

文章编号 1004-924X(2009)05-1063-09

ISO5436-2 的表面形貌评定基准

崔长彩^{1,2}, 蒋向前^{1,3}, 李小改¹, 刘晓军¹

(1. 华中科技大学 机械学院 仪器系, 湖北 武汉 430074;

2. 华侨大学, 福建 泉州 362021; 3. 哈德斯菲尔德大学 精密技术中心, 英国)

摘要: 为了评价仪器的软件和整体性能, 根据 ISO 软件测量标准 (SoftGauge) 5436-2, 应用过程仿真、以及实测电加工表面和实测珩磨表面得到的标准数据, 研究了采用不同方法获得的表面形貌即粗糙度轮廓的评定基准, 分别为高斯滤波基准、最小二乘中线基准和最小二乘曲线基准。给出了不同基准下 ISO 4287 定义的表面粗糙度轮廓典型参数的评定结果, 包括 R_a 、 R_q 、 R_p 、 R_v 、 R_{sk} 、 R_{ku} 等, 分析了几种基准下各参数相对于标准结果的计算偏差。计算结果表明: 对于仿真数据, 3 种方法的计算精度都比较好, 仅仅参数 R_{sk} 在两个最小二乘基准下偏差较大, 达 50% 左右; 对于电加工表面数据, 高斯基准下的各个参数偏差最小, 其它两种基准下偏差稍大, 而相对偏差较大的是 R_{sk} 和 R_p , 其中 R_{sk} 分别为 3.55% 和 -7.45%, R_p 分别为 -3.45% 和 3.95%; 对于含有跳跃点的珩磨表面, 3 种基准下的评定结果都有较大偏差, 其中求均值运算的 R_a 、 R_q 的偏差稍小, 其它较大, 经过剔除处理后, R_a 、 R_q 偏差仍然相对稍小, R_{sk} 和 R_p 由较大偏差明显减小为稍小偏差, 而 R_{ku} 、 R_p 偏差没有明显改进, 仍约为 40%。总之, 3 种方法对奇异点较敏感, 对无奇异点的粗糙度轮廓的常用参数评定结果基本一致。在评定一般精度、表面无明显周期波纹度成分和较大奇异特征时, 对于常用表面功能评定参数, 如 R_a 、 R_q , 选用原理简单、实现方便的最小二乘拟合基准即可满足要求。

关键词: 粗糙度评定; 基准; 标准数据; ISO5436-2; ISO4287

中图分类号: TH741.3 **文献标识码:** A

Assessment mean lines of surface texture based on ISO5436-2

CUI Chang-cai^{1,2}, JIANG Xiang-qian^{1,3}, LI Xiao-gai¹, LIU Xiao-jun¹

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Huaqiao University, Quanzhou 362021, China; 3. Center for Precision Technology, Huddersfield University, UK)

Abstract: In order to evaluate the performance of software and instruments, the assessment mean lines of roughness profiles are researched by means of Gaussian filtration, least square mean lines and the least square conic fitting on the basis of the software standard ISO 5436-2. And by simulating manufacturing process data, measuring EDM surface data and honing surface data, the typical roughness profile parameters R_a 、 R_q 、 R_p 、 R_v 、 R_{sk} 、 R_{ku} defined in ISO 4287 are assessed and their deviation values from standard results are analyzed. Experimental results indicate that for the simulated process data, the results given by three kinds of mean lines are all better than those of the original ones, except the deviation value of R_{sk} is relatively bigger by 50% or so than that given by the least square method. For the EDM surface data, the deviation values given by the Gaussian filtration are smaller and those given

收稿日期: 2008-06-04; 修订日期: 2008-08-15.

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (No. 20060400247); 华中科技大学博士后科学基金资助项目

by other two least square mean lines are a little bigger. The relatively bigger ones are R_{sk} with relative errors of 3.55% and -7.45% and R_p with relative errors of -3.45% and 3.95% respectively. For the honing surface data, the parameter deviation values are all bigger computed under three mean lines because of the jumping bump, and the deviation values of parameters R_a 、 R_q are relatively smaller, but the others are bigger. After excluding the jumping bump, the deviation values of R_a 、 R_q are still relatively smaller, those of R_{sk} and R_p are minished from big to small, but those of R_{ku} 、 R_p are still 40% or so. It can be concluded that the roughness parameters almost have no distinct difference based on the three mean lines for the profiles without jumping bump. Therefore, for the common precision profile without distinct periodical waveness components and bigger jumping bumps, the typical roughness parameters R_a 、 R_q can be assessed by the least square method which is simple and easy to be realized.

Key words: roughness; evaluation; mean line; standard data; ISO5436-2; ISO4287

1 引言

表面形貌是产品几何特征的重要组成部分。随着对产品精度要求越来越高,除了宏观几何尺寸和形状必须精密测量和控制外,对表面微观形貌参数的测量和评定也提出了更高的要求。表面形貌参数的测量和评定,主要涉及轮廓提取、参数定义、基准计算、轮廓的分离以及参数的具体实现,围绕这些方面人们做了大量的工作^[1-3]。国际标准化组织 ISO TC213 在新一代几何产品规范与认证(GPS)中制定了表面形貌系列标准,旨在规范和指导表面特征的测量和评定,但是在具体理解和实现时仍然存在模糊性、奇异性和不确定性^[4]。随着检测仪器向数字化、自动化和微机化发展,标准中存在的矛盾越来越突出,对于规范参数的定义提出更高的要求,尤其对于实现技术更应该有可操作性强、便于理解的规范。在表面形貌参数的评定中,除了规范参数避免参数爆炸之外评定基准线的获取、评定轮廓的提取是非常重要的问题,一直以来受到国内外学者的关注。ISO 标准通过滤波获取评定轮廓,通过相应的处理可以得到基准线。目前的滤波法包括最小二乘多项式拟合法、滤波法、Motif 法和分形法,各有其特点和适用范围^[4]。除了正确理解标准外,基于计算机的实现算法的合理性也非常重要。为了评判软件的合理性,ISO TC213 提出软件测量标准(SoftGauge)的概念,给出标准数据(类型 F_1)和标准软件(类型 F_2)^[5]。根据 ISO5436-2,英国国家物理实验室(NPL)、Taylor Hobson 公司和英国 Huddersfield 大学精密技术研究中心共同

制定了基于网络的评价系统和标准数据库,其中标准数据包括过程仿真数据、实测电加工和珩磨表面的标准数据^[6]。应用标准数据,本文对于几类粗糙度轮廓基准线的获得方法,通过粗糙度轮廓典型参数的计算进行了比较分析。

2 表面形貌参数评定基准及其实现

2.1 高斯滤波及粗糙度轮廓基准的计算

2.1.1 高斯滤波器的定义

高斯滤波器是国际标准 ISO 11562 唯一的一个滤波器^[7]。高斯滤波器权函数的定义为:

$$s(x) = \frac{1}{\alpha\lambda_{co}} e^{-\pi(\frac{x}{\omega_{co}})^2}, \quad (1)$$

式中 λ 为波长, λ_{co} 为高斯滤波器截止波长,为保证滤波器在截止波长处通过率为 50%,取 $\alpha = 0.4697$ 。

ISO 11562 定义了长波高斯滤波器,即低通高斯滤波器,将高斯权函数进行傅里叶变换可得到低通滤波器的传输特性。对于开放轮廓,这种高斯滤波器是一种连续的加权卷积,其权系数呈典型的高斯钟型分布,其截止波长的传输比是 50%。短波高斯滤波器的定义是表面轮廓与通过长波高斯滤波器所得的长波轮廓成分之差,即可以得到的粗糙度轮廓。

2.1.2 高斯滤波器数值实现方法及粗糙度轮廓参数评定基准

标准中定义的高斯滤波器为连续的权函数,实际测量中得到的被测表面的形貌数据是离散的。因此,ISO 11562-1996 附录 A 中推荐使用

近似离散的方法,但未给出具体实现过程。有两种等价方法可以实现离散高斯滤波,即直接卷积方法和傅里叶变换方法。其中傅里叶变换方法是直接将表面原始形貌的频率特性与滤波频响函数相乘,然后通过傅里叶反变换获取滤波结果。直接卷积方法如下。

通过表面轮廓 $z(x)$ 和高斯权函数 $s(x)$ 的卷积运算可以将表面轮廓 $z(x)$ 分离为高频粗糙度信号 $r(x)$ 和低频信号 $w(x)$ 两部分,即:

$$w(x) = \int_{-\infty}^{\infty} z(\xi)s(x-\xi)d\xi, \quad (2)$$

$$r(x) = z(x) - w(x). \quad (3)$$

在文中,假设在滤波之前已经去除形状误差以及比粗糙度频率成分更高的部分,故可将滤波得到的低频成分即 $w(x)$ 作为粗糙度评定基准。

由卷积运算的性质可知,只有当高斯权函数完全落在采样信号的测量范围内,运算才有效,否则在起始的半个波长和最后的半个波长处存在着边界效应。因此在参数评定时,应去除在轮廓数据首尾半个高斯滤波器截止波长内的数据。

2.2 最小二乘拟合基准

最小二乘拟合方法简单且易于实现,它是表面低频信号成分的近似表示。对于表面含有明显周期成分,如波纹度,拟合轮廓将严重失真。在实际中,通过控制取样长度和评定长度的选区可限制波纹度和形状误差等成分对评定表面粗糙度参数的影响,因此本文假设波纹度的影响可以忽略。

2.2.1 最小二乘直线基准

假设被评定轮廓为直线,对于 n 组测量数据点 (x_i, z_i) (x_i 为沿测量方向, z_i 为垂直于 x_i 且指向材料外面), 设拟合直线方程为 $z = ax + b$, a 和 b 为待确定系数^[8-9]。各点残差平方和为: $\theta(a, b)$

$$= \sum_{i=1}^n (z_i - ax_i - b)^2, \text{ 根据最小二乘原理, 有}$$

$\theta(a, b) \rightarrow \min$ 。目标函数 $\theta(a, b)$ 的自变量为 a 和 b , 分别对 a, b 求偏导数并令其为 0, 即 $\partial\theta/\partial a = 0$, $\partial\theta/\partial b = 0$, 可得拟合直线方程的系数:

$$a = \frac{\overline{xz} - \bar{x} \cdot \bar{z}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}, b = \bar{z} - a\bar{x}. \quad (4)$$

其中, $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i/n$, $\bar{z} = \sum_{i=1}^n z_i/n$, $\overline{x^2} = \sum_{i=1}^n x_i^2/n$,

$$\overline{xz} = \sum_{i=1}^n x_i z_i/n, \text{ 从而得到最小二乘直线基准 } z = ax + b.$$

2.2.2 最小二乘二次曲线基准

假设被评定轮廓为二次曲线,对于 n 组测量数据点 (x_i, z_i) (x_i 为沿测量方向, z_i 为垂直于 x_i 且指向材料外面), 设拟合曲线方程为 $z = ax^2 + bx + c$, 其中 a, b 和 c 为待确定系数。各点残差平方和为: $\theta(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (z_i - ax_i^2 - bx_i - c)^2$, 根据最小二乘原理, 有 $\theta(a, b, c) \rightarrow \min$ 。目标函数 $\theta(a, b, c)$ 的自变量为 a, b 和 c , 分别对 a, b 和 c 求偏导数并令其为 0, 即 $\partial\theta/\partial a = 0$, $\partial\theta/\partial b = 0$, $\partial\theta/\partial c = 0$, 可得拟合曲线方程的系数, 从而得到最小二乘二次曲线基准 $z = ax^2 + bx + c$ 。

根据 GB/T3505, 将测量轮廓减去拟合得到的最小二乘基准线即可得到粗糙度轮廓, 即 $z_i - z(x_i)$, 并在此基础上计算相应的轮廓参数。

3 ISO 5436-2 标准数据

在 ISO 5436-2^[5] 中定义的类型 F_1 —标准数据, 是一个存储于计算机中的用数字描述的表面或轮廓的计算机数据文件。该文件由两部分组成: 轮廓数据和标定结果。 F_1 型测量标准适用于测试软件, 即在测试、校准状态下将其以数据形式输入被测软件, 然后将运行结果与标定结果相比较。

作为软件测量标准, 不仅要有重点和其适用范围, 也应涵盖尽量多的类别, 才能给计算软件以全面的校准。标准数据应该包括的类型有: 通过调查常用表面轮廓得到的数据、标准中的表面轮廓数据、常用加工方式生成的表面轮廓数据。

标准数据的产生方法主要有 3 种: 数学方法产生的正弦和锯齿形波轮廓或其混合轮廓; 测量一个典型样件产生的轮廓; 模拟制造工件的轮廓。

4 标准数据对评定基准的检验

英国国家物理实验室(NPL)与 Taylor Hobson 公司、英国 Huddersfield 大学精密技术研究中心, 共同设计完成了用于校验区域法测量仪器的二维表面形貌评定参数的软件测量标准软件系

统^[6],并制定了较为丰富的类型 F_1 的标准数据库。

本文采用其中几组典型标准数据对不同方法获得的评定基准下的表面粗糙度轮廓典型参数进行了计算,包括数值法产生的标准数据、测量电加工表面得到的标准数据以及测量珩磨表面得到的标准数据,以求得包含不同来源、不同精度和不同特征的标准数据。其中模拟数据的精度和特征便于软件计算的比较;实测数据则更体现实际测量中的不确定性因素,很多情况不可同时选用两种典型的精加工方法。珩磨表面包括一些奇异特征点,可以验证算法的适用性。

4.1 数值法生成的标准数据

模拟制造过程轮廓,生成取样间隔 $1 \mu\text{m}$,评定长度 5.60 mm 的一个粗糙高斯轮廓。其中高

斯滤波器截止波长为 0.8 mm ,取样长度为 0.8 mm 。通过高斯滤波得到的基准线是一条连续曲线,如图 1 和图 2 中的连续基准曲线。分段采用最小二乘法求其中线,如图 1 所示。将分段直线分别采用最小二乘二次曲线法求其中线,图 2 所示是分段的曲线。

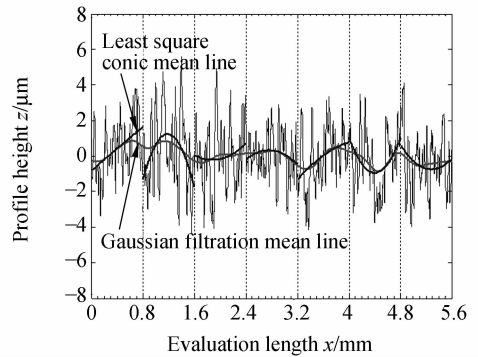


图 2 实例 1 高斯滤波基准和二次最小二乘基准线
Fig. 2 Gaussian filtration and least square conic mean lines for case 1

表 1 列出 3 种方法得到的基准下 ISO4287 粗糙度轮廓主要参数的评定结果,其中高斯滤波法由于边界效应舍去整个评定长度首尾两端,最后结果是 5 段取样长度上计算结果的均值。其它两种则是 7 段取样长度的评定结果均值。表 2 则列出几种中线基准下的计算结果偏差:(评定结果-标准参考结果)/标准参考结果,其中标准参考结果引自网站文献^[6]。

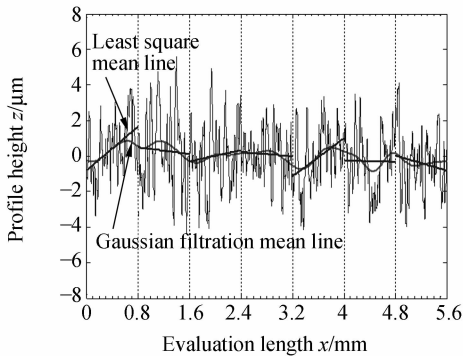


图 1 实例 1 高斯滤波基准和最小二乘基准线
Fig. 1 Gaussian filtration and least square mean lines for case 1

表 1 3 种滤波基准及典型粗糙度轮廓参数

Tab. 1 Three mean lines and main roughness parameters

粗糙度轮廓参数	标准参考结果 ^[6]	高斯滤波基准	最小二乘中线	最小二乘曲线
算术平均偏差 R_a	1.290 850 646 551 473	1.290 9	1.292 1	1.255 2
最大峰高 R_p	3.949 769 995 153 952 4	3.949 7	3.987 1	3.947 9
最大谷深 R_v	3.676 005 905 552 950 4	3.676 1	3.666 9	3.667 9
均方根偏差 R_q	1.586 969 271 487 674 9	1.587 0	1.596 6	1.549 9
偏斜度 R_{sk}	0.075 188 795 705 683 9	0.075 1	0.111 1	0.117 6
陡峭度 R_{ku}	2.677 227 703 511 459 6	2.677 2	2.652 9	2.709 8

注:偏斜度 R_{sk} 和陡峭度 R_{ku} 无单位。

表 2 3 种滤波基准及其典型参数偏差对比

Tab. 2 Three mean lines and parameter relative warps

粗糙度轮廓参数	R_a	R_p	R_v	R_q	R_{sk}	R_{ku}
高斯滤波基准	-0.01	0.002 686 3	-0.003 322 3	-0.001 495 0	0.056 034	-0.000 070 870
最小二乘中线	-0.094 022	-0.95	0.25	0.61	-47.70	0.91
最小二乘曲线	2.76	0.046 670	0.22	2.33	-56.40	-1.22

4.2 测量电加工表面得到的标准数据

对一个电加工表面进行测量, 取样间隔为 $0.25 \mu\text{m}$, 评定长度为 5.6 mm 。高斯滤波器截止波长为 0.8 mm , 取样长度为 0.8 mm 。 R_a 标称值 $0.1 \mu\text{m}$ 。

通过高斯滤波得到的基准线是一条连续曲线, 如图 3 和图 4 中的连续基准曲线。分段采用最小二乘法求其中线, 如图 3 所示, 是分段的直线。分段采用最小二乘二次曲线法求其中线, 图 4 所示是分段的曲线。

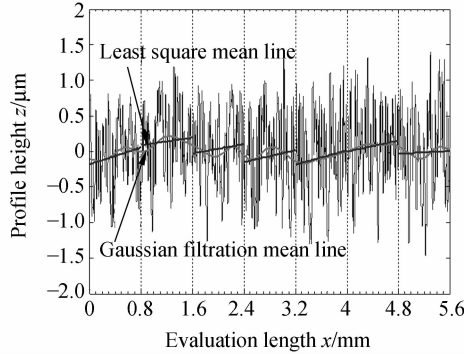


图 3 实例 2 高斯滤波基准和最小二乘基准线
Fig. 3 Gaussian filtration and least square mean lines for case 2

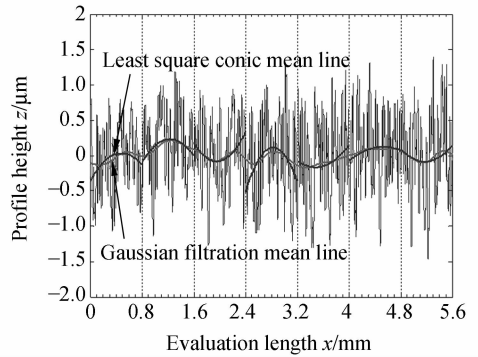


图 4 实例 2 高斯滤波基准和二次最小二乘基准线
Fig. 4 Gaussian filtration and least square conic mean lines for case 2

表 3 列出 3 种方法得到的基准下 ISO 4287 粗糙度轮廓主要参数的评定结果。其中高斯滤波法由于边界效应舍去首尾两端, 最后结果是 5 段取样长度上计算结果的均值, 其它两种则是 7 段取样长度的评定结果均值。表 4 则列出几种中线基准下的计算结果偏差: (评定结果 - 标准参考结果) / 标准参考结果^[6]。

表 3 3 种滤波基准及典型粗糙度轮廓参数

Tab. 3 Three mean lines and main roughness parameters

粗糙度轮廓参数	标准参考结果 ^[6]	高斯滤波基准	最小二乘中线	最小二乘曲线
算术平均偏差 R_a	0.449 659 863 380 682 26	0.449 7	0.459 2	0.452 2
最大峰高 R_p	1.127 316 205 919 676 9	1.127 3	1.166 2	1.171 8
最大谷深 R_v	1.218 697 755 630 949 5	1.218 7	1.246 8	1.237 1
均方根偏差 R_q	0.539 018 625 787 880 4	0.539 0	0.550 2	0.542 6
偏斜度 R_{sk}	-0.112 545 613 451 390 89	-0.112 5	-0.108 5	-0.120 9
陡峭度 R_{ku}	2.293 044 799 866 293 3	2.293 1	2.276 4	2.338 7

注: 偏斜度 R_{sk} 和陡峭度 R_{ku} 无单位。

表 4 3 种滤波基准及其典型参数偏差对比

Tab. 4 Three mean lines and parameter relative warps

粗糙度轮廓参数	R_a	R_p	R_v	R_q	R_{sk}	R_{ku}
高斯滤波基准	0.000 0	0.000 035 233	0.000 442 2	-0.000 020 250	0.000 081 965	-0.000 398 13
最小二乘中线	-2.12	-3.45	-2.31	-2.08	3.55	0.73
最小二乘曲线	-0.57	-3.95	-1.51	-0.67	-7.45	-1.99

4.3 测量珩磨表面得到的标准数据

测量一个珩磨工件表面, 取样间隔为 $0.25 \mu\text{m}$, 评定长度为 5.6 mm , 含有个别较大跳跃点。高斯滤波器截止波长为 0.8 mm , 取样长

度为 0.8 mm 。 R_a 标称值为 $0.1 \mu\text{m}$ 。

通过高斯滤波得到的基准线是一条连续曲线, 如图 5 和图 6 中的连续基准曲线。分段采用最小二乘法求其中线, 图 5 所示是分段的直线。

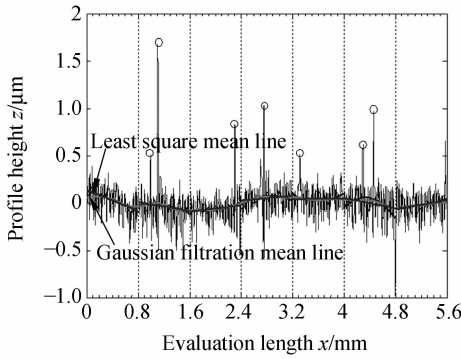


图 5 实例 3 高斯滤波基准和最小二乘基准线

Fig. 5 Gaussian filtration and least square mean lines for case 3

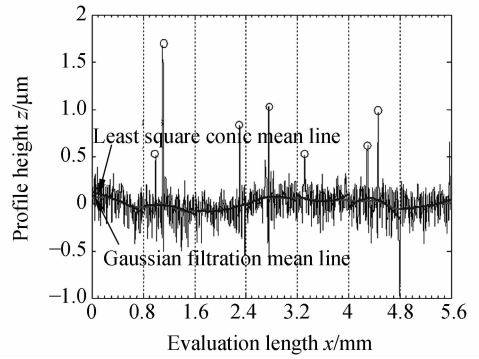


图 6 实例 3 高斯滤波基准和二次最小二乘基准线

Fig. 6 Gaussian filtration and least square conic mean lines for case 3

分段采用最小二乘二次曲线法求其中线,图 6 所示是分段的曲线。

表 5 列出 3 种方法得到的基准下 ISO4287 粗糙度轮廓主要参数的评定结果。其中高斯滤波法由于边界效应舍去首尾两端,最后结果是 5 段取

样长度上计算结果的均值,其它两种则是 7 段取样长度的评定结果均值。表 6 则列出几种中线基准下的计算结果偏差:(评定结果-标准参考结果)/标准参考结果^[6]。

表 5 3 种滤波基准及典型粗糙度轮廓参数

Tab. 5 Three mean lines and main roughness parameters

粗糙度轮廓参数	标准参考结果 ^[6]	高斯滤波基准	最小二乘中线	最小二乘曲线
算术平均偏差 R_a	0.106 498 487 302 081 4	0.104 8	0.102 4	0.101 9
最大峰高 R_p	0.299 297 722 966 744 2	0.983 0	0.844 2	0.826 9
最大谷深 R_v	0.934 016 250 722 088 8	0.593 0	0.583 5	0.575 7
均方根偏差 R_q	0.156 092 649 832 782 98	0.158 6	0.150 3	0.148 7
偏斜度 R_{sk}	-1.833 846 916 221 696	1.289 5	0.777 8	0.692 7
陡峭度 R_{ku}	9.782 123 125 365 043	13.357 4	11.361 2	10.984 3

注:偏斜度 R_{sk} 和陡峭度 R_{ku} 无单位。

表 6 3 种滤波基准及其典型参数偏差对比

Tab. 6 Three mean lines and parameter relative warps

粗糙度轮廓参数	R_a	R_p	R_v	R_q	R_{sk}	R_{ku}
高斯滤波基准	1.63	-228.43	36.51	-1.59	170.31	-36.55
最小二乘中线	3.88	-182.06	37.53	3.70	142.41	-16.14
最小二乘曲线	4.31	-176.26	38.36	4.71	137.77	-12.29

4.4 将 4.3 剔除跳跃点后的珩磨表面数据

4.3 珩磨表面剔除极大跳跃点后的粗糙度轮廓及其评定基准如图 7 和图 8 所示,其中图 7 是高斯基准和最小二乘直线基准,图 8 是高斯滤波基准和最小二乘二次曲线基准,表 7 和表 8 是主要粗糙度轮廓参数计算的结果和偏差。

4.5 图表计算结果分析

由 4.1~4.3 可以得到以下结果:

(1)根据图 1~6 可见,在整个评定长度上高斯滤波基准线是一条连续的基准线,而最小二乘基准线是间断的,不连续的;

(2)由表 1 和表 2 可见,对于第一组数据,除了

R_{sk} 之外各个参数在 3 种基准下的评定结果相似, 其中高斯基准下的偏差最小, 其它两种稍大。最小二乘基准下偏差较大的参数 R_{sk} 达 50% 左右;

(3) 由表 3 和表 4 可见, 对于第二组数据, 高斯基准下的各个参数偏差最小, 其它两种偏差稍大, 而相对稍大偏差是 R_{sk} 和 R_p , 对于直线和曲线基准 R_{sk} 分别为 3.55% 和 -7.45%, R_p 分别为

-3.45% 和 3.95%;

(4) 由表 5 和表 6 可见, 对于第二组具有跳跃点的数据, 3 种方法的评定结果都不是很理想, 从偏差来看, 仅具有求均值运算的参数 R_a, R_q 受到的影响较小, 其中高斯滤波基准稍好, 其他参数包括 R_{sk} 和 R_p , 还有 R_v, R_{ku} 偏差都较大, 其中 R_{sk} 和 R_p 最高达约 200%, R_v, R_{ku} 偏差可达约 40%。

表 7 3 种滤波基准及典型粗糙度轮廓参数

Tab. 7 Three mean lines and main roughness parameters

粗糙度轮廓参数	标准参考结果 ^[6]	高斯滤波基准	最小二乘中线	最小二乘曲线
算术平均偏差 R_a	0.106 498 487 302 081 4	0.092 9	0.092 9	0.092 6
最大峰高 R_p	0.299 297 722 966 744 2	0.376 3	0.346 4	0.338 9
最大谷深 R_v	0.934 016 250 722 088 8	0.573 5	0.572 1	0.560 6
均方根偏差 R_q	0.156 092 649 832 782 98	0.123 2	0.122 9	0.122 1
偏斜度 R_{sk}	-1.833 846 916 221 696	-0.785 5	-0.823 5	-0.812 4
陡峭度 R_{ku}	9.782 123 125 365 043	5.474 1	5.509 6	5.304 4

注: 偏斜度 R_{sk} 和陡峭度 R_{ku} 无单位。

表 8 3 种滤波基准及其典型参数偏差对比

Tab. 8 Three mean lines and parameter relative warps

粗糙度轮廓参数	R_a	R_p	R_v	R_q	R_{sk}	R_{ku}
高斯滤波基准	12.77	-25.72	38.60	21.07	57.17	44.04
最小二乘中线	12.76	-15.73	38.75	21.29	55.10	43.68
最小二乘曲线	13.01	-13.23	39.97	21.80	55.70	45.77

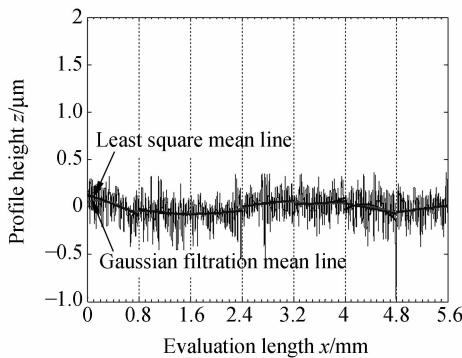


图 7 实例 3 去除跳跃点后高斯滤波基准和最小二乘基准线

Fig. 7 Gaussian and least square mean lines for case 3 after excluding jumping bump lines

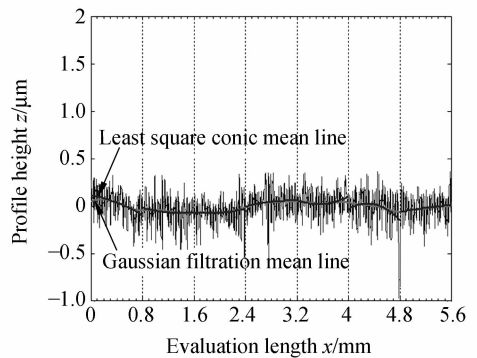


图 8 实例 3 去除跳跃点高斯滤波基准和二次最小二乘基准线

Fig. 8 Gaussian filtration and least square conic mean lines for case 3 after excluding jumping bump

(5) 分析图 7、8 可见, 去除个别较大跳跃区域点(每个点实际上是一个小区域)后的轮廓, 通过上述方法得到的 3 种基准的特征仍如先前, 高斯

基准是各取样长度上边界连续的, 而其它两种是间断的。从表 7、8 可见, 3 种方法的计算效果基本相似, 由于去除个别较大跳跃点区域的方法没

有标准的做法,故与标准结果的比较本身就不够严谨,仅仅只是参考。从结果可见,不仅最小二乘基准,而且高斯滤波基准受奇异特征信号的影响都较大,仍然仅仅是具有求均值运算的参数 R_a , R_q 受到的影响较小,不过比去除前的结果稍大,而 R_{sk} 和 R_p 偏差都明显变小,分别在 30%, 60% 以下, R_v 、 R_{ku} 偏差基本未变,保持在 40% 左右。

5 结 论

从上述粗糙度轮廓基准的定义和实现以及参数计算可见,各种方法的选用具有一定的条件,对于具有奇异点或者有较大形状误差的表面不能

直接选用高斯滤波方法,使用之前必须去除。对于一般的规则无明显周期成分和奇异点的工程表面,采用简单的最小二乘中线法计算其表面典型形貌参数,如轮廓算数平均偏差 R_a 、轮廓均方根偏差 R_q 等,是可以满足要求的,可以充分发挥其原理简单,实现方便等特点。对于精度较高的表面选用 ISO11562 建议的高斯滤波基准较为合适。而新标准新方法在定义和实现,特别是基于计算机技术的实现等方面目前还存在很多不完善的地方,使用时要谨慎。对于其它不常用的轮廓参数还需要做进一步的计算分析。三维表面形貌参数评定基准的研究也是目前国内外研究的热点,还存在大量研究课题。

参考文献:

- [1] 戴蓉, 谢铁邦. 新型一维位移工作台的设计及特性分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 428-433.
DAI R, XIE T B. Design and analysis of 1-DOF nano-positioning stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 428-433. (in Chinese)
- [2] JIANG X Q, BLUNT L, STOUT K J. Application of the lifting wavelet to rough surfaces[J]. *Precision Engineering*, 2001, 25 (2): 83-89.
- [3] YUAN Y B, QIANG X F, SONG J F, *et al.*. Fast algorithm for determining the Gaussian filtered mean line in surface metrology[J]. *Precision Engineering*, 2000, 24(1): 62-69.
- [4] 蒋向前. 新一代 GPS 标准理论与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
JIANG X Q. *Theory and Application of New-Generation Geometrical Product Specification*[M]. Beijing: High Education Press, 2007. (in Chinese)
- [5] British Standards Institution. ISO 5436-2 Geometrical product specifications surface texture: profile method; measurement standards-part 2: software measurement standards[S]. London: BSI, 2003.
- [6] Softgauges for Surface topography[EB/OL]. <http://161.112.232.32/softgauges>
- [7] British Standards Institution. ISO 11562 Geometric product specifications-surface texture: profile method - metrological characteristics of phase correct filters[S]. London: BSI, 1998.
- [8] 黄富贵, 崔长彩. 评定直线度误差的最小二乘法与最小包容区域法精度之比较[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 889-893.
HUANG F G, CUI CH C. Comparison of evaluating precision of straightness error between least square method and least envelope zone method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (6): 889-893. (in Chinese)
- [9] CUI CH C, YE D, HUANG Q C, *et al.*. Precise computation of planar straightness error using genetic algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11 (4): 374-378.

作者简介:



崔长彩(1972—),女,山东胶南人,工学博士,副教授,1996年于佳木斯大学获学士学位,2003年于哈尔滨工业大学获博士学位,现为华中科技大学博士后,国立华侨大学副教授,主要从事精密测量技术等方面的教学与研究工作。E-mail: cuichc@hotmail.com



李小改(1982—),女,河南漯河人,2005年于吉林大学获学士学位,2008年于华中科技大学获硕士学位,目前在瑞典皇家工学院攻读博士学位,主要从事新一代GPS表面滤波和软件量规以及生物力学方面的研究。E-mail: Xiaogai.Li@sth.kth.se



蒋向前(1955—),女,江苏常州人,教授,博士生导师,长江学者,1995年于原华中理工大学获得博士学位,现为华中科技大学教授,英国Huddersfield大学终身教授,主要研究方向为微纳米表面形貌评定技术与表面计量学,新一代GPS标准计量基础理论与技术等。E-mail: x.jiang@vip.163.com



刘晓军(1968—),男,湖北人,1990年于哈尔滨工业大学获学士学位,2003年于香港科技大学获博士学位,现为华中科技大学机械学院副教授,主要从事光电检测、精密测量、精密工程等方面的研究。E-mail: mexjl@hust.edu.cn

●下期预告

MEMS 复合式振动能量采集器

张杨键,任 婧,伞海生,陈旭远

(厦门大学 萨本栋微机电研究中心,福建 厦门 361005)

介绍了一种结合了压电式能量采集器与静电式能量采集器原理的复合式振动能量采集器。其结构通过有限元分析软件的优化设计,得到了期望的低频共振频率。为了预测这个复合式振动能量采集器的性能,建立了解析模型,在此基础上使用 MATLAB/SIMULINK 进行了数值模拟。模拟结果显示,在某些特定的频率范围内,这种复合式振动能量采集器能够提供比其他两种能量采集器更高的输出功率。仿真发现对于固有频率为 282 Hz 的器件结构,复合式设计的输出功率可达 $4.85 \mu\text{W}$,两倍于电容式设计的输出功率 $2.11 \mu\text{W}$ 。