

用于测量量块尺寸的激光干涉测量方法研究

黄 雷 马 宏 徐文慧

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 量块支撑与安装方式对坐标测量机尺寸测量示值误差的影响已经越来越引起重视, 尤其对于线性测量精度为 $0.6 \mu\text{m}+1000/L$ 以上的计量型坐标测量机量块安装姿态对校准结果的影响不可忽略。利用单频激光干涉仪作为测量仪, 通过专用变形量测量系统, 测量量块在不同姿态下支撑位置对量块中心长度的影响。提出利用多点支撑法, 减小量块长度变化量的测试方案。实验结果表明, 采用多点支撑法测得量块最大变形量为 $+0.21 \mu\text{m}$, 并根据对坐标测量机尺寸测量示值误差测量结果不确定度分析, 重新计算其标准不确定度为 $0.75 \mu\text{m}$ 。

关键词 计量学; 激光干涉; 量块; 坐标测量机; 不同姿态

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100501

Application Research of Measuring the Length of Gauge Blocks by Laser Interferometry

Huang Lei Ma Hong Xu Wenhui

(School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract The influences of gauge blocks gestures on calibration of coordinate measuring machine attach increasing attention. In particular, the effects of gauge blocks gestures on metrology coordinate measuring machine of which the measurement accuracy is hyper- $0.6 \mu\text{m}+1000/L$ cannot be ingnored. Adopting laser interferometer as measuring datum, length deflection of gauge blocks are measured in different gestures by developing an adjustable platform. An advance multi-point bracing means is proposed to minish length variation of gauge blocks. The results of experiments indicate that the maximum length deflection of gauge blocks is $+0.21 \mu\text{m}$ by adopting multi-point bracing means. According to the formula of error uncertainty for coordinate measuring machine the standard uncertainty is recalculated to be $0.75 \mu\text{m}$.

Key words metrology; laser interference; gauge block; coordinate measuring machine; different gestures

OCIS codes 120.0120; 140.0140; 160.0160

1 引 言

根据坐标测量机校准规范 JJF1064-2004 的要求, 校准坐标测量机尺寸测量示值误差时一般使用 5 个不同尺寸的量块在不同姿态下进行^[1]。因此, 量块安装姿态对坐标测量机尺寸测量示值误差的影响已经越来越引起人们的重视。由于量块属于高精度计量标准, 对于测量其不同姿态下长度变化量的测量系统要求有很高的测量精度及分辨率。传统量块检定方法采用高等级量块检定低等级量块的传递

法, 但由于仪器分辨率、测量精度和姿态的限制使其难以对量块的姿态变化量进行高精度检测。

激光干涉仪具有测量范围大、精度高等优势, 因此在计量领域中得到了广泛应用^[2]。国外国家级计量机构和中國計量院等采用偏振激光干涉仪作为标准器检定量块已经开展了很多工作。在此基础上, 采用分辨率为 1.2 nm 、线性测量精度为 $\pm 5 \times 10^{-7}$ 的单频激光干涉仪给出线值标准, 利用研制的变形量测量系统, 通过分析量块在不同姿态下支撑位置

收稿日期: 2011-03-05; **收到修改稿日期**: 2011-03-29

作者简介: 黄 雷(1982—), 男, 博士研究生, 助理工程师, 主要从事光学仪器及几何量计量技术等方面的研究。

E-mail: huanglei_mail@yahoo.com.cn

导师简介: 马 宏(1941—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学精密机械领域方面的研究。E-mail: 93768351@qq.com

对量块中心长度的影响,从而为量块尺寸的精确测量提供了最佳测量方案。

2 单频激光干涉仪原理

单频激光干涉仪的原理图^[3]如图 1 所示。 Q_1 , Q_2 为 $\lambda/4$ 波片; R_1, R_2 为直角四面棱体; A_1, A_2, A_3 为检偏器; D_1, D_2, D_3 为光探测器; A/D 为数模转换器; \tan 为正切器; PBS 为偏振分光镜,光源采用双纵模等光强法稳频,用偏振棱镜去掉一个频率而得到单频激光输出。 $\lambda/4$ 波片 Q_1 的快轴和激光偏振方向夹角为 45° ,圆偏振光在偏振分光棱镜处分成两个正交的线偏振光。 s 分量经棱镜 R_1 返回; p 分量经 R_2 返回。当棱镜运动时, p 分量的光程变化而 s 分量光程不变。二者合成以后依然保持各自的偏振态。经过 $\lambda/4$ 波片 Q_2 以后成为旋转偏振光。检偏器的通光方向是这样放置的: A_1 取水平方向; A_3 取垂直方向; A_2 取 45° 方向。因此 D_1 得到信号为

$$a_1 + b_1 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}x\right),$$

D_2 得到信号为

$$a_2 + b_2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}x + 90^\circ\right),$$

D_3 得到信号为

$$a_3 + b_3 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}x + 180^\circ\right).$$

令 $\theta = \frac{4\pi}{\lambda}x$, 并消去直流分量得

$$\begin{cases} S_1 = b(\sin \theta + \cos \theta) = b\sqrt{2}\sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \\ S_2 = b(\sin \theta - \cos \theta) = -b\sqrt{2}\cos\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \end{cases}, \quad (1)$$

采用高速 A/D 采集 S_1, S_2 信号,在仪器中查表得到相位值

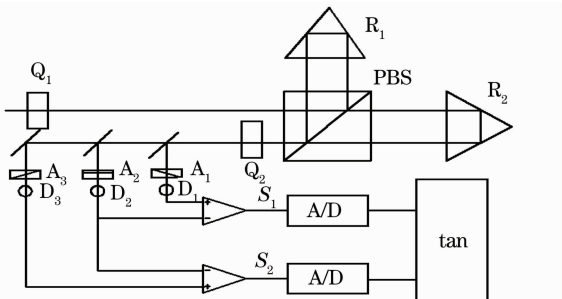


图 1 单频激光干涉仪原理

Fig. 1 Principle of single-frequency interferometer laser

$$\tan\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) = \frac{S_1}{S_2}, \quad (2)$$

分辨率取决于 A/D 转换的位数,该仪器采用双 7 位,内部时钟 20 MHz,分辨率即可达到 1.2 nm,满足测量量块长度变化量的要求。

3 量块在不同姿态下安装位置理论分析

分析量块在标准姿态下的安装位置,进而推导其在不同姿态下的最佳安装位置。^[4~7]

3.1 量块在标准姿态下安装位置分析

如图 2 所示,量块的标准姿态为量块水平放置,为两点支撑(艾利点)。由力学平衡原理得到

$$R_A = R_B = \frac{qL}{2}, \quad (3)$$

式中 R_A 为 A 点支承反力, R_B 为 B 点支承反力, q 为均布载荷集度, a 为外伸长度, b 为 A 点、B 点跨度值, L 为梁的长度。

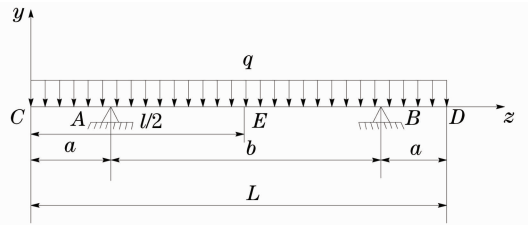


图 2 量块标准位置

Fig. 2 Normal gesture of gauge blocks

计算梁最小转角时,坐标原点设在外伸段 a 的最左端点 C 处。写出各段的挠曲线方程: $0 \leq z \leq a$ 外伸段的挠度方程

$$y_{0 \leq z \leq a} = y_0 + \theta_0 z - \frac{qz^4}{24EJ}, \quad (4)$$

同理可写出 $a \leq z \leq a+b$ 的 A 点、B 点支承段的挠度方程:

$$y_{a \leq z \leq a+b} = y_0 + \theta_0 z + \frac{1}{EJ} \left[-\frac{qz^4}{24} + R_A \frac{(z-a)^3}{6} \right], \quad (5)$$

式中 θ_0, y_0 这 2 个未知量,可根据在 A 点、B 点支承处挠度等于零的条件求得,即 $y_A = 0, y_B = 0$ 。求得坐标原点 C 处的转角 θ_0 为

$$\theta_0 = -\frac{qb^3}{24EJ} \left(1 - 6\frac{a^2}{b^2} - 4\frac{a^3}{b^3} \right), \quad (6)$$

梁的两端外伸端点 C, D 处的转角等于坐标原点处的转角 $\theta_C = \theta_D = \theta_0$,求得 $a = 0.21133L$,所以 $b = L - 2a = 0.57735L$ 。

3.2 量块旋转 45°和 90°姿态时量块安装位置计算

由坐标测量机校准规范知,量块需在分别平行于三个坐标位置、对角线位置校准尺寸测量示值误差,下面以 45°和 90°为例分析其安装位置。

当量块转动 $\alpha=45^\circ$ 后,量块的受力情况如图 3 所示。由图 3 可知,量块在支撑点 A 点、B 点处, y' 方向的所受支撑力 R'_A, R'_B 为

$$R'_A = R'_B = \frac{qL}{2} \cos 45^\circ, \quad (7)$$

同理,写出转角后量块挠度方程

$$y'_{0 \leq z' \leq a} = y'_0 + \theta'_0 z' - \frac{q'z'^4}{24EJ}, \quad (8)$$

$$y'_{a \leq z' \leq a+b} = y'_0 + \theta'_0 z' + \frac{1}{EJ} \left[-\frac{q'z'^4}{24} + R'_A \frac{(z'-a)^3}{6} \right], \quad (9)$$

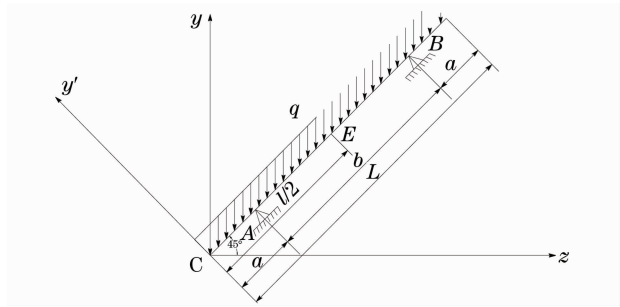


图 3 量块旋转 45°位置

Fig. 3 Gage blocks in 45° position

当量块转动角度后,支撑反力的大小随之变化,但是仍然是 $R'_A = R'_B$ 。根据(4),(5)式求得,量块

旋转 45°后,最小转角的支承点位置仍为 $a = 0.21133L, b = 0.57735L$ 。

当量块旋转 $\alpha=90^\circ$ 时,量块两端面自然保持平行状态。

3.3 利用多点支撑改善量块变量

由上面的分析知,量块在不同姿态下长度有一定变化。在校准高精度坐标机时,其带来的不确定度应给予考虑。因此,提出了改进量块安装方式的一种方法,即在保持量块两端面的平行的同时,通过增加支撑点数来减小量块变量。四点支撑法便于计算,且可以在一定程度上减小量块变形带来的校准误差,如图 4 所示。

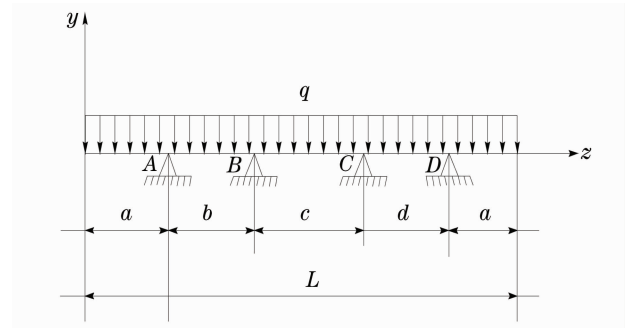


图 4 多点支撑法

Fig. 4 Multi-point sustaining method

将量块分为 5 段,如图 4 所示。由材料力学理论可知, $R_A = R_B = R_C = R_D = \frac{qL}{4}$ 。

由初步参数法,列出量块挠度方程

$$y_{0 \leq z \leq a} = y_0 + \theta_0 z - \frac{qz^4}{24EJ}, \quad (10)$$

$$y_{a+b+c \leq z \leq a+2b+c} = y_0 + \theta_0 z + \frac{1}{EJ} \left[-\frac{qz^4}{24} + R_A \frac{(z-a)^3}{6} + R_B \frac{(z-a-b)^3}{6} + R_C \frac{(z-a-b-c)^3}{6} \right], \quad (11)$$

分别代入 $z=a$ 和 $z=a+2b+c$,得挠曲线方程为

$$y_a = y_0 + \theta_0 a - \frac{qa^4}{24EJ}, \quad (12)$$

$$y_{a+2b+c} = y_0 + \theta_0 (a+2b+c) + \frac{1}{EJ} \left[-\frac{q(a+2b+c)^4}{24} + \frac{qL}{4} \frac{(2b+c)^3}{6} + \frac{qL}{4} \frac{(b+c)^3}{6} + \frac{qL}{4} \frac{b^3}{6} \right], \quad (13)$$

当量块转角为 $\theta_D = \theta_F = 0^\circ$ 时,(12),(13)式相减并化简得

$$\theta_0 = \frac{q}{24EJ} [(a+2b+c)^4 - (2b+c)^3 - (b+c)^3 - Lb^3 - a^4] = 0, \quad (14)$$

化简上式,列出 a 与 b 的关系式为

$$(1-a)^4 - (1-2a)^3 - (1-2a-b)^3 - b^3 - a^4 = 0, \quad (15)$$

解得

$$a = \begin{cases} \frac{1}{2} \text{ (舍)} \\ -\frac{1}{2}b + \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \sqrt{(-9b^2 + 3)} \text{ (舍)}, \\ -\frac{1}{2}b + \frac{1}{2} - \frac{1}{6} \sqrt{(-9b^2 + 3)} \end{cases}$$

由于 a 的前两个根无意义,故舍去。代入满足

上式要求的值,即可计算出 a, b, c 的值。当 $L = 1000 \text{ mm}$ 时,经过计算,得到 $a = 146 \text{ mm}, b = 150 \text{ mm}, c = 408 \text{ mm}$ 。

4 实 验

4.1 变形量测量系统结构

图 5 为变形量测量系统,其中 1 为移动测头;2 为被测量块;3 为基座;4 为测力调整装置;5 为移动角锥反射镜;6 为偏振干涉镜;7 为激光器;8 为工作台;9 为底座;10 为支撑座。该系统可分别在标准、 45° 和垂直位置对量块变化量进行测量。现以量块

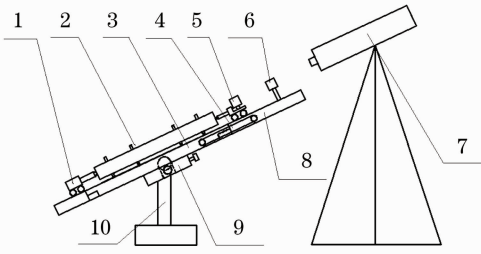


图 5 变形量测量系统

Fig. 5 Measuring platform of length deflection

置于 45° 位置时加以说明。

移动测头 1 采用高精度电感测微仪,用于量块对零。被测量块 2 置于移动测头 1 和移动角锥反射镜 5 之间,并固定在工作台 8 上。该工作台可在三个方向调整量块的测量拐点。同时,为避免重力分量影响测头变形量,测量力调整装置 4 可根据量块重量进行测量力调整,用于平衡量块自身重力。干涉镜 6 置于工作台 8 右端。激光器 7 可随被测量块姿态不同进行同步姿态调整。

4.2 测量实验及结果分析

采用变形量测量系统对 1000 mm 量块在标准、 45° 和垂直位置分别应用两点支撑方法和多点支撑方法进行测量。测量时,对量块进行 3 次测量,取读数数值最大作为测量结果。同时,利用有限元分析计算量块长度变化量,并与变形量测量系统测得值进行比对^[8]。有限元分析软件对 1000 mm 量块采用多点支撑方法在不同姿态下计算长度变化量,如图 6 所示。

由表 1 的测量结果知,变形量测量系统与有限元分析结果数值有一定的差别,但总体趋势是相同的。

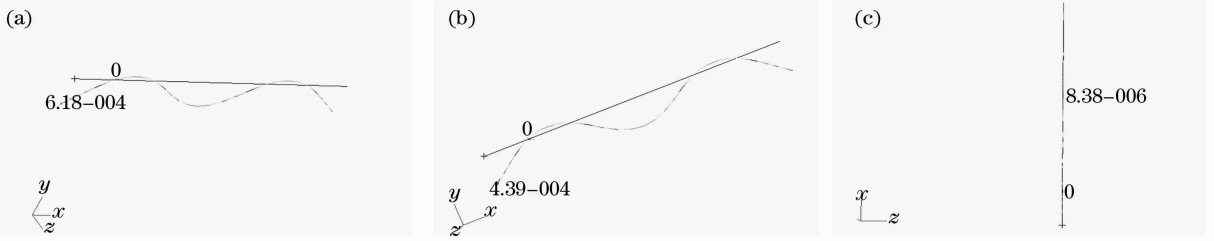


图 6 1000 mm 量块有限元分析。(a) 标准位置分析图;(b) 45° 位置分析图;(c) 90° 位置分析图

Fig. 6 FEA of 1000 mm gage block. (a) Normal; (b) 45° ; (c) 90°

表 1 量块变形量测量值

Table 1 Measured result of length deflection

Gauge blocks gestures	0°			
	First time	Second time	Third time	Max
Measured value of two points bracing /mm	-0.20×10^{-3}	-0.27×10^{-3}	-0.24×10^{-3}	-0.27×10^{-3}
Measured value of multi-point bracing /mm	0.21×10^{-3}	0.20×10^{-3}	0.18×10^{-3}	0.21×10^{-3}
Gauge blocks gestures	45°			
	First time	Second time	Third time	Max
Measured value of two points bracing /mm	0.32×10^{-3}	0.41×10^{-3}	0.24×10^{-3}	0.32×10^{-3}
Measured value of multi-point bracing /mm	0.24×10^{-3}	0.22×10^{-3}	0.21×10^{-3}	0.21×10^{-3}
Gauge blocks gestures	90°			
	First time	Second time	Third time	Max
Measured value of two points bracing /mm	0.14×10^{-3}	0.10×10^{-3}	0.09×10^{-3}	0.14×10^{-3}
Measured value of multi-point bracing /mm	0.08×10^{-3}	0.11×10^{-3}	0.05×10^{-3}	0.11×10^{-3}

由于量块是在标准位置进行检定的,因此设置量块在标准位置时的长度值为标准值。那么采用两点支撑方法时量块在 45° 和 90° 时带来的最大变化量

为 $0.41 \mu\text{m}$ 。当采用多点支撑方法测量时,由变形量测量系统测得的最大变形量为 $0.21 \mu\text{m}$,根据坐标测量机校准规范内容^[1],合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + (L_s \Delta t u_2)^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2}, \quad (16)$$

由(16)式知,当 $L=1000 \text{ mm}$ 时, $u_c=0.72 \text{ }\mu\text{m}$ 。

但是,从上面的分析得知,评定坐标测量机示值误差测量结果不确定度时,应考虑量块姿态引入的影响量。因此,在两点支撑时其标准合成不确定度为

$$u'_c = \sqrt{u_1^2 + (L_s \Delta t u_2)^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2} = 0.82 \text{ }\mu\text{m}, \quad (17)$$

式中 u_7 为量块安装姿态引入的不确定度分量。

当采用多点支撑方法时,重新计算其标准不确定度 $u''_c=0.75 \text{ }\mu\text{m}$ 。

5 结 论

由单频激光干涉仪提供长度标准,利用研制的变形量测量系统,测量并分析了量块在不同姿态下,支撑位置对量块中心长度的影响。在此基础上提出利用多点支撑法,减小量块长度变化量,并利用有限元分析计算量块长度变化量,将测量结果与变形量测量系统实测值比对。实验结果表明,采用两点支撑方法测量 1000 mm 量块在 45° 和 90° 位置时带来的最大变化量为 $+0.41 \text{ }\mu\text{m}$,采用多点支撑方法测得量块最大变形量为 $+0.21 \text{ }\mu\text{m}$,并根据坐标测量机尺寸测量示值误差测量结果不确定度公式,重新计算其标准不确定度 u''_c 为 $0.75 \text{ }\mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- 1 JJF 1064-2004, Calibration Specification for Coordinate Measuring Machine[S]. Beijing: China Metrology Press, 2004
- 2 JJF 1064-2004, 坐标测量机校准规范[S]. 北京:中国计量出版社,2004
- 3 Yang Guoguang. Modern Optical Testing Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997. 84~89
- 4 杨国光. 近代光学测试技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,1997. 84~89
- 5 C. Wu, C. Su, G. Peng *et al.*. Polarimetric nonlinearity-free, homodyne interferometer for vibration measurement [J]. *Metrologia*, 1996, **33**(6): 533~537
- 6 Liu Jia. Calibration and analysis of compliance haptic display device[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, **29**(4): 324~328
- 7 刘佳. 柔顺性触觉再现装置的刚度标定和误差分析[J]. 计量学报, 2008, **29**(4): 324~328
- 8 JJG 146-2003, Verification Regulation of Gauge Block [S]. Beijing: China Metrology Press, 2003
- 9 JJG 146-2003, 量块检测规程[S]. 北京:中国计量出版社,2003
- 10 Guo Yinji. Theoretical arithmetic calculation to catch point for even bending moment[J]. *Precision Machining*, 1991, **3**: 2~15
- 11 郭荫基. 等弯矩,最小挠度和最小转角承点位置的理论计算[J]. 精密机床, 1991, **3**: 2~15
- 12 T. C. Napehko. Handbook of Mechanics of Materials[M]. Fan Qinsan Transl. Beijing: China Machine Press, 1981. 156~160
- 13 T. C. 皮萨连科. 材料力学手册[M]. 范钦珊译. 北京:机械工业出版社,1981. 156~160
- 14 Li Jingyong. Finite Element Method [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 1999. 114~131
- 15 李竞勇. 有限元法[M]. 北京:北京邮电大学出版社,1999. 114~131