

高速回转机械扭转振动测量的研究

骆德渊 任雅萍 陈文艺 谭玉山

(西安交通大学激光红外研究所 西安 710049)

提要 讨论了高速大型回转机械扭转振动测量的特点及其对测量系统的要求, 针对这些要求, 提出一种新型激光多普勒扭转振动测量方法。

关键词 多普勒频移, 光学混频, 扭转振动

在高速回转机械中, 由于材料性能和机械结构等因素, 使得回转轴发生塑性或弹性振动, 其具体表现为在回转轴的恒定转速(平均转速)上叠加一个随机波动的转速, 由此产生振动力矩。对于大型回转机械, 这种振动力矩的破坏性很强, 极易引起机械结构的疲劳断裂和结构松散, 尤其是当振动频率接近机械结构的固有频率时, 这种破坏性更强, 同时这种扭转振动在初期很不易被人们察觉(因为转速的波动分量相对于平均转速是一个小量), 如果不及时检测出这种扭转振动, 就无法避免机械结构的失效。从现有的转速测量技术^[1]来看, 存在两类测量方法: 一种是接触测量, 利用固定于回转轴上的各种传感器来得到与转速有关的信息, 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, 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, 所以这类方法的应用受到很大限制; 另一类则是非接触测量, 目前用得最多的是光电脉冲法, 它测量的是轴旋转一周所用的时间, 即转轴在一周内的平均转速, 但对于大型回转机械的故障诊断, 更需要转轴“瞬时转速”的波动情况。

由以上讨论我们可以看出, 扭转振动测试仪应具备以下几个方面的性能: (1) 非接触测量; (2) 测量的是回转轴的瞬时转速; (3) 测量过程中对回转轴不造成任何影响, 不改变其振动状态; (4) 操作方便, 适应范围广。下面提出一种满足以上要求的激光多普勒扭转振动测量法。

1 测量原理

这种激光扭转振动测试方法的光路如图 1 所示, 图中 Laser 是波长为 632.8 nm 的 He-Ne 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 2 直接到达被测轴表面 B 点, 反射光再经一反射镜使之成为与透射光完全平行的光束 1 并到达被测轴表面 A 点。两平行光束分别在 A, B 两点被散射, 其中一部分沿原光路返

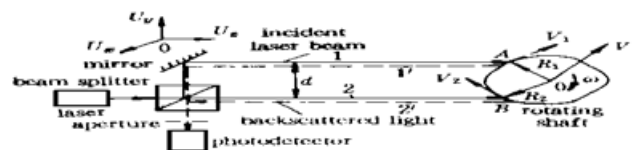


图 1 激光扭转测试仪光路示意图
Fig. 1 The optic arrangement of the laser torsional vibrometer

回,成为图 1 中的后向散射光束 1'和 2'(虚线表示),它们经过分光镜合成为共路相干光束,最后由光电探测器接收。从图 1 中我们还可以看出,旋转轴不仅有转动,还有平动,本测试系统只对转动敏感,这一点可由后面的数学推导过程看出。根据多普勒频移原理,两束后向散射光均会发生频移,频移值分别为

$$\begin{aligned} f_A &= (2\mu/\lambda) \cdot \vec{t} \cdot (\vec{V} + \vec{V}_1) \\ f_B &= (2\mu/\lambda) \cdot \vec{t} \cdot (\vec{V} + \vec{V}_2) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, f_A, f_B 分别为散射光束 1'和 2'的多普勒频移值; μ 为传播媒介的反射指数(若为空气,则 $\mu = 1$); λ 为激光波长; \vec{t} 为入射光束方向上的单位向量(此处假定两入射光绝对平行)。具有频移的两束散射光在光电探测器光敏面上发生光学混频,光电探测器输出电流被这一混频频差所调制,频差为

$$f_D = f_A - f_B = (2\mu/\lambda) \cdot \vec{t} \cdot (\vec{V}_1 - \vec{V}_2) \quad (2)$$

图 1 中,我们用 Z 表示转轴轴线方向上的单位向量,则有如下关系式

$$\vec{V}_1 = 2\pi N(\vec{R}_1 \times \vec{Z}), \quad \vec{V}_2 = 2\pi N(\vec{R}_2 \times \vec{Z}) \quad (3)$$

式中, N 为旋转速度,由式(3)可得到

$$\vec{V}_1 - \vec{V}_2 = 2\pi N(\vec{R}_1 - \vec{R}_2) \times \vec{Z} = 2\pi N(\vec{BA} \times \vec{Z}) \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)可得到

$$f_D = (4\mu\pi/\lambda) \cdot N \cdot \vec{t} \cdot (\vec{BA} \times \vec{Z}) = (4\mu\pi/\lambda) \cdot N \cdot (\vec{t} \times \vec{BA}) \cdot \vec{Z} = (4\mu\pi/\lambda) \cdot N \cdot d \cdot \cos\gamma \quad (5)$$

其中, γ 是转轴轴线与入射光所在平面法线间的夹角。设 β 为转轴轴线与入射光所在平面间的夹角,且有 $\gamma = 90^\circ - \beta$,将此式代入式(5)可得

$$f_D = (4\mu\pi/\lambda) \cdot d \cdot N \cdot \sin\beta \quad (6)$$

如果转轴轴线垂直于入射光所在平面,则式(6)中的 $\beta = \pi/2$,于是有

$$f_D = \frac{4\mu\pi d}{\lambda} \cdot N \quad (7)$$

由式(7)可以看出:(1) 光电探测器输出信号调制频率 f_D 与转轴“瞬时转速”成正比;(2) 如果以矢量表示转动,则频率 f_D 仅与入射光所在平面法线方向上的转动分量有关,而与轴的平动和其它方向的转动无关;(3) 测量结果与轴的截面形状无关,亦不受激光束在截面轮廓上的位置的影响(因为非圆截面形状和激光束在截面轮廓上位置的变化可等效于轴相对测量光斑作平动);这是现有转速测量系统所不具备的特点。

用电子线路解调出频率 f_D ,经频压转换,得到与回转轴转速成正比的模拟电压信号,取该信号的微分,得到与回转轴“瞬时角加速度”成正比的电压信号 $V(t)$ 。由于瞬时角加速度的波动直接反映了扭矩的振动情况,对信号 $V(t)$ 进行频谱分析,就可以确定转轴的各阶振动频率,运用故障诊断的频谱分类方法,即可判断和预测转轴系统的故障部位,确定转轴系统当前运行状态,以利于对其进行有效的维护,防止突发故障的出现。

2 精度分析

从前面的讨论可以看出,扭转振动测量精度直接取决于回转轴转速测量精度,而转速测量精度主要受到两入射光的不平行、散斑噪声、非线性信号处理系统、测振仪自身的振动等因素

的影响,下面分别予以详细分析。

2.1 入射光不平行对测量结果的影响

在前面测量原理的讨论中,我们已假定两入射光绝对平行,但实际上很难做到,两入射光不平行时的几何关系如图 2 所示,设两入射光的夹角为 α , U_{x1} , U_{x2} 分别表示两入射光束方向上的单位向量。根据多普勒频移原理, A , B 两点后向散射光频移分别为

$$f_A = \frac{2\mu}{\lambda} \cdot \overline{U_{x1}} \cdot (\overline{V} + \overline{V_1}) \quad (8)$$

$$f_B = \frac{2\mu}{\lambda} \cdot \overline{U_{x2}} \cdot (\overline{V} + \overline{V_2}) \quad (9)$$

则光电探测器输出电流的调制频率为

$$\begin{aligned} f_D = f_A - f_B &= \frac{2\mu}{\lambda} \cdot (\overline{U_{x1}} - \overline{U_{x2}}) \cdot \overline{V} + \frac{2\mu}{\lambda} \cdot (\overline{U_{x1}} \cdot \overline{V_1} - \overline{U_{x2}} \cdot \overline{V_2}) = \\ &= \frac{2\mu}{\lambda} \cdot (\overline{U_{x1}} - \overline{U_{x2}}) \cdot \overline{V} + \frac{4\mu\pi}{\lambda} \cdot N \cdot [(\overline{R_1} \times \overline{Z}) \cdot \overline{U_{x1}} - (\overline{R_2} \times \overline{Z}) \cdot \overline{U_{x2}}] = \\ &= \frac{2\mu}{\lambda} \cdot (\overline{U_{x1}} - \overline{U_{x2}}) \cdot \overline{V} + \frac{4\mu\pi}{\lambda} \cdot N \cdot [\overline{R_1} \cdot (\overline{Z} \times \overline{U_{x1}}) - \overline{R_2} \cdot (\overline{Z} \times \overline{U_{x2}})] = \\ &= \frac{2\mu}{\lambda} \cdot (\overline{U_{x1}} - \overline{U_{x2}}) \cdot \overline{V} + \frac{4\mu\pi}{\lambda} \cdot N \cdot [(\overline{R_1} - \overline{R_2}) \cdot \overline{k_1} + \overline{R_2} \cdot (\overline{k_1} - \overline{k_2})] = \\ &= \frac{2\mu}{\lambda} \cdot (\overline{U_{x1}} - \overline{U_{x2}}) \cdot \overline{V} + \frac{4\mu\pi}{\lambda} \cdot d \cdot N + \frac{4\mu\pi}{\lambda} \cdot N \cdot \overline{R_2} \cdot (\overline{k_1} - \overline{k_2}) \quad (10) \end{aligned}$$

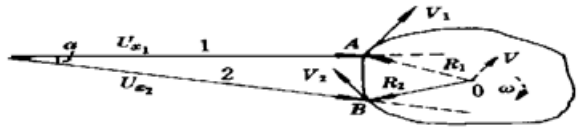


图 2 转轴几何关系示意图

Fig. 2 The diagram showing the geometry relation of a rotating shaft

式(10)中, $\overline{k_1}$ 是同时垂直于 U_{x1} 和 \overline{Z} 的单位向量, $\overline{k_2}$ 是同时垂直于 U_{x2} 和 \overline{Z} 的单位向量; 第一项是由轴平动所引起的误差分量, 最后一项是由于入射光的不平行所引入的误差分量, 实际上这两项误差均是由入射光的不平行所引入的。由此可见, 入射光的不平行对测量精度至关重要, 尤其是当所测转轴截面为非圆形截面时, $\overline{R_2}$ 会发生周期性变化, 即使转轴匀速转动(N 恒定), f_D 仍会随 $\overline{R_2}$ 的周期性变化而变化, 从而产生一个虚假的振动分量, 大大影响测振仪的精度。本测振仪采用特殊结构的光路, 有效地保证了两入射光的平行度。

2.2 散斑噪声对测量结果的影响

由于被测转轴表面大多为且只能为光学粗糙表面(如果为光学反射表面, 将无法在入射光方向上接收反射光), 两入射光均被散射, 这些频率相同而相位随机的散射光之间发生干涉而形成散斑^[3], 光电探测器输出电流实际上代表的是散斑场的光强。由于转轴在不断地转动, 两散斑场成为动态散斑场, 其相位会随机变化, 最终导致光电探测器输出电流幅度和相位的随机抖动, 无论是采用跟踪滤波器还是采用计数器来解调差拍信号, 均会由于信号幅度和相位的随机抖动而产生误差, 这种误差在高速扭转振动测量中影响较大。对此我们采用了一种特殊材料来增加转轴对入射光的定向反射能力, 以减轻散斑效应, 有效降低差拍信号幅度和相位的随机性。

2.3 非线性信号处理系统对测量结果的影响

本测振仪仍采用跟踪滤波器解调差拍信号, 图 3 给出其原理框图, 其输入是频率 f 连续改变的调频信号, 输出是随频率 f 变化的模拟电压信号 $V(t)$ 。 $V(t)$ 在理论上应该与 f 成正比, 但

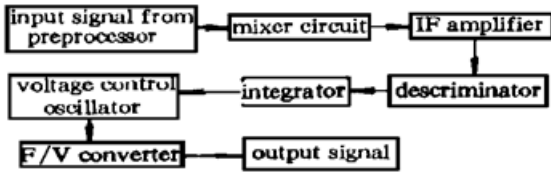


图 3 信号处理系统示意图

Fig. 3 The diagram of the signal processing system

由于其中的鉴频器、压控振荡器、频压转换器不可能是严格的线性原件, 它们的非线性会导致 $V(t)$ 与 f 之间的非线性, $V(t)$ 的微分信号频谱也就不能准确地反映转轴扭转振动情况, 甚至会出现错误的诊断结果, 所以尽可能采用线性度良好的信号处理系统也是本测振仪的关键之处。

2.4 测振仪晃动对测量精度的影响

通过前面的讨论可以看出, 差频 f_D 会随入射光所在平面与转轴轴线间夹角的变化而变化, 对于同一转轴的不同次测量, 由于夹角 β 可能发生变化, 所测转速可能不一致, 但测得的转轴扭振情况应该是一致的。由于这种测振仪体积小, 可以做成便携式, 可以想象手持测振仪时, 会使夹角 β 发生变化, 形成一个虚假的振动分量而引起扭转振动测量误差, 值得庆幸的是由于人体晃动或机械振动所造成的这种振动频率不会高于 $30 \text{ Hz}^{[4]}$, 一般不在我们研究范围之内(因为频率低于 30 Hz 的回转振动通过直觉都可以发现), 通过高通滤波器可予以滤除, 但若研究对象的振动频率分布在 30 Hz 之内, 此时就必须为测振仪设计良好的基座, 以避免其振动所造成的测量误差。

针对这些误差因素来仔细设计系统, 完全能够将测量误差控制在允许的范围内。我们所设计的测振仪实验样机的速度测量精度可达到 0.1 。

3 测量范围

对于扭转振动测量来说, 其测量范围仅仅受到速度测量范围的限制, 所以下面将详细研究测振仪的速度测量范围。从式(6)中可看出, 随转速的增大, 差频会越来越高, 这要求线性频带(最后的模拟电压与多普勒频率保持良好线性度的频率范围)越来越宽的信号处理系统, 所以信号处理系统有限的线性频带宽度会限制测振仪的最高测量速度。但我们还应该看到, 多普勒频差还与两入射光束间距 d 、两入射光所在平面与轴线间的夹角 β 有关。如果将所测转速分段, 每段合理设置间距 d 和夹角 β , 就能保证每转速分段所对应的差频频宽基本保持不变, 最大限度地利用现有电子处理系统的线性频带, 以达到测振仪有较宽测量范围的目的。我们所研制的测振仪具有三个测量范围: 1) $0 \sim 300^\circ/\text{s}$; 2) $0 \sim 1500^\circ/\text{s}$; 3) $0 \sim 7500^\circ/\text{s}$, 这三个速度范围所对应的多普勒信号频宽均为 3 MHz , 正好处在电子处理系统的线性频带之内, 这对于提高测振仪测量精度具有十分重要的意义。

4 实验结果

我们知道, 多普勒频率与入射光所在平面和转轴轴线间的夹角 β 有关, 为此, 我们做了如下实验。将测振仪固定在一可转动的圆盘上来测量一个以恒定转速旋转的圆盘, 连续转动测振仪(相当于连续改变平行光束所在平面与转轴轴线间的夹角 β), 得到频率连续改变的多普勒信号, 夹角 β 与多普勒频率 f_D 的关系曲线如图 4 所示。图中当 β 大于 50° 时, 理论值与实验值相差较大, 原因在于 β 超过 50° 时, 由圆盘端面(本实验采用的是转轴端面测试方式)散射回来的光已经非常微弱, 接近于光电探测器的极限探测功率, 其输出的电流信号信噪比很低, 导致测量精度的降低, 为了验证信号处理系统的线性特性, 我们还分别测得转速为 $N = 10 \text{ rev/s}$,

15 rev/s 时, V/N 与 $d\sin\beta$ 的关系曲线, 如图 5 所示。从中可看出, 各 $(V/N, d\sin\beta)$ 点均匀地分布在斜线两侧, 这表明它们之间具有良好的线性关系, 也表明所设计的信号处理系统是成功的。

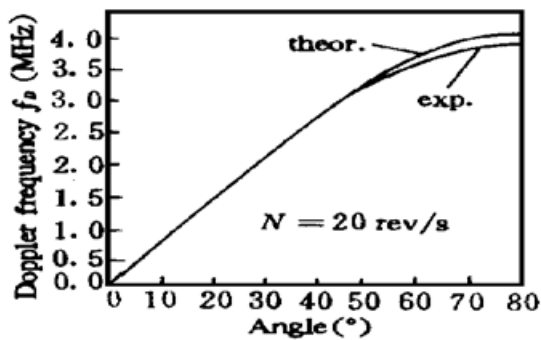


图 4 多普勒频率 f_D 与夹角 β 的关系曲线

Fig. 4 The curves show the relation between f_D and β

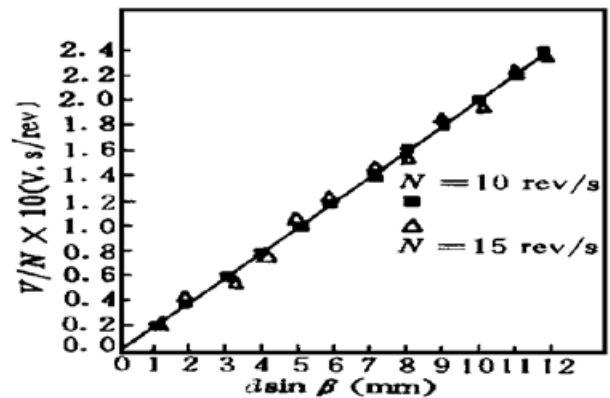


图 5 输出电压与 $d\sin\beta$ 关系曲线

Fig. 5 The line shows the relation between voltage and $d\sin\beta$

5 结 论

由前面的讨论可知, 激光多普勒测振仪具有以下特点: (1) 非接触测量, 不改变轴的运行状态; (2) 对轴的外表面无特殊要求(如齿轮、凸轮等); (3) 仅对转动敏感, 转轴任何方向上的平动均不影响扭转振动测量结果; (4) 由于光频很高, 对测量速度又进行了分段处理, 使本仪器具有很宽的测试范围; (5) 通过改变两入射光束间的距离和入射光所在平面与转轴轴线间的夹角, 使得转轴的平均速度所对应多普勒信号的中心频率基本保持不变, 有利于降低对信号处理系统线性带宽的要求; (6) 对操作员无特殊要求, 可做成便携式, 特别适合于高速回转机械的扭转振动测试; (7) 既可以进行端面测量, 又能进行横向测量, 对被测转轴结构无特殊要求, 方便测量。

参 考 文 献

- 1 李树人, 范琳生 编著. 转速测量技术. 北京: 中国计量出版社, 1986, 178~ 215
- 2 Durst F., Melling A., Whitelaw J. H. Principles and practice of laser Doppler anemometry. London: Academic press, 1976, 49~ 51
- 3 Watrasiewicz B. M., Rudd M. J.. Laser Doppler Measurements. Butterworth: London-Boston, 1976, 79~ 85
- 4 Abbiss J. B., Chubb T. W., Pike E. R.. A new high sensitivity laser vibrometer. *Optics and Laser Technology*, 1974, 6: 249~ 261

Research of Torsional Vibration Measurement of High-speed Rotating Mechanical Devices

Luo Deyuan Ren Yapin Chen Wenyi Tan Yushan

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

Abstract In this paper, the characteristics of torsional vibration of high-speed rotating mechanical devices as well as requests for the measuring system is discussed. As far as these requests are concerned, a new laser Doppler torsional vibration measuring method is given.

Key words Doppler frequency shift, optic heterodyning, torsional vibration