



中华人民共和国国家标准

GB/T 26958.21—2020/ISO 16610-21:2011

产品几何技术规范(GPS) 滤波 第21部分:线性轮廓滤波器 高斯滤波器

Geometrical product specifications (GPS)—Filtration—
Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters

(ISO 16610-21:2011, IDT)

2020-12-14 发布

2021-07-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 开放轮廓的高斯轮廓滤波器特性 2

5 闭合轮廓的高斯轮廓滤波器特性 5

附录 A（资料性附录） 开放和闭合轮廓滤波的执行误差（卷积算法） 8

附录 B（资料性附录） 示例 12

附录 C（资料性附录） 与滤波矩阵模型的关系 13

附录 D（资料性附录） 与 GPS 矩阵模型的关系 14

参考文献 15

前 言

GB/T 26958《产品几何技术规范(GPS) 滤波》分为 89 部分,已发布的有以下 12 个部分:

- 第 1 部分:概述和基本概念;
- 第 20 部分:线性轮廓滤波器 基本概念;
- 第 21 部分:线性轮廓滤波器 高斯滤波器;
- 第 22 部分:线性轮廓滤波器 样条滤波器;
- 第 28 部分:轮廓滤波器 端部效应;
- 第 29 部分:线性轮廓滤波器 样条小波;
- 第 30 部分:稳健轮廓滤波器 基本概念;
- 第 31 部分:稳健轮廓滤波器 高斯回归滤波器;
- 第 32 部分:稳健轮廓滤波器 样条滤波器;
- 第 40 部分:形态学轮廓滤波器 基本概念;
- 第 41 部分:形态学轮廓滤波器 圆盘和水平线段滤波器;
- 第 49 部分:形态学轮廓滤波器 尺度空间技术。

本部分为 GB/T 26958 的第 21 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用 ISO 16610-21:2011《产品几何技术规范(GPS) 滤波 第 21 部分:线性轮廓滤波器 高斯滤波器》。

与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下:

- JJF 1001—2011 通用计量术语及定义(ISO/IEC Guide 99:2007,MOD);
- JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示(ISO/IEC Guide 98-3:2008,MOD)。

本部分做了下列编辑性修改:

- 将附录 D 按 GB/T 20308—2020 的要求进行重新编写。

本部分由全国产品几何技术规范标准化技术委员会(SAC/TC 240)提出并归口。

本部分起草单位:华中科技大学、陕西威尔机电科技有限公司、北京时代之峰科技有限公司、山东道先为智能科技有限公司、上海市计量测试技术研究院、中机生产力促进中心、江苏锐精光电研究院有限公司。

本部分主要起草人:卢文龙、张涛、郎岩梅、明翠新、郝建国、瞿潮庆、朱悦、陈刚。

产品几何技术规范(GPS) 滤波

第 21 部分:线性轮廓滤波器 高斯滤波器

1 范围

GB/T 26958 的本部分规定了高斯滤波器用于轮廓滤波的计量特性,给出了分离表面轮廓长波与短波成分的方法。

本部分适用于表面轮廓粗糙度特征提取操作,其他信号滤波分析场合可参考采用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/Z 26958.1—2011 产品几何技术规范(GPS) 滤波 第 1 部分:概述和基本概念(ISO/TS 16610-1:2006,IDT)

GB/Z 26958.20—2011 产品几何技术规范(GPS) 滤波 第 20 部分:线性轮廓滤波器 基本概念(ISO/TS 16610-20:2006,IDT)

ISO/IEC 指南 98-3:2008 测量不确定度评定与表示[Uncertainty of measurement—Part 3:Guide to the expression of uncertainty in measurement(GUM:1995)]

ISO/IEC 指南 99:2007 通用计量术语及定义[International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms(VIM)]

3 术语和定义

GB/Z 26958.1、GB/Z 26958.20、ISO/IEC 指南 98-3 和 ISO/IEC 指南 99 界定的术语和定义适用于本文件。为了便于使用,以下重复列出了 GB/Z 26958.1 和 GB/Z 26958.20 中的某些术语和定义。

3.1

线性轮廓滤波器 linear profile filter

将轮廓分为长波和短波成分的轮廓滤波器。

[GB/Z 26958.20—2011,定义 3.1]

3.2

开放轮廓 open profile

具有两个端点且长度有限的表面轮廓。

[GB/Z 26958.1—2011,定义 3.7]

3.3

闭合轮廓 closed profile

没有端点且长度有限的表面轮廓。

[GB/Z 26958.1—2011,定义 3.8]

3.4

截止波长 cut-off wavelength

通过轮廓滤波器后,幅值衰减 50%的正弦轮廓的波长。

[GB/Z 26958.20—2011,定义 3.5]

4 开放轮廓的高斯轮廓滤波器特性

4.1 开放轮廓滤波的高斯权函数

开放轮廓高斯滤波的权函数(见图 1)有一个截止波长 λ_c 的高斯函数表达式,c 是截止之意。表达式为:

$$s(x) = \frac{1}{a\lambda_c} \exp \left[-\pi \left(\frac{x}{a\lambda_c} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (1)$$

式中:

x ——距权函数中心(最大)的距离;

λ_c ——截止波长;

a ——常数,此时截止波长 λ_c 处有 50%传输特性。

应用中,权函数表达式为:

$$s(x) = \begin{cases} \frac{1}{a\lambda_c} \exp \left[-\pi \left(\frac{x}{a\lambda_c} \right)^2 \right] & -L_c\lambda_c \leq x \leq L_c\lambda_c \\ 0 & x < -L_c\lambda_c, x > L_c\lambda_c \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

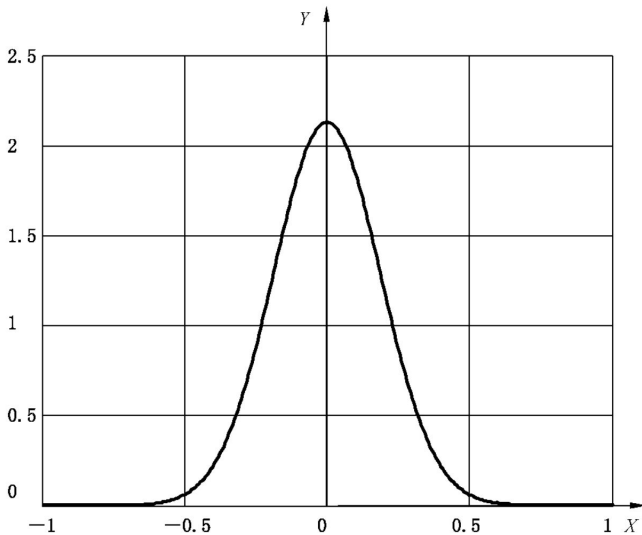
式中:

L_c ——权函数的截取常数(参见附录 A 推荐值);

a 为

$$a = \sqrt{\ln 2 / \pi} \approx 0.469\ 7 \dots\dots\dots (3)$$

权函数图形显示如图 1。



说明:

X —— x/λ_c ;

Y —— $\lambda_c \times s(x)$ 。

图 1 开放轮廓的高斯轮廓滤波器权函数

4.2 开放轮廓的传输特性

4.2.1 开放轮廓长波成分的传输特性

传输特性(见图 2)由权函数的傅立叶变换得到。长波成分(中线)的传输特性由式(4)表示:

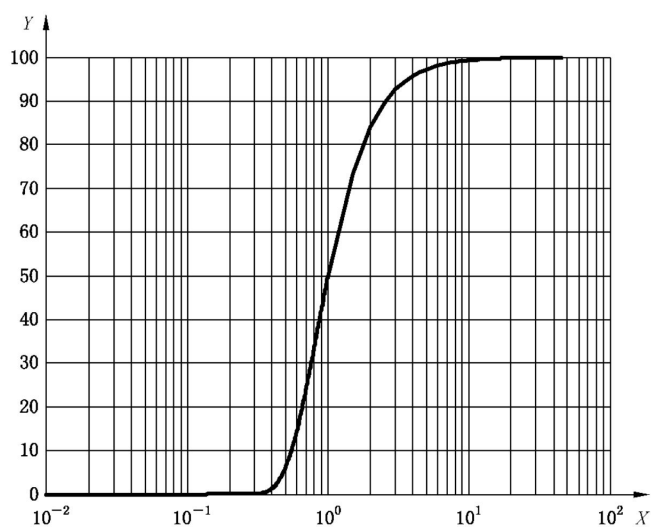
$$\frac{a_1}{a_0} = \exp \left[-\pi \left(\frac{a\lambda_c}{\lambda} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

a_1 ——长波成分(中线)中(波长 λ 的)正弦轮廓幅值;

a_0 ——滤波前(波长 λ 的)正弦轮廓幅值;

λ ——正弦轮廓的波长。



说明:

X —— λ/λ_c ;

Y ——幅值传输比例 a_1/a_0 的百分数表示。

图 2 开放轮廓高斯滤波器的长波传输特性

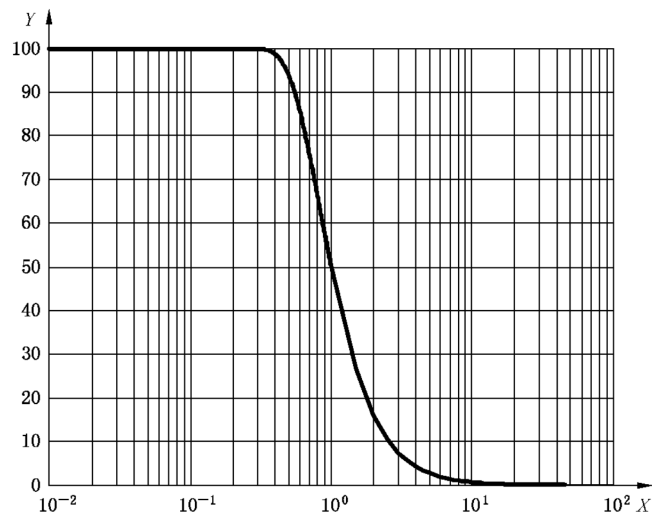
4.2.2 开放轮廓短波成分的传输特性

传输特性(见图 3)由权函数的傅立叶变换得到,它是长波轮廓成分传输特性的补,由式(5)表示:

$$\frac{a_2}{a_0} = 1 - \exp \left[-\pi \left(\frac{a\lambda_c}{\lambda} \right)^2 \right] \quad \frac{a_2}{a_0} = 1 - \frac{a_1}{a_0} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

a_2 ——短波成分中(波长 λ 的)正弦轮廓幅值。



说明:

X —— λ/λ_c ;

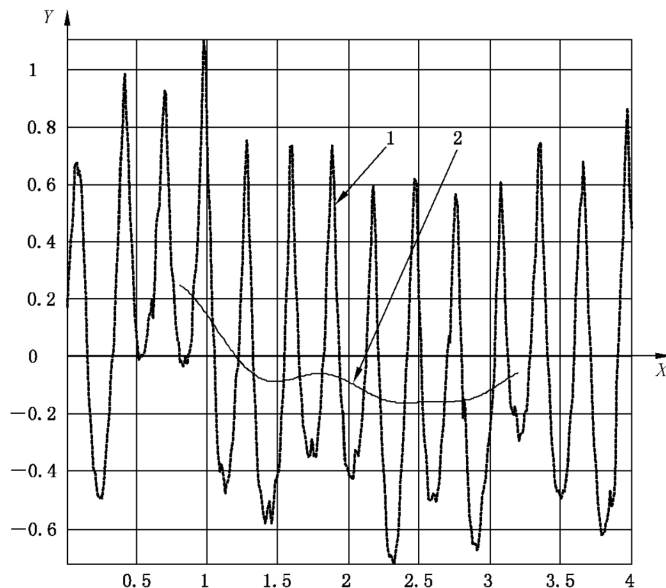
Y —— 幅值传输比例 a_2/a_0 的百分数表示。

图 3 开放轮廓高斯滤波器的短波传输特性

4.3 端部效应

因为开放轮廓只定义有限长度,高斯滤波器与开放轮廓的卷积将在轮廓端部滤波响应中引起非趋势性的改变(称为端部效应)。开放轮廓上发生显著端部效应的部分称为端部效应区域。

减少这种端部效应的方法,是取较长的一段轮廓进行高斯滤波,然后去除端部效应区域,进而得到无显著端部效应的滤波响应(见图 4)。



说明:

1 —— 未滤波的轮廓;

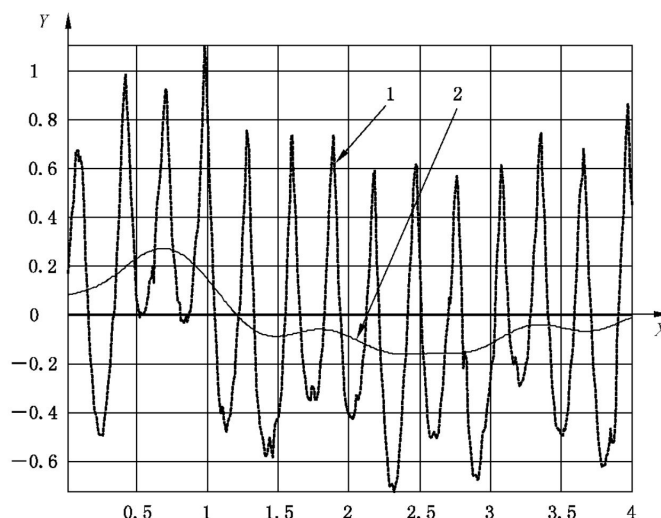
2 —— 已滤波的轮廓;

X —— 长度, mm ;

Y —— 高度, μm 。

图 4 去除端部效应区域的高斯滤波($\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$)例子

可供选择的减小端部效应的另外方法参见 GB/T 26958.28。图 5 给出了一个示例。



说明:

1 —— 未滤波的轮廓;

2 —— 已滤波的轮廓;

X —— 长度, mm;

Y —— 高度, μm 。

图 5 使用 GB/T 26958.28 矩保持准则高斯滤波($\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$)示例

5 闭合轮廓的高斯轮廓滤波器特性

5.1 说明

如果轮廓长度(周长)小于 $2\lambda_c$, 不推荐使用闭合轮廓滤波器。

5.2 闭合轮廓滤波的高斯权函数

闭合轮廓滤波器的权函数(见图 6)是限定在长度为 L 的闭合轮廓内的高斯密度函数。当选取截止频率为 $f_c = L/\lambda_c$, 其表达为:

$$s(x) = \begin{cases} \frac{f_c}{aL} \exp\left[-\pi\left(\frac{xf_c}{aL}\right)^2\right] & -\frac{L_c L}{f_c} \leq x \leq \frac{L_c L}{f_c} \\ 0 & x < -\frac{L_c L}{f_c}, x > \frac{L_c L}{f_c} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

x —— 沿闭合轮廓距高斯权函数中心(最大)的距离;

f_c —— 以每周波数表示的截止频率;

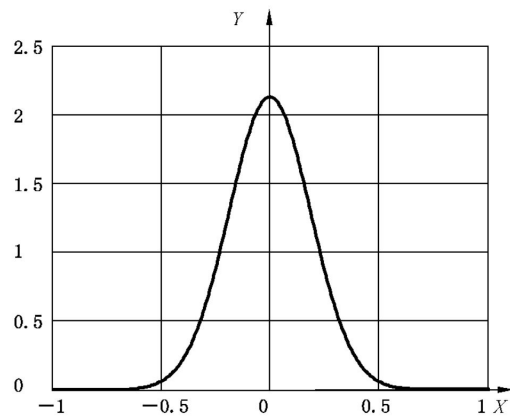
L —— 闭合轮廓的长度;

L_c —— 截取常数(参见附录 A);

a —— 常数。

$$a = \sqrt{\ln 2 / \pi} \approx 0.469 \ 7 \quad \dots\dots\dots (7)$$

图 6 中显示闭合轮廓滤波器的权函数图。



说明:

X —— $(f_c/L)x$;

Y —— $(L/f_c)s(x)$ 。

图 6 闭合高斯轮廓滤波器的权函数

5.3 闭合轮廓滤波器的传输特性

5.3.1 闭合轮廓长波成分的传输特性

滤波特性(见图 7)由权函数的傅立叶变换得到,当 $\lambda_c \ll L$ 时,滤波中线的传输特性由下式近似表示:

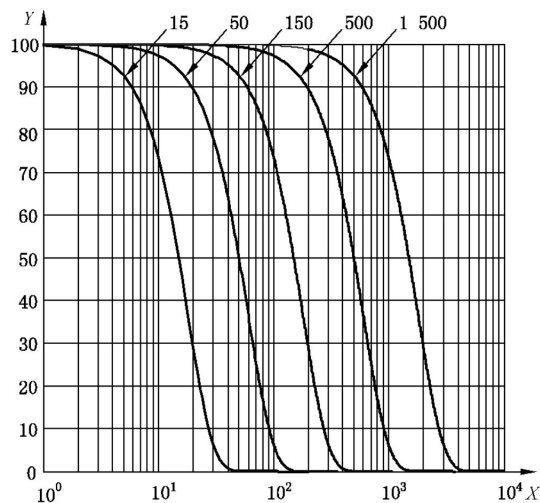
$$\frac{a_1}{a_0} = \exp \left[-\pi \left(\frac{af}{f_c} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

a_1 ——长波成分(中线)中(频率 f 的)正弦轮廓的幅值;

a_0 ——滤波前(频率 f 的)正弦轮廓的幅值;

f ——以每周波数表示的正弦轮廓频率。



说明:

X ——每周波数(UPR);

Y ——幅值传输比例 a_1/a_0 的百分数表示。

图 7 不同截止频率(UPR 表示)下闭合轮廓滤波器的长波传输特性

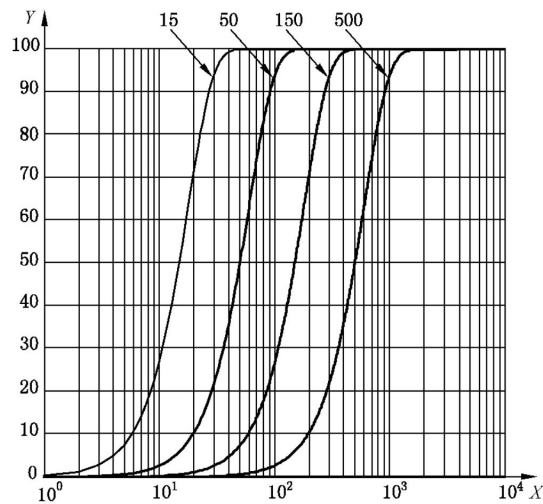
5.3.2 闭合轮廓短波成分的传递特性

短波轮廓成分的传输特性(见图 8)是长波轮廓成分传输特性的补。短波轮廓成分是原始表面轮廓与长波轮廓成分的差。当极限波长 $\lambda_c \ll L$ 时,传输特性表达式近似为:

$$\frac{a_2}{a_0} = 1 - \exp\left[-\pi\left(\frac{af}{f_c}\right)^2\right] \quad \frac{a_2}{a_0} = 1 - \frac{a_1}{a_0} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

a_2 ——短波中(频率 f 的)正弦轮廓的幅值。



说明:

X ——每周波数(UPR);

Y ——幅值传输比例 a_2/a_0 的百分数表示。

图 8 不同截止频率(UPR 表示)下闭合轮廓短波成分的传输特性

附录 A (资料性附录)

开放和闭合轮廓滤波的执行误差(卷积算法)

A.1 开放轮廓

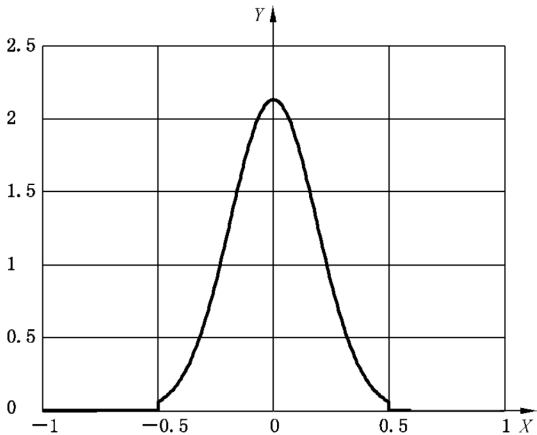
理论上,开放轮廓的高斯权函数从负无穷大到正无穷大都取正值,即有无限支撑。但是高斯权函数随着离开中心会快速地接近零,因此,在应用中,足够远离中心的区域实际都为零。换言之,高斯权函数在任何实际执行中都具有有限的支撑。这相当于执行截取高斯权函数,其中开放轮廓的截取高斯权函数定义为:

$$\tilde{s}(x) = \begin{cases} 0 & x < -L_c \times \lambda_c \\ s(x) & -L_c \times \lambda_c \leq x \leq L_c \times \lambda_c \\ 0 & x > L_c \times \lambda_c \end{cases} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

- x ——距高斯权函数中心的距离;
- λ_c ——截止波长;
- L_c ——截取常数。

图 A.1 为一个开放轮廓的截取高斯权函数的例子。



说明:

- X —— x/λ_c ;
- Y —— $\lambda_c \times \tilde{s}(x)$ 。

图 A.1 $L_c=0.5$ 的截取高斯权函数应用于开放轮廓的例子

截取权函数是对真正的高斯权函数的近似,因此当用截取权函数执行卷积时,与执行真正的高斯权函数的卷积相比总是存在误差。截取常数 L_c 应该合理选择,使该执行误差处于应用中可接受的水平。注意,执行误差不同于由端部效应引起的误差(参见 GB/T 26958.28),并且也不包括由于高斯滤波器的数字实现而引起的误差。

A.2 提供了给定截取常数 L_c 时执行误差所需的数学计算。

A.2 开放轮廓的数学计算

从数学上讲,权函数截取有限区间^[6]可以用相乘一个矩形函数来描述,因此,截取有限区间的权函

数表示为：

$$\tilde{s}(x) = s(x) \times r(L_c, x) \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

$s(x)$ —— 高斯权函数；

$\tilde{s}(x)$ —— 截取高斯权函数；

$r(L_c, x)$ —— 矩形函数, 定义如下：

$$r(L_c, x) = \begin{cases} 1 & -L_c\lambda_c \leq x \leq L_c\lambda_c \\ 0 & x < -L_c\lambda_c, x > L_c\lambda_c \end{cases} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

执行误差被定义为截取高斯权函数的传递函数与高斯权函数的传递函数的最大偏差。

截取高斯权函数的傅里叶变换是：

$$\tilde{S}(\omega) = (S * R)(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(v) \times R(L_c, \omega - v) dv \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

$S(v)$ —— 高斯权函数的傅里叶变换；

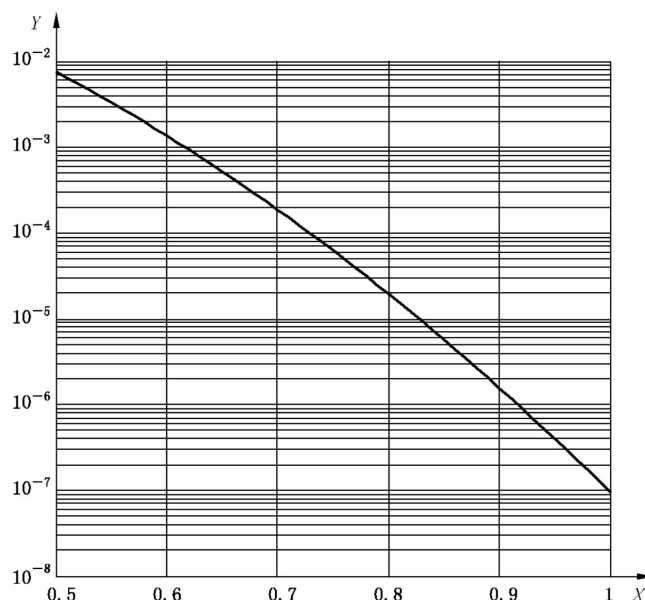
$R(.,.)$ —— 矩形函数的傅里叶变换, 如下式所示：

$$R(L_c, \omega) = \int_{-L_c\lambda_c}^{L_c\lambda_c} e^{-i\omega x} dx = 2L_c\lambda_c \operatorname{sinc}\left(\frac{L_c\lambda_c}{\pi}\omega\right) \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

$\operatorname{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ 是 sinc 函数。

利用式(A.3), 截取高斯权函数的传递函数与高斯权函数的传递函数的最大偏差发生在 $\omega = 0$ 时, 导致的最大偏差^[6] $Y = \operatorname{erfc}\left(\frac{L_c\sqrt{\pi}}{a\lambda_c}\right)$, 如图 A.2 和表 A.1 显示。



说明：

X —— 截取常数 L_c ；

Y —— 执行误差。

图 A.2 不同截取常数的执行误差

表 A.1 不同截取常数的执行误差

截取常数 L_c	执行误差/ %
0.5	0.76
0.6	0.14
0.8	1.96e-003
1.0	9.47e-006

在轮廓 $w(x)$ 上,最大偏差的估计为^[6]:

$$\Delta w(x) \leq p_{\max} \operatorname{erfc}\left(\frac{L_c \sqrt{\pi}}{a \lambda_c}\right) \dots\dots\dots (A.6)$$

式中:
 p_{\max} ——轮廓绝对值的最大值。

A.3 闭合轮廓

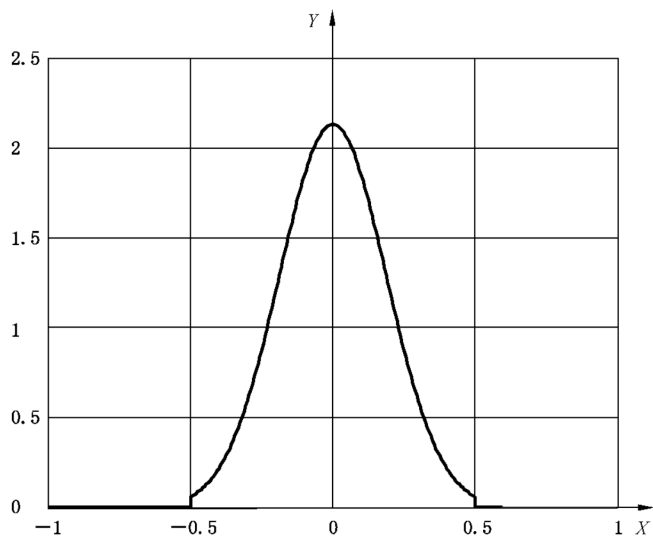
闭合轮廓滤波器的权函数具有局限于长度为 L 的闭合轮廓的高斯密度函数的表达式,选取截止频率为 $f_c=L/\lambda_c$,其表达式为:

$$s(x)=\begin{cases} \frac{f_c}{aL} \exp\left[-\pi\left(\frac{xf_c}{aL}\right)^2\right] & -\frac{L_cL}{f_c} \leq x \leq \frac{L_cL}{f_c} \\ 0 & x < -\frac{L_cL}{f_c}, x > \frac{L_cL}{f_c} \end{cases} \dots\dots\dots (A.7)$$

式中:
 x ——沿闭合轮廓距高斯权函数中心(最大)的距离;
 f_c ——以每周波数表达的截止频率;
 L ——闭合轮廓的长度;
 L_c ——截取常数(参见附录 A);
 a ——常数。

$$a = \sqrt{\ln 2 / \pi} \approx 0.469\ 7 \dots\dots\dots (A.8)$$

该式已是截取高斯权函数的形式。
图 A.3 中为一个闭合轮廓的截取高斯权函数的例子。



说明：
 X —— $f_c/L \times x$ ；
 Y —— $L/f_c \times \tilde{s}(x)$ 。

图 A.3 闭合轮廓的 $L_c=0.5$ 截取高斯权函数的例子

截取权函数是对真正的高斯权函数的近似，因此当用截取权函数执行卷积时，与执行真正的高斯权函数的卷积相比总是存在误差。截取常数 L_c 应该合理选择，使执行误差处于应用中可接受的水平。

A.4 闭合轮廓的数学计算

闭合轮廓的截取高斯权函数的数学计算与开放轮廓相同，除了由 L/f_c 代替 λ_c （即 $\lambda_c = L/f_c$ ）。图 A.2 和表 A.1 对于闭合轮廓情况也是相同的。

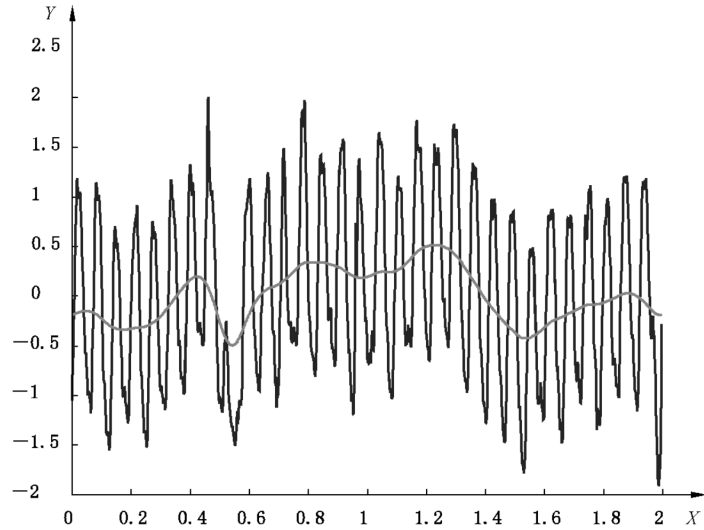
A.5 建议

建议如下：

- 1) 一般情况下，截取常数取 $L_c=0.5$ ；
- 2) 对于期望将执行误差减小到 0.14% 的精密表面滤波而言，截取常数 L_c 取 0.6^{[4][5]}；
- 3) 对于参考软件，截取常数应取为 $L_c=1.0$ ，以使执行误差不显著^[6]。

附录 B
(资料性附录)
示例

将高斯轮廓滤波器应用于开放和闭合轮廓的示例见图 B.1 和图 B.2。



说明:

X —— 长度, mm;

Y —— 高度, μm 。

图 B.1 开放高斯滤波器 ($\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$), 用矩保持准则进行端部效应校正, 应用于铣削表面

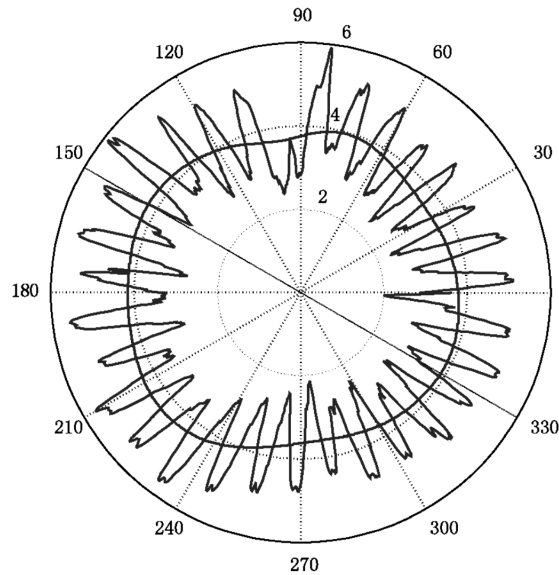


图 B.2 $f_c = 5\text{UPR}$ 闭合高斯滤波器, 应用于铣削/冲压表面

附录 C
(资料性附录)
与滤波矩阵模型的关系

C.1 概述

关于滤波矩阵模型详见 GB/Z 26958.1。

C.2 在滤波矩阵模型中的位置

GB/T 26958 的本部分是基本概念文件,它是属于“轮廓滤波器 线性的”这一栏的滤波标准,见表 C.1。

表 C.1 与滤波矩阵模型的关系

	滤波 GB/T 26958 系列					
通用	第 1 部分					
	轮廓滤波器			区域滤波器		
基础	第 11 部分 ^a			第 12 部分 ^a		
	线性的	稳健的	形态学的	线性的	稳健的	形态学的
基本概念	第 20 部分	第 30 部分	第 40 部分	第 60 部分	第 70 部分	第 80 部分
专用滤波器	第 21-25 部分	第 31-35 部分	第 41-45 部分	第 61-65 部分	第 71-75 部分	第 81-85 部分
如何滤波	第 26-28 部分	第 36-38 部分	第 46-48 部分	第 66-68 部分	第 76-78 部分	第 86-88 部分
多分辨率	第 29 部分	第 39 部分	第 49 部分	第 69 部分	第 79 部分	第 89 部分
^a 现在包括在第 1 部分。						

附 录 D
(资料性附录)
与 GPS 矩阵模型的关系

D.1 概述

关于 GPS 矩阵模型的完整细则,参见 GB/T 20308。

GB/T 20308 中的 GPS 矩阵模型对 GPS 体系进行了综述,本部分是该体系的一部分。除非另有说明,GB/T 4249 给出的 GPS 基本规则适用于本部分,GB/T 18779.1 给出的缺省规则适用于按照本部分制定的规范。

D.2 关于标准及其使用的信息

本部分描述了高斯滤波器用于轮廓滤波的计量特性。

D.3 在 GPS 矩阵模型中的位置

本部分是一项 GPS 通用标准。本部分给出的规则和原则适用于 GPS 矩阵中所有标有实心点(•)的部分。见表 D.1。

表 D.1 GPS 标准矩阵模型

几何特征	链环						
	A	B	C	D	E	F	G
	符号和标注	要素要求	要素特征	符合与不符合	测量	测量设备	校准
尺寸			•			•	
距离			•			•	
形状			•			•	
方向			•			•	
位置			•			•	
跳动			•			•	
轮廓表面结构			•			•	
区域表面结构			•			•	
表面缺陷			•			•	

D.4 相关的标准

表 D.1 所示标准链涉及的标准为相关的标准。

参 考 文 献

- [1] GB/T 4249 产品几何技术规范(GPS) 基础 概念、原则和规则
 - [2] GB/T 18777 产品几何技术规范(GPS) 表面结构 轮廓法 相位修正滤波器的计量特性
 - [3] GB/T 18779.1 产品几何量技术规范(GPS) 工件与测量设备的测量检验 第1部分:按规范检验合格或不合格的判定规则
 - [4] GB/T 20308 产品几何技术规范(GPS) 矩阵模型
 - [5] GB/T 26958.28 产品几何技术规范(GPS) 滤波 第28部分:轮廓滤波器 端部效应
 - [6] EVANS, C. Precision Engineering an evolutionary view. Cranfield Press, 1989.
 - [7] KRYSTEK, M. The digital implementation of Gaussian profile filter according to ISO 11562. Beuth-Verlag, Berlin, 2005.
 - [8] JONES, J. V. Precision engineering from supertankers to integrated circuits, *Precision Engineering*, 1(1), 1979. p.3.
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
产品几何技术规范(GPS) 滤波
第 21 部分:线性轮廓滤波器 高斯滤波器
GB/T 26958.21—2020/ISO 16610-21:2011

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址:www.spc.org.cn

服务热线:400-168-0010

2020 年 12 月第一版

*

书号: 155066 • 1-66607

版权专有 侵权必究



GB/T 26958.21-2020