

轴系扭振和横振的激光测量*

曾周末 孙家薰 杨学友 万里雪

(天津大学精密仪器工程系, 天津 300072)

提要 本文全面分析了多维振动状态下旋转轴表面光的散射特性,提出了利用激光技术实施旋转轴系扭振和横振测量的方法。以扭振和横振的合并测量为基础,能实现两种振动的独立测量,且扭振测量不受轴系横振因素的影响。

关键词 激光测量,振动测量,扭转振动,横向振动

1 引言

由于象轴翘曲、非对称负载等不平衡因素的影响,运行中的回转机械轴系总存在着扭转振动,表现为轴的应力状态周期性变化。这种振动会使机械的平稳运行受到破坏,严重时将导致轴系及相关部件的损坏。

目前广泛使用的电感式扭振仪、光电码盘式扭振仪等,都假定轴上具有精确等分的齿盘,在无扭振情况下,齿盘转动使传感器产生均匀脉冲输出。然而实际齿盘的不等分误差总是存在的,如直径为200 mm的标准渐开线圆柱齿盘,6级精度下的不等分度为 0.0036° ,较小幅度的扭振实际上就处于该数量级水平。另一方面,非扭振因素的影响也不容忽视,当轴系存在横向振动时,沿传感器表面方向上的分量将改变齿盘掠过传感器的速度。若轴系存在 0.3 mm/s 的横振,对直径为200 mm的齿盘,相当于引入 0.085° 的附加角位移。现有扭振测量仪器常采用在多个角度上设置传感器的方法来消除轴系横振对测量的影响,显然,不消除上述因素的影响,要实现高精度的扭振测量是困难的,无法实施扭振和横振的同时测量。

本文将激光测量技术应用于旋转轴系的扭振测量及运行监测中,全面分析了振动状态下轴表面的光学散射特性,提出了轴系扭振和横振的合并测量方法。

2 基本原理

按光波波长的尺度来衡量,机械轴系的表面是极其粗糙的。当激光被这样一个表面散射时,空间任一点 p 的散射场 $E_s(p, t)$ 是由许多来自轴表面不同微观区所产生的次级波的叠加。实际上,轴表面的散射不仅与其散射特性有关,还与散射点、光源、接收器三者之间的相对位置

* 国家教委博士点基金资助课题。

有关。由于这些微观区空间位置的微小差别,散射场包含着大量频率相同而相位随机的次级波间的干涉和差拍,在宏观上形成散斑^[1],因而,研究 $E_s(\rho, t)$ 的统计特性才有意义。可以证明^[2],对于运动速度为 V 的散射体,当入射光为平面波时,空间两点 ρ_1, ρ_2 散射场强度的互相关函数为

$$R(\rho_1, \rho_2, \tau) = \exp\left[-\left(\frac{V_\varphi \tau}{b}\right)^2 - \left(\frac{kb}{2s}\right)^2 (\rho_1 - \rho_2 - V\tau)^2\right] \quad (1)$$

式中, τ 为相关延时, V_φ 表示 V 在入射光等相位面上的投影, b 为照射光斑的半径,当光源到散射点的距离 s 确定之后, b 为常数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为光波波长。

事实上,光电检测器是一个具有有限面积的窗口。假设窗中点的位置矢量记为 ρ , 为方便讨论不妨定义窗函数

$$W(\rho) = \begin{cases} 1 & \text{窗内} \\ 0 & \text{窗外} \end{cases} \quad (2)$$

则检测器的强度输出

$$I(t) \propto \int_{-\infty}^{\infty} W(\rho) |E_s(\rho, t)|^2 d\rho \quad (3)$$

由于散射场分布的随机性, $I(t)$ 是关于时间和空间的平稳随机过程^[3], 其时间相关函数与时间起点和空间位置无关, 可以用窗面上任两点的强度相关函数表示, 即

$$\begin{aligned} R_I(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(\rho_1) W(\rho_2) R^2(\rho_1, \rho_2, \tau) d\rho_1 d\rho_2 \\ &= \exp\left[-\left(\frac{V_\varphi \tau}{b}\right)^2\right] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(\rho_1) W(\rho_2) \exp\left[-\left(\frac{kb}{2s}\right)^2 (\rho_1 - \rho_2 - V\tau)^2\right] d\rho_1 d\rho_2 \end{aligned} \quad (4)$$

因为 $W(\rho)$ 代表着检测器的响应特性, 显然, $W(\rho)$ 是可积函数, 同时令 $\rho = \rho_1 - \rho_2$, 由式(2)有

$$R_I(\tau) = C \cdot \exp\left[-\left(\frac{V_\varphi \tau}{b}\right)^2\right] \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{kb}{2s}\right)^2 (\rho - V\tau)^2\right] d\rho = \frac{2Cs \sqrt{\pi}}{kb} \exp\left[-\left(\frac{V_\varphi \tau}{b}\right)^2\right] \quad (5)$$

式中 C 为常数。式(5)对 τ 求导数, 当 $\tau = 0$ 时

$$R'_I(0) = -2 \left(\frac{V_\varphi}{b}\right)^2 R_I(0)$$

从而

$$V_\varphi = \frac{b}{\sqrt{2}} \sqrt{-\frac{R'_I(0)}{R_I(0)}} \quad (6)$$

令

$$e \triangleq \sqrt{-\frac{R'_I(0)}{R_I(0)}} \quad (7)$$

则

$$V_\varphi = \frac{b}{\sqrt{2}} e \quad (8)$$

一般来说, 轴系的横向振动是三维的。为了简化讨论, 忽略轴沿轴向的振动, 这时, 在轴的任一轴向位置, 横振是一个二维振动, 假定轴心取向与坐标 Z 一致, 那么横振速度

$$V_L = V_x X + V_y Y \quad (9)$$

而在轴的任一轴向位置, 扭振表现轴的转动角速度的周期性变化。因此, 振动状态下轴表面点

的合成速度应表示为

$$V = \omega(\mathbf{R} \times \mathbf{Z}) + \mathbf{V}_L \quad (10)$$

式中, R 表示轴的半径, ω 为轴的转动角速度。

测量系统采用如图 1 所示的参考光外差光路结构。激光器输出波长为 λ 的线偏振光, 由半透半反镜 BS_1 , 反射棱镜 M 分成间距为 d 的两平行光束照在待测轴表面 A, B 两点, 散射光分别经 BS_4, BS_5 与相应的参考光合成, 在检测器 D_A, D_B 表面差拍形成光电流输出。

假定在某一时刻, 两测试点偏离 X 轴的角度分别为 θ_A, θ_B , 测试点入射光和散射光的方向矢量

$$\mathbf{K}_i = (1, 0) \quad \mathbf{K}_s = (-1, 0)$$

那么, D_A 检测到的散射光的多普勒频移为

$$\begin{aligned} f_{DA} &= -\frac{1}{\lambda}(\mathbf{K}_i - \mathbf{K}_s) \cdot (\mathbf{V}_L + \omega \mathbf{R}_A \times \mathbf{Z}) \\ &= -\frac{2}{\lambda} \mathbf{X} \cdot (\mathbf{V}_L + \omega \mathbf{R}_A \times \mathbf{Z}) \\ &= -\frac{2}{\lambda} (V_x + \omega \mathbf{R}_A \times \mathbf{Z} \cdot \mathbf{X}) \end{aligned} \quad (11)$$

R_A 表示照射点 A 的半径矢量。由式(8)有

$$\varepsilon_A = \frac{\sqrt{2}}{b} (\mathbf{V}_L + \omega \mathbf{R}_A \times \mathbf{Z}) \cdot \mathbf{Y} = \frac{\sqrt{2}}{b} (V_y + \omega \mathbf{R}_A \times \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}) \quad (12)$$

同理

$$f_{DB} = -\frac{2}{\lambda} (V_x + \omega \mathbf{R}_B \cdot \mathbf{Z} \times \mathbf{X}) \quad (13)$$

$$\varepsilon_B = \frac{\sqrt{2}}{b} (V_y + \omega \mathbf{R}_B \times \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}) \quad (14)$$

可以确定 R_A, R_B 的方向矢量

$$\mathbf{R}_A^0 = (-\cos\theta_A, -\sin\theta_A) \quad \mathbf{R}_B^0 = (-\cos\theta_B, \sin\theta_B)$$

即有

$$f_{DA} = -\frac{2}{\lambda} (V_x - \omega R \sin\theta_A) \quad (15)$$

$$f_{DB} = -\frac{2}{\lambda} (V_x + \omega R \sin\theta_B) \quad (16)$$

$$\varepsilon_A = \frac{\sqrt{2}}{b} (V_y + \omega R \cos\theta_A) \quad (17)$$

$$\varepsilon_B = \frac{\sqrt{2}}{b} (V_y + \omega R \cos\theta_B) \quad (18)$$

式(18)减(17)得

$$\cos\theta_B - \cos\theta_A = \frac{b}{\sqrt{2} \omega R} (\varepsilon_B - \varepsilon_A) \quad (19)$$

并注意到

$$\sin\theta_B + \sin\theta_A = d/R \quad (20)$$

联立式(19), (20), 有

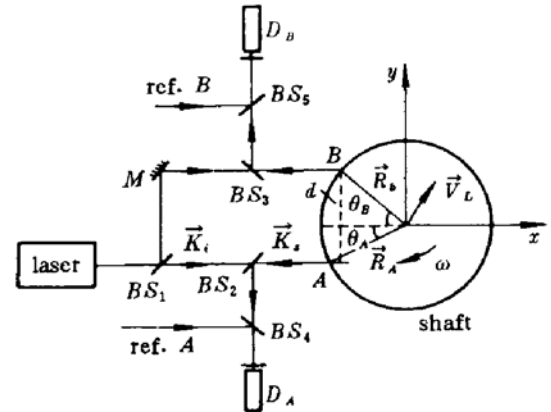


Fig. 1 Experimental setup with optoheterodyne configuration for measuring vibrations of a rotating shaft

$BS_1 \sim BS_5$: beam splitters, ref. A, ref. B: reference beams; D_A, D_B : Detectors

$$\sin\theta_B - \sin\theta_A = \frac{b}{\sqrt{2}\omega R}(\varepsilon_B - \varepsilon_A) \sqrt{\frac{8(\omega R)^2}{b^2(\varepsilon_B - \varepsilon_A)^2 + 2(d\omega)^2} - 1} \quad (21)$$

$$\cos\theta_B + \cos\theta_A = \frac{d}{R} \sqrt{\frac{8(\omega R)^2}{b^2(\varepsilon_B - \varepsilon_A)^2 + 2(d\omega)^2} - 1} \quad (22)$$

从而

$$\omega = -\frac{\lambda}{2d}(f_{DB} - f_{DA}) \quad (23)$$

$$V_r = -\frac{\lambda}{4}(f_{DB} + f_{DA}) - \frac{b(\varepsilon_B - \varepsilon_A)}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{8(\omega R)^2}{b^2(\varepsilon_B - \varepsilon_A)^2 + 2(d\omega)^2} - 1} \quad (24)$$

$$V_t = \frac{b}{2\sqrt{2}}(\varepsilon_B + \varepsilon_A) - \frac{\omega d}{2} \sqrt{\frac{8(\omega R)^2}{b^2(\varepsilon_B - \varepsilon_A)^2 + 2(d\omega)^2} - 1} \quad (25)$$

确立了实现轴系扭振和横振合并测量的方法。

式(23)中, ω 表示轴的转动角速度, 包括平均转速和转速波动两部分, 其中后者与轴系的扭振状态有关。该式表明, 扭振测量与轴系的横振及轴系与测试系统间的相对运动无关, 这正是扭振测量需要解决的一个难题。

3 系统设计

分析表明, 光电检测器的输出信号是一个频率调制信号, 因而, 光电流信号的相位信息提取应由频率解调电路完成, 对于幅度信息, 由于光电流信号上带有较强的加性噪声和振幅调制噪声, 需利用数字信号处理的方法来获取有用信息。

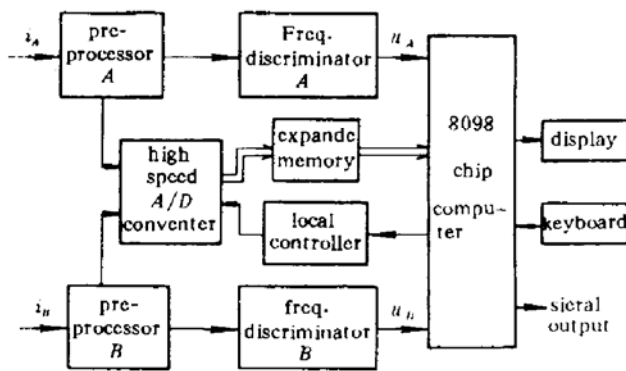


Fig. 2 Signal processing system

测量系统包括信号预处理电路、高速数据采集存储电路及以 16 位单片机 8098 芯片为核心的处理、控制电路三部分组成。如图 2 所示。

光电流信号 i_A , i_B 经滤波、混频和限幅中放后送鉴频电路产生与多普勒频移成正比的电压输出 u_A , u_B , 由于 u_A , u_B 的频率与轴系的振动状态有关, 一般都较低, 可以直接用 8098 片内的 A/D 转换器将其数字化。

对于幅度信息的处理, 由于 i_A , i_B 本身的频率较高, 系统进行滤波放大后送入高速采集电路数

字化, 以求不损失幅度信息。这部分的数据量较大, 系统对 8098 单片机的存储空间进行了扩展, 并将数据线挂接 8098 单片机的数据总线。8098 单片机对外部接口的控制速度也难以满足高速采集电路的工作要求, 因而系统设计了局部控制器和地址产生电路, 与单片机的数据联系采用“总线握手”方式。

测量系统由 8098 单片机协调。一方面, 利用单片机的硬件和软件资源从 u_A , u_B 中提取多普勒频移值 f_{DA} , f_{DB} , 处理高速采集数据确定散射光强度的相关函数 $R_i(\tau)$, 进而利用式(7)及式(23)~(25)确定轴系的瞬时运动状态, 并对部分测试参数(如平均转速等)进行现场显示, 通过控制端口调整混频电路的本振频率, 信号的采样速率等。另一方面, 可以将全部测试数据通过串行口传输给 IBM-PC 微机, 以便保存测试数据及进行轴系振动参数的动态分析和故障诊

断。

对扭振的测量,还需确定轴的扭振振型,这一般需要多点测量才能完成,从而最终了解振动状态下轴系的动力学特性。

4 振动测量

利用本文设计的测量方法和测量系统,在 NZJ-1 型扭振校验计上进行了轴系扭振及轴系运行状态的联合测试。

NZJ-1 型扭振校验计是一种平行位移型校验计,其轴系由输入轴和扭振轴两部分组成,轴的转动由两轴间的活动滑块耦合。当输入轴与扭振轴完全同心时,两轴同步转动,而当扭振轴偏离输入轴某一水平位移时,扭振轴就产生周期性扭转振动。如图 3 所示,假定输入轴中心为 O ,半径为 r ,角速度为 ω ,扭振轴中心为 O' ,两轴间的相对位移为 e ,那么扭转角位移

$$\alpha = \beta - \theta = \arctg \frac{e \cdot \sin \theta}{r - e \cos \theta} \quad (26)$$

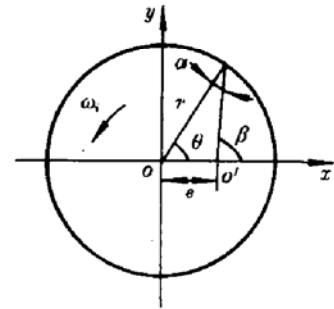


Fig. 3 Illustration of torsional vibration

由 $da/d\theta = 0$, 得

$$\alpha_{\max} = \arcsin(e/r) \quad (27)$$

可见,扭振振幅大小由两轴间的相对位移量决定,扭振频率等于输入轴的转速,这时,扭振轴的实际角速度,除输入轴的角速度 ω 外还附加一个扭转振动。轴系工作时,相对输入轴而言,扭振轴在靠近输入轴一端是一个偏心轴,偏心距为 e ,轴表面的点,不仅绕轴心 O' 转动,同时还绕 O 转动。其中,前者是扭振轴旋转和扭振的总效果,而后者是由偏心引起的平面运动,相当于轴系在 X, Y 方向均存在振幅为 e ,频率与输入轴转速相同的横向振动。因此,当扭振测试点选在靠近输入轴的一端时,系统能同时测出扭振轴的偏心轨迹。

图 4 是偏心距 $e = 0.5 \text{ mm}$ (千分表指示值), $r = 95 \text{ mm}$ 条件下实测出的扭振波形 (a) 和扭振轴的偏心轨迹 (b)。轴的平均转速 $N = 689.4 \text{ rpm}$, 扭振振幅 $\alpha_{\max} = 0.300^\circ$, 扭振轴偏心 $X = 0.496 \text{ mm}$, $Y = 0.494 \text{ mm}$ 。

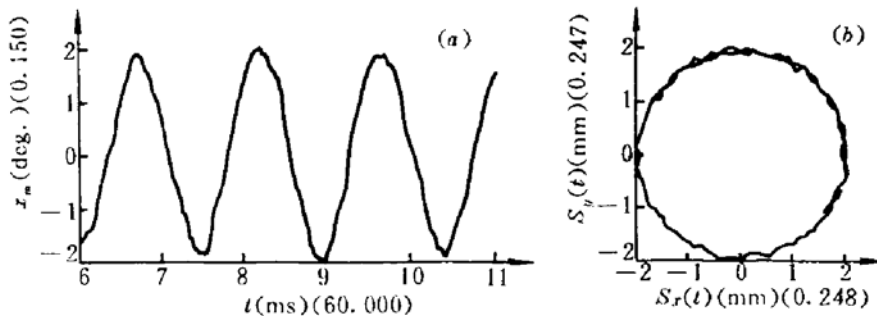


Fig. 4

(a) 11.49 Hz, 0.300° torsional vibration; (b) 0.5 mm eccentric orbit

扭振轴偏心轨迹的测量体现了轴系横振的测量思想,而扭振的测量结果说明了扭振测量与光学测试头和被测轴间的相对运动(横振)无关。

参 考 文 献

- 1 Goodman J. W. Some fundamental properties of speckle. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(11) : 1145~1150
- 2 Churnside J. H. Velocity measurement using laser speckle statistics. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(20) : 3539~3541
- 3 Churnside J. H. Speckle from a rotating diffuse object. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(11) : 1464~1469

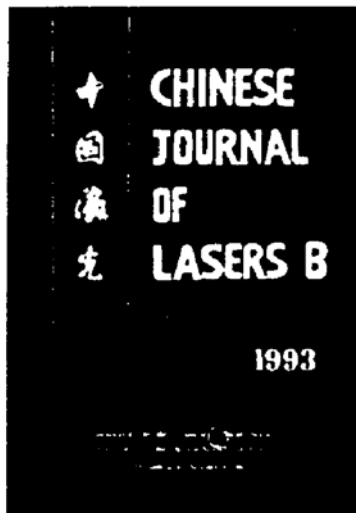
Measuring Torsional and Transversal Vibrations of Rotating Shafts Using Laser

Zeng Zhoumo Sun Jiazi Yang Xueyou Wan Lixue

(Department of Precision Instruments Engineering, Jianjin University, Tianjin 300072)

Abstract In this paper the multi-dimension movement of a rotating shaft under vibrations is studied and a novel method of optical measurement of torsional and transversal vibrations in a drive train is proposed. With modern optoelectronic digital signal processing and micro-computer techniques, the measuring device is developed.

Key words laser measurement, vibration measurement, torsional vibration, transversal vibration



Chinese Journal of Lasers

This journal covers original material submitted for the first time in English and selected translations of the leading Chinese publication in the field. The *Chinese Journal of Lasers* focuses on new ideas, techniques, material advances and

application of laser science in China. This journal is of particular interest to engineers because it explores laser devices, laser physics, laser chemistry, holography, information processing, new experimental techniques and elements, electro-optics, and other applications.

English edition distributed by OSA.

EDITOR IN CHIEF: XINGLI TANG, SHANGHAI
INSTITUTE OF OPTICS AND FINE MECHANICS

FREQUENCY: BIMONTHLY

CURRENT VOLUME NUMBER: B4

ISSN: 1004-2822

CODEN: 31-1615/TN

APPROX. PAGES/YEAR: 570

PAGE SIZE: 7" x 10"

ANNUAL INDEX: IN LAST NUMBER OF VOLUME

CUMULATIVE INDEX: NOT AVAILABLE

MICROFORM EDITIONS: NOT AVAILABLE

1995 U.S. INSTITUTIONAL

SUBSCRIPTION PRICE: \$390