

# 基于变尺度法的机床平面度误差轮廓重构算法

卢泽宸, 赵春雨, 刘志学

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 为了解决国内机床导轨安装表面平面度检测无法实现数字化描述这一问题, 基于变尺度原理, 提出了全新的机床导轨安装面平面度误差检测方法, 通过将多段具有重合区域的短安装面拼接起来实现安装表面全长测量. 同时设计出了检测仪, 给出了测量原理, 利用基准板、测量仪和机床导轨安装表面间的几何关系, 建立了算法的理论模型, 开发出机床导轨安装表面平面度误差轮廓重构算法, 并对算法进行了仿真. 结果表明, 算法可以精确重构出机床导轨安装面平面度误差轮廓.

**关 键 词:** 平面度; 变尺度原理; 数字化检测; 拼接测量; 轮廓重构算法

中图分类号: TG 801

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)06-0857-05

## Reconstruction Algorithm of Machine Tool Flatness Error Profile Based on Mutative Scale Method

LU Ze-chen, ZHAO Chun-yu, LIU Zhi-xue

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: ZHAO Chun-yu, E-mail: chyzhao@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** In order to solve the problem that the flatness measurement of the installation surface of machine tool guides in China cannot be digitally described, a new method of flatness error detection of the guide rail mounting surface of numerical control machines was proposed based on the mutative scale theory, whereby the total length of the mounting surface can be measured by splicing several short mounting surfaces with overlapping areas. The new instrument was designed and the measurement principles were made. The theoretical model of the algorithm was established by utilizing the geometric relationship between the reference plate, the measuring instrument and the installation surface of the machine tool guideway. And an algorithm for reconstructing the flatness error profile of the installation surface of the machine tool guideway was developed and simulated. The results demonstrated that the algorithm can reconstruct the flatness error profile of machine tool guides' installation surface accurately.

**Key words:** flatness; mutative scale theory; digital detection; stitching measurement; profile reconstruction algorithm

机床导轨安装表面精度是保证进给系统装配误差的基础<sup>[1]</sup>,也是产生加工件形状误差和位置误差的重要因素之一. 目前机床导轨安装表面检测仍采用传统的检验方法,例如千分表、水平仪、平尺等,测量结果受操作者的熟练程度和经验影响较大,且效率低,更不可能实现装配过程的数字化. 而传统的检验设备与现代先进测量仪器相比,精度差距较大,这大大限制了测量结果的准确性.

另外,在测量过程中工人只能通过观察千分表的变化范围判断质量,无法了解导轨安装面的局部特性和整体变化曲线,给之后的加工件修整带来一定困难. 因此,利用现代高精度测量元件研制出符合工程实际需要的平面度测量仪及系统的参数化标准来指导生产对机床制造业具有重大现实意义. 近年来,学者们不断提出新方法以便精确地重构表面误差轮廓<sup>[2-3]</sup>. 精密表面误差检测方法有

收稿日期: 2018-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775094).

作者简介: 卢泽宸(1991-),男,辽宁铁岭人,东北大学博士研究生; 赵春雨(1963-),男,辽宁黑山人,东北大学教授,博士生导师.

光学测量法<sup>[4]</sup>、扫描侧头法<sup>[5]</sup>以及传感器和平晶结合的方法<sup>[6]</sup>.但上述方法要求在特定环境下检测,对机床进行在线测量仍是难题.

变尺度原理可以使用小尺寸工具测量大尺度工件<sup>[7]</sup>,本文根据变尺度理论,将长导轨安装表面分解为多段具有重叠区域的短安装面进行测量,使用开发的算法得到各段安装表面平面度误差轮廓,利用重叠区域轮廓间的相对位置关系,经拼接算法将各段轮廓统一到同一法平面上,最终重构出机床长导轨安装表面平面度误差轮廓.

## 1 测量原理

### 1.1 测量仪测量原理

变尺度检测机构原理如图 1 所示,检测机构采用 A、B 和 C 三支撑柱与待检测面接触,A 和 B 为固定支撑柱,C 通过弹簧压紧在待检测面上.将检测机构静止时传感器记录的数值定义为初始零点.检测过程中,操作者沿测量方向推动机构体运动,随着机构体上导轨沿滑块运动,支撑导轨沿滑块柱 C 随检测平面的平面度波动带动检测面上下波动,而传感器检测到检测面的变化,并通过 PC104 工业控制计算机记录,检测结果为沿检测机构前进方向的法平面侧向投影波纹线.

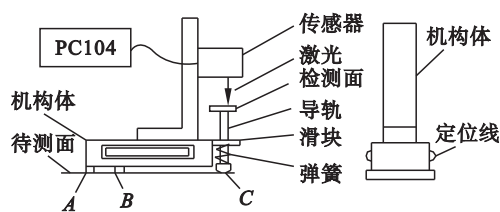


图 1 测量仪测量原理

Fig. 1 Measurement principles of the instrument

### 1.2 基准板测量原理

基准板表面结构如图 2a 所示, $O_0, O_4$  为上表面端点,同时在上表面开有 3 个给定深度的弧形沟槽  $O_1, O_2, O_3$ ,下表面为平面,两侧表面精磨加工,并进行刮研.

测量过程如图 2b 所示,将基准板置于大理石平台表面,测量时先令 A 点与  $O_0$  点重合,手工推动检测机构从左向右移动直到 B 点与  $O_4$  点重合,之后调转检测机构,令 A 点与  $O_4$  点重合,推动检测机构从右向左移动直到 B 点与  $O_0$  点重合,由 PC104 记录检测结果,各次检测结果为一条随时间变化的波纹线.由于测量机构经过凹槽时会产生比较明显的波形变化,定义该波形为特征波形.支撑柱 A 和 B 各有两次通过沟槽,会有

两个波峰(A 入槽)和两个波谷(B 入槽).已知采样数据数量随推动速度变化,但每次检测得到的波形是不变的,定义不变的波形为本征峰谷波形.将各段测量值进行数据处理得到其本征峰谷波形.并通过插值法使本征峰谷波形映射到采样步长为  $d_1$ ,测量长度为  $3a$  的区间内,该结果与初始零点的差即为从左向右测量时基准板的测量值  $d_1$ ,同理对从右向左测量时的数据采用相同处理方法获得测量值  $d_2$ .最后利用基准板沟槽和检测机构三条支撑柱的几何关系,开发基准板平面度误差轮廓重构算法,将重构的曲线作为标准基准板平面度误差轮廓曲线.

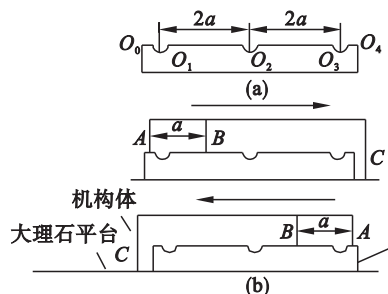


图 2 基准板测量原理

Fig. 2 Measurement principle of reference plate

(a)—基准板; (b)—测量过程.

### 1.3 基于基准板的待测面平面度误差测量原理

将待测面沿长度方向分成 7 段,如图 3 所示.

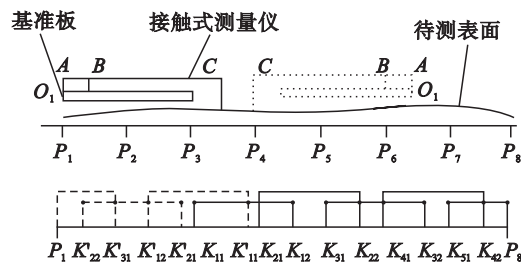


图 3 待测面测量原理

Fig. 3 Measurement principle of the measuring surface

设进入沟槽点  $O_1$  为起点,将  $O_1$  与  $P_1$  重合固定在待测平面上,检测机构 A 点与  $O_1$  点重合,此时 C 点与  $K_{11}$  点重合,推动检测机构直到 B 点到达基准板最右端,此过程中 C 点经过  $K_{11}K_{12}$  得到测量值,通过识别特征波峰波谷将测量值映射到标准基准板平面度误差轮廓对应区间内.以此类推,依次移动基准板,使  $O_1$  分别与  $P_2, P_3, P_4, P_5$  重合,直至 C 点到达待检面最右端  $P_8$ .将此过程得到的测量值通过分离算法计算可得到  $K_{21}K_{22}, K_{31}K_{32}, K_{41}K_{42}, K_{51}P_8$  段表面轮廓,通过匹配  $K_{11}K_{12}$  与  $K_{21}K_{22}$  段重合区域就可以将两段表面轮廓拼接起来,同理依次拼接可重构出  $K_{11}P_8$  段

轮廓. 此时  $P_1K_{11}$  段属于未测量部分, 为了得到该部分表面轮廓, 需将  $O_1$  与  $P_6$  重合, 固定在待测平面上, 检测机构  $A$  点与  $O_1$  点重合, 推动检测机构直到  $B$  点到达基准板末端, 依次挪动基准板直到检测机构  $C$  点到达待测表面最左端  $P_1$  点. 通过重合区域间的几何关系对分段表面进行拼接可以得到  $K_{11}P_1$  段表面轮廓, 最后将  $P_1K_{11}$  与  $K_{11}P_8$  拼接起来, 最终重构出整体长导轨安装面平面度误差轮廓.

## 2 算法理论模型

### 2.1 基准板表面平面度误差轮廓重构算法

假设大理石平面绝对水平(大理石平尺表面精度极高), 基准板下表面粗糙度尺度远小于基准板整体几何尺寸尺度, 故忽略接触误差的影响.

简化后的模型如图4所示, 以沟槽  $O_1, O_3$  为端点, 取适当值赋予采样步长  $d_1$ , 并保证  $a/d_1$  为整数, 则基准板测量值总数为

$$N = \frac{3a}{d_1}. \quad (1)$$

将从右向左的测量值映射到对应步长为  $d_1$  的测量长度区间内, 即

$$N' \rightarrow N. \quad (2)$$

式中  $N'$  为从右向左测量时的测量值个数.

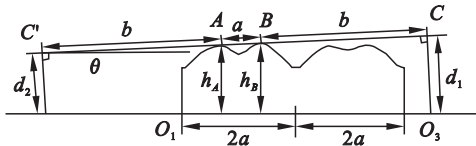


图4 基准板表面轮廓重构算法模型

Fig. 4 Reconstruction algorithm model of the surface profile of the base plate

由基准板测量原理可知, 机构往返推动过程中  $AB$  经过相同位置时  $AC$  和  $AC'$  在同一直线上, 此时  $CC'$  与水平面倾斜角为

$$\theta(n) = \arctan\left[\frac{|d_1(n) - d_2(n)|}{a + 2b}\right], n = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

式中:  $d_1(n)$ ,  $d_2(n)$  分别表示从左向右和从右向左测量过程中每个测点的测量值;  $a$  表示  $AB$  两点间的距离;  $b$  表示  $BC$  两点间的距离.

$A$  点所经过的表面轮廓高度用  $h_A$  表示,  $B$  点所经过的表面轮廓高度用  $h_B$  表示.

$$\left. \begin{aligned} h_A(n) &= d_1(n) \cos[\theta(n)] \pm (a + b) \sin[\theta(n)], \\ h_B(n) &= d_1(n) \cos[\theta(n)] \pm b \sin[\theta(n)]. \end{aligned} \right\}$$

(4)

式中: 当  $d_1(n) > d_2(n)$  时, 正负号使用 ‘-’ 号; 当  $d_1(n) < d_2(n)$  时, 正负号使用 ‘+’ 号; 当  $d_1(n) = d_2(n)$  时,  $h_A(n) = h_B(n) = d_1(n)$ .

由于  $A, B$  点所经过的表面轮廓有重合部分, 故重构的表面轮廓高度值为

$$h = \left\{ h_A(1, \dots, \frac{a}{d_1}), h_B(1, \dots, N) \right\}. \quad (5)$$

高度对应基准板位置为以  $O_1$  为起始点,  $d_1$  为采样间隔,  $4a$  为长度的区间.

### 2.2 基准板平面度误差轮廓分离算法

基准板与待测表面间粗糙度尺度远小于基准板整体几何尺度, 故忽略其影响. 简化模型如图5所示, 在长导轨安装表面轮廓起点定义局部坐标系  $O_{xz}$ ,  $x$  为测量方向,  $z$  为待测面平面度误差轮廓. 该模型包含测量过程中所有可能出现的情况, 测得导轨安装表面轮廓波纹线为基准板侧面投影波纹和待检测平面侧向投影波纹线的综合结果, 重构表面轮廓时需要将基准板侧向投影波纹线分离出来, 得到待检测平面轮廓侧向投影波纹线.

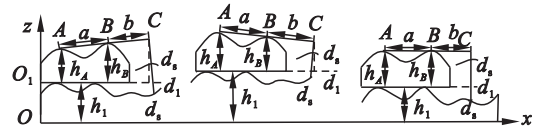


图5 分离算法模型

Fig. 5 Separation algorithm model

对待测表面测量值采用与基准板相同的数据处理方法提取其本征峰谷, 并通过插值使其映射到采样步长为  $d_1$ , 测量点数为  $N$ , 测量距离为  $3a$  的区间内.

则第  $i$  段待测表面直线度误差轮廓高度为

$$Z_d^i(n) = h_1 \pm |d_s^i(n) - d_1(n)| \cos[\theta(n)]. \quad (6)$$

式中:  $h_1$  为基准板每段的位置高度;  $d_s^i(n)$  为测量第  $i$  段待测面得到的测量值; 当  $d_s^i(n) > d_1(n)$  时, 正负号使用 ‘-’ 号; 当  $d_s^i(n) < d_1(n)$  时, 正负号使用 ‘+’ 号; 当  $d_s^i(n) = d_1(n)$  时,  $Z_d^i(n) = h_1$ .

此时轮廓高度对应的横坐标为

$$X_d^i(n) = X_O^i + X_{A(n)} + L_{AC} \cos[\theta(n)] \pm d_s^i \sin[\theta(n)]. \quad (7)$$

式中:  $L_{AC} = a + b$ ;  $X_O^i$  为测量第  $i$  段轮廓时基准板起始点  $O_1$  位置横坐标;  $X_{A(n)}$  为  $A$  点相对于基准板起始点  $O_1$  的位置横坐标.

当正向和反向最后一次测量时, 已知测量距离  $L_m$ . 式(6), 式(7)中  $n$  最大值为  $NL_m/3a$ .

### 2.3 基于最小二乘的拼接算法

如图6a所示, 理想情况下, 曲线拼接的充要

条件是位置重合处有相同的曲线. 基准板固定于导轨安装表面各段时, 由于待测表面平面度误差的影响, 基准板不在一条水平线上. 同时基准板在每个刻度停留起始位置的不同也会造成重合区域对应点无法完全匹配. 为了解决匹配误差对重构曲线精度造成影响这一问题, 提出了最小二乘拼接算法, 选择最佳匹配区域, 模型如图 6b 所示, 定义曲线 1 为被拼接曲线, 曲线 2 为拼接曲线.

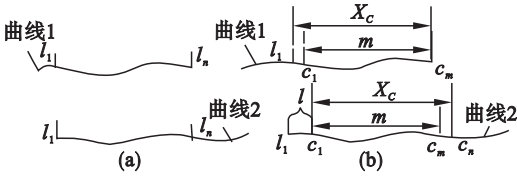


图 6 拼接算法模型  
Fig. 6 Splicing algorithm model  
(a)—曲线; (b)—模型.

拼接曲线 2 起点位于误差范围  $l$  内, 故截断曲线  $l$ , 在曲线 1 中  $l_1 c_m$  段和曲线 2 中  $c_1 c_n$  段寻找新重合区域  $c_1 c_m$ . 其中  $Z_w^i$  表示第  $i$  段段尾区间轮廓,  $Z_s^{i+1}$  表示第  $i+1$  段段首区间轮廓,  $Z_w^i, Z_s^{i+1}$  长度为已知理论重叠区域的长度  $X_c$ , 其取值范围为

$$Z_w^i = Z_d^i(N - \frac{X_c}{d_t}, \dots, N), Z_s^{i+1} = Z_d^{i+1}(\frac{l}{d_t}, \dots, \frac{1}{d_t} + \frac{X_c}{d_t}). \tag{8}$$

式中:  $Z_d^i, Z_d^{i+1}$  由式(6)得到;  $l$  为截断区域长度,  $l/d_t$  为拼接曲线 2 截断后的位置起点.

在拼接过程中, 被曲线 1 与曲线 2 中每次去掉一个数据点建立新的重合区域, 其中曲线 1 依次去掉  $l_1 c_m$  前端的点, 曲线 2 依次去掉  $c_1 c_n$  尾部的点, 曲线 1 中每次建立的新重合区域为  $C(k)$ , 曲线 2 中每次建立的新重合区域为  $D(k)$ .

$$C(k) = Z_w^i(k, \dots, \frac{X_c}{d_t}), D(k) = Z_s^{i+1}(1, \dots, \frac{X_c}{d_t} + 1 - k). \tag{9}$$

式中:  $k$  为搜索重合区域的次数,  $k = 1, 2, \dots, (l/d_t - 1)$ ,  $l/d_t$  为最大搜索次数.

令

$$M(k) = C(k) - D(k), F(k) = k, \dots, l/d_t. \tag{10}$$

定义式(10)为目标函数, 并将其代入最小二乘公式(11), 求出  $U(k)$  的最小值.

$$\min U(k) = \frac{\sum_{j=1}^{l/d_t-k} (M(k) - \overline{M(k)}) (F(k) - \overline{F(k)})}{\sum_{j=1}^{l/d_t-k} (F(k) - \overline{F(k)})^2}. \tag{11}$$

式中:  $\overline{M(k)}, \overline{F(k)}$  分别表示第  $k$  次搜索时目标函数  $M(k), F(k)$  的均值.

通过在  $k$  中搜索使  $U(k)$  成为最小值的点  $n_1$  并代入式(12)得到相邻两段轮廓最小匹配误差.

$$P_i^{i+1} = \frac{[Z_w^i(n_1, \dots, N) - Z_s^{i+1}(1, \dots, N - n_1 + 1)]}{N - n_1 + 1}. \tag{12}$$

拼接曲线 2 转换后的轮廓为

$$Z_i^{i+1} = Z_d^{i+1} \pm |P_i^{i+1}|. \tag{13}$$

式中: 当  $P_i^{i+1} > 0$  时, 使用 ‘+’ 号; 当  $P_i^{i+1} < 0$  时, 使用 ‘-’ 号.

拼接后的轮廓为

$$Z_p = \left\{ Z_d^i, Z_i^{i+1}(\frac{X_c}{d_t} + 1, \dots, N) \right\}. \tag{14}$$

重复上述过程重构出整个表面平面度轮廓.

### 3 测量算法仿真分析

为了验证算法准确性, 使用 Matlab 进行仿真. 设待测面长度  $L = 1\,000\text{ mm}$ , 基准板长度  $L_j = 200\text{ mm}$ , 基准板高度  $h = 10\text{ mm}$ ,  $AB$  接触点之间的距离  $a = 50\text{ mm}$ ,  $BC$  之间的距离  $b = 160\text{ mm}$ , 将待测面分为 10 段, 每段长度  $100\text{ mm}$ , 采样步长为  $0.2\text{ mm}$ , 将分形函数曲线结合形状误差曲线代替基准板表面平面度误差轮廓和待测表面平面度误差轮廓<sup>[8-9]</sup>.

#### 3.1 测量值仿真

图 7a 为基准板测量值仿真结果, 图 7b 为待测表面测量值仿真结果. 从图 7a 中可以看出  $AB$  点在往返测量过程中经过相同位置时的测量值对称分布, 且单次测量产生两个波峰两个波谷, 与基准板测量原理产生的效果相对应. 从图 7b 中可以看出待测表面每段测量值具有交叉部分, 且均含有特征波峰波谷, 与测量原理相符.

#### 3.2 重构算法仿真

图 8a 中可看出, 在仿真条件下基准板表面平面度误差轮廓重构算法可以很好地重构出基准板平面度误差轮廓. 图 8b 中可看出, 待测表面平面度误差轮廓重构算法可以很好地重构出待测表面平面度误差轮廓. 重构后的轮廓与原始轮廓接近重合, 验证了重构算法的正确性.



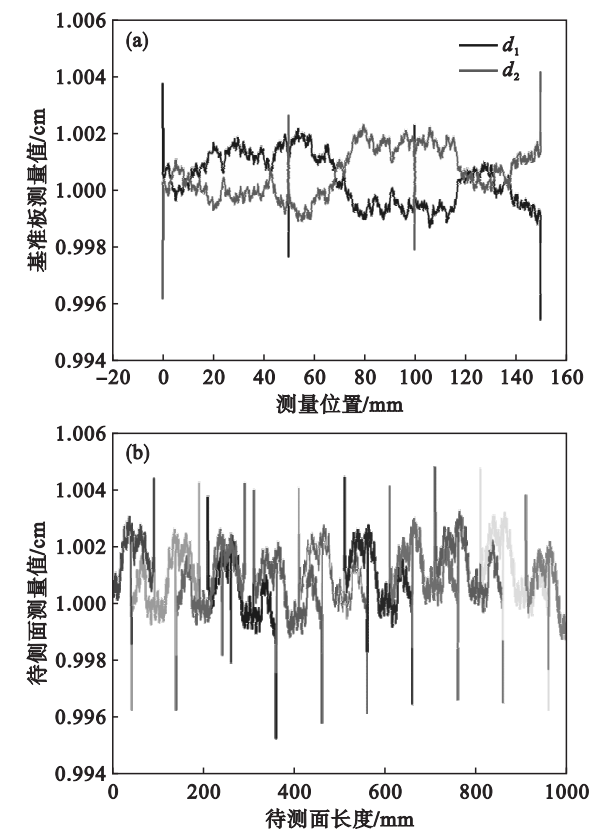


图7 测量值仿真曲线

Fig. 7 Curves of measurement value simulation

(a)—基准板测量值仿真；(b)—待测表面测量值仿真。

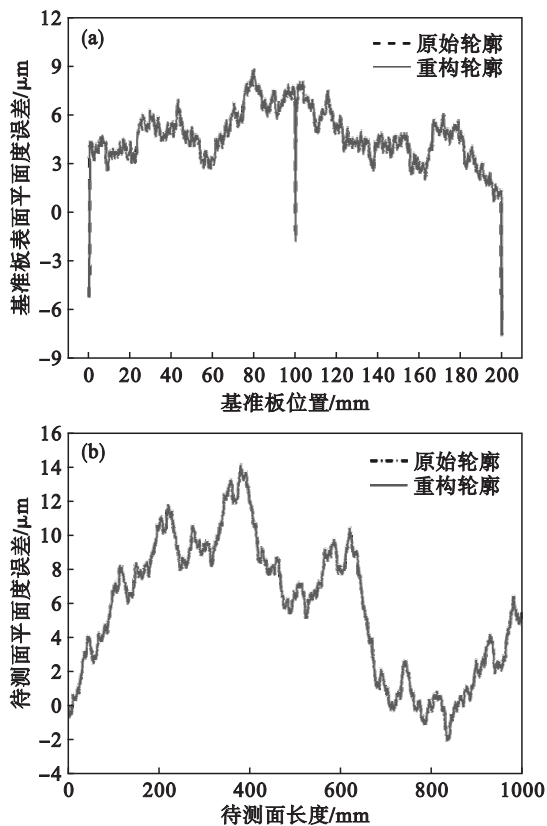


图8 轮廓重构结果

Fig. 8 Results of profile reconstruction

(a)—基准板重构轮廓与原始轮廓比较；

(b)—待测面重构轮廓与原始轮廓比较。

## 4 结 论

1) 本文根据变尺度原理提出一种可以重构表面平面度误差轮廓的新方法. 该方法适用于现场测量, 实现了平面度误差轮廓数字化描述, 解决了机床导轨安装表面检测不便的难题.

2) 根据测量原理开发出机床长导轨安装表面平面误差轮廓重构算法, 其中包含基准板表面平面度误差轮廓重构算法、基准板表面误差轮廓分离算法及最小二乘拼接算法.

3) 通过仿真获得满足测量原理的测量值, 并对重构算法进行验证, 由结果可知算法可以很好地重构出机床导轨安装表面平面度误差轮廓.

## 参考文献：

- [1] 洪军, 郭俊康, 刘志刚, 等. 基于状态空间模型的精密机床装配精度预测与调整工艺[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 114–121.  
(Hong Jun, Guo Jun-kang, Liu Zhi-gang, et al. Assembly accuracy prediction and adjustment process modeling of precision machine tool based on state space model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 114–121.)
- [2] Gao W, Yokoyama J, Kojima H, et al. Precision measurement of cylinder straightness using a scanning multi-probe system[J]. Precision Engineering, 2002, 26(3): 279–288.
- [3] Su H, Hong M S, Li Z J, et al. The error analysis and online measurement of linear slide motion error in machine tools[J]. Measurement Science & Technology, 2002, 13(6): 895–972.
- [4] Vekteris V, Jurevicius M, Striska V. Two-dimensional straightness measurement using optical meter[J]. Optical Engineering, 2008, 47(12): 760–764.
- [5] Fang C, Chen C. Straightness measurement of guide rail based on optical scanning method[J]. Optical Instrument, 2015, 37(2): 95–99.
- [6] 贾立德, 郑子文, 李圣怡, 等. 使用短基准的超精密长导轨直线度误差测量方法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 141–147.  
(Jia Li-de, Zheng Zi-wen, Li Sheng-yi, et al. Measurement method of straightness error of a long ultra-precise guide way with a short benchmark[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 141–147.)
- [7] Cao Y, Li B, Guan J, et al. A study on mutative scale straightness measurement based on uncertainty analysis[J]. Measurement; Journal of the International Measurement Confederation, 2013, 46(1): 145–153.
- [8] El-Sonbaty I A, Khashaba U A, Selmy A I, et al. Prediction of surface roughness profiles for milled surfaces using an artificial neural network and fractal geometry approach[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 200(1): 271–278.
- [9] 杨碧波, 赵文宏, 赵蓉, 等. 大尺寸平面直线度检测方法的研究[J]. 机电工程, 2011, 28(1): 99–102.  
(Yang Bi-bo, Zhao Wen-hong, Zhao Rong, et al. Research on the inspection method of large-scale plane straightness[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(1): 99–102.)