

机器零件的
表面质量
和接触

КАЧЕСТВО
ПОВЕРХНОСТИ
И КОНТАКТ
ДЕТАЛЕЙ
МАШИН

机械工业出版社

机器零件的表面质量和接触

〔苏〕 H.Б.捷姆金 著
Э.В.雷若夫

金同熹 译
张 思 校



机械工业出版社

本书介绍了机器零件表面质量的实验和理论研究现状，阐明了机械加工工艺对表面质量参数影响的研究结果，并援引了决定机器零件使用性能的接触特性的计算原则。

本书可供从事机器制造和仪表制造的工程技术人员和科研人员参考，也可作为高等院校机械制造专业师生的教学参考用书。

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И КОНТАКТ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Н.Б. Демкин

Э.В. Рыжов

《МАШИНОСТРОЕНИЕ》1981

• • •

机器零件的表面质量和接触

Н.Б. 捷姆金 著

〔苏〕 Э.В. 雷若夫

金同熹 译

张思 校

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）
（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

•
开本 787×1092 1/32 ·印张 9 ·字数 196 千字
1986 年 12 月北京第一版 ·1986 年 12 月北京第一次印刷
印数 0,0001—3,980 ·定价 2.35 元

•
统一书号：15033·6445

译者的话

机械产品的工作性能和可靠性指标，除了取决于产品本身的结构布局、制造精度和材料性能以外，在很大程度上还与零件的表面质量有关。影响零件表面质量的因素是多方面的，诸如加工方法、切削刀具形状、切削用量和工艺系统的刚度等等，因此，在机器零件加工中，如何控制表面质量以获得理想的接触特性，是一个迫切需要研究和解决的问题。

本书作者H.Б.捷姆金教授和Э.В.雷若夫教授，多年来在苏联加里宁工业学院从事金属表面质量的理论研究和科学实验，积累了极为丰富的资料，这些资料除了已在苏联主要科技期刊上发表以外，已有几本专著先后问世，可以说，本书是两位作者所发表过的论著的系统综合，也是研究金属表面质量问题的重要成果。

书中详细地论述了金属零件表面质量与接触特性的关系，分析了在各种条件下影响零件表面质量的因素，肯定了制造过程中控制表面质量的可能性及其有效途径。作者在进行大量实验的基础上获得了许多有参考价值的数据、图表和计算公式，特别是在最后一章中还提供了实用价值较大的专题附录，因此，本书对于从事金属表面质量研究的科技工作者来说，确是一本比较全面而实用的参考书。

本书译稿承南京工学院机械系副教授张思同志进行了认真的校订，在此谨表感谢。

由于译者水平有限，译文中的错误或欠妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

前 言

现代机器发展的特点是机器的运转速度和功率不断增大,其效率和精度也越来越高,因此,提高机器的可靠性和使用寿命问题就具有非常重要的意义。往往有这样的情况,结构布局完全相同的机器,但其可靠性并不一样。在很多情况下,这是由于机器零件制造的工艺过程不同所致。这就为在机械制造工艺方面的科学发展方向建立基础,即用工艺方法来控制机器的使用参数。

新的先进工艺方法的发展对设计更现代化的机器,降低制造成本和减少工时消耗都有一定的促进作用。研究零件加工表面质量的理论是一项重要的科学成就,它为机器零件可靠性的显著提高开辟了新的途径。

机器的许多使用性能,如耐磨性、接触刚度、疲劳强度、耐磨蚀性、接触电阻和热阻以及连接的密封性等等在很大程度上与零件接触的相互作用有关,而零件表面层的性能则是接触相互作用的基础。

为解决摩擦与磨损、接触刚度、结合部的密封性和导电性的计算问题,对机器零件接触时相互作用的研究,可以提出机器零件接触使用特性的工程计算方法。

零件的接触过程决定于几何参数,这些参数表征相配表面的粗糙度、波度、几何形状误差和物理机械性能,它们可以通过零件的加工工艺来控制。例如,在采用减少初期磨损的方法来_{提高}摩擦零件的耐磨性时,最好能按动配合面来加工,这种表面的粗糙度接近磨合过的零件粗糙度。由于波

度和宏观几何误差、残余应力、冷硬层以及零件表面质量其他指标的变化，零件的磨损可以减少，这主要是零件在磨合时磨损已减小的缘故。

因此，首先必须了解，什么样的微观几何形状和什么样的表面层性能才能保证所需的接触使用特性，其次就是要知道怎样才能获得具有所需性能的表面。第一个问题可以通过实验研究和根据能全面评定各参数的影响程度和作用特性的表面粗糙度模型进行理论分析来得到解决；而第二个问题则要用工艺方法来解决。因为每种加工工艺方法都能使表面层具有一定的数量和质量参数，如轮廓微观不平度高度、形状及其方向，轮廓峰的分布规律，残余应力的大小和方向，冷硬层的深度和程度等等，所以确定加工条件与表面层的各种参数之间的关系是有可能的。根据这种关系就可以选择制造零件的工艺方法，使表面层能得到所需的使用性能。

本书主要提供了机器零件接触特性的实验和理论研究以及在机械加工时对表面层特性进行工艺控制的研究成果，这些研究工作都是在本书作者指导和参加下于加里宁工业学院和布良斯克运输机械制造学院进行的。书中所列的实验研究结果是作者早期发表过的研究成果的进一步发展。

在汇编资料时，作者对理论与实验研究成果尽量采用便于实用的形式，特别是在本书中列出了计算时必须使用的数据表和若干参数的计算方法，评定机器零件接触特性的数学公式以及所获结果的几篇实用附录。当然，研究零件接触及其表面质量所取得结果的现实意义还不仅仅局限于书中谈到的一些实例，在其他方面，如结合部的导电性、过盈配合和粘结的强度以及与相配表面接触性能有关的其他问题，本书均未加以讨论。

目 次

译者的话

前 言

第一章 表面几何形状特性及其评定方法

(H.B.捷姆金) 1

- 一、表面微观几何形状特性 1
- 二、表面的地貌特性——支承长度率曲线 10
- 三、地貌特性和轮廓特性间的关系 20
- 四、测定微观几何形状特性的方法和仪器 24
- 五、微观几何形状非标准特性的测定方法 28

第二章 工艺方法对表面几何参数的影响

(Э.В.雷若夫) 34

- 一、机械加工时的表面粗糙度 35
- 二、车削时的表面粗糙度 44
- 三、平面磨削时的表面粗糙度 49
- 四、用砂轮端磨时的表面粗糙度 55
- 五、珩磨时的表面粗糙度 57
- 六、用砂带加工时的表面粗糙度 72
- 七、磁性-磨料加工时的表面粗糙度 90
- 八、用研磨膏研磨时的表面粗糙度 94
- 九、精整-强化加工时的表面粗糙度 97
- 十、粗糙度参数的工艺保证 108
- 十一、机械加工时的表面波度 125

第三章 工艺方法对表面层物理-机械性

能的影响(Э.В.雷若夫) 135

- 一、零件切削加工时表面层的物理-机械性能 140
- 二、精整-强化加工时的表面层的物理-机械性能 155

第四章 结合表面的相互作用和接触面积

(H.Б.捷姆金)	171
一、粗糙表面接触的研究	171
二、微观不平度和波度的接触、实际接触面积和 轮廓接触面积	179
三、实际接触面积的物理性质	182
四、粗糙面与光滑面的接触以及两个粗糙面的接触	184
五、轮廓峰模型及其变形	189
六、一般情况下接触特性的计算	196
七、实际接触面积和实际压力的计算	200
八、粗糙面接触变形的计算	205
九、接触的轮廓峰数和接触斑点的平均面积	207
十、粗糙面接触间的空隙容积	211
十一、粗糙球面的接触	215
十二、波纹表面的接触	222
十三、实际压力和轮廓压力与载荷的关系	227
十四、波纹表面接触间的空隙容积	228
十五、切向力对预位移和接触面积的影响	230
第五章 金属表面接触的流变性能(H.Б.捷姆金)	237
一、接触蠕变的研究	237
二、接触变形与时间关系的计算	240
三、研究接触蠕变的实验方法	246
四、接触变形的温度-时间关系	251
第六章 几篇技术附录	260
一、对接面变形的时间稳定性	260
二、接触的导热性	262
三、诸因素对正常接触变形的影响	267
四、粗糙表面接触的密封性	268
参考文献	273

第一章 表面几何形状特性 及其评定方法

一、表面微观几何形状特性

机器零件表面的不平度包括粗糙度、波度和宏观形状误差。宏观形状误差是属于单一的、经常是不重复的实际表面对于几何表面的误差(如轮廓峰高、轮廓谷深和锥度等)。波度则是周期性的、经常重复和尺寸相近的波峰和波谷的总体。同时波峰和波谷之间的距离比形成表面粗糙度的微观不平度要大,并超过了用来评定粗糙度的取样长度 l 。波峰之间的距离(波距)范围为 $0.8\sim 10\text{mm}$,而波高范围则为 $0.03\sim 500\mu\text{m}$ 〔45〕。

表面粗糙度是指峰距较小,构成表面起伏及在某个取样长度 l 内进行测量的微观不平度的总体。微观不平度峰距的变化范围为 $2\sim 800\mu\text{m}$,高度的变化范围为 $0.03\sim 400\mu\text{m}$ 。

此外,在形成粗糙面的轮廓峰上还有更小的不平度——亚微观粗糙度。对于亚微观粗糙度没有制定标准,因为目前还没有研制出很可靠的工具对它进行评定,但是,它在接触过程流动中是具有重要作用的。用电子显微镜检测表面的结果表明,亚微观粗糙度是由高度为 $2\sim 20\text{nm}$ 的不平度形成的。

应该指出,目前对波度和粗糙度之间界限的划分还是属于假定的,因此,根据指导性资料C93—3951—73规定,峰距与峰高之比大于40的不平度即为波度。如应用这一准则,则粗糙度与波度之间的界限可绘成图1.1的形式,虚线即为

文献^[46]中所划定的界限。

可以说,宏观误差为第一类误差;波度为第二类误差;粗糙度为第三、第四类误差而亚微观不平度则为第五、第六类误差。

零件表面微观不平度的形状和尺寸与加工的运动方式和加工方法,材料的机械性能和机床-夹具-刀具-工件系统的振动有关。亚微观粗糙度在很大程度上是由被加工材料的组织及其应力状态决定的。波度主要是在加工过程中产生强迫振动

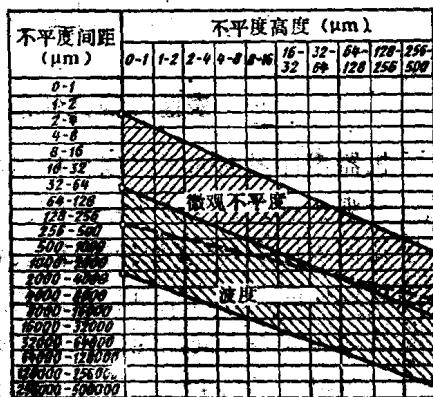


图1.1 波度和粗糙度的界限

而形成的。宏观误差则是机床和刀具的制造误差以及受切削力变化影响而产生弹性变形所引起的结果^[46, 45]。

在机器零件的摩擦和磨损过程中,表面的微观几何形状会发生显著的变化。此时变化最大的是相配表面中较软的表面,在磨合过程中,该表面的粗糙度向接近于硬表面粗糙度的方面变化,直到获得该摩擦条件特性的某一最佳值时为止。摩擦表面上的粗糙度是由于塑性挤压、疲劳损伤和某些情况下的微量切削以及深处的撕裂而形成的^[78]。

当塑料与金属摩擦时,曾经发现有与摩擦方向垂直的波纹^[12]。这种波形不平度的大小在很大程度上与压力有关。在金属与磨料摩擦时也会出现横向不平度。目前对摩擦时产生不平度的机理研究得还不够。

一般是利用表面轮廓来评定表面微观几何形状的。表面轮廓就是与该表面垂直并以某给定方向定位的截面。在与加工痕迹（或磨损痕迹）方向垂直的截形称为横向轮廓；而顺着加工痕迹方向的截形则称为纵向轮廓。

图1.2所示为采用不同加工方法时的表面轮廓（1~5

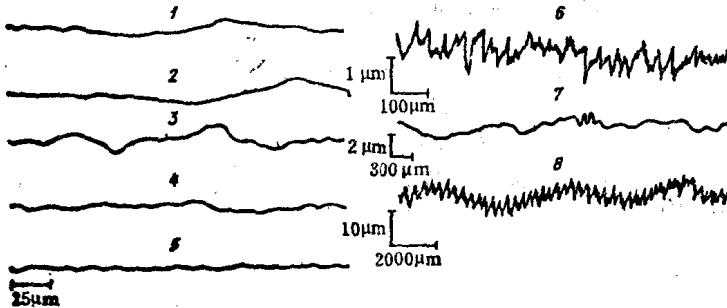


图1.2 不同加工方法时的表面轮廓图

1—车削 2、8—铣削 3~7—磨削

为垂直和水平放大倍数相同亦即无失真现象的横向轮廓；6~7为在横、纵坐标轴上放大倍数不同的横向和纵向轮廓；8为具有粗糙度和波度的表面轮廓）。

粗糙度的特性主要是按照轮廓在已标准化的取样长度 l 范围内评定。选取基本长度时须注意，在该长度内不应伴有其他形式的不平度（如波度和宏观误差）〔43, 45〕。

在苏联是采用自中线计算不平度高度的方式（M制）。在取样长度范围内沿轮廓方向划出中线时，应使

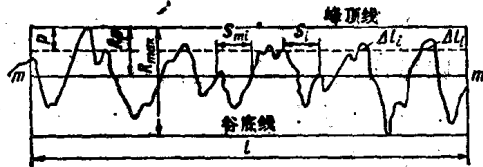


图1.3 表面轮廓的基本特性

中线上部和下部轮廓上各点的误差平方和为最小。通过最高不平度的轮廓峰顶和轮廓谷底的底部作出与中线 $m-m$ 平行的轮廓峰顶线和轮廓谷底线(图1.3)。根据这些线段计算出的轮廓特性有:

R_a ——轮廓算术平均偏差。即在取样长度内轮廓偏差($y_1, y_2, \dots, y_n$)绝对值的算术平均值:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \approx \frac{\sum_{i=1}^n |y_i|}{n} \quad (1.1)$$

R_z ——轮廓均方根偏差。即轮廓各点距中线的距离平方和的均方根。

$$R_z = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx} \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}} \quad (1.2)$$

R_s ——微观不平度十点高度。即在取样长度内五个最大的轮廓谷深和五个最大的轮廓峰高的平均值之和, 即:

$$R_s = \frac{(h_1 + h_2 + \dots + h_5) - (h_1 + h_2 + \dots + h_5)}{5} \quad (1.3)$$

R_p ——轮廓最大峰高。即在取样长度内自轮廓峰顶线至中线的距离;

R_{max} ——轮廓微观不平度的最大高度。即在取样长度内轮廓峰顶线与谷底线之间的距离。

表1.1为粗糙度等级、取样长度和粗糙度各参数间的概略比例关系。

具有明显统计意义的参数 R_a 和 R_z 最全面地反映了所研究轮廓段的性能。在测定 R_s 时共计算了十个点, 这个数值很

表1.1 不同粗糙度参数间的概略比例 [20, 43, 45, 135]

粗糙度等级	$R_a(\mu\text{m})$	$R_s(\mu\text{m})$	$l(\mu\text{m})$	$R_{\text{max}}(\mu\text{m})$	$P_p(\mu\text{m})$	$R_p(\mu\text{m})$
1		320~160		400~200		200~100
2		160~80	8.0	200~100	25~12.5	100~50
3		80~40		100~50		50~25
4	10~5	40~20	2.5	50~25	12.5~6.25	25~12.5
5	5~2.5	20~10		25~12.5	6.25~3.16	12.5~6.25
6	2.5~1.25	10~5		12.5~6.25	3.16~1.58	6.25~3.12
7	1.25~0.63	5~2.8	0.8	6.25~3.48	1.58~0.79	3.12~1.74
8	0.63~0.32	2.8~1.4		3.48~1.76	0.79~0.40	1.74~0.88
9	0.32~0.16	1.4~0.7		1.76~0.87	0.4~0.2	0.88~0.43
10	0.16~0.08	0.7~0.4		0.87~0.48	0.2~0.1	0.43~0.24
11	0.08~0.04	0.4~0.2	0.25	0.48~0.24	0.1~0.05	0.24~0.12
12	0.04~0.02	0.2~0.1		0.24~0.12	0.05~0.025	0.12~0.06
13	0.02~0.01	0.1~0.05	0.08	0.12~0.06		0.06~0.03
14		0.05~0.025		0.06~0.03		0.03~0.015

有条件来表示轮廓的特征，因其测定方法简单而得到应用。

参数 R_{max} 和 R_p 表示轮廓高度变化的界限。此时如果表面变得光滑时， R_s 即等于轮廓高度减小了的量。这两个数值对表面接触性能的影响很大。ГОСТ2789—73推荐 R_s 、 R_s 和 R_{max} 作为粗糙度高度的参数。在ГОСТ中还列举了几种表征不平度形状等级的指标：

S_m ——轮廓微观不平度的平均间距。即在取样长度内中线上诸分段长度的算术平均值，该长度等于轮廓线与中线两相邻交点（有正斜率）之间的距离。

S ——轮廓的单峰平均间距，为中线上诸分段长度的算术平均值，每一分段等于轮廓两个相邻轮廓峰的最高点投影间

的距离。

t ，—轮廓支承长度率，等于在取样长度内，一平行于中线的线与轮廓相截所得的各段截线长度之和与取样长度之比（图1.3）。

上述几种特性还不足以全面反映表面微观几何形状的特征，因为如果在 R_z 值相同时，不平度的形状及其高度的分布可能是完全不同的，因此，表面的使用性能也就不同。所以在计算粗糙面接触的相互作用时还必须使用一些辅助的几何参数。

轮廓的积分特性 K_r ，——轮廓的充填系数，即在取样长度内由被测轮廓和谷底线形成的图形面积与包括在峰顶线和谷底线之间的面积之比^[44]。

$$K_r = 1 - \frac{R_p}{R_{m+x}} \quad (1.4)$$

式中 $\frac{R_p}{R_{m+x}}$ ——取样长度内空间所占的面积与包括在峰顶线与谷底线之间的面积之比。

单个轮廓峰形状的特征可用下述概念表示：

轮廓峰顶的曲率半径：

$$r_i = \frac{\Delta l_i^2}{8 h_i} \quad (1.5)$$

式中 Δl_i ——用与中线平行距峰顶 h_i 等于 $0.3R_z \approx 0.05 R_{m+x}$ 的线上所截取的轮廓峰截面长度。

横向和纵向轮廓峰顶的曲率半径 r_n 和 r_{np} 的平均值，是按取样长度内五个最高峰顶曲率半径的算术平均值计算的。

$$r_n = \frac{\sum_{i=1}^5 r_{ni}}{5} \quad r_{np} = \frac{\sum_{i=1}^5 r_{npi}}{5} \quad (1.6)$$

轮廓峰平均曲率半径 r_m ,按公式(1.5)和(1.6)计算(在公式(1.5)中设 $\Delta l_i = \Delta l_m$,此处 Δl_m 为轮廓五个最高峰沿中线和 h_i 截长的算术平均值),该数值可取等于峰顶至中线的距离。

选用最高峰的理由是因为它在接触相互作用中起主要作用。

轮廓不平度倾角 γ_m ——在取样长度内轮廓与中线相交时所形成角度的算术平均值。

波度对于接触性能的影响是很大的,因为它能决定表面微观不平度可能发生接触的区域,而波峰的变形可能比微观不平度的变形要大得多。为了表示波纹表面在接触时的状况,采用以下几种波度参数。

波的最大高度 $W_{m,x}$ ——波形图上峰顶线与谷底线之间的距离。波形图峰顶线是通过测量段范围内最高峰顶画出的与波形图中线相平行的线。谷底线就是通过最深波谷的底部画出与波形图中线相平行的线。所有参数都是在一定的测量段长度 l_w 内求得的,该长度至少要包括五个波。

波的平均高度 W_z (和 R_z 一样,根据波形图的十个点测定)。

波的辗平高度 W_p ——自波形图最高峰顶至中线的距离。

波的平均间距 S_w ——波形图上波峰与中线相交的各点(有正斜率)之间的距离平均值。

波形图相对支承长度 t_w ——在距峰顶线 D_w 并与中线等距的线段上被波形图截取的诸长度之和与波形图所示长度之比。

纵向和横向波形图的轮廓峰平均曲率半径——测量段范

圈内轮廓峰半径的算术平均值,

$$r_{w\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{wi}}{n} \quad (1.7)$$

式中 $r_{wi} = \frac{\Delta l_{wi}^2}{8h_{wi}}$ ——单个波峰半径;

Δl_{wi} ——波形图在其中线上的所截长度;

h_{wi} ——峰顶线至中线的距离。

对于正弦曲线波形图:

$$r_{w\Pi} = \frac{5S_w^2}{32w_p} \quad (1.8)$$

除了粗糙度和波度以外,表面还具有宏观几何形状误差。例如,对圆柱面来说,横向的误差有椭圆度和棱圆度;纵向的误差则有锥度、中凸度、中凹度和弯曲度^[12]。平面的形状误差有直线度和平面度,可以用四种有代表性的图形来表示(图1.4a~d)。根据形状极限容许误差的标准方案,对圆柱面规定了九个精度等级,对平面规定了八个精度等级。

由基本尺寸决定的极限误差见表1.2和1.3。

在形状误差的量值方面,可以用极限形状误差 $\Delta_{m,x}$ 来表示。 $\Delta_{m,x}$ 即宏观不平度 $\ominus$ 峰顶至零件几何形状正确表面的最大距离(图1.4)。

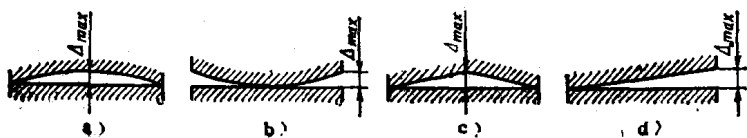


图1.4 不同形式的形状误差

$\ominus$ 原文误为微观不平度。——校者注

表1.2 圆柱面的形状容许极限误差

圆柱体直径 (mm)	不同精度等级的极限误差 (μm)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1~10	1	1.5	2	3	5	8	12	20	50
10~18	1	2	3	5	7	10	16	25	65
18~30	1	2	3	5	8	12	20	32	80
30~50	1.5	3	4	6	10	16	25	40	100
50~80	1.5	3	4	7	12	13	30	48	120
80~120	2	4	5	8	14	22	35	55	140
120~180	2	4	6	10	16	25	40	65	160
180~260	3	5	7	12	18	30	45	75	180
260~360	3	6	8	14	22	35	55	85	220
360~500	4	7	10	16	25	40	65	100	250

表1.3 平面的形状容许极限误差

平面长度(mm)	不同精度等级的极限误差 (μm)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
60以下	0.6	1.2	2.5	5	10	20	40	80
60~100	0.8	1.6	3	6	12	25	50	100
100~160	1.0	2	4	8	16	32	60	120
160~250	1.2	2.5	5	10	20	40	80	160
250~400	1.6	3	6	12	25	50	100	200
400~630	—	4	8	16	32	60	120	250
630~1000	—	5	10	20	40	80	160	320
1000~1600	—	6	12	25	50	100	200	400
1600~2500	—	8	16	32	60	120	250	500
2500~4000	—	10	20	40	80	160	320	630
4000~6300	—	12	25	50	100	200	400	800
6300~10000	—	16	32	60	120	250	500	1000