

THE SECOND ANNUAL MEETING OF CHINA SOCIETY OF UNIVERSITIES
FOR INTERCHANGEABILITY AND MEASUREMENT TECHNOLOGY

SELECTED PROCEEDINGS OF PRECISION MEASUREMENT
FOR GEOMETICAL QUANTITIES

全国高校互换性与测量技术研究会第二届年会

几何量精密测量论文选集



中国计量出版社

全国高校互换性与测量技术研究会第二届年会

几何量精密测量论文选集

中国计量出版社

内 容 提 要

本论文选集是从全国各高等学校征集和评选出的数百篇论文中，精选出有关几何量测量技术的论文 19 篇，汇编成本书。

该书汇集了大尺寸、小位移、形状和位置误差、表面粗糙度等名种几何量的最新测量技术和理论研究成果，有的已成为科技成果被国内有关工厂在生产实际中采用。

本书可供大专院校机械类和仪器仪表类有关专业师生参考，还可供从事几何量测试的科研人员和工程技术人员阅读和使用。

几何量精密测量论文选集

责任编辑：刘瑞清

—♦—

中国计量出版社出版

北京和平里11区7号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—♦—

开本 787×1092/16

印张 8 字数 193 千字

1989年3月第1版

1989年3月第1次印刷

印数 1—6000

ISBN 7-5026-0220-8/TB·192

定价 5.00元

前 言

全国高等学校互换性与测量技术研究会为了召开 1989 年第二届全国年会，在全国 6 个大区分会征集和评选出的数百篇学术论文的基础上，于 1988 年 3 月在武昌华中理工大学召开了研究会的学术委员会扩大会议。会议在主要涉及测量技术范畴的论文中，精选出 19 篇汇编成这本《几何量精密测量论文选集》。

在这本选集中，汇集了大尺寸、小位移、形状和位置误差、表面粗糙度等各种几何量的最新测量技术和理论研究成果。其中，不少论文是在各高校研究生论文的基础上，经过充实提高后写成的，因此，不但具有较高的学术价值，而且有较好的实用性，有的已成为科技成果被国内有关工厂在生产实际中采用。

我们相信，这本论文选集的出版将对我国几何量测量事业的发展有所贡献。

本书是大专院校机械类和仪器仪表类专业师生的一本有益的参考书，同时也可供从事几何量计量测试的科研人员和广大的工程技术人员使用。

中国计量出版社为本论文选集的出版提供了大量的支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

全国高校互换性与测量技术
研究会学术委员会
1988年6月

目 录

表面粗糙度的混合谱模型及综合评定	(1)
表面粗糙度的微机化测量	(9)
利用激光散射原理测量表面粗糙度的改进方法	(17)
用激光测量微观不平度间距	(22)
微机辅助平面度检测系统	(27)
直线度自动检测——三测头误差分离法	(32)
形位误差测量和评定中的采样与删点技术	(40)
圆度测量误差一次转位分离法的探讨	(47)
测量和评定椭圆轮廓几何参数的理论研究	(53)
大轴圆度误差、端面跳动的临床测量	(58)
回转轴法测量大箱体孔系的同轴度	(65)
用光电法测量微小位移	(71)
用两杆三点法测量大尺寸的孔轴直径	(77)
用于检定玻璃短标尺的激光干涉比较仪	(82)
传动仪精度动态检定法分析	(86)
动态测头动态特性分析	(94)
微机控制的实时测量系统	(101)
光线在高温场传播中偏折的研究	(108)
多指标正交设计的优化方法	(117)

表面粗糙度的混合谱模型及综合评定

林洪桦 胡剑峰

(北京工业学院)

【摘 要】 本文采用自回归谱分析结合改进周期图检验的方法,建立表面粗糙度的混合谱模型,以分离其中表现为离散谱的确定性谐波成分和表现为连续谱的随机性成分,并在此基础上提出综合评定表面粗糙度各种参数的方法。同时,对 AR 模型的阶数与谐波成分识别给出较有效的经验判定方法。

【关键词】 表面粗糙度,混合谱分析,自回归模型,Marple 算法,改进周期图检验。

一、概 述

近年来制订的我国国家标准 (GB 3503—83, GB 1031—83) 与国际标准 (ISO 4287:1984) 都规定了 27 个评定表面粗糙度的参数。这些参数可在不同程度上分别反映机械零件的某种性能,无疑,能更加适合于当前生产中评定产品质量的多方面要求。

然而,不同表面的某一粗糙度参数相等,其使用性能可有很大差异。因为国标中规定的各个参数通常都只能反映表面轮廓上的某一独立信息或某个方面的性能,而对于相关信息或综合性能则未予反映。有些参数 (如 S_m 、 S 等) 在某种情况下则难以确切评定。另一方面,常要求在评定表面粗糙度参数中,能对其工艺分析提供有用信息,以利于作反馈控制及提高其加工精度。尤其当前已逐渐开展对表面形貌作三维描述及评定,这就不仅要计及每一表面轮廓的自相关性,还应考虑到各轮廓间的互相关性。尽管后者目前研究得未尽完善,却反映着表面粗糙度研究中的发展趋向。

为此,本文探讨对表面轮廓采用现代混合谱分析方法^{[1]、[2]},更合理地反映其频域结构,分离其中表现为离散谱的确定性谐波成分与表现为连续谱的随机性成分。在对表面轮廓建立混合谱模型的基础上,提出综合评定其粗糙度的各种参数的方法,以便更加全面而完善地反映其多种性能,还可按其频率成分来查找加工误差源,以改进其工艺及提高精度。同时,也可进一步扩展为表面的二维混合谱分析,为其三维形貌识别及评定提供另一途径。

二、表面轮廓的混合谱模型

目前对表面轮廓渐多采用触针式动态测量方法,并通过接口与微型数字计算机联接,而进行数据处理。显然,在这种情况下对表面轮廓建立混合谱模型来作整体分析及综合评定,不仅是可实现的,而且有很大实用价值。

设测得的表面实际轮廓线为 $Z(t)$, 将其分解为基准线——最小二乘中线 $d(t)$ 和轮廓偏距 (对基准线的) 形成的曲线 $Y(t)$, 对 $Y(t)$ 可建立混合谱模型, 即其中的周期轮廓部分以

m 次谐波表示, 记为 $p(t)$; 随机轮廓部分以 n 阶自回归模型 $AR(n)$ 来拟合, 记为 $X(t)$. 为了进行数字计算, 首先以 Δ 为间隔作离散化采样而得数据序列 $\{Z_i\}$, 于是:

$$\begin{aligned} Z_i &= d_i + Y_i = d_i + p_i + X_i \\ &= (c_0 + c_1 t) + \sum_{k=1}^m (\alpha_k \cos \omega_k t + \beta_k \sin \omega_k t) + \sum_{i=1}^n a_i X_{i-1} + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (1)$$

$t = 1, 2, \dots, N$

式中, c_0 、 c_1 分别为最小二乘中线的截距、斜率; α_k 、 β_k 为 k 次谐波的富里叶系数; $\{a_i\}$ 为自回归系数; $\{\varepsilon_i\}$ 为白噪声。

从频域的谱分析意义上看, 设 $S_p(\omega)$ 是 m 次谐波 $p(t)$ 的离散谱; $S_x(\omega)$ 是 $X(t)$ 的 $AR(n)$ 模型的连续谱。则轮廓偏距曲线 $Y(t)$ 的混合谱为

$$S_y(\omega) = S_p(\omega) + S_x(\omega) \quad (2)$$

于是可借混合谱分析方法来描述表面粗糙度的各方面特性, 及综合评定其各种参数。

三、混合谱分析方法

对表面粗糙度的混合谱分析方法是作者在[2]的基础上再作改进的。首先对数据拟合高

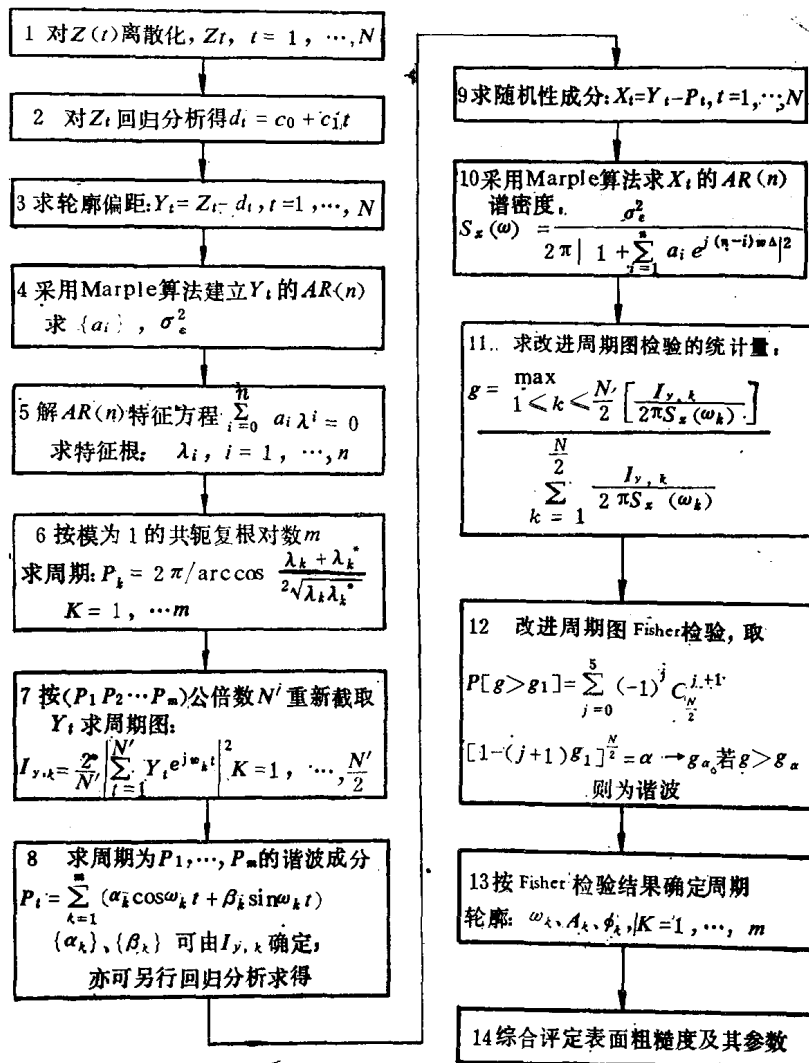


图 1 表面粗糙度混合谱分析框图

阶自回归模型,而通过其特征根分析作出谐波频率的初辨;再按诸谐波的公共周期的整数倍调整数据截取长度后,求其周期图及初辨诸谐波的幅值和相位;然后,自数据中消去诸谐波,求余下的随机性成分的谱密度,以作为白化周期图坐标的比例因子;最后进行改进周期图检验,以确定其谐波项数、频率、幅值和相位。具体方法及步骤见框图(图1)。

对本文所作改进之处再略加说明:

1. 采用 Marple 算法^[3]拟合高阶 AR(n) 模型,并作特征根分析和求 AR 谱是由于:快速、分辨率高、谱线尖锐且背景清晰,在数据量足够和信噪比 ≥ 1 的条件下无谱线分裂与谱峰偏移现象,且可避免富里叶谱分析中存在的频率混叠和能量泄漏现象等。我们曾采用过 ARMA 谱分析方法和 $P(\lambda)$ 检验法^[1],但前者计算量太大,后者欠精确,均不实用。经大量模拟计算及实用结果都表明,只要定阶恰当及模为 1 的共轭复根判别准确,作为初辨诸谐波较为有效。

2. 仅靠建立 AR(n) 模型而按其特征根来判别谐波成分,并非十分可靠,还需结合运用改进周期图检验方法,才能有效地识别出数据中隐含的诸确定性谐波,而不致同时检出能量较大的随机成分的许多拟合的谐波。要作到这点需作如下的改进:尽量按初辨诸谐波的公共周期的整数倍调整数据的截取长度,以免产生频栅效应,即谐波频率恰在离散频率间隔的中点,致使检出伪谐波;对数据的周期图坐标 I_{xx} 需作白化处理,以使周期图检验中随机成分接近为白噪声,即需以实际随机成分 X_t 的谱密度 $S_x(\omega_k)$ 除以 $I_{xx}^{(1)}$;同时,要消除诸谐波本身对 I_{xx} 的影响^[1],曾采用按其公共周期对数据进行差分的方法,然而,因该公共周期难以准确求得,故此法欠佳。本文采用周期图分析或回归分析而求得初辨频率的诸谐波后,将其减以数据的消去方法。具体方法见图 1 中第 7~11 框。

四、AR 模型定阶方法

定阶问题历来就是拟合数学模型中的难点。能否借 AR 模型特征根的分析较可靠地识别出数据中隐含的谐波成分,关键问题也在于定阶。尽管已有多种定阶准则和方法,我们也曾对常用的定阶准则作过建模试验,如对赤池相继提出的最终预测误差准则(FPE)、最小信息量准则(AIC)及其后改进的 BIC 准则,还有 Parzan 提出的自回归传递函数准则(CAT)等。也采用过 Marple 算法中的定阶判别,即基于迭代残差平方和变小的经验界限。然而,这些定阶准则主要用于预测的需要,实际上各定阶曲线(如 AIC— n 曲线)多不是单谷平滑曲线,而是有多个极小点的反复振荡的曲线,难以判定其最小值。

大量模拟计算结果表明,若按模为 1 的共轭复根数来识别数据所含的谐波项数,则上述各准则所定的阶数易偏低,尤其信噪比较小时,所识别的谐波频率或周期不很准确,均未取得较好效果。

为此,这里针对表面粗糙度测量中可能遇到的情况,如数据量 $N \geq 100 \sim 2000$,信噪比 ≥ 1 ,谐波项数 $m = 0 \sim 5$,以及谐波频率、幅值和相位等不同大小、变化范围和比例等,来拟定大量模拟计算,从中找出定阶的经验方法。

还需指出,由于拟合 AR(n) 模型中所求得特征根本身是随机的,目前还没有判别模为 1 的共轭复根的统计检验方法。本文亦采用经验方法,即只要满足 $|1 - \lambda_k \lambda_k^*| \leq 0.02$,就可认为其模已接近为 1。大量模拟计算结果已验证其基本可行。

综上,采用 Marple 算法拟合 AR(n) 模型的定阶可按以下的经验方法:

$$n \geq \begin{cases} 18 + \frac{N}{20}, & N \leq 200 \\ 24 + \frac{N}{50}, & 200 < N \leq 400 \\ 28 + \frac{N}{100}, & 400 < N \leq 1000 \\ 38, & N > 1000 \end{cases} \quad (3)$$

例如, 对表 1 所列五项谐波及 AR(2) 随机项的模拟数据, 按上述定阶方法采用 Maple 算法拟合 AR(n) 模型后, 可识别模为 1 的共轭复根有五对, 按图 1 框 6 所求得相应周期均较准确。可见, 这种经验定阶法较有效, 且 N 越大其效果越佳 (其他模拟模型及不同 N 的情况亦均此, 免予列举)。

表 1

模 拟 模 型			$N=100$		$N=800$
			AR (27)		AR (40)
谐 波 项	1	$14 \cos \left(\frac{2\pi}{40} t \right)$	p_1	39.274	39.605
	2	$16 \cos \left(\frac{2\pi}{10} t + 0.725398 \right)$	p_2	10.000	10.005
	3	$18 \cos \left(\frac{2\pi}{5.79736} t + 0.523559 \right)$	p_3	5.7951	5.7984
	4	$20 \cos \left(\frac{2\pi}{5} t + 0.334651 \right)$	p_4	5.0019	5.0001
	5	$22 \cos \left(\frac{2\pi}{3.9604} t + 1.23411 \right)$	p_5	3.9589	3.9605
随 机 项		$1.2x_{t-1} - 0.4x_{t-2} + \varepsilon_t (\sigma_\varepsilon^2 = 16)$			

五、谐波谱线的选定

尽管经改进的周期图检验已符合 Fisher 检验的理论要求, 然而由图 1 框 12 所检出的谐波谱线还会偏多, 且多余者均为能量较小的。这往往由以下原因造成: 首先是数据长度 N 难以按公共周期的整数倍截取, 导致前述频栅效应而引谱线弥散; 其次是在有限数据长度下谐波能量在周期图上呈 Fejer 函数型分布^[1]; 再则是某频率的随机性成分的能量较强, 可近似拟合成谐波等。因此, 对改进周期图检验所检出的谐波谱线还需再予甄选。

首先按微小系统误差舍弃的 1/10 原则, 将能量较小即不显著的检出谐波谱线略去。由于 $A_k^2 = \frac{1}{N} I_k$, 因此满足

$$\frac{A_k}{\max_{1 \leq k \leq n} [A_k]} < \frac{1}{10} \quad \text{或} \quad \frac{I_{k,b}}{\max_{1 \leq k \leq n} [I_{k,b}]} < 0.01 \quad (4)$$

则该 ω_k 的谐波可不计。

其次, 考虑谐波能量按 Fejer 函数型分布, 而引起相邻谱线同时检出的甄选问题, 由于谐波主峰在真实频率 $\omega_p \pm \frac{2\pi}{N}$ 范围内, 且有

$$I_N\left(\omega_p \pm \frac{\pi}{N}\right) \approx 0.4 I_N(\omega_p), \quad I_N\left(\omega_p \pm \frac{\pi}{2N}\right) \approx 0.8 I_N(\omega_p)$$

于是, 若真实频率与采样频率的偏移 $|\omega_p - \omega_k| < \frac{\pi}{2N}$, 则

$$\frac{I_N(\omega_{k+1})}{I_N(\omega_k)} < \frac{0.4 I_N(\omega_p)}{0.8 I_N(\omega_p)} = 0.5 \quad (5)$$

这时可取 $\omega_p = \omega_k$, 即 $I_N(\omega_p) = I_N(\omega_k)$, 而不计 $I_N(\omega_{k+1})$. 若 $\frac{\pi}{2N} < |\omega_p - \omega_k| < \frac{\pi}{N}$, 则

$$0.5 < \frac{I_N(\omega_{k+1})}{I_N(\omega_k)} < \frac{0.4 I_N(\omega_p)}{0.4 I_N(\omega_p)} = 1 \quad (6)$$

这时可取 $\omega_p = \frac{1}{2}(\omega_k + \omega_{k+1})$ 且 $I_N(\omega_p) = I_N(\omega_k)$, 亦可不计 $I_N(\omega_{k+1})$. 若 $I_N(\omega_k) > I_N(\omega_{k+1}) >$

$I_N(\omega_{k+2})$ 均检出, 则后者可视为旁瓣能量泄漏, 在数据直接截断下, 旁瓣能量不会超过主

瓣的 20%, 故当 $|\omega_{k+2} - \omega_p| > \frac{2\pi}{N} \sim \frac{4\pi}{N}$ 时, 若满足

$$\frac{I_N(\omega_{k+2})}{I_N(\omega_k)} < 0.2 \quad (7)$$

即可不计 $I_N(\omega_{k+2})$.

模拟计算与实用结果均表明, 按上述方法甄选检出的谐波谱线较接近实际情况。显然也可以采取增长数据或缩小频率采样间隔的方法来解决此问题, 但将增加计算量, 或将影响周期图坐标间的独立性, 而使检验失效。

六、表面粗糙度的综合评定

对表面轮廓拟合混合谱模型后, 对其各种性能可作全面综合评定, 而避免分别评定其单一参数所引起的片面性。这里包括直接评定国家标准已规定的参数; 也包括国家标准尚未规定的重要参数或更能反映出使用性能的特征量; 还可评定研究工作所需更为复杂和特殊的性能等。

1. 对国家标准规定参数的评定

由于已按图 1 的框 2、3、7、10 和 13 求得表面轮廓的中线 $d(t)$ 、轮廓偏距 $\{Y_i\}$ 、周期图 $\{I_{y,i}\}$ 、周期轮廓模型 $p(t)$ 和随机轮廓模型 X_i 。因此, 可按定义直接评定国家标准所规定的几乎所有粗糙度参数。本文则着重谈建模评定方法。

在与高度特性有关的参数方面: 首先推荐评定更有代表性的参数——轮廓均方根偏差, 即

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{y,i}} \quad (8)$$

其他参数 R_z 、 R_a 、 R_y 等显然均可借 $\{Y_i\}$ 按定义求得。当诸谐波为主要成分时, $R_a \approx \frac{2\sqrt{2}}{\pi} R_q$,

$$R_y \approx 2\sqrt{2} R_q.$$

在与间距特性有关的参数方面：由于在评定平均间距 S_m 和单峰平均间距 S 上，常因表面轮廓与中线交点处和峰点处有随机变动，而不易确定其值，使评定结果有较大差异。若将混合谱分析已识别的表面粗糙度中所含诸谐波波长 $\lambda_k = K \frac{2\pi}{\omega_k}$ (K 为周期——波长转换系数)，按其能量即周期图坐标 $I_{p,k}$ 加权取平均，而以该加权平均波长

$$S_\lambda = \frac{\sum_{k=1}^m I_{p,k} \lambda_k}{\sum_{k=1}^m I_{p,k}} \quad (9)$$

来评定间距特性，则更客观、合理。若未检出显著性谐波，则按图1框10所求得AR谱密度的诸峰值 $S(\omega_k)$ 及其相应的频率 ω_k 来计算 S_λ 。显然以 S_λ 代替 S_m 或 S 可得出确定的值。

同时，标准中规定的平均波长 λ_a ，其物理意义不明确，以 S_λ 代之则有更确切含意，且性质相同。轮廓峰密度显然也可按 $D = \frac{l}{S_\lambda}$ (l 为采样长度) 来评定。

标准中规定的均方根波长 $\lambda_q = \frac{2\pi R_q}{\Delta_q}$ ，同样会因轮廓的均方根斜率 Δ_q 难以准确评定，而不如直接通过均方频带宽 ω_{rms} 来求得，即

$$\lambda_q = K \frac{2\pi}{\omega_{rms}}, \quad \omega_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N/2} I_{p,k} \omega_k^2}{\sum_{k=1}^{N/2} I_{p,k}}} \quad (10)$$

这样在理论上更符合定义。

在与形状特性有关的参数方面：主要决定于其幅度分布，即轮廓微观不平度高度的概率分布函数。而任一分布密度都可近似展成以下的标准化形式：

$$p(u) \approx \varphi(u) - \frac{S_k}{3!} \varphi^{(3)}(u) + \frac{K_u - 3}{4!} \varphi^{(4)}(u) \quad (11)$$

式中， $u = \frac{Y - \mu}{\sigma}$ 为标准化轮廓偏距，可按轮廓偏距序列 $\{Y_i\}$ 确定，即其中： $\hat{\mu} = \bar{Y}$ ； $\hat{\sigma} = R_q$ ；

$\varphi(u)$ 和 $\varphi^{(i)}(u)$ 分别为标准化正态分布密度和它的 i 阶导数，而 $\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}}$ ； S_k 和 K_u

分别为轮廓偏斜度和陡度，且可按式估计：

$$S_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_i}{R_q} \right)^3 \quad \text{和} \quad K_u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_i}{R_q} \right)^4 \quad (12)$$

因此，按式(11)求得幅度分布密度后，即可按下式求得支承率曲线 $t_p(c)$ 及评定支承率 t_p 和支承长度 $\eta_p = t_p l$ 。即

$$t_p(c) = \int_0^{u_c} p(u) du, \quad u_c = \frac{c - \bar{Y}}{R_q} \quad (13)$$

而给定水平截距 c 后即得 t_p 。

标准中规定的轮廓均方根斜率 $\Delta_q = \frac{2\pi R_q}{\lambda_q}$ 按式 (8) 与式 (16) 来评定, 如前已述, 更客观、合理。

例如, 对某一车削表面用 Talysurf 5 型轮廓仪测得 $R_a = 0.302 \mu\text{m}$ ($l = 0.8 \text{ mm}$), 而对其拟合混合谱模型后, 利用上述评定方法可得: $R_q = 0.331 \mu\text{m}$, $R_z = 0.298 \mu\text{m}$, $S_\lambda = 46 \mu\text{m}$, $\lambda_q = 11.07 \mu\text{m}$ 等, 与测量及记录结果一致。

尽管上述评定的诸参数中有些在现行的国标 (GB 1031—83) 中尚未规定其数值, 却都是些主要参数。而该标准已规定数值的参数 R_a 、 R_z 、 R_y 、 S_m 、 S 和 t_p 多为现有量仪便于测量者。预计随着当前计算机与量仪联接技术的不断应用, 不久必将制订出更多、更主要参数的标准数值。

2. 建议国家标准增订的参数

除上述参数评定方法的改善及建议增加轮廓陡度 K_a 参数外, 我们也认为当前国内外专家们主张在国家标准或国际标准中应列入轮廓自相关函数 (ACF) 和轮廓功率谱密度 (PSD) 是很有必要的。因为某一参数 (如 R_a 或 R_q 、 S_m 或 S 、 t_p 等) 相同的不同表面, 许多试验已证实其谱图却很不一致。而通过谱图分析则有利于分辨在加工中机床的反常振颤、刀具磨损、刀瘤产生、切削液欠佳、切削用量选择不当或研磨、抛光不完善等现象, 并借频率成分能量或强度分析便于查找其产生原因而予以改善。

本文提出的混合谱分析方法能更精确地估计 ACF 和 PSD, 有助于更全面而合理地描述表面轮廓的统计特性、结构成分及其使用性能, 尤其适于对加工过程建立参考谱, 并与不断抽样检查的实际谱图相比较来控制加工表面质量。

3. 拓展表面性能综合评定方法

对于同一加工过程的不同表面或同一表面的不同轮廓一致性或某种性能的比较, 以往常仅靠某一或某几个参数的比较来作出检定结论。例如对我国新近研制成的精细表面随机轮廓 D 型校准样块⁽⁴⁾, 所作的国家鉴定中主要按 ISO/5436—1985 的规定, 仅以 R_a 值来评定, 并辅以扫描电镜的观测比较。这样显然不够全面和完善。本文提出对表面轮廓建立混合谱模型, 而对该模型诸参数的一致性作出统计检验。如曾对上述合格 D 型样块作过这种检验。结果表明, 未检出谐波, 可判定为随机轮廓, 而对其所拟合的 AR 模型的阶数作比较及其参数的统计检验, 则可判定其纵向具有重复性及横向具有均匀一致性。可是检验结果曾发现某几段轮廓的该模型参数有较大差异, 即统计检验未通过其随机一致性。而上述国家鉴定中则未能发现。可见, 这种综合评定方法更加客观、合理。

此外, 若进一步研究不同轮廓的互谱分析, 而拓展至表面的二维混合谱分析。可望采用该方法实现表面形貌的混合谱分析。

以上所述的大量模拟计算、表面粗糙度的混合谱分析实例、D 型样块的混合谱模型的统计检验等数据处理结果及图表等, 限于篇幅而免于列举。

参 考 文 献

[1] Priestley, M. B., Spectral Analysis and Time Series, v. 1, Academic Press,

1981.

- [2] 林洪桦, 主轴回转精度的混合谱分析法, 北京工业学院学报, 1986, 2.
- [3] Marple, S.L., A New Autoregressive Spectrum Analysis Algorithm, IEEE vol. ASSP-28, No.4, 441~454, 1980.
- [4] 宋俊峰, 精细表面随机轮廓粗糙度校准样块, 计测技术, 1986, 1.

THE MIXED SPECTRAL MODEL OF SURFACE ROUGHNESS AND ITS SYNTHETICAL EVALUTION

Lin Honghua Hu Jianzheng

(Beijing Institute of Technology)

[Abstract] This paper presents a mixed spectral model of surface roughness to be set up by means of the AR spectral analysis combined with the modified periodogram test, so as to separate the deterministic harmonic components described as discrete spectra and the stochastic components described as continuous spectra in the model. Based on this model, a synthetical evaluation method of surface roughness parameters is presented, and a more effective empirical method for determining the order of AR model and identifying the harmonic components is also presented.

[Key Words] Surface roughness, analysis with mixed spectra, AR model, Marple algorithm, modified periodogram test.

表面粗糙度的微机化测量

娄华洲 张 鄂

(上海交通大学)

【摘 要】 随着工业技术的发展,对零件表面质量提出越来越高的要求,相应要求能实现对所需各种表面粗糙度参数的测量,这就使仪器的数据处理部分复杂化。对此,作者提出了以一般触针式轮廓仪与通用微型计算机相连的微机化测量方案。文中讨论了该测量系统的组成、精度及用于表面三维粗糙度参数和三维形貌图形的测量、计算和绘制,此外还可开发科研与工程技术上所需的特殊参数的软件。最后指出,以这种测量系统来取代昂贵的高档表面轮廓仪,应是我国当前发展这类仪器的一个重要方向。

【关键词】 表面粗糙度测量,表面轮廓参数,表面形貌参数。

一、引 言

工业技术的发展,加工精度的提高,新工艺、新材料的涌现,对零件表面质量提出越来越高的要求。同时,摩擦与磨损过程的研究,工艺过程的分析,表面接触状态的探讨,也都要求对表面微观几何形状给出定量的描述。这些都要求能实现所需参数的测量,从而使仪器及其测量处理部分复杂化。目前广泛应用的仪器是机械触针式轮廓仪,利用这类仪器实现多参数测量一般有两种途径:一是采用带有专用计算机的轮廓仪(如 Talysurf-6 型轮廓仪,可测量计算近 40 个粗糙度和波度参数),另一是采用普通轮廓仪与单板机相连以弥补只能测量 R_a 一项参数的不足。然而,前者要求进口高档轮廓仪,并且这种将参数计算程序固化的方式不利于用户进一步开发新的软件,无法实现科研与实验分析中所需的但尚未归纳为标准的参数。而后者显然由于单板机容量与速度的限制,不宜作为科研的测量手段。

针对上述问题,结合我国国情,我们提出用轮廓仪传感器与通用型微机相连的设想,以实现下列功能:

- ①各种轮廓参数的测量计算;
- ②表面三维粗糙度参数的计算;
- ③表面三维形貌图形的绘制;
- ④可根据需要进一步开发绘图与计算软件。

现将我们在这方面的探索与试验结果汇总于后。

二、工 作 原 理

所采用方案的原理框图如图 1 所示。具体做法是将 Talysurf-6 型轮廓仪传感器●与 IBM-

●我国哈尔滨量具刀具厂研制的 2202 型轮廓仪也可用。

PC 通用微机相连, 以构成微机化的计算机辅助测量系统。

若配备一精密工作台, 由步进电机驱动以产生 y 向运动, 则在该测量系统上可实现表面三维形貌的测量⁽¹⁾。当步进电机步距角为 1.5° , 工作台丝杠螺距为 0.5 mm 时, y 向最小进给量为 $2.08 \mu\text{m}$ 左右。

三、系统的精度

该系统的精度主要由四部分决定, 即轮廓仪传感器、A/D 转换器、微机和工作台。

轮廓仪传感器一般可测到 $R_a = 0.025 \mu\text{m}$ 的表面, 6 型轮廓仪可测 $R_a = 0.01 \mu\text{m}$ 的表面; A/D 转换器的误差小于 $\pm 0.2\%$; 微机也具有足够的精度。因此, 这几部分的精度对轮廓测量来说已足够了。

对表面三维粗糙度参数测量来说, 尚需讨论工作台及有关附属装置的精度。

1. 工作台 y 向直线度误差

它将直接影响测量精度。在采取一定措施后, 实测误差值为 $0.08 \mu\text{m}/\text{mm}$ 。

2. 轮廓起始点误差

根据测量原理要求, 各扫描轮廓具有同一起始点, 否则将使图形畸变。影响这项误差的主要因素为工作台横向扭摆误差和采样触发器的重复性误差。经实测, 前者为 $\varepsilon_1 = \pm 0.11 \mu\text{m}/\text{mm}$, 后者为 $\varepsilon_2 = \pm 0.4 \mu\text{m}$, 两者合成后得轮廓起始点误差 $\varepsilon = \pm \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} = \pm 0.41 \mu\text{m}$ 。

3. 轮廓长度误差

经实测为 0.8% 。

由上可知, 工作台精度可以满足不用导向滑块对测量 $R_a = 0.05 \mu\text{m}$ 的表面。同时, 我们还用 Talysurf-6 型的三刻线样板标定系统, 再用 6 型的多刻线样板和 B&K 的三角形样板实测, 误差均小于 2% 。显然, 若测量时带有导向滑块, 则对工作台导轨要求可大为降低, 相应可测 $R_a = 0.02 \mu\text{m}$ 的表面三维粗糙度。

四、特殊轮廓参数的计算

一般轮廓参数的测量计算可按照国家标准的规定编制软件, 本文仅对特殊轮廓参数讨论。

为了定量地评定轮廓支承率曲线, DIN 4776 提出了一组参数, 其实质在于用三个直线段近似代替整个曲线, 并确定这组参数的数值 (图 2)。这组参数为:

R_k : 中心部粗糙度高度 (core roughness depth);

R_{pk} : 减少了的峰高 (reduced peak height);

R_{vk} : 减少了的谷深 (reduced valley depth);

M_{r_1} : R_k 上限对应的实体比例 (material portion acc. to the upper limit of R_k);

M_{r_2} : R_k 下限对应的实体比例 (material portion acc. to the lower limit of R_k)。

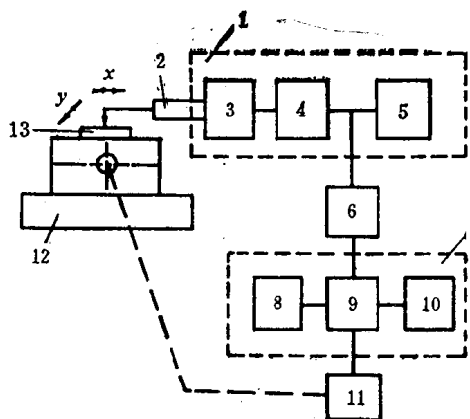


图 1 测量系统原理

1—轮廓仪; 2—传感器; 3—驱动电路; 4—放大电路;
5—记录器; 6—A/D转换器; 7—微型机系统;
8—CRT; 9—微机; 10—打印机; 11—步进电机驱动电路;
12—工作台; 13—试件

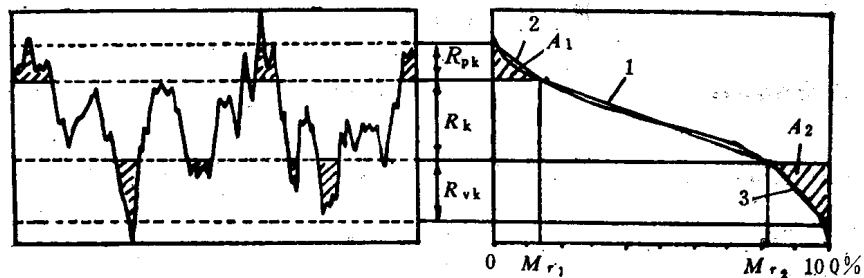


图2 R_k 等参数的定义

在相同的 R_a 或 R_z 情况下, R_k 小表示支承率好, 相应比较耐磨。 R_{pk} 为极易去除的峰高部分, R_{vk} 为储油的谷深部分。 M_{r1} 、 M_{r2} 为相应的实体比例。据悉, 西德 Mahr 与 Perthen 公司已准备将这组参数用于复合材料表面的评定。

鉴于我们的系统具有开发软件的灵活性, 对此编制了相应程序以计算并绘制这组参数与支承率曲线。图3为实测的研磨与磨削表面的 R_k 与 R_a 等参数, 这为开展有关科研提供了必要的手段。

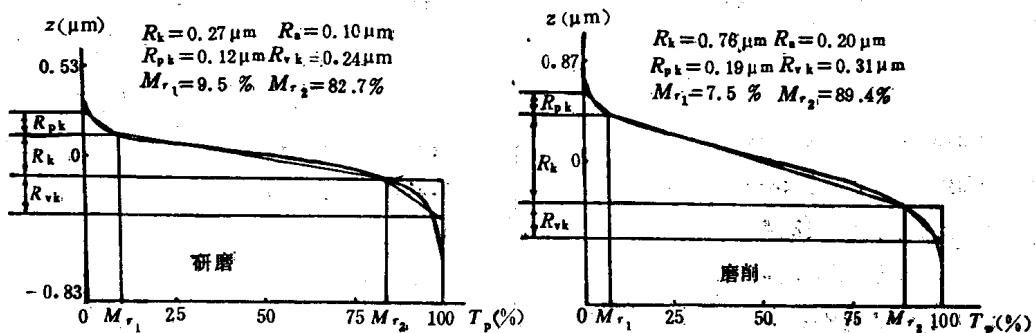


图3 研磨与磨削表面的 R_k 等参数

五、表面三维粗糙度参数的计算及三维形貌图形的绘制

由于表面轮廓参数只表征表面纹理某一方向上的特性, 并以此作为整个表面的统计特性, 这显然不够全面。而三维参数则能较合理地表征表面的几何特性。关于三维参数的全面论述可见参考文献[3], 本文仅简述在该系统上已可计算的参数。表1所列为该系统已开发的可计算参数及其计算式。表2为一电火花加工表面的实测值。图4为表面支承率曲线和幅度分布曲线, 由图4及参数 R_{sk} 、 R_{ku} 可知, 该表面属高斯分布。图5为该表面的二维相关函数, 可以看出该表面的相关函数在 x 和 y 两个方向上很快地衰减为零, 这说明电火花加工表面是一个各向同性的随机表面。图6为该表面的二维功率谱密度, 由于该面为各向同性的随机表面, 所以其功率谱近似地分布于空间频域内的圆形区域内。

有关该系统图形处理的功能详见参考文献[1]。最近我们又作了改进, 以方便操作和提高速度。图7所示为系统软件框图, 它采用人机对话“菜单”形式, 可绘制最大约 53 线 $\times$ 400 点/线 (打印机输出) 及 106 线 $\times$ 800 点/线 (绘图仪输出) 的图形。最大测量面积 14 $\times$ 14 mm², 当采样点为 31 线 $\times$ 400 点/线时, 绘制轴测形貌图需 40 秒, 截面图需 1 分钟 55 秒,

表1 表面三维粗糙度参数及其计算式

号	参 数	计 算 式
1	表面算术平均偏差 R_{aa}	$R_{aa} = \frac{1}{s} \iint_s z(x, y) dx dy, \quad s - \text{测量面积}$
2	表面均方根偏差 R_{aq}	$R_{aq} = \sqrt{\frac{1}{s} \iint_s z^2(x, y) dx dy}$
3	表面最大峰高 R_{ap}	$R_{ap} = \max(z(x, y))$
4	表面最大谷深 R_{av}	$R_{av} = \min(z(x, y))$
5	表面最大峰谷距 R_{ay}	$R_{ay} = R_{ap} - R_{av}$
6	表面有效高度 R_{ad}	两平行于基面且分别截得表面实体面积5%和90%的平面之间的距离。
7	表面 x 向算术平均斜率 Δ_{ax}	$\Delta_{ax} = \frac{1}{s} \iint_s \left \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right dx dy$
8	表面 y 向算术平均斜率 Δ_{ay}	$\Delta_{ay} = \frac{1}{s} \iint_s \left \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right dx dy$
9	表面 x 向均方根斜率 Δ_{qx}	$\Delta_{qx} = \sqrt{\frac{1}{s} \iint_s \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 dx dy}$
10	表面 y 向均方根斜率 Δ_{qy}	$\Delta_{qy} = \sqrt{\frac{1}{s} \iint_s \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2 dx dy}$
11	表面 x 向算术平均波长 λ_{ax}	$\lambda_{ax} = 2\pi R_{aa} / \Delta_{ax}$
12	表面 y 向算术平均波长 λ_{ay}	$\lambda_{ay} = 2\pi R_{aa} / \Delta_{ay}$
13	表面 x 向均方根波长 λ_{qx}	$\lambda_{qx} = 2\pi R_{aq} / \Delta_{qx}$
14	表面 y 向均方根波长 λ_{qy}	$\lambda_{qy} = 2\pi R_{aq} / \Delta_{qy}$
15	表面展开面积比 R_{as}	$R_{as} = s_0 / s, \quad s_0 - \text{表面展开面积}$
16	表面幅度分布 $f_z(z)$	表面上点位于某一高度 z 的概率密度
17	表面偏斜度 R_{sk}	$R_{sk} = m_3 / (m_2)^{3/2}, \quad m_k = \frac{1}{s} \iint_s z^k(x, y) dx dy$
18	表面陡度 R_{ku}	$R_{ku} = m_4 / m_2^2$
19	表面峰体积曲线 $V_p(z)$	某一平行于基面的平面截得的表面实体体积
20	表面面积支承率 T_p	一平行于基面的平面所截得的实体面积与测量面积之比
21	表面二维自相关函数 $R(\tau_x, \tau_y)$	$R(\tau_x, \tau_y) = \lim_{\substack{L_1 \rightarrow \infty \\ L_2 \rightarrow \infty}} \frac{1}{L_1 L_2} \int_{-L_1}^{L_1} \int_{-L_2}^{L_2} z(x, y) \cdot z(x + \tau_x, y + \tau_y) dx dy$
22	表面二维功率谱密度函数 $P(f_x, f_y)$	$P(f_x, f_y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau_x, \tau_y) \times e^{-j(f_x \tau_x + f_y \tau_y)} d\tau_x d\tau_y$