

文章编号: 1672-8785(2017)11-0034-05

轴跳动激光相干测量技术研究

孙士钦 戴梦萍 柳 康

(山东理工大学机械工程学院, 山东 淄博 255049)

摘 要: 转轴的圆跳动对机床的加工性能具有重要影响。为了满足实时在线的高精度测量需求, 提出了一种新颖高效的轴跳动激光相干测量技术。该技术采用稳定可靠的基于塞曼效应的 He-Ne 激光器作为光源, 具有灵敏度高、输出信噪比高、精度高、探测目标作用距离远等优点。另外, 通过光纤传输, 其测量灵活性和抗干扰性得到了进一步提高, 可以满足实时在线的远距离测量需求。实验结果表明, 该系统的测量不确定度小于 0.1%。

关键词: 圆跳动; 塞曼效应; 激光外差干涉; 光纤; 不确定度

中图分类号: TN209 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.11.007

Research on Laser Interference Measurement of Shaft Runout

SUN Shi-qin, DAI Meng-ping, LIU Kang

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Shaft runout has an important influence on the machining performance of machine tools. To meet the requirements of high precision, real-time and on-line shaft runout measurement, a novel efficient laser coherence technique for shaft runout measurement is proposed. Because of the use of a stable and reliable He-Ne laser based on Zeeman effect as the light source, the technique has the advantages of high sensitivity, high signal-to-noise ratio, high accuracy and long detection range. In addition, with the transmission by optical fiber, the flexibility and anti-interference of measurement are further improved. The demand of real-time and online long range measurement can be satisfied. The experimental result shows that the measurement uncertainty of this system is less than 0.1%.

Key words: runout; Zeeman effect; laser heterodyne interferometry; optical fiber transmission

0 引言

作为机床转轴形位公差中的一种, 圆跳动不仅会影响零件加工质量的好坏, 而且还会影响机械系统的配合质量、传动精度、抗磨损性能和使用寿命等, 因此是工件的重要质量指标之一^[1]。然而, 机床转轴圆跳动公差检测设备相对欠缺^[2]。目前应用比较广泛的机床转轴圆跳

动测量方法主要是机械式比较法(百分表和千分表等), 无法满足现代工艺制造的要求^[3]。由于对质地较软或者精密的零件的表面损坏较大, 机械测头仅适用于测量精度不高的场合, 更谈不上满足实时测量的要求。针对现有方法的不足, 我们在现有理论技术的基础上, 提出了一种新颖、可行的轴跳动激光相干测量技术。

收稿日期: 2017-07-25

作者简介: 孙士钦(1993-), 男, 山东滕州人, 硕士研究生, 主要研究方向为激光与光电精密测量技术。

E-mail: 1924538718@qq.com

激光干涉法具有分辨力高、无需接触以及测量速度快等优点。目前常用的干涉法包括零差法、外差法和 F-P 干涉法等^[4]。其中, 零差法采用的结构简单, 但受外界影响较大, 对激光光源的频率稳定性要求较高, 且探测器后面的放大器只能用直流放大器, 无法摆脱零点漂移的困扰。双频激光外差干涉法具有技术成熟、稳定可靠以及抗干扰能力强等特点, 可用交流放大器解决零点漂移的问题^[5]。现代零件加工既需要在线、在位、在体测量, 又要求传感器可实现远距离测量、远距离传输和高分辨率测定。因此, 本文系统选用光纤作为激光传输的载体。

1 测量原理和方案

1.1 建立数学模型表达式

图 1 为转轴跳动激光相干测量技术的光路原理图。其中, 双频激光外差干涉仪的光源是一个稳频的 He-Ne 激光器。在全内腔式单频激光器上加上约 3×10^{-2} T 的轴向磁场后, 由于塞曼效应和频率牵引效应, 激光器输出一束具有两个不同频率(双频)的左旋(v_1)和右旋(v_2)圆偏

振光(v_1 垂直于纸面, v_2 平行于纸面)。两个偏振光频的频率差 Δv_0 ($v_1 - v_2$) 约为 1.5 MHz。由于激光频率的数量级为 10^{14} , 现有的器件难以响应, 但是两列偏振光拍频后的频率 Δv_0 却可以满足要求^[6]。由于激光外差干涉法具有灵敏度高、信噪比大、抗干扰强等优势, 可将系统光路分为两个部分: 将两列偏振光拍频后的频率 Δv_0 用作参考信号, 并将其中的一列偏振光(v_2)用作测量信号。下面介绍具体的实现过程。

双频激光器输出的圆偏振光 v_1 和 v_2 的振动方程为

$$y_1(t) = a \cos 2\pi v_1(t) \quad (\text{左旋}) \quad (1)$$

$$x_1(t) = a \sin 2\pi v_1(t) \quad (\text{左旋}) \quad (2)$$

$$y_2(t) = a \cos 2\pi v_2(t) \quad (\text{右旋}) \quad (3)$$

$$x_2(t) = -a \sin 2\pi v_2(t) \quad (\text{右旋}) \quad (4)$$

通过 $\lambda/4$ 波片后, 它们成为两束互相垂直的线偏振光。若检偏器 5 的检偏轴沿 Y 轴配置, 即检偏器让 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 通过, 则合成信号(拍频)为

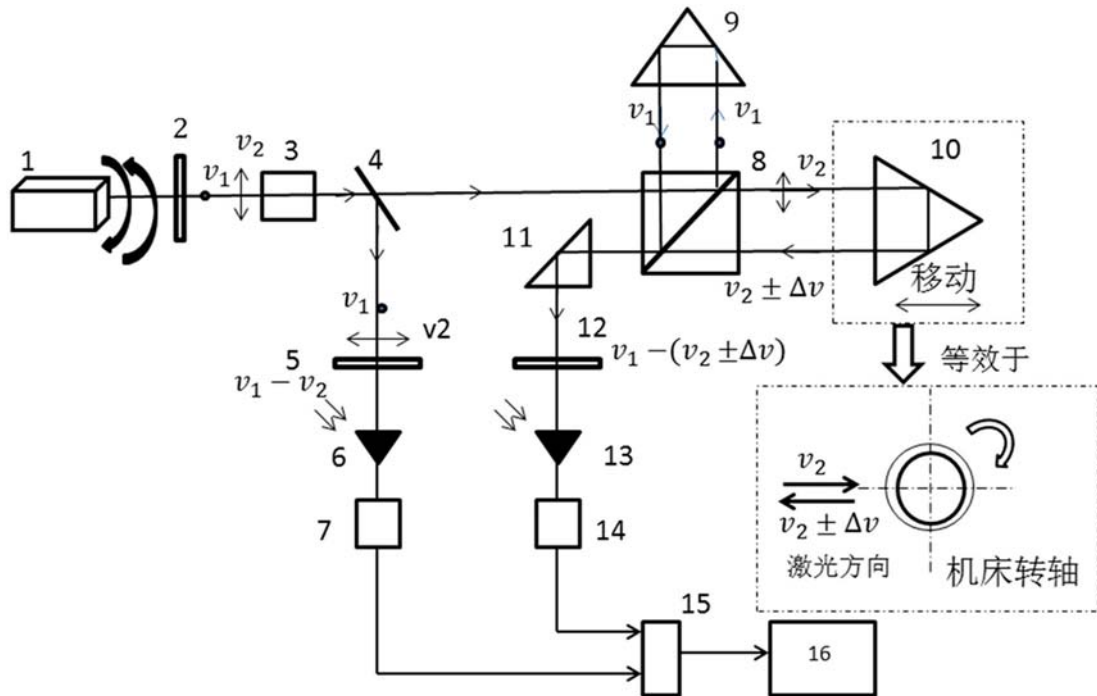


图 1 双频激光外差干涉法的测量示意图: 1- He-Ne 激光器; 2- $\lambda/4$ 波片; 3- 光束扩束镜; 4- 分光镜; 5、12- 检偏器; 6、13- 光电接收器; 7、14- 交流前置放大器; 8- 偏振分光棱镜; 9- 参考角锥棱镜; 10- 测量角锥棱镜; 11- 反射镜; 15- 乘法器; 16- 计算机

$$Y_y = a \cos 2\pi v_1(t) + a \cos 2\pi v_2(t)$$

$$= 2a \cos[\pi(v_2 - v_1)t] \cos[\pi(v_2 + v_1)t] \quad (5)$$

由于 $v_1 + v_2$ 在 10^{14} 量级, 光电元件无法响应。但差频信号 $v_1 - v_2$ 约为 1.5 MHz, 此时光电元件可以响应, 其输出为

$$I_y = s \times 2a \cos[\pi(v_2 - v_1)t] \quad (6)$$

式中, s 为光电元件的灵敏度系数。 I_y 作为参考信号, 经放大后被送至乘法器 15。

透过分光镜 4 的光被偏振分光棱镜 8 透射的光束 v_2 射向运动的测量角锥棱镜, 并产生激光多普勒频移 $\Delta v = 2V/\lambda$ 。该光线与被偏振分光棱镜 8 反射的光束 v_1 (由参考角锥棱镜 9 反射回来后) 再次在偏振分光镜 8 上会合, 经检偏器 12 作用后合成以下信号:

$$y_t = [a \cos 2\pi(v_2 \pm \Delta v)t + a \cos(2\pi v_1 t + \pi/2)] \cdot \cos(\pi/4) \quad (7)$$

光电接收器 13 输出的信号为

$$I_C = \sqrt{2}ak \sin \frac{2\pi(\Delta v_0 \pm \Delta v)t + \varphi}{2} \quad (8)$$

该信号经交流前置放大器 14 放大后与参考信号一起由乘法器 15 作乘积检波, 并通过判向得到光频差 Δv 。

设在测量角锥棱镜 10 移动的时间 t 内, 由光偏差 Δv 引起的条纹明暗变化次数为 N , 则有

$$n = \int_0^t \Delta v dt = \int_0^t \frac{2V}{\lambda} dt = \frac{2}{\lambda} \int_0^t V dt \quad (9)$$

式中, $\int_0^t V dt$ 即为测量距离 L [6]。它还可改写为

$$L = \frac{\lambda}{2} \int_0^t v dt = N \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (10)$$

经软件处理后, 所测的圆跳动为

$$\Delta L = L_{max} - L_{min} = \frac{\lambda}{2} (N_{max} - N_{min})$$

$$= \int_0^t (\Delta v_{max} - \Delta v_{min}) dt \quad (11)$$

1.2 系统设计

从式 (11) 中可以看出, 仅靠光学系统中的普通干涉仪只能达到半波长的分辨率即 $0.1 \mu\text{m}$ 。目前的干涉仪产品已可通过电子细分方法提高测量分辨率 (可达 $0.01 \mu\text{m}$) [7]。这不在研究范围之内, 故不再赘述。图 2 所示为轴跳动激光相干测量技术的后续信号处理电路的示意图。

当求得参考光路信号 Δv_0 与测量光路信号 $\Delta v_0 + \Delta v$ 后, 分别使其经过光电探测器转换为微弱的交流电信号。由上述原理可知, 当测量角锥棱镜 10 不动时, 虽然多普勒频移 Δv 为零, 但 Δv_0 一直存在, 即光电接收器 6 一直输出一个频率为 1.5 MHz 的交流信号。因此, 交流前置放大器可采用选频放大器, 通过将某一段频率范围内的信号放大, 可以避免直放大器所碰到的棘手的直流漂移问题, 进而消除其他噪声的影响, 提高信噪比和测量精度 [6]。为了提高抗干扰能力, 利用相敏检波电路 (核心部件是乘法器) 和低通滤波器得到 Δv , 然后通过 f/V 转

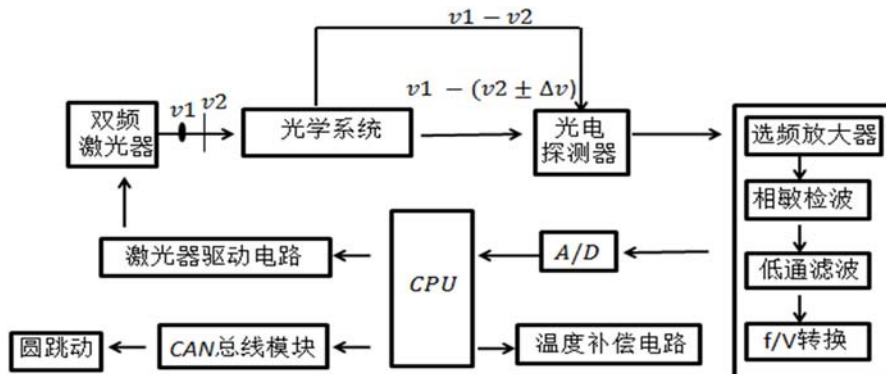


图 2 圆跳动测量系统的整体框图

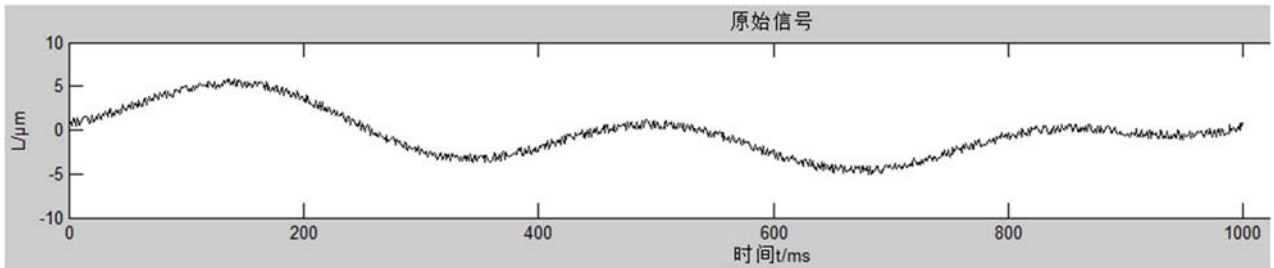


图 3 原始信号

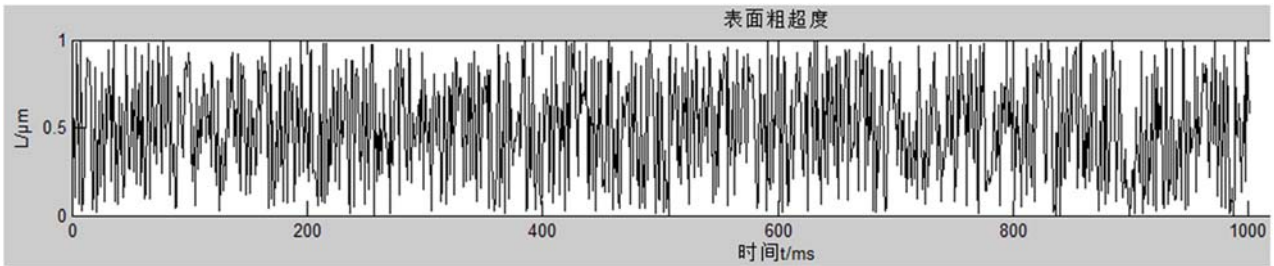


图 4 粗超度

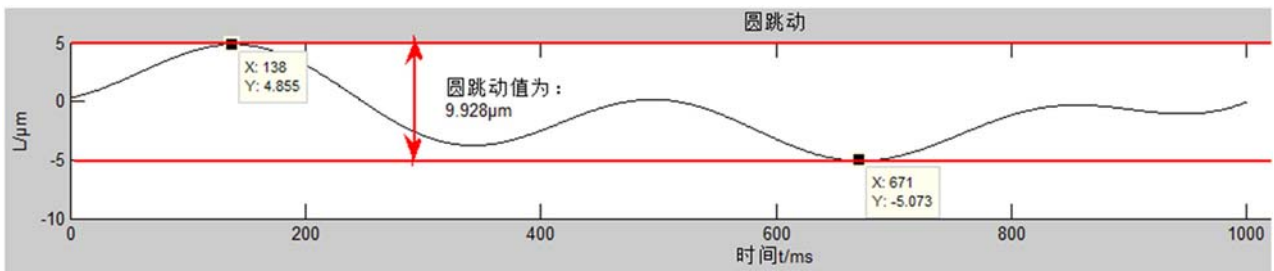


图 5 圆跳动测量界面

换电路和 A/D 转换并将其交由计算机处理, 最后经 CAN 总线远距离传输, 得到圆跳动数据。为了消除周围环境杂散光的影响, 本文利用光纤对激光进行传输。这样不仅能够满足远距离测量的要求, 而且还能提高测量的灵活性, 减小激光传输过程中的信息损失。该方法进一步减小了外界噪声的影响, 提高了抗干扰能力和测量精度^[8]。

2 实验测量

实验系统选用 HP5528 型双频激光干涉仪, 其分辨力为 $0.01 \mu\text{m}$, 测量范围为 61 m ; 测量准确度为 $(0.03 \pm 10^{-7}L) \mu\text{m}$, 其中 L 为测量长度 (mm)^[6]。选用 $d=30 \text{ mm}$ 、圆跳动公差等级为 6 ($10 \mu\text{m}$) 的车床转轴, 并将其作为待测工件。

图 3 和图 4 所示为利用该系统得到的一组结果。尽管它也反映了所测截面的圆跳动, 但是

轴上激光点处的表面粗超度影响了测量结果。因此, 通过增加一个低通滤波器消除了待测工件表面粗超度的影响, 从而得到了一个比较平滑的曲线 (见图 5)。在这条曲线的纵坐标方向上, 顶部两条实线之间的最大距离反映了圆跳动的大小。这两条实线之间的差值为

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_{max} - L_{min} = \frac{\lambda}{2}(N_{max} - N_{min}) \\ &= \int_0^t (\Delta v_{max} - \Delta v_{min}) dt \end{aligned} \quad (12)$$

为了对测量结果进行评估, 选用日本三丰公司生产的 RA-2100 型高精度圆度圆柱度仪对转轴进行了 10 次测量, 并将其数据作为参考标准。测量时, 要求待测转轴缓慢平稳转动 (结果见表 1)。在上述方案中, 分别求得圆跳动的平均值和标准偏差: $\bar{x}_1=10.0270 \mu\text{m}$, $\bar{x}_2=10.0150 \mu\text{m}$,

表 1 圆跳动测量值

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
系统未加入光纤 (μm)	10.20	10.14	9.93	9.99	10.16	9.87	9.92	10.17	9.91	9.98
系统加入光纤 (μm)	10.05	10.03	9.91	9.98	9.95	10.08	9.93	10.04	10.12	10.06
RA-2100 (μm)	10.01	10.02	10.01	9.98	9.97	9.99	10.00	10.02	10.0	9.98

$\bar{x}_3 = 10.0010 \mu\text{m}$; $\sigma_1 = 0.1263$, $\sigma_2 = 0.0692$, $\sigma_3 = 0.0202$ 。

结果表明, 加入光纤作为光路传输媒介后, 该系统的精度明显提高, 而且误差更小。由此可见, 光纤的加入对系统性能具有明显的提升作用。

加入光纤后, 系统的相对误差为 0.14%。本文系统的误差为 $e = (10.0150 - 10)/10 = 0.15\%$ 。在此强调一下, 为了保证测量精度, 这里要求待测转轴的最大转速不超过 300 mm/s, 这样才能满足测量精度的要求^[9]。

3 不确定度分析

3.1 由光波长 λ 引起的不确定度^[5]

由于系统光源采用的是波长为 632 nm 的 He-Ne 激光器, 其稳定性小于 0.01%, 用正态分布来估计它的相对不确定度:

$$\mu(\lambda) = \frac{0.01\%}{2} = 0.005\%$$

3.2 由光纤芯径 θ 角引起的不确定度^[10]

实际上, 受光纤芯径的影响, 入射光线与反射光线不可能在一条直线上。系统所用光纤的芯径 r 为 0.5 μm , 由芯径 θ 角带来的最大误差限为 0.080%。用矩阵分布估计其相对不确定度:

$$\mu(\theta) = \frac{0.080\%}{\sqrt{3}} = 0.0462\%$$

3.3 由多普勒频移 Δv 引起的不确定度^[11]

测量系统选取的光电探测器的波长范围为 900 ~ 1700 nm, 置信区间的半宽度为 0.2%, 包含因子 k 为 1.96。因此, 由光电探测器引起的相对不确定度分量为

$$\mu(\Delta v) = \frac{0.2\%}{1.96} = 0.1020\%$$

3.4 温度对不确定度的影响^[12]

通过查阅相关资料可知, 当温度在 0 ~ 50 $^{\circ}\text{C}$ 时, 放大电路的精度为 $\pm 0.002\%$ 。因此, 用三角分布估计其不确定度:

$$\mu(T) = \frac{0.002\%}{\sqrt{6}} = 0.0008\%$$

3.5 由外部环境及其他因素引起的不确定度^[13]

外界的杂散光及电磁干扰会使探测器的信噪比下降, 进而减小测量系统的分辨率。由此带来的误差不大于 0.01%, 所以用反正弦分布估计其相对不确定度:

$$\mu(n) = \frac{0.01\%}{\sqrt{2}} = 0.0071\%$$

综合以上分析, 用 B 类标准不确定度评价测量系统可得其合成相对标准不确定度^[14]:

$$\begin{aligned} \mu &= [\mu^2(\lambda) + \mu^2(\theta) + \mu^2(\Delta v) \\ &+ \mu^2(T) + \mu^2(n)]^{1/2} = 0.0126\% \end{aligned}$$

4 结束语

通过用双频激光外差干涉技术测量圆跳动, 可以减少外界噪声的干扰, 提高测量的精度和灵敏度; 采用激光多普勒技术能够实现数字测量, 进而提高测量的分辨力; 采用光纤传输可以提高测量的灵活性, 从而实现实时在线的远距离测量。实验结果表明, 本文提出的轴跳动相干测量技术方案具有可行性, 且技术新颖。该方法能够实现实时在线的高精度非接触式测量, 对转轴圆跳动测量具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 梁晋文. 几何量实用测试手册 [M]. 北京: 北京工业出版社, 1985.

(下转第 48 页)