

文章编号: 0258-7025(2003)11-1019-04

# 激光多普勒技术用于大型转轴扭矩 测量原理的研究

董全林, 刘彬, 杨海马

(燕山大学光电子工程系, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 基于激光多普勒效应, 提出了一种用于测量转轴扭矩的测量原理。实现了大型机械设备主传动的动力监测, 为设备自动化、智能化奠定基础。

**关键词** 激光多普勒技术; 扭矩测量; 弹性转轴; 动力监测

**中图分类号** TN 249; TH 823.4 **文献标识码** A

## Research on the Principle of Measure Large Rotation Shaft Torque Using the Laser Doppler Technique

DONG Quan-lin, LIU Bin, YANG Hai-ma

(Department of Optoelectronics Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** This paper presents a method of measure large elastic rotation shaft torque based on the laser Doppler technique. It can realize dynamics observation of main drive for large mechanism equipment, which can provide the foundation of the equipment automatization and intelligentization.

**Key words** laser Doppler technique; measure torque; elastic rotation shaft; dynamics observation

## 1 引言

回转运动与动力传输是机械系统最重要的动力传递方式之一。在运行中, 由于动力大、能量传递密集、载荷变化, 时常出现运行不稳、准确性差、振动甚至零件断裂等故障, 严重影响了设备运行。对转动系统动力传递行为进行动态监测、预防与控制成为消除事故的重要手段。国际上目前主要采用在转轴表面粘贴应变片、涂敷磁滞伸缩材料、放置压电晶体、弦振<sup>[1]</sup>等方式感受转轴的变形测量扭矩; 用双截面齿环、光纤光栅、光敏材料、激光散斑等<sup>[2~5]</sup>电感和光学方法感受两个截面的相位差(也就是轴的扭转角)来测量扭矩。国内的研究原理和方法与国外基本同步<sup>[1]</sup>, 许多学校和研究机构都在研究和进行产品开发<sup>[2~4]</sup>。

光学方法测量扭矩在原理上具有不介入、非接触、抗电磁干扰、信号易于处理等优点。采用激光多普勒技术测量转轴扭矩未见报道。本文基于激光多普勒效应, 提出一种用于测量转轴扭矩的测量原理, 具有精度高、抗干扰能力强、频率单一性好、能量密集等优点, 以实现大型机械设备主传动的动力监测, 为设备自动化、智能化奠定基础。激光测量与一般光学测量相比,

## 2 基本原理

文献[6~10]介绍了激光多普勒技术测量扭振、横振等的原理。得出了明确的结论: 利用激光多普勒原理测量转速, 不受转轴横振的影响。这对于一般的动力传动轴测量带来了方便。本文在上述论文

收稿日期: 2002-07-09; 收到修改稿日期: 2002-09-23

基金项目: 河北省科技攻关(编号: 02212106D)资助项目。

作者简介: 董全林(1964. 1—), 男, 黑龙江泰来人, 燕山大学光电子工程系博士研究生, 副教授, 主要从事光测应力研究和大型回转机械的能量传递监测。E-mail: dongquanlin@88mail. ysu. edu. cn

单截面测量转轴转速和转速波动的基础上,采用双截面(甚至多截面)测量转速,求两截面的转速差并积分得到转轴在扭矩作用下的扭转角,进而计算得到转轴扭矩。测量系统的光路结构如图 1 所示,图中由同一个激光器发出的激光通过分光镜分成两束相同的光供给两个截面,截面间距为  $a$ 。每一截面的光又分成了两束平行的激光投射到被测转轴表面,同一截面两平行光束的间距为  $d$ 。转轴表面的散射光沿原路返回的光通过折射镜后在光电检测器上形成多普勒频差拍频被检测到。这里先给出每一截面的多普勒频差计算公式。

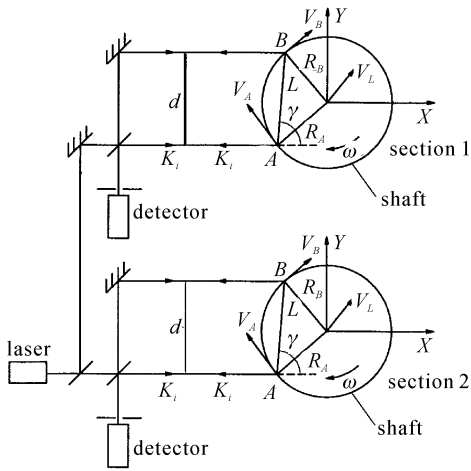


图 1 转轴扭矩测量光路结构

Fig. 1 Experimental setup with optoheterodyne configuration for measuring torque of a rotating shaft

当运动物体被激光照射时,其散射光将产生多普勒频移

$$f_D = -\frac{2}{\lambda} V \cdot K_i \quad (1)$$

式中,  $V$  为物体的运动速度;  $K_i$  为照射光的方向矢量。

如图 1 所示,转轴的角速度为  $\omega$ ,  $A, B$  两点为光电检测器接收轴表面的散射光。当转轴在转动时有横向振动,振动速度为  $V_L$ ,则探测器接收到的多普勒频移为

$$f_{DA} = -\frac{2}{\lambda} (V_A + V_L) \cdot K_i \quad (2)$$

$$f_{DB} = -\frac{2}{\lambda} (V_B + V_L) \cdot K_i \quad (3)$$

多普勒频差

$$f_D = f_{DB} - f_{DA} = -\frac{2}{\lambda} \omega l L_0 \times Z \cdot K_i \quad (4)$$

式中  $V_A, V_B$  为不包括横振速度的转轴  $A, B$  两点的

线速度,  $L = lL_0 = R_B - R_A$ 。一般地,若入射光从任意角度入射,  $K_i = (\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$ ,  $L_0 = (\cos\epsilon, \cos\delta, \cos\gamma)$ , 则

$$f_D = -\frac{2}{\lambda} \omega l (\cos\alpha \cos\delta - \cos\epsilon \cos\beta) \quad (5)$$

式(5)表明多普勒频移  $f_D$  与转轴的角速度  $\omega$  成正比。

当转轴的两个截面的转速  $\omega_1$  (对应多普勒频差为  $f_{D1}$ ),  $\omega_2$  (对应多普勒频差为  $f_{D2}$ ) 测出后相减得到两截面的角速度差

$$\begin{aligned} \omega_\Delta = \omega_1 - \omega_2 = & -\frac{\lambda}{2} \left[ \frac{f_{D1}}{l_1 (\cos\alpha_1 \cos\delta_1 - \cos\epsilon_1 \cos\beta_1)} - \frac{f_{D2}}{l_2 (\cos\alpha_2 \cos\delta_2 - \cos\epsilon_2 \cos\beta_2)} \right] = \\ & -\frac{\lambda}{2} \left( \frac{f_{D1}}{l_1 L_{01} \times Z_1 \cdot K_{i1}} - \frac{f_{D2}}{l_2 L_{02} \times Z_2 \cdot K_{i2}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

对于式(6)对时间  $t$  进行积分得到截面 1 和截面 2 之间的相对转角  $\theta$

$$\begin{aligned} \theta = \int_0^t & -\frac{\lambda}{2} \left( \frac{f_{D1}}{l_1 L_{01} \times Z_1 \cdot K_{i1}} - \frac{f_{D2}}{l_2 L_{02} \times Z_2 \cdot K_{i2}} \right) dt = \\ & \int_0^t -\frac{\lambda}{2} \left[ \frac{f_{D1}}{l_1 (\cos\alpha_1 \cos\delta_1 - \cos\epsilon_1 \cos\beta_1)} - \frac{f_{D2}}{l_2 (\cos\alpha_2 \cos\delta_2 - \cos\epsilon_2 \cos\beta_2)} \right] dt \end{aligned} \quad (7)$$

当两截面 1, 2 的光路结构和光的入射方向相同时, 式(7)中的两分母相同, 则式(7)可简化为

$$\begin{aligned} \theta = \int_0^t & -\frac{\lambda}{2} \left( \frac{f_{D1} - f_{D2}}{l L_0 Z \cdot K_i} \right) dt = \\ & -\frac{\lambda}{2 l L_0 Z \cdot K_i} \int_0^t (f_{D1} - f_{D2}) dt = \\ & \int_0^t -\frac{\lambda}{2} \left[ \frac{f_{D1} - f_{D2}}{l (\cos\alpha \cos\delta - \cos\epsilon \cos\beta)} \right] dt = \\ & -\frac{\lambda}{2 l (\cos\alpha \cos\delta - \cos\epsilon \cos\beta)} \int_0^t (f_{D1} - f_{D2}) dt \end{aligned} \quad (8)$$

上式表明,只对检测量积分便可以得出转角,简化了测量电路。由弹性转轴的静力几何关系

$$M = \frac{GI_p \theta}{a} \quad (9)$$

式中,  $M$  为弹性转轴两端施加的扭矩,  $G$  为弹性转轴的剪切弹性模量,  $I_p$  为弹性转轴的截面极惯矩。可以得到加于转轴截面两端的扭矩,既实现了扭矩测量。但是转轴是动态的,有转轴的质量(转动惯量  $J$ )、弹性( $K = GI_p/l$ )和阻尼因素  $C$ , 动态的扭矩和

转角的关系可由公式(10),(11)所示<sup>[11]</sup>

$$\frac{J}{6} \frac{d^2\theta}{dt^2} + 2C \frac{d\theta}{dt} + 2K\theta = M_2 - M_1 \quad (10)$$

$$\frac{J}{2} \frac{d^2\theta}{dt^2} + 9C \frac{d\theta}{dt} + 9K\theta = 4M_2 - 5M_1 \quad (11)$$

通过式(8)测得  $\theta$  后,便可运用动力学方程(10),(11)和静力学方程(9)来计算弹性转轴的扭矩及动态过程,实现对动力传递过程的监测。一般在低转速平稳运行时可运用公式(9),对于平稳高转速运用公式(10),对于非平稳高速运行时使用公式(11)。方程(11)与方程(10)相比,从系数上转动惯量加大到3倍,刚度加大到4.5倍,阻尼系数加大到4.5倍,无阻尼自由振荡频率增大到 $\sqrt{3/2}$ 倍,但驱动力降低了。总之,动态参数发生了较大变化。

### 3 系统设计

激光测量仪器除了具有非接触性、高精度、高效率和高灵敏度外,可实现多功能化是另一重要优点。我们在测得两个截面的转速后进行了一系列处理。图2是根据上述指导思想设计的测量系统。该系统的功能如下:1)完成扭矩的测量及信号的处理、分析和参数识别;2)兼容扭矩测量与在线监测功能;3)实现相关参数的测量,如瞬时转速、转速差、转速差加速度、角加速度、扭振、振动模式等;4)实现主动控制,可作为系统控制的位置环、故障报警器、动态运行准则监测器与控制器;5)扩展硬件控制功能,以适应多功能测量的需要;6)扩展信号处理功能,提高测量参数的测量准确度和识别方法。测量装置包括光学测试头、信号转换和预处理电路、高速数据采集卡、分析和控制计算机等,组件采购系统集成。由激光器发出的4束平行光照在转轴两个截面的4个点上,轴表面散射的光由光电探测器收集,产生光电信号,分送给信号处理电路,高速采集卡将采

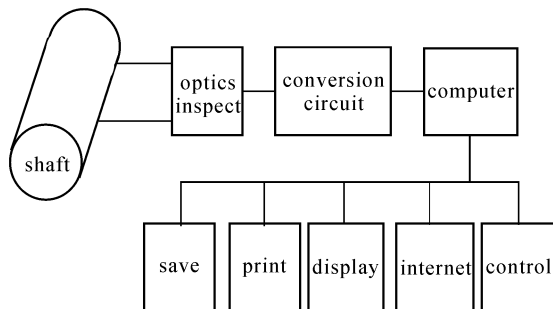


图2 测量系统框图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

集到的信息读入计算机进行分析计算,生成不同的显示和控制数据进行存储、打印、显示、生成报表、控制其他设备、报警和接入 internet 等工作。

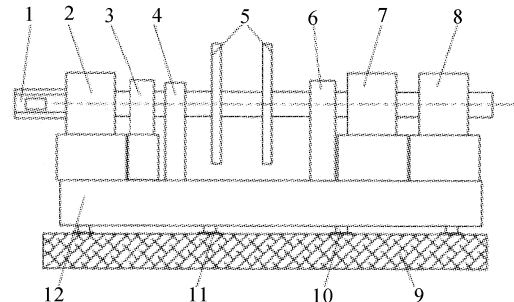


图3 扭矩实验平台

1:交流变频电机;2:减速箱;3:JN338-A型扭矩传感器;4,6:支架;5:测试圆盘;7:增速器;8:动力负载;9:地基;10:垫铁;11:防震垫;12:基座平台

Fig. 3 Equipment of torque examination

1: AC frequency conversion electromotor; 2: reducer; 3: JN338-A model torque sensor; 4,6: bracket; 5: measurement disc; 7: increase gear case; 8: dynamical load; 9: groundwork; 10: mat iron; 11: quakeproof mat; 12: flat

表1(单位:Nm)

Table 1 (unit: Nm)

Shaft rotate speed /r/min	JN338-A measurement	Laser measurement	Difference
30	29.86	29.855	0.005
60	29.91	29.904	0.006
90	29.85	29.860	-0.01
120	29.86	29.880	-0.02
150	29.90	29.898	0.002
180	29.87	29.880	-0.01
210	29.91	29.896	0.014
240	29.92	29.887	0.033
270	29.91	29.896	0.014
300	29.93	29.875	0.055
330	29.95	29.889	0.061

### 4 结论

扭矩试验在 YDCK-019 扭矩实验平台上进行,各部分结构如图3所示,交流变频可调速电机驱动转轴转动,由直流发电机作负载,使转轴承受扭矩的作用,并使两个圆盘5产生相对扭转变形。并由本试验装置检测,标准扭矩的大小由 JN338-A 型扭矩传感器测出,以便与本试验装置进行比较。

试验数据见表1,结果表明激光测量与传统的测量有很大的一致性,但是在高速时,由于算法的不

同,与传统的测试结果有一定出入。

### 参 考 文 献

- 1 Shang Weilu, Miao Deyuan, Qian Shunzhang *et al.*. Modern Technique of Measure Torque [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1999. chapter1~2 (in Chinese)
- 2 Zheng Dezhong, Bin Xing, Hu Caisheng. A new torque instrument driven by light power with two photocell rings [J]. *Journal of Northeast Heavy Machinery Institute* (东北重型机械学院学报), 1996, **20**(2):125~129 (in Chinese)
- 3 Zhang Weigang, Zhao Qida, Kai Guiyun *et al.*. New-type torsion sensor of fiber grating [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2001, **30**(10):1237~1239 (in Chinese)
- 4 Xue Dongxin, Song Xigeng. Study on laser measuring technology in diesel shaft power measurement [J]. *Gas Engine Project* (内燃机工程), 2000, (3):19~22 (in Chinese)
- 5 Iain David Charles Tullis. The Laser Torquemeter and Implications of Speckle Decorrelation on Torque Measurement [D]. A Doctoral Thesis. Submitted in Partial Fulfillment of the requirements for the award of Doctor of Philosophy. 2000
- 6 Luo Deyuan, Ren Yapin, 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)
- 7 Ge Weijing, Wang Weisheng. Research on gas engine of torsional vibration measuring using the laser Doppler technique [J]. *Minytype Gas Engine* (小型内燃机), 1994, **23**(2):53~57 (in Chinese)
- 8 Zheng Zhoumo, Sun Jiazi, Yan Ming. Measuring torsional and self-adapt calibration of rotating shafts using laser [J]. *Transactions of CSICE* (内燃机学报), 1998, **16**(1):123~125 (in Chinese)
- 9 Zheng Zhoumo, Sun Jiazi, Yang Xueyou *et al.*. Measuring torsional and transversal vibrations of rotating shafts using laser [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1995, **A22**(1):17~22 (in Chinese)
- 10 Yue Kaiduan, Tang Jingyuan, Zhang Wending. Torsional vibration measuring by Doppler technology [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2001, **30**(7):868~870 (in Chinese)
- 11 Dong Quanlin, Liu Bin. A similarity dynamics equation of elastic rotation shaft possessed twain side under the galileo coordinate conversion [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2002, **51**(10):18~24 (in Chinese)