光学测量; 扭振测量方法; 激光多普勒技术; 角加速度

中图分类号: TN247 文献标识码: A

## Research on the Torsional Vibration Measurement Based on Laser Doppler Technique

Huang Zhen<sup>1</sup> Liu Bin<sup>1</sup> Dong Quanlin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Optoelectronics Engineering, College of Information Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)  
(<sup>2</sup> Institute of Opto-Electronics Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

**Abstract:** A novel measurement method for the torsional vibration of high-speed rotary machine is proposed, based on laser Doppler technique and the principle of optical heterodyne. The article analyzes its principle, worked out the mathematical model of the optical configuration, and tests the feasibility and accuracy respectively. The laser beams launch at two points of the same section of the rotating shaft. The reflected beams are shifted at frequency domain according to Doppler effect. The frequency shift is proportional to the rotating velocity. With the proper optical configuration, the beams of two successive times are heterodyned on the photo-detector, and the frequency of the photoelectric current is proportional to difference of velocity at the two times. By making the interval of the two successive times small enough so that the angular acceleration is measured directly. Compared with other measurement methods based on laser Doppler technique, the angular acceleration is measured directly, therefore the measurement of torsional vibration is more real-time and dynamic range is extended greatly. It is essential to the monitoring running state and failure diagnosis of large-scale gyration machine with high-rotational velocity.

**Key words:** optical measurement; torsional vibration measurement method; laser Doppler technique; angular acceleration

### 1 引 言

在回转机械中, 由于材料性能和机械结构等因素, 使得回转轴发生弹性振动, 具体表现为转轴速度的随机波动, 即存在角加速度, 由此而产生振动力矩。对于大型回转机械, 这种振动的破坏性很强, 极

易引起机械结构的疲劳和结构松散, 尤其是当振动频率接近于机械结构的固有频率时, 破坏性将会更严重。因此对扭转振动进行测量具有重大的实际意义。扭振测量技术主要分为两类方法。一类是接触式测量, 利用固定于转轴表面的各种传感器得到与

\* 河北省科技攻关(02212106D)资助课题。

作者简介: 黄 震(1976~), 男, 天津市人, 讲师, 燕山大学电路系统博士研究生, 主要从事光纤通信和光学、光纤测量方面的研究。E-mail: hans@ysu.edu.cn

收稿日期: 2005-05-26; 收到修改稿日期: 2005-08-06

扭转振动相关的物理量,如速度、位移等,经数据处理得到扭振信息。但对于高速大型回转机械,转轴表面线速度很高,造成传感器失效或测量精度降低,同时也给传感器的安装维护以及传感信号的传递带来很大困难,限制了这类方法的使用场合。另一类为非接触式测量,一般都是通过电磁感应和光电脉冲法直接测量转轴的平均速度,进而反映出扭转振动信息,实时性差。基于激光多普勒测速技术的扭振测量方法可以直接测量得到转轴的瞬时转速,但系统带宽限制它主要用于  $1 \mu\text{m/s} \sim 20 \text{ m/s}$  的中低速场合<sup>[1]</sup>。

提出一种基于激光多普勒技术和光学外差的原理进行扭振测量的新方法。将高相干激光投射到转轴一个截面上,反射光发生多普勒频移,该频移正比于转轴转速,再通过光学配置,使前后两个时刻的多普勒频移光信号在光探测器上发生光学混频,光电流拍差正比于转轴在两个时刻的速度差,控制两个时刻时间差很小,就可以直接得到角加速度。转轴角速度波动,即角加速度,直接反映了转轴扭转振动的性质<sup>[2]</sup>。该系统扭转振动测量实时性高,具有非常宽的动态范围,对大型高速回转机械运行状态的监测和故障诊断具有重要的意义。

## 2 测量原理

### 2.1 测量原理

测量原理如图 1 所示。

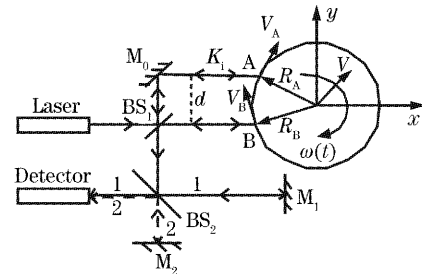


图 1 测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement

由高相干光源 (He-Ne 激光器) 发出的激光经过分束镜  $BS_1$  分为两束,分别投射在转轴同一截面上点 A 和点 B 上,部分散射光原路返回,并发生多普勒频移,然后被  $BS_1$  分别反射和透射到分束镜  $BS_2$  上,并被分为两路,分别表示为光束 1 和 2 (用实线和虚线表示)。光束 1 和 2 分别被距分束镜  $BS_2$  距离不同的两面反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  反射后,共同射到光探测器的光敏面上。根据多普勒频移, A、B 两点反射光线的多普勒频移  $f_{DA}(t)$  和  $f_{DB}(t)$  分别为

$$\begin{cases} f_{DA}(t) = \frac{2}{\lambda} \{ [\mathbf{V}_A(t) + \mathbf{V}(t)] - [\mathbf{V}_A(t - \Delta l/c) + \mathbf{V}(t - \Delta l/c)] \} \cdot \mathbf{K}_i, \\ f_{DB}(t) = \frac{2}{\lambda} \{ [\mathbf{V}_B(t) + \mathbf{V}(t)] - [\mathbf{V}_B(t - \Delta l/c) + \mathbf{V}(t - \Delta l/c)] \} \cdot \mathbf{K}_i, \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\mathbf{K}_i$  为入射光束方向上的单位向量 (此处假定两入射光束平行,并且在到达分束镜  $BS_2$  之前两光束光程相等),  $\mathbf{V}_A(t)$ 、 $\mathbf{V}_B(t)$  分别为 A、B 两点的切向速度矢量,  $\mathbf{V}(t)$  为转轴在  $t$  时刻的横向振动速度矢量,  $c$  为光在空气中的速度,  $\lambda$  为激光波长  $632.8 \text{ nm}$ ,  $\Delta l$  为光束 1 和 2 的光程差,它是两反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  到  $BS_2$  距离差的 2 倍。在探测器光敏面上发生光学混频后得到光电流信号频率  $f_D(t)$  为

$$f_D(t) = f_{DA}(t) - f_{DB}(t) = \frac{2}{\lambda} \{ [\mathbf{V}_A(t) - \mathbf{V}_B(t)] - [\mathbf{V}_A(t - \Delta l/c) - \mathbf{V}_B(t - \Delta l/c)] \} \cdot \mathbf{K}_i, \quad (2)$$

$\mathbf{Z}$  表示转轴轴线方向上的单位矢量,则

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_A(t) &= 2\pi\omega(t) [\mathbf{R}_A(t) \times \mathbf{Z}], & \mathbf{V}_A(t - \Delta l/c) &= 2\pi\omega(t - \Delta l/c) [\mathbf{R}_A(t - \Delta l/c) \times \mathbf{Z}], \\ \mathbf{V}_B(t) &= 2\pi\omega(t) [\mathbf{R}_B(t) \times \mathbf{Z}], & \mathbf{V}_B(t - \Delta l/c) &= 2\pi\omega(t - \Delta l/c) [\mathbf{R}_B(t - \Delta l/c) \times \mathbf{Z}], \end{aligned} \quad (3)$$

$\omega(t)$  为转轴  $t$  时刻转动角速度,  $\mathbf{R}_A(t)$  和  $\mathbf{R}_B(t)$  为  $t$  时刻转轴 A、B 两点径向矢量,由 (3) 式可得

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_A(t) - \mathbf{V}_B(t) &= 2\pi\omega(t) [\mathbf{R}_A(t) - \mathbf{R}_B(t)] \times \mathbf{Z} = 2\pi\omega(t) (\mathbf{BA} \times \mathbf{Z}), \\ \mathbf{V}_A(t - \Delta l/c) - \mathbf{V}_B(t - \Delta l/c) &= 2\pi\omega(t - \Delta l/c) [\mathbf{R}_A(t - \Delta l/c) - \mathbf{R}_B(t - \Delta l/c)] \times \mathbf{Z} = \\ &= 2\pi\omega(t - \Delta l/c) (\mathbf{BA} \times \mathbf{Z}), \end{aligned} \quad (4)$$

将 (4) 式带入 (2) 式得

$$\begin{aligned} f_D &= \frac{4\pi}{\lambda} [\omega(t) - \omega(t - \Delta l/c)] \cdot (\mathbf{BA} \times \mathbf{Z}) \cdot \mathbf{K}_i = \frac{4\pi}{\lambda} [\omega(t) - \omega(t - \Delta l/c)] \cdot (\mathbf{K}_i \times \mathbf{BA}) \cdot \mathbf{Z} = \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} [\omega(t) - \omega(t - \Delta l/c)] \cdot d \cdot \cos \gamma, \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $d$  为两平行光束的距离,  $\gamma$  为转轴轴线与入射光所在平面法线间的夹角。设  $\beta$  为转轴轴线与入射光所在平面间的交角, 即有  $\gamma = (\pi/2) - \beta$ , 代入 (5) 式得到

$$f_D = \frac{4\pi}{\lambda} [\omega(t) - \omega(t - \Delta l/c)] \cdot d \cdot \sin \beta, \quad (6)$$

如果转轴轴线和入射光所在平面垂直, 即 (6) 式中  $\beta = \pi/2$ , 于是 (6) 式成为

$$f_D = \frac{4\pi d}{\lambda} [\omega(t) - \omega(t - \Delta l/c)], \quad (7)$$

当  $\Delta l/c$  很小时, 有

$$f_D = \frac{4\pi d}{\lambda} \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \cdot \frac{\Delta l}{c} = \frac{4\pi d \Delta l}{\lambda c} \cdot \epsilon, \quad (8)$$

式中  $\epsilon$  为转轴角加速度。

通过 (8) 式, 可以得出差频信号频率与转轴的转动角加速度成正比, 直接反映出扭转振动信息; 且与转轴形状无关, 方便地应用于各种形状的回转轴上; 并且信号频率  $f_D$  仅与入射光所在平面法线方向一致的转动分量相关, 而与转轴平动和其他方向的转动无关, 提高了系统信噪比。

用电子线路解调出频率  $f_D$ , 经过频压变换可以得到与回转轴转动瞬时角加速度成正比的电压信号  $U(t)$ 。由于瞬时角加速度直接反映了扭矩振动的情况, 对  $U(t)$  进行频谱分析, 就可以确定转轴的各阶振动频率和转轴系统当前运行状态。运用故障诊断的频谱分析方法, 即可判断转轴系统的故障部位, 形成知识库, 以达到预测目的, 对其进行有效地维护, 预防突发故障的发生。

## 2.2 动态范围和精度

设最大的差频为  $f_{Dmax}$  (由解调电路动态范围决定), 由 (8) 式可测最大角加速度为

$$\epsilon_{max} = \lambda c f_{Dmax} / (4\pi d \Delta l), \quad (9)$$

为了保证 (8) 式的线性度, 至少要满足  $\omega_{max} \Delta l/c \leq 0.1$ ,  $\omega_{max}$  为扭振各次谐波中最大角频率, 则振动最大频率为

$$f_{max} = 0.2\pi c / \Delta l, \quad (10)$$

通过 (9) 式和 (10) 式可以得出, 可测最大角加速度和扭振频率都与  $1/\Delta l$  成正比, 而光程差  $\Delta l$  可趋向于无穷小, 因此理论上角加速度和扭振频率的测量范围是没有上限的。而且, 当角加速度范围确定后, 还可以通过改变  $\Delta l$  实现对调频信号频率范围的调节, 以适应解调电路的动态范围, 减小了系统带宽对测量范围的限制, 具有非常高的灵活性和自适应性。系统使用 He-Ne 激光器, 波长为 632.8 nm, 解调器工作范围为  $1.6 \pm 0.8$  MHz, 动态范围大约为

100 dB, 不同的光程差对应的角加速度范围和最大扭振频率如表 1 所示。

表 1  $\Delta l$  与  $\epsilon_{max}$  和  $f_{max}$  的对应关系

Table 1 Corresponding relationship between  $\epsilon_{max}$ ,

$f_{max}$  and  $\Delta l$

$\Delta l$ / m	Angular acceleration range / (rad/s <sup>2</sup> )	$f_{max}$ / kHz
5	24 ~ 2.387 × 10 <sup>6</sup>	1000
50	2.4 ~ 2.387 × 10 <sup>5</sup>	100
500	0.24 ~ 2.387 × 10 <sup>4</sup>	10

扭转振动的精度直接取决于系统对角加速度测量的精度, 而角加速度的测量精度直接受散斑噪声、测振仪器自身的振动等因素的影响。

由于被测转轴表面大多为光学粗糙表面, 由于激光测量点面积相对于转轴表面粗糙度比较大, 这样就会产生许多频率相同, 而散射方向和相位随机的散射光线。它们之间会随机地发生干涉, 产生散斑。转轴的高速转动而形成动态散斑, 最终导致光探测器输出的电流幅度和相位的随机抖动, 降低系统的信噪比, 影响了系统测量精度。可以通过在被测转轴表面粘贴或涂抹反光均匀的反光材料, 控制激光光斑直径来降低散斑对系统精度的影响。采用相位光栅和适当的增大光接收口径等方法, 提高系统信噪比<sup>[3~6]</sup>。

此系统信号解调单元可以直接使用多普勒测速系统中的解调电路, 兼容性好。

## 3 实验结果

实验在 YDCK-019 扭矩实验台上进行, 各部分结构如图 2 所示。伺服调速电机驱动转轴转动, 直流电机作为负载, 使转轴承受扭矩作用, 转轴在驱动负载的过程中发生扭转振动。本实验是在文献[7]相同的实验平台上和相同参量的条件下测量得到的扭矩和扭振数据, 并比较了在平均转速 800 r/min 和 1200 r/min 下扭矩的变化和扭转振动的关系, 实验曲线如图 3 所示。

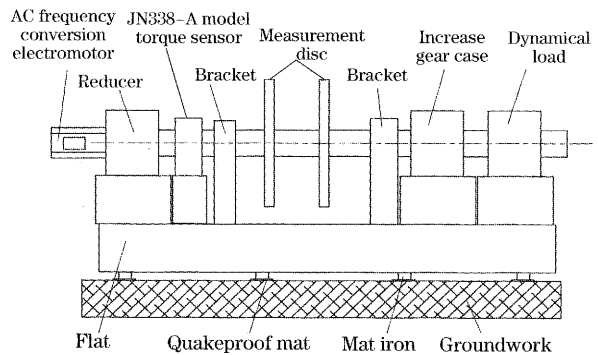


图 2 扭矩实验平台

Fig. 2 Equipment of torque examination

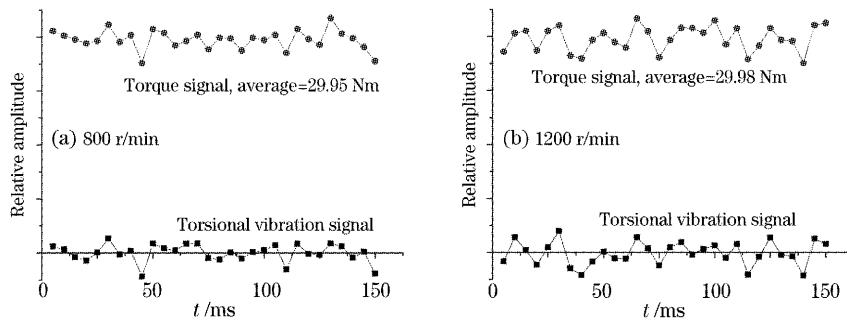


图3 实验结果曲线

Fig. 3 Test result curve

扭振的具体表现为转轴速度的随机波动,即存在角加速度,并由此而产生振动力矩,因此扭振和扭矩的变化具有一致的趋势。通过实验结果可以得出扭矩变化信号和扭振信号的趋势的确是—致的,可以初步判定此扭振测量方法可行。

标定后进行数据测量,针对 300~6000 r/min 不同转速测量旋转轴相应的扭振振幅,每个转速下测量 6 次,取其平均值,测量数据如表 2 所示。参考值是德国 Polytec 公司 OFV-4000 扭振测试仪对相同扭转状态的测量值。

表 2 扭振振幅测量数据

Table 2 Measurement data of the amplitude of torsional vibration

Rotating speed / (r/min)	800	1200	2000	2800
Reference value / ( $^{\circ}$ )	0.426	1.046	2.304	0.826
Measured value / ( $^{\circ}$ )	0.4263	1.0452	2.3102	0.8268
Rotating speed / (r/min)	3600	4200	5000	5600
Reference value / ( $^{\circ}$ )	0.937	3.362	0.782	0.668
Measured value / ( $^{\circ}$ )	0.9369	3.3668	0.7818	0.6598

与参考值相比较,扭转振动振幅的均方差为  $0.004^{\circ}$ ,达到了预期结果。在测量的过程中由于环境等因素会出现信号丢失现象,增大了随机误差,因此在信号处理过程中需要引入信号重构和频谱校正技术减小误差<sup>[8,9]</sup>。

## 4 结 论

对一种基于激光多普勒技术和光学外差原理进行扭振测量的新方法进行了理论分析,推导出光路部分的数学模型,并进行了实验研究。最终实验证明了该扭振测量方法的合理性,而且除具有基于激光多普勒测速技术测量扭振的非接触测量、不改变转轴运行状态和与转轴形状无关的优点外,还具有实时性高和测量范围更宽的优点。该方法的运用可以提高对大型高速回转机械在线监测和故障诊断的

能力,具有重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 S. J. Rothberg, A. Hocknell, J. Coupland. Developments in laser Doppler accelerometry (LDAc) and comparison with laser Doppler velocimetry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **32**(6): 549~564
- 2 Luo Deyuan, Ren Yaping, Chen Wenyi *et al.*. Research of torsional vibration measurement of high-speed rotating mechanical devices [J]. *Chin. J. Lasers*, 1997, **A24**(9): 809~813 (in Chinese)  
骆德渊,任雅萍,陈文艺等. 高速回转机械扭转振动测量的研究 [J]. *中国激光*, 1997, **A24**(9): 809~813
- 3 He Shunzhong, Liu Yanyu, Jiang Chengzhi *et al.*. On the relation between the signal intensity and parameters of optical structure of displacement measurement system of scattering-surface laser Doppler effect [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002, **23**(4): 256~262 (in Chinese)  
贺顺忠,刘彦宇,蒋诚志等. 激光多普勒位移测量中散射光多普勒信号强度与系统结构参数相关的分析研究 [J]. *计量学报*, 2002, **23**(4): 256~262
- 4 Hong Xin, He Shunzhong, Jiang Chengzhi *et al.*. Remote displacement measurement of solid scattering surface utilizing laser Doppler effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 118~121 (in Chinese)  
洪 昕,贺顺忠,蒋诚志等. 用激光多普勒效应远距离测量固体散射表面的位移 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 118~121
- 5 He Shunzhong, Yao Xin, Jiang Chengzhi *et al.*. Optimization of optical system capable of off-surface displacement measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1375~1378 (in Chinese)  
贺顺忠,姚 欣,蒋诚志等. 一种可用于离面位移测量的光路的优化设计 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1375~1378
- 6 Sang Bo, Zhao Hong, Tan Yunshan. Research on torsional vibration measurement with laser Doppler technology [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(8): 743~746 (in Chinese)  
桑 波,赵 宏,谭云山. 激光多普勒扭振测试技术的研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 743~746
- 7 Dong Quanlin, Liu Bin, Yang Haima. Research on the principle of measure large rotation shaft torque using the laser Doppler technology [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(11): 1019~1022 (in Chinese)  
董全林,刘 彬,杨海马. 激光多普勒技术用于大型转轴扭矩测量原理的研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(11): 1019~1022
- 8 He Shunzhong, Liu Jinfeng, Jiang Chengzhi *et al.*. Study on Doppler signal of outline measurement of revolving object surface [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(2): 215~218 (in Chinese)  
贺顺忠,刘金凤,蒋诚志等. 旋转体表面轮廓测量的激光多普勒信号研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 215~218
- 9 Liu Changwen, Han Jingna, Liu Jie *et al.*. Investigation on frequency correction methods and its application in digital spectrum LDA processor [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(7): 642~646 (in Chinese)  
刘昌文,韩静娜,刘 杰等. 激光多普勒测速中的频谱校正及其应用 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 642~646