

文章编号: 0258-7025(2007)01-0113-05

# 激光双截面转速波动法监测转轴动态扭矩

刘 彬<sup>1</sup>, 时培明<sup>1\*</sup>, 赵 武<sup>1</sup>, 韩东颖<sup>2</sup>, 蒋金水<sup>3</sup>

(燕山大学<sup>1</sup> 信息科学与工程学院, <sup>2</sup> 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)  
<sup>3</sup> 中国第一重型机械集团公司大连设计研究院, 辽宁 大连 116600)

**摘要** 基于激光多普勒效应和转动动力学原理, 提出一种直接监测转轴动态扭矩的新方法, 并建立了数学模型。通过构造光学测试系统使 4 束高相干激光投射到转轴轴段两截面上 4 点, 具有多普勒频移的反射光在光电探测器上发生混频, 光电流频差正比于角速度。测得相邻时刻两截面的瞬时转速, 得到轴段转速波动值及两端面相对转速波动值, 进而实现转轴动态扭矩的直接监测。实验验证了该方法的可行性。与传统方法相比, 该方法实时性强, 具有较宽的动态范围, 对动态扭矩的识别值提高了 5%~10%, 反映了转轴扭矩波动的动态特性。

**关键词** 测量; 激光多普勒效应; 多普勒频移; 动态扭矩监测; 转速波动

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

## Dynamic Torque Measurement Technique Using Laser Doppler Effect and Two-Section Speed Fluctuation

LIU Bin<sup>1</sup>, SHI Pei-ming<sup>1</sup>, ZHAO Wu<sup>1</sup>, HAN Dong-ying<sup>2</sup>, JIANG Jin-shui<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Information Science and Engineering, <sup>2</sup>College of Mechanical Engineering,  
Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China  
<sup>3</sup>Design and Research Institute of China First Heavy Industries, Dalian, Liaoning 116600, China

**Abstract** Based on laser Doppler effect and principle of rotational dynamics, a novel approach to dynamic torque measurement is proposed. Mathematical model of measurement method is deduced. Four highly coherent laser beams irradiate four points of two sections of rotating shaft by designed optical measurement system. Backscattered lights with Doppler frequency shift are mixed onto the surface of photo-detectors, heterodyning takes place, and the output current is modulated. The photocurrent frequency difference is proportional to rotational velocity. Speed fluctuation values of rotating shaft segment and relative speed fluctuation values of between sections are obtained directly by measuring instantaneous rotational velocity of double sections in two successive times, and then dynamic torque values are obtained. Experimental results indicate that the identification values of dynamic torque are improved 5%~10%, which reflects the dynamic characteristic of torque fluctuation. Compared to conventional measurement approaches, this approach can promote the dynamic measurement range, and is more real-time.

**Key words** measurement; laser Doppler effect; Doppler frequency shift; dynamic torque monitoring; speed fluctuation

## 1 引 言

旋转机械广泛应用于机械加工制造、能源、交通等部门。在设备运行过程中, 由于动力或负载的突变、机械结构参数和运行工况改变等因素的作用将

导致传动轴系产生扭振, 表现为转轴的扭矩动态波动变化。扭振会破坏机械设备的平稳运行, 甚至导致相关部件瞬间损坏等严重后果<sup>[1]</sup>。扭矩是反映旋转机械动力特性的重要参量。对传动系统转轴的动态扭矩进行实时监测成为预防与控制机械传动系统

收稿日期: 2006-01-16; 收到修改稿日期: 2006-06-27

基金项目: 国家十五重大攻关(ZZ02-13B-02-03-1)资助项目。

作者简介: 刘 彬(1953—), 男, 黑龙江人, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测及信号处理等方面的研究工作。

E-mail: peiming.shi@163.com

\* 通信联系人。E-mail: peiming.shi@163.com

故障的重要方法。

光学测量方法具有精度高、非接触、响应快、抗电磁干扰、信号易处理等优点<sup>[2~4]</sup>。以往的检测方法一般通过测量转轴相对角位移计算扭矩<sup>[5,6]</sup>，由于被检测测量需要进行积分转换，带来系统的时滞效应，同时没有考虑转轴的动态特性，影响监测系统的实时性和识别精度。本文基于激光多普勒效应和转动动力学理论，提出一种监测转轴动态扭矩的新方法。通过构建光学测试系统直接测取转速波动值，实现对动态扭矩的实时监测。

与传统方法相比，本文测取的测量参数直接反映动态扭矩的瞬时变化，拓宽了动态测量范围，实时性强，易于实现在线监测。该方法同时考虑了转轴动态特性及内外阻尼的影响因素，提高了对转轴动态扭矩的识别精度，为大型旋转机械转轴动载的实时监测提供了新方法。

## 2 监测原理

为了实现激光双截面转速波动方法监测转轴动态扭矩，采用如图 1 所示的参考光路。He-Ne 激光器输出波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ，由半透半反镜  $BS_0$  分成强度相等的两束光，分别经由反射镜  $M_0$ ，半透半反镜  $BS_1, BS_2$ ，反射镜  $M_1, M_2$  形成两两平行间距为  $L$  的 4 束等强入射光束 1, 2, 3, 4。入射光束分别照射在待测转轴两截面  $a, b$  上  $A_1, B_1, A_2, B_2$  四点。由于转轴转速的作用，每一测点后向散射激光束带有多普勒频移，散射光 1', 2', 3', 4' (虚线表示) 沿原路返回，两两在光电探测器上分别发生混频，光电探测器输出的光电流被调制，光电流频差正比于角速度。

当激光照射运动物体时，其散射光将产生多普勒频移<sup>[7,8]</sup>

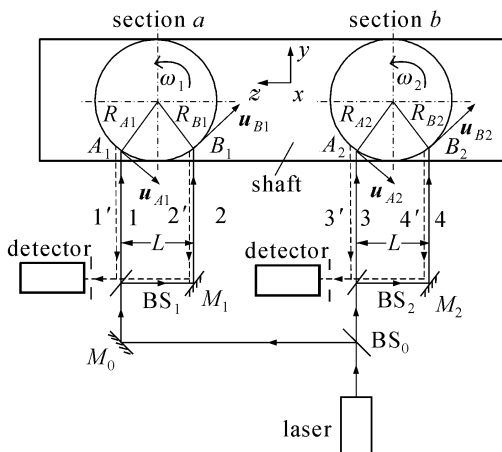


图 1 监测光路

Fig. 1 Optical monitoring system

$$f_D = -\frac{2}{\lambda} \mu \mathbf{u} \cdot \mathbf{i}, \quad (1)$$

式中  $\mu$  为传播介质的折射率， $\lambda$  为入射激光波长， $\mathbf{u}$  为照射点的运动速度矢量， $\mathbf{i}$  为入射激光的方向矢量。

对于转轴，考虑三维横向振动和绕轴线的扭转振动，则

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_x + \mathbf{u}_y + \mathbf{u}_z + \omega(\mathbf{R} \times \mathbf{Z}), \quad (2)$$

式中  $\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_z$  分别为测点  $x, y, z$  方向上的速度分量， $\mathbf{R}$  为测点的半径矢量， $\mathbf{Z}$  为转轴轴线方向上的单位矢量， $\omega$  为转轴转动角速度（仅指大小，下同）。

对于转轴截面  $a, b$  中的任意截面，从测试点  $A, B$  按入射光路返回的散射光的多普勒频移  $f_{DA}, f_{DB}$  分别为

$$\begin{aligned} f_{DA} = & -\frac{2}{\lambda} \mu \mathbf{u}_A \cdot \mathbf{i} = \\ & -\frac{2}{\lambda} \mu (\omega \mathbf{R}_A \times \mathbf{Z} + \mathbf{u}_{Ax} + \mathbf{u}_{Ay} + \mathbf{u}_{Az}) \cdot \mathbf{i}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f_{DB} = & -\frac{2}{\lambda} \mu \mathbf{u}_B \cdot \mathbf{i} = \\ & -\frac{2}{\lambda} \mu (\omega \mathbf{R}_B \times \mathbf{Z} + \mathbf{u}_{Bx} + \mathbf{u}_{By} + \mathbf{u}_{Bz}) \cdot \mathbf{i}, \end{aligned} \quad (4)$$

那么，两束具有频移的散射光在光电探测器光敏面上发生光学混频，光电探测器输出的电流被这一混频频差所调制，频差为

$$\begin{aligned} f_D = f_{DB} - f_{DA} = & \frac{2}{\lambda} \mu \mathbf{i} (\mathbf{u}_B - \mathbf{u}_A) = \\ & -\frac{2}{\lambda} \mu \mathbf{i} (\omega \mathbf{R}_B \times \mathbf{Z} - \omega \mathbf{R}_A \times \mathbf{Z}) = \\ & -\frac{2}{\lambda} \mu \omega \mathbf{i} (\mathbf{R}_B - \mathbf{R}_A) \times \mathbf{Z} = \\ & -\frac{2}{\lambda} \mu \omega \mathbf{i} (\mathbf{BA} \times \mathbf{Z}) = \\ & -\frac{2\mu}{\lambda} \omega (\mathbf{i} \times \mathbf{BA}) \cdot \mathbf{Z} = \\ & -\frac{2\mu}{\lambda} \omega L \cos \alpha, \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $L$  为入射平行光束之间的距离， $\alpha$  为转轴轴线与入射光所在平面法线间的夹角，若  $\beta$  为转轴轴线与入射光所在平面间的夹角，则  $\alpha = \pi/2 - \beta$ ，(5) 式可变形为

$$f_D = -\frac{2\mu}{\lambda} \omega L \sin \beta, \quad (6)$$

一般令转轴轴线垂直于入射光所在平面，即取(6)式中的  $\beta = \pi/2$ ，则

$$f_D = -\frac{2\mu L}{\lambda}\omega, \quad (7)$$

由(7)式可知多普勒频差  $f_D$  与轴的角速度  $\omega$  成正比,由光路 1 可直接测得转轴任意时刻任意截面的角速度,并且信号频率  $f_D$  与转轴平动和其他方向的转动无关,提高了系统的信噪比。

与以往方法不同,本文采用激光双截面转速波动法监测转轴动态扭矩  $T_i$ 。从动力学的角度,董全林等<sup>[9]</sup> 求解了转轴任意两个横截面间转动动力学方程。对于动态转轴,动态扭矩  $T$  和转轴扭转变形角  $\theta$  的关系可由转动动力学方程表示为

$$\frac{1}{6}J \frac{d^2\theta}{dt^2} + 2C \frac{d\theta}{dt} + 2K\theta = T, \quad (8)$$

式中  $J$  为转轴两个横截面间的转动惯量, $C$  为转轴的阻尼系数, $K = GI_p/l$  为转轴的扭转刚度, $G$  为转轴的剪切弹性模量, $I_p$  为转轴的截面极惯性矩。

根据动力学理论,同时考虑工程中的实际应用,令第  $i$  个  $\Delta t$  时间段内扭矩波动为  $T_i$ ,则(8)式可简化为

$$T_i = \frac{1}{6}J \frac{\Delta\omega_i}{\Delta t} + 2C\Delta\omega_i + 2K\Delta\omega_i\Delta t, \quad (9)$$

式中  $\Delta\omega_i$  为第  $i$  次  $\Delta t$  时间段内的转速波动值, $\Delta\omega_i$  为转轴端面间的转速波动, $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  为时间间隔。

考虑第  $i$  个  $\Delta t$  时间段内转轴轴段  $l$  内转速波动为线性变化,则转轴轴段  $l$  的转速波动可表示为

$$\begin{aligned} \Delta\omega_i &= \frac{1}{2}(\Delta\omega_{2i} + \Delta\omega_{1i}) = \\ &= \frac{1}{2}[(\omega_{i+1,1} - \omega_{i,1}) + (\omega_{i+1,2} - \omega_{i,2})] = \\ &= \frac{1}{2}[(\omega_{i+1,1} + \omega_{i+1,2}) - (\omega_{i,1} + \omega_{i,2})], \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $\Delta\omega_{1i} = \omega_{i+1,1} - \omega_{i,1}$  为截面  $a$  的角速度波动, $\Delta\omega_{2i} = \omega_{i+1,2} - \omega_{i,2}$  为截面  $b$  的角速度波动, $\omega_{i,1}$ ,  $\omega_{i+1,1}$ ,  $\omega_{i,2}$ ,  $\omega_{i+1,2}$  分别为  $t_i, t_{i+1}$  时刻截面  $a, b$  的瞬时转速。

考虑角速度在下一时刻波动,则  $\Delta t$  时间段内转轴两截面相对角速度为

$$\Delta\omega_i = \omega_{i,2} - \omega_{i,1}, \quad (11)$$

(7)式代入(10),(11)式可得

$$\Delta\omega_i = \frac{1}{2} \left[ \frac{\lambda}{2\mu L} (f_{D_{i+1,1}} + f_{D_{i+1,2}}) - (f_{D_{i,1}} + f_{D_{i,2}}) \right], \quad (12)$$

$$\Delta\omega_i = \frac{\lambda}{2\mu L} (f_{D_{i,2}} - f_{D_{i,1}}), \quad (13)$$

将(12),(13)式代入(9)式得

$$\begin{aligned} T_i &= \frac{\lambda}{24\mu L} \frac{J}{\Delta t} [(f_{D_{i+1,1}} + f_{D_{i+1,2}}) - (f_{D_{i,1}} + f_{D_{i,2}})] + \\ &= (2C + 2K\Delta t) \frac{\lambda}{2\mu L} (f_{D_{i,2}} - f_{D_{i,1}}), \end{aligned} \quad (14)$$

式中  $f_{D_{i,1}}, f_{D_{i+1,1}}, f_{D_{i,2}}, f_{D_{i+1,2}}$  分别为  $t_i, t_{i+1}$  时刻转轴轴段  $l$  两端面  $a, b$  与转速成正比的激光多普勒频差,可由光路直接测量。由(14)式可实现转轴动态扭矩  $T_i$  的实时监测。

由上述理论,在  $t_i, t_{i+1}$  时刻,分别测得转轴两端面  $a, b$  的转速  $\omega_{i,1}, \omega_{i+1,1}, \omega_{i,2}, \omega_{i+1,2}$ 。进而可得  $\Delta\omega_i$ ,  $\Delta\omega_i$ , 实现转轴动态扭矩的检测。

理论上该方法对动态扭矩的测量范围没有限制,只受测试系统硬件设备识别精度的制约,由式(6)和式(14)可知,动态扭矩的测量范围受到转速的限制,随着转速的增大,差频会越来越高,这要求线性频带越来越宽的信号处理系统,对于不同的转轴结构参数(直径、刚度、阻尼等),选择合适的光学测试系统结构参数(平行入射光束间距  $L$ , 转轴轴线与入射光所在平面间的夹角  $\beta$  等)就能保证频差频宽基本保持不变,最大限度地利用信号处理系统的线性频带。

### 3 测试系统及实验

监测实验在 YDCK-019 扭振实验平台上进行,实验平台及测量系统如图 2 所示,在实验过程中,测试系统采用 OL6109L-10B 型激光器(功率为 10 mW,激光波长  $\lambda = 632.8$  nm),G8371-01 型 PIN 光电探测器,解调器工作范围为  $1.6 \pm 0.8$  MHz。经过光学系统后,差频信号经 PIN 光电二极管接收,经锁相放大器,由数据采集卡把模拟信号转换为数字信号由计算机处理。伺服调速电机分别以 300 r/m, 600 r/m 转速驱动转轴,负载端采用 CJK-1000 型磁粉振动器加载,使分布有两个  $\phi 142$  mm 金属圆盘的  $\phi 55$  mm 合金转承受交变扭矩的扭振作

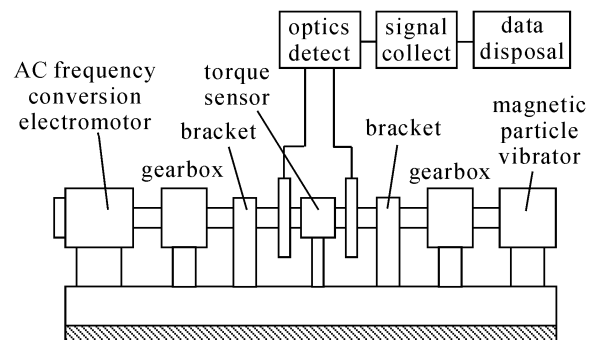


图 2 实验平台

Fig. 2 Experiment table

用。在转动过程中,扭矩呈现动态往复变化,外在表现为转轴及圆盘的转速波动。通过本文的新方法测得相邻时刻两圆盘的瞬时转速,实现转轴动态扭矩的瞬时检测,同时与安装在两圆盘中间的 JN338-A 套装式扭矩传感器测试的数据比较。

实验数据见表 1,负值表示相反方向的扭矩值,

由实验可知,在连续时间里动态扭矩表现为往复交变波动,这与扭振的本质特性相吻合,也是转轴产生疲劳效应的原因。与传统的测量结果相比,激光双截面转速波动方法对动态扭矩的识别值提高了 5%~10%,反映了转轴扭矩的动态波动特性,验证了本方法的可行性和准确性。

表 1 实验数据

Table 1 Experiment data

N · m

Rotational speed / (r/m)	Serial number	Laser measurement	JN338-A measurement	Absolute difference	Relative error $\delta$ / %
300	1	-131.74	-125.81	5.93	4.71
	2	81.46	77.43	4.03	5.20
	3	109.16	101.09	8.07	7.98
	4	-181.21	-172.55	8.66	5.02
	5	75.03	71.36	3.67	5.14
	6	-138.91	-129.81	9.10	7.01
	7	179.85	168.84	11.01	6.52
	8	-98.16	-92.01	6.15	6.68
	9	-124.43	-117.25	7.18	6.12
	10	191.62	180.48	11.14	6.17
600	1	148.36	137.26	11.10	8.09
	2	-193.29	-181.03	12.26	6.77
	3	-155.73	-145.17	10.56	7.27
	4	158.61	146.40	12.21	8.34
	5	186.32	176.16	10.16	5.77
	6	-144.80	-135.78	9.02	6.64
	7	-146.56	-134.06	12.50	9.32
	8	95.13	91.25	3.88	4.25
	9	172.39	161.34	11.05	6.85
	10	-128.21	-120.17	8.04	6.69

## 4 结 论

提出了一种监测转轴动态扭矩波动的新方法,并进行了实验验证,为大型复杂旋转机械传动系统扭振的实时故障监测开辟了一种容易实现的工程途径。该方法具有以下特点:1) 直接测取表征动态扭矩波动本质的测量参量——转速波动值,拓宽了动态测量范围;2) 实时性强,易于实现在线监测;3) 考虑了转轴动态特性及内外阻尼的影响因素,提高了识别精度。

由于实际测试现场工况复杂,测试系统及信号测取受环境干扰较大,且被测转轴表面大多为光学粗糙表面,测试信号较弱,降低了系统的信噪比,影响系统的测试精度。可以通过在被测转轴表面粘贴或涂抹反光均匀的材料,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、适当增大光接收口径、采用新的信号处理方法<sup>[10]</sup>等提高系统信噪比。

## 参 考 文 献

- Sang Bo, Zhao Hong, Tan Yushan. Research on the torsional vibration measurement with laser Doppler technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):743~746  
桑波,赵宏,谭玉山. 激光多普勒扭转振动测试技术的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):743~746
- He Shunzhong, Liu Jinfeng, Jiang Chengzhi *et al.*. Study on Doppler signal of outline measurement of revolving object surface [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2):215~218  
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
- Zhang Xiaoyuan, Hong Xin, He Shunzhong *et al.*. Study on measurement technique of scattering-surface displacement utilizing laser Doppler effect [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8):751~755

- 张宵元, 洪 昕, 贺顺忠 等. 散射面位移激光多普勒测量技术的研究[J]. 中国激光, 2000, **A27**(8):751~755
- 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):117~121
- 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):117~121
- 5 Dong Quanlin, Liu Bin, Yang Haima. Research on the principle of measure large rotation shaft torque using the laser Doppler technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11):1019~1022
- 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
- 6 Dong Quanlin, Liu Bin, Zhang Chunxi *et al.*. Research on the principle of measure large rotation shaft torque using the planar encoder [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2004, **40**(1):188~190
- 董全林, 刘 彬, 张春熹 等. 利用平面编码器测量巨型转轴扭矩的原理研究[J]. 机械工程学报, 2004, **40**(1):188~190
- 7 Luo Deyuan, Ren Yapin, Chen Wenyi *et al.*. Research of torsional vibration measurement of high-speed rotating mechanical devices [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(9):809~813
- 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
- 8 Zeng Zhoumo, Sun Jiazi, Yang Xueyou *et al.*. Measuring torsional and transversal vibrations of rotating shafts using laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(1):17~22
- 曾周末, 孙家肅, 杨学友 等. 轴系扭振和横振的激光测量[J]. 中国激光, 1995, **A22**(1):17~22
- 9 Dong Quanlin, Liu Bin. A similarity dynamics equation of an elastic rotation shaft with twin sides under the Galileo coordinate conversion [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(10):2191~2196
- 董全林, 刘 彬. 在伽利略坐标变换下的二端面弹性转轴相似动力学方程[J]. 物理学报, 2002, **51**(10):2191~2196
- 10 Zhang Yucun, Liu Bin, Li Qun. Application of novel approach of detecting signal in laser Doppler effect [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12):1674~1677
- 张玉存, 刘 彬, 李 群. 一种新的信号分析方法在激光多普勒信号检测中的应用[J]. 中国激光, 2005, **32**(12):1674~1677