

文章编号: 0258-7025(2004)02-0215-04

旋转体表面轮廓测量的激光多普勒信号研究

贺顺忠, 刘金凤, 蒋诚志, 陈林才, 姚欣

(天津大学精密仪器与光电子工程学院测试计量技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 在利用激光多普勒效应对旋转体表面轮廓损伤进行测量时,其散射光的多普勒信号强度及质量是影响测量精度的极其重要的参数。研究了激光多普勒参考光技术、旋转体表面散射光位相无规则变化的平均效应和最小二乘法曲线拟合技术,设计出高信噪比的参考光路,并对物体表面细微结构所引起的信号丢失进行了重构,实现了旋转体表面轮廓损伤的测量,其相对误差约0.3%。

关键词 精密工程测量; 表面轮廓测量; 激光多普勒效应; 最小二乘法曲线拟合

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

Study on Doppler Signal of Outline Measurement of Revolving Object Surface

HE Shun-zhong, LIU Jin-feng, JIANG Cheng-zhi, CHEN Lin-cai, YAO Xin

(The National Key Lab of Precision Measuring and Testing Technique and Instrument,
College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract When the outline injury measurement of revolving object surface is carried out utilizing laser Doppler effect, intensity and quality of Doppler signals of the diffused light are essential parameters affecting measurement and its accuracy. In this paper, the laser Doppler reference optical system, average effect of diffused light phase random change of revolving object surface and least square fit method are studied, and a reference optical system with high signal noise ratio is designed, besides the loss signals arising from subtle structure of object surface are restructured, outline injury measurement of revolving object surface is attained with the relative error of 0.3%.

Key words precision engineering measurement; measurement of object surface; laser Doppler effect; least square fit

1 引言

随着计量技术的发展,人们开始将测量的目标转移到表面复杂的(形如高斯型旋转曲面)三维物体,关心的是其表面轮廓及其损伤情况。由于激光多普勒技术具有动态响应快、线性度好、非接触、测量精度高等特点而优先被用于轮廓损伤的测量。但是其散射光的多普勒信号非常微弱,因此解决信号的强度、信噪比则是实现测量的关键。此外,由于物体表面细微结构的影响,有时会出现信号的短暂丢失,因而改善信号的质量即重构丢失的信号将对测

量精度的提高起到直接重要的作用。为此作者研究了激光多普勒参考光技术、物体表面散射光位相无规则变化的平均作用(对干涉或差拍的影响)和最小二乘法曲线拟合技术,设计出实用的参考光路和测量系统。实验结果证明:将它用于旋转体表面轮廓损伤测量效果令人满意。

2 测量原理

图1所示为用于旋转体M表面轮廓损伤测量的参考光路。此光路具有非接触、动态响应快、被

收稿日期 2002-09-20;收到修改稿日期 2002-11-21

基金项目:博士点基金资助课题。

作者简介:贺顺忠(1945—),男,天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授,主要从事物理光学、光电子学、激光光电检测技术等研究。E-mail: jlyy76@sina.com

物体散射光能利用率高、光强调试方便可靠以及信噪比和测量精度高等优点。

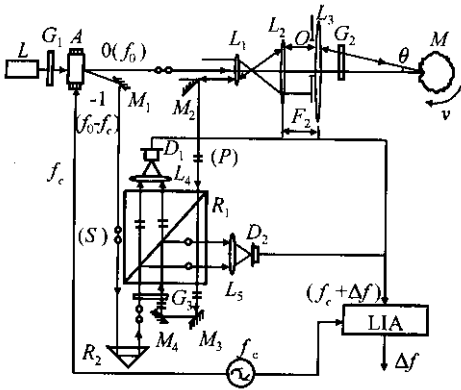


图1 测量光路

Fig. 1 Optical measuring system

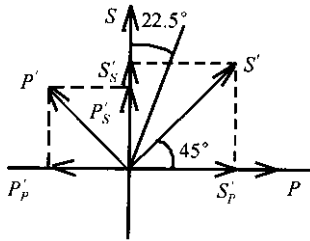


图2 偏振分解

Fig. 2 Polarization resolution

从激光器 L 发出的频率为 f_0 的激光以布拉格角入射到声光调制器 A (其调制频率为 $f_c = 40$ MHz, 以提高抗干扰、抑制噪声的能力) 上, 输出频率为 f_0 的 0 级和频率为 $(f_0 - f_c)$ 的 -1 级衍射光。其中 0 级的衍射光经透镜 L_1 、 L_2 扩束准直又由位于 L_2 后焦面上的 L_3 镜聚焦在旋转体表面上形成一个直径很小的光斑 (得到高的分辨力) 并被散射。1/4 波片 G_2 使入射线偏振光变成圆偏振光 (G_2 快轴与入射光矢量成 45°), 又使散射的圆偏振光变成光矢量转过 90° 的线偏振光。然后再经 $L_3 \sim L_1$ 、 $M_2 \sim M_4$ 、 R_1 作用与由 M_1 镜、 R_2 棱镜反射的 -1 级衍射光一起入射到半波片 G_3 上 (其快轴与 -1 级衍射光光矢量成 22.5°), 最后再经 R_1 作用在其透射、反射方向上分别得到两个分量如图 2 所示 (S 为垂直偏振, P 为平行偏振)。并由 L_4 、 L_5 聚焦在 D_1 、 D_2 光敏面上差拍输出频率为 $(f_c + \Delta f)$ 的光电信号。调整 R_2 位置使两路光程尽可能相等。调整 G_1 使两束光强度尽可能接近。设置光阑 O 是为了能接收到被测物体调制的频移信号。

从 D_1 、 D_2 输出的位相差 π 的两个光电信号经差分放大后与参考信号 (频率为 f_c) 一起送入锁相放

大器 (LIA) 拾取多普勒信号 Δf 。根据激光多普勒技术^[1], 当 $2\theta \leq 1^\circ$ 时, 差拍信号的频移 Δf 与运动物体速度 v 或旋转体径向的速度有以下关系

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \approx \frac{2v}{\lambda} \quad (1)$$

式中 λ 为激光波长, θ_1 、 θ_2 分别为入射光线、散射光线与轴向 (或物体径向) 方向间夹角。

如果对所拾取的多普勒信号进行脉冲累计计数 N , 则可得物体的位移 (或旋转体径向位移) x , 即

$$N = \int_0^t \Delta f d\tau = \int_0^t \frac{2v}{\lambda} d\tau = \frac{2}{\lambda} \int_0^t v d\tau = \frac{2}{\lambda} x \quad (2)$$

因此

$$x = \frac{N\lambda}{2} \quad (3)$$

可见, 所累计的脉冲计数 N 或径向位移量 x 是与物体运动速度的大小及变化是无关的。因此, 利用此原理和光路可以方便地测量旋转体表面的损伤或凹坑深度。

事实上, 为了实现脉冲计数还需要对信号进行处理, 即对所拾取的多普勒信号先进行采样、模数转换变成数字信号, 然后对它进行处理 (即对丢失信号重构) 最后整形、细分后再对脉冲累计计数得到旋转体表面损伤或凹坑深度。

3 光学测量系统研究

为了利用激光多普勒技术实现对旋转体表面轮廓及损伤的测量, 采用了如图 1 所示的参考光路。当物体旋转时, 由 (1) 式可知, 沿其径向方向的速度分量将会对轴向及其附近的散射光产生频移, 而转动的切向分量不起作用。表明采用此光路 (设有光阑 O) 能沿轴向方向得到频移的光信号, 因此可进行径向位移即旋转体表面轮廓损伤的测量, 其测量精度与照射在物体表面上的光斑大小有关。光斑的大小将直接决定其散射光的强度并决定对散射光位相无规则变化的平均作用。光斑越小, 散射光越强, 其位相的平均作用就越小, 相应的两路光的干涉或差拍效果越好。为得到小的光斑, 可用一短焦距 ($F_1 = 10$ mm) 或数值孔径大的透镜 L_1 来聚焦, 可得到直径为几微米的光斑。但是, 被测物体都有一定大小 (> 60 mm), 且测量时还需要安装、调试、位移等, 因此只用一个短焦距镜头是不够的。为了合理地解决光斑大小、工作距离、位移量 (或测量范围) 等间的矛盾, 在 L_1 镜后增设由 L_2 、 L_3 组成的测量光头 ($F_1 = 20$ mm, $F_2 = 250$ mm), 这时 L_1 、 L_2 镜对入射的高

斯光束准直扩束, 扩束的光束又由位于 L_2 镜后焦面上的 L_3 镜(这时入射束腰在 L_3 上)聚焦成一个很小的光斑^[2](束腰半径变为 $25 \mu\text{m}$)。

为了提高多普勒信号的信噪比, 本光路中还采用调制频率为 40 MHz 的声光调制器 A (以提高抑制噪声, 抗干扰的能力), 用 $1/4$ 波片 G_2 , 半波片 G_1 , G_3 , 偏振棱镜 R_1 以及两个低噪声高灵敏度的光电接受器 D_1 , D_2 接受差拍的频移信号, 并用一差分放大器将它们放大, 来提高通过光阑 O (其直径为 2 mm) 的散射光的利用率。还采用了高信噪比的锁相放大器来拾取多普勒信号等。

特别是对于表面轮廓有损伤的旋转体, 由于其表面细微结构的作用, 有时会引起光信号的丢失, 即当物体旋转到某处, 其上被光斑照明的区域内出现径向距离相差 $1/4$ 波长(或奇数倍)的两部分(面积差不多)时, 其入射的照明光与散射光间因有半波长(或奇数倍)的光程差而产生相消干涉, 使频移的光信号丢失, 从而造成脉冲累计计数减少, 测量误差增大。可采用最小二乘法拟合曲线重构丢失的信号。

4 信号重构

图 3 所示为锁相放大器输出端所接收到的多普勒信号(1 kHz , 由 $t = 0$ 到 $t = 1.5 \text{ s}$ 时观察的), 如从中提取运动对象的速度信号, 则应有如图 4 所示的速度变化曲线。可见, 多普勒信号的丢失对应于速度的不连续, 因此只要能重构连续的速度信号, 再对它积分, 就可完成对信号的重构。

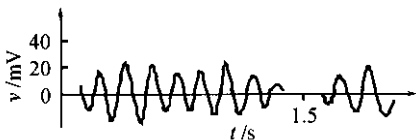


图 3 信号的丢失 ($\Delta f = 1 \text{ kHz}$)

Fig. 3 Loss of signal

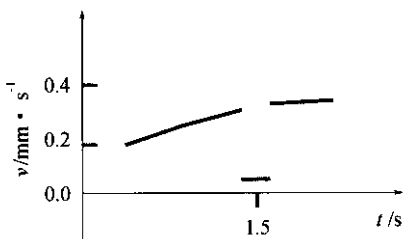


图 4 信号丢失对应的速度情况

Fig. 4 Velocity condition of the loss signal

事实上, 不同时刻、相同时间长度的位移脉冲计数值就反映各个时刻速度的大小, 因此通过记录这一数值可使速度记录下来, 以备重构时使用(可选用 C++^[3]语言得到速度函数, 然后再对它进行重构)。

如图 4 所示, 速度函数在信号丢失点出现不连续情况, 需要对这些不连续点进行重构, 可采用最小二乘法^[4]进行曲线拟合来重构。

设有一系列点

$$(\bar{y}_1, \bar{a}_1), (\bar{y}_2, \bar{a}_2), \dots, (\bar{y}_i, \bar{a}_i), \dots$$

现将它们拟合成 n 次多项式

$$\bar{a} = \sum_{i=0}^n A_i \bar{y}^i \quad (4)$$

则任意点的偏差

$$\sigma_j = \sum_{i=0}^n A_i \bar{y}_j^i - \bar{a}_j$$

所有点偏差的平方和

$$\sigma = \sum_{j=1}^{\beta} \sigma_j^2 = \sum_{j=1}^{\beta} \left(\sum_{i=0}^n A_i \bar{y}_j^i - \bar{a}_j \right)^2 \quad (5)$$

最佳拟合时, 应满足

$$\frac{\partial \sigma}{\partial A_k} = 0 \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

即

$$\sum_{j=1}^{\beta} \left(\sum_{i=0}^n A_i \bar{y}_j^i - \bar{a}_j \right) \bar{y}_j^k = 0$$

或

$$\sum_{j=1}^{\beta} \sum_{i=0}^n A_i \bar{y}_j^{(i+k)} = \sum_{j=1}^{\beta} \bar{a}_j \bar{y}_j^k \quad (7)$$

由此可得 $(n+1)$ 元一次线性方程组的第 k 个方程

$$\sum_{i=0}^n C_{ki} A_i = b_k \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n)$$

其中

$$C_{ki} = \sum_{j=1}^{\beta} \bar{y}_j^{(i+k)}, \quad b_k = \sum_{j=1}^{\beta} \bar{a}_j \bar{y}_j^k$$

因此, 解此线性方程组就可得到拟合多项式系数 A_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$)。但是, 这样建立的方程组如果直接用一般的 Gauss 消去法求解, 有可能因为系数差别大而影响求解精度, 进而影响拟合精度。为此, 可采用全主元素^[4]消元法求解(用 C++ 对方程重新排列, 并求解), 但是由于全主元素消元法是在一个较大范围内(在子矩阵中而不是一列中)选主元的(绝对值最大的), 它除需进行行交换外, 还需列交换, 而列交换会使待求系数的位置顺序也发生交换, 因此方程组求解完后还需对方程组的解进行重新排序, 使得它的顺序恢复到以前的位置顺序。对此可采用冒泡算法^[5]排序(用 C++ 编程)。

利用以上方法所求得的函数关系(求解精度达

1.0×10^{-16}) ,由编程可拟合出如图 5 所示的速度变化曲线。这样 将丢失点用重构点代替 将各段速度连起来计数就可以得到位移的计数值或被测旋转体表面凹坑的深度值。

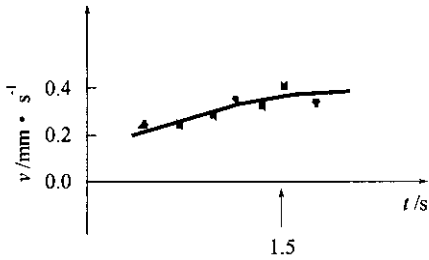


图 5 最小二乘法曲线拟合示意图
Fig.5 Least square curve fit figure

5 实验结果

利用图 1 的参考光路和测量系统对距离光学测头 250 mm 处的旋转体表面(其表面是高斯型旋转曲面,中腰附近有一个面积 3 mm^2 深约 2 mm 的凹坑)进行测量 ,其上凹坑深度测量值列于表 1。

表 1 凹坑深度测量值(单位 : μm)

Table 1 Measurement results of the hole depth (unit : μm)

x_i	$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$	Δx_i^2	x_i	$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$	Δx_i^2
1992	-10	100	2008	6	36
1996	-6	36	2005	3	9
2006	4	16	2002	0	0
2009	7	49	1999	-3	9
2011	9	81	1996	-6	36

$$\bar{x} = 2002 \mu\text{m}$$

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n-1}} \approx 6.4 \mu\text{m}$$

$$\frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% = \frac{6.4}{2002} \times 100\% \approx 0.3\%$$

试验结果表明 ,对上述的多普勒信号研究所采取的一切措施是可行的、令人满意的(而未加上述数字信号处理的系统所测得的相对误差为 3% ,甚至到 10%)。此方法在纵向位移测量、轮廓测量、径向速度测量等方面可有效地对丢失信号进行重构。

参 考 文 献

- 1 L. E. Drain. Translated by Wang Shikang , Shen Xiong , Zhou Zuoyuan. The Laser Doppler Technique [M]. Beijing : Tsinghua University Press , 1980 , 50 ~ 51 , 105 ~ 107
L. E. 特瑞恩. 王仕康,沈 熊,周作元 译. 激光多普勒技术 [M]. 北京 :清华大学出版社 ,1980. 50 ~ 51 , 105 ~ 107
- 2 Zhou Binkun , Gao Yizhi , Chen Jiahua. Principles of Laser [M]. Beijing : National Defence Industry Press , 1980. 6 , 348 ~ 349 , 357 ~ 358
周炳琨,高以智,陈家骅. 激光原理[M]. 北京 :国防工业出版社 ,1980. 6 , 348 ~ 349 , 357 ~ 358
- 3 Peng Muchang , An Ruifei , Zhao Xueling *et al.* . C + + Language [M]. Beijing : National Defence Industry Press , 1993. 9 , 1 ~ 210
彭木昌,安瑞飞,越学龄 等. C + + 语言大全 [M]. 北京 :国防工业出版社 ,1993. 9 , 1 ~ 210
- 4 Yang Fengxiang , Zhai Ruicai , Shun Jing. Numeric Analysis [M]. Tianjin : Tianjin University Press , 1996. 6 , 38 ~ 40 , 187 ~ 200
杨凤翔,翟瑞彩,孙 晶. 数值分析 [M]. 天津 :天津大学出版社 ,1996. 6 , 38 ~ 40 , 187 ~ 200
- 5 Wang Yanxing , Zheng Li , Liu Jinting *et al.* . Computer Program Design Fundament [M]. Beijing : Tsinghua University Press , 1995. 9 , 236 ~ 237
王言行. 计算机程序设计基础 [M]. 北京 :清华大学出版社 , 1995. 9 , 236 ~ 237