

三点法中测头角位置的精密测量方法

张宇华

(北京理工大学光电工程系 北京 100081)

王晓林

(山东工业大学机械工程学院 济南 250061)

摘要 研究了三点法圆度及轴系误差测量中测头角位置的精密测量方法。设计了能直接测量非接触电容传感器测头实测状态下的角位置的测角系统,提出了克服测头角位置测量误差及三个测头灵敏度标定误差影响的校正方法。实验表明:采用本文提出的“多刻线”法测角精度优于1,测头角位置测量误差及三个测头灵敏度标定误差对测量精度的影响可降致最小。

关键词 三点法 角位置测量 精度 误差校正

在圆度及轴系运动误差的测量中,在被测件圆周上按一定角度布置三个测头,获得三个测量方程,就可以同时测得工件的圆度以及轴系在 x 、 y 两个方向的运动误差^[1-2]。测量中,三个测头角位置的精确测量具有重要意义:①它关系到能否实现圆度及轴系误差的彻底分离,因为三点法中的合成系数取决于测头间夹角,测头的定位及测量误差直接影响圆度及轴系运动误差的测量精度。②它是保障测头精确定位的关键。实际测量中,受测量装置结构的限制,一般难以直接测量测头间夹角。而且,由于三个测头不可避免地存在灵敏度不一致等因素,也影响圆度及轴系误差的彻底分离。本文将详细研究测头角位置的精确测量方法及克服测头灵敏度的标定误差对测量精度影响的校正方法,为提高三点法测量精度奠定基础。

1 测头角位置的直接测量

1.1 三点法原理及测量系统

如图1,在工件圆周上布置3个测头 $P_i (i = 1 \sim 3)$,各测头与 y 轴的夹角分别为 $\varphi_i (\varphi = 0)$,工件圆度为 $r(\theta)$,轴系径向运动误差为 X 、 Y 向分量为 $x(\theta_n)$ 、 $y(\theta_n)$,各测头的输出为:

$$S_i(\theta_n) = R_i - r(\theta_n - \varphi_i) - y(\theta_n) \cos \varphi_i + X(\theta_n) \sin \varphi_i \quad (1)$$

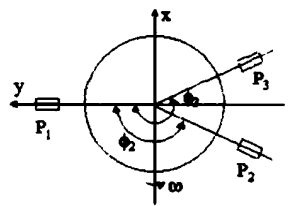


Fig. 1 The principle of three-point method

其中, R_i 为测头 P_i 的零起读数。 θ_n 为采样点, $\theta_n = n \cdot 2\pi/N, n = 0, 1, \dots, N - 1$, 构造线性方程

$$S_0(\theta_i) = S_1(\theta_i) + a_2s_2(\theta_i) + a_3s_3(\theta_i) \quad (2)$$

将 $r(\theta)$ 展开为 Fourier 级数

$$r(\theta_n) = r_0 + \sum_{k=1}^{k_m} (A_k \cos(k\theta_n) + B_k \sin(k\theta_n)) \quad (3)$$

设

$$\alpha_k = 1 + a_2 \cos k\varphi + a_3 \cos k\varphi \quad (4)$$

$$\beta_k = a_2 \sin k\varphi + a_3 \sin k\varphi \quad (5)$$

则

$$S_0(\theta_i) = R_1 + a_2R_2 + a_3R_3 - r_0(1 + a_2 + a_3) - \alpha y(\theta_i) + \beta x(\theta_i) - \sum_{k=2}^{k_m} [(A_k \alpha_k - B_k \beta_k) \cos k\theta_i + (B_k \alpha_k + A_k \beta_k) \sin k\theta_i] \quad (6)$$

为分离 $x(\theta_i)$ 、 $y(\theta_i)$, 使

$$\alpha = 1 + a_2 \cos \varphi + a_3 \cos \varphi = 0 \quad (7)$$

$$\beta = a_2 \sin \varphi + a_3 \sin \varphi = 0 \quad (8)$$

将 $S_0(\theta_n)$ 展开为 Fourier 级数

$$S_0(\theta) = S_{n0} + \sum_{k=1}^{k_m} (F_k \cos k\theta + G_k \sin k\theta) \quad (9)$$

则

$$A_k = -(\alpha_k F_k + \beta_k G_k) / (\alpha_k^2 + \beta_k^2) \quad (10)$$

$$B_k = (\beta_k F_k - \alpha_k G_k) / (\alpha_k^2 + \beta_k^2) \quad (11)$$

由此得到工件圆度。其中, k_m 为谐波最高级次。由方程组(1)可求得轴系径向运动误差。

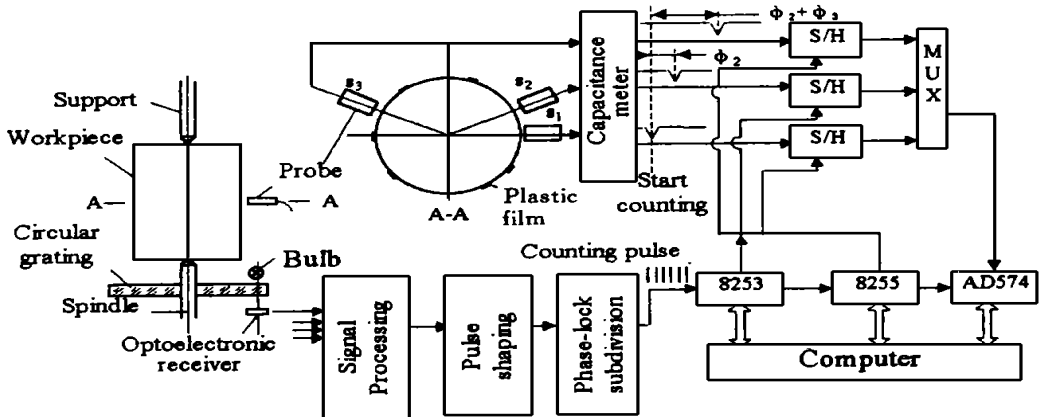


Fig. 2 Three-point method measuring system

图2为三点法测量系统, 被测件与轴系同步回转, 安装在主轴上的圆光栅产生的光电信号经放大、整形、细分后给出回转角度信号, 以此测量测头间夹角和提供数据采集的采样信号。三

路位移信号经电容测微仪转换为电压信号,经三路采样保持器(S/H)同时采样保持,在下一个采样信号到来之前,计算机控制A/D574依次完成各路S/H的A/D转换及数据存储,数据采集完毕后经处理得到被测件圆度及轴系误差。

1.2 测头角间距测量

测量中采用非接触式电容测头的表面有一定面积($\Phi 2\text{mm}$),而且测头包裹在屏蔽壳内,由于加工精度的影响,测头芯与屏蔽层外壳表面不完全平行。为测量测头工作状态下的实际夹角,参考文献[2],在被测件圆周表面上贴一宽0.2mm、厚0.02mm、长2mm的塑料薄膜,由于它远高出被测件表面,同时其介电常数与空气不同,当它经过电容测头时,电容测微仪将输出一明显低于其它测量值的电压,以此信号作为8253计数器开始计数的信号,当这个标志经过2、3测头时,依次读出计数器的值,即可得到测头间夹角。

具体测量过程为,主轴带动被测件开始旋转,计算机控制AD574A不断查询标志是否到来,当标志到来时,计数器8253开始工作,计数器1、2设置在工作方式2,第1个计数器的输出作为第2个计数器时钟脉冲的输入。光栅常数为1,100细分后的脉冲当量为0.01。假设从标志经过第一个测头 P_1 时开始计数,经过第2个测头时,8253计数器 PC_1 的读数值为 N_1 ,计数器 PC_2 的读数值为 N_2 ,则 $Q_2 = [(65536 - N_1) + (65536 - N_2) \times 65536] \times 0.01/60$ (度),同理,标志经过 P_3 时, $Q_2 + Q_3 = [(65536 - N_1) + (65536 - N_2) \times 65536] \times 0.01/60$ (度)。多测几圈取各角度的平均值作为最后测量结果。测量结果的不重复性误差为3.2。

为提高测角的重复性精度,在被测件表面上贴2~10条薄膜,这些薄膜位置无需均布,按单刻线法测出每个标志经过测头时计数器的读数,然后对这些结果进行综合处理。结果表明,重复性误差近似按 $1/\sqrt{m}$ (m 为薄膜数目)规律减小。测角误差减至1以下,满足了测量要求。仿真研究表明,当测量误差控制在1以下时,这项误差的影响已非常小。

2 测头角位置误差及灵敏度标定误差的校正

为提高圆度及轴系误差的测量精度,本文提出“作用夹角”这个概念,测头的“作用夹角”不仅仅表达了各测头的空间位置,而且是满足实测状态下误差分离的基本条件的夹角。

实际测量中,考虑到①测头角位置存在测量误差 $\Delta Q_2, \Delta Q_3$;②三个测头的灵敏度有标定误差,设它们的比值为 $1:p_2:p_3$ 。则圆度与轴系误差分离的基本条件方程(7,8)应改为:

$$1 + a_2 p_2 \cos(Q_2 + \Delta Q_2) + a_3 p_3 \cos(Q_3 + \Delta Q_3) = 0 \quad (12)$$

$$a_2 p_2 \sin(Q_2 + \Delta Q_2) + a_3 p_3 \sin(Q_3 + \Delta Q_3) = 0 \quad (13)$$

显然,式(7,8)得出的 a_2, a_3 无法保证式(12,13)成立。这导致:①圆度与轴系误差不能彻底分离,残留的轴系运动误差计入到首先算出的圆度误差中去;②计算得出的圆度各次Fourier系数被虚假地放大,从而造成较大的测量误差。

因此,本文提出下述方法,根据三点法误差分离的基本条件,对各测头直接测量结果进行优化,由此确定各测头之间的实际“作用夹角”。

当满足误差分离的基本条件时, $\alpha_i = \beta_i = 0$,此时, $S_0(\theta_i)$ 的一阶Fourier系数 $F_1 = G_1 = 0$,即

$$F_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S_0(\theta_n) \cos \theta_n = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [S_1(\theta_n) + a_2 S_2(\theta_n) + a_3 S_3(\theta_n)] \cos \theta_n = 0 \quad (14)$$

$$G_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S_0(\theta_n) \sin \theta_n = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [S_1(\theta_n) + a_2 S_2(\theta_n) + a_3 S_3(\theta_n)] \sin \theta_n = 0 \quad (15)$$

Table 1 The optimization results of the angular positions φ_2, φ_3

The angular position	φ_2 (°)	φ_3 (°)	objective function $ C_1 $
measured values	112.45	230.23	0.003521
the optimization results	1	112.49	0.000891
	2	112.45	0.000957
	3	112.47	0.001264
	4	112.49	0.001018
	5	112.47	0.000984
mean values	112.48	229.89	
standard deviation	0.014	0.018	

则 $S_0(\theta_n)$ 的一次谐波幅值 $C_1^2 = F_1^2 + G_1^2 = 0$, 当 φ_2, φ_3 有误差时, $C_1 \neq 0$, 即 $|C_1| \neq 0$, 据此, 我们可以对 φ_2, φ_3 的直接测量结果进行优化以确定其“真值”。方法是: 当 φ_2, φ_3 变化时, a_2, a_3 随之变化, C_1 的值也随之变化, 如果 $|C_1|$ 变小, 则说明 φ_2, φ_3 趋近于其“作用夹角”。数学模型可表示为以下有约束的优化: 求 $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_{2\min} \leq \varphi_2 \leq \varphi_{2\max}, \varphi_{3\min} \leq \varphi_3 \leq \varphi_{3\max}$, 使 $|C_1(\varphi_2, \varphi_3)| = \min$, 其中, $\varphi_{2\min}, \varphi_{3\min}, \varphi_{2\max}, \varphi_{3\max}$ 由直接测量误差限确定。采用直接搜索的方法, 即可求得 φ_2, φ_3 的“作用夹角”。

实验表明: 通过优化, 可以使 $|C_1|$ 的数值明显趋近于0, 有效地提高了 φ_2, φ_3 的测量精度。表1给出了5次不同测量列 $S_0(\theta_n)$ 的优化结果, 优化结果具有较好的重复性精度。

3 结 论

① 本文设计的测角系统能直接测量非接触电容传感器测头实测状态下的角位置, 采用“多刻线”法测角精度优于1。

② 提出了克服测头角位置测量误差以及三个测头的灵敏度标定误差影响的校正方法。

参 考 文 献

- 青本保雄, 大 成夫. 3点法真丹度测定法の展开. 精密机械[日], 1996, 32(12): 831~836
- Mitsui K. Development of new measuring method for spindle rotation accuracy by three points. Proceedings of 23rd International MTDR, 1982: 115~121

On the Precision Measurement Method for the Angular Positions of the Probes in Three-Point Method

ZHANG Yu-Hua¹, WANG Xiao-Lin²

(¹ *Optical Engineering Department of Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*)

(² *School of Mechanical Engineering, Shandong Polytechnic University, Jinan 250061*)

Abstract

A study on the precision measurement method for the angular positions of the probes in roundness and spindle error motion with three-point method has been carried out in this paper. A measuring system has been developed, which can simply measure the angular positions of the nontouching capacitance micrometer gauges under real measurement. A correction method is proposed, which can eliminate the effect of the angular position measurement errors and the calibration errors of the capacitance micrometer gauges on the roundness and spindle error motion measurements. Experiments show that the measurement error of the angular position of the probes measured by the multiple line method proposed in this paper is less than 1 μ m, and the effect of the angular position measurement errors and the calibration errors of the capacitance micrometer gauges on the roundness and spindle error motion measurements can be lessened to minimum.

Key words: Three-point method, Angular position measurement, Accuracy, Error correction

张宇华 男, 1964年5月出生, 博士。1986年7月于天津大学精密仪器系本科毕业, 1993年3月于中国科学院长春光学精密机械研究所研究生部硕士毕业, 1996年9月于天津大学精密仪器与光电子工程学院博士毕业。现在北京理工大学光电工程系仪器仪表博士后流动站从事博士后科研工作。研究方向为测试计量技术与仪器、自适应光学。