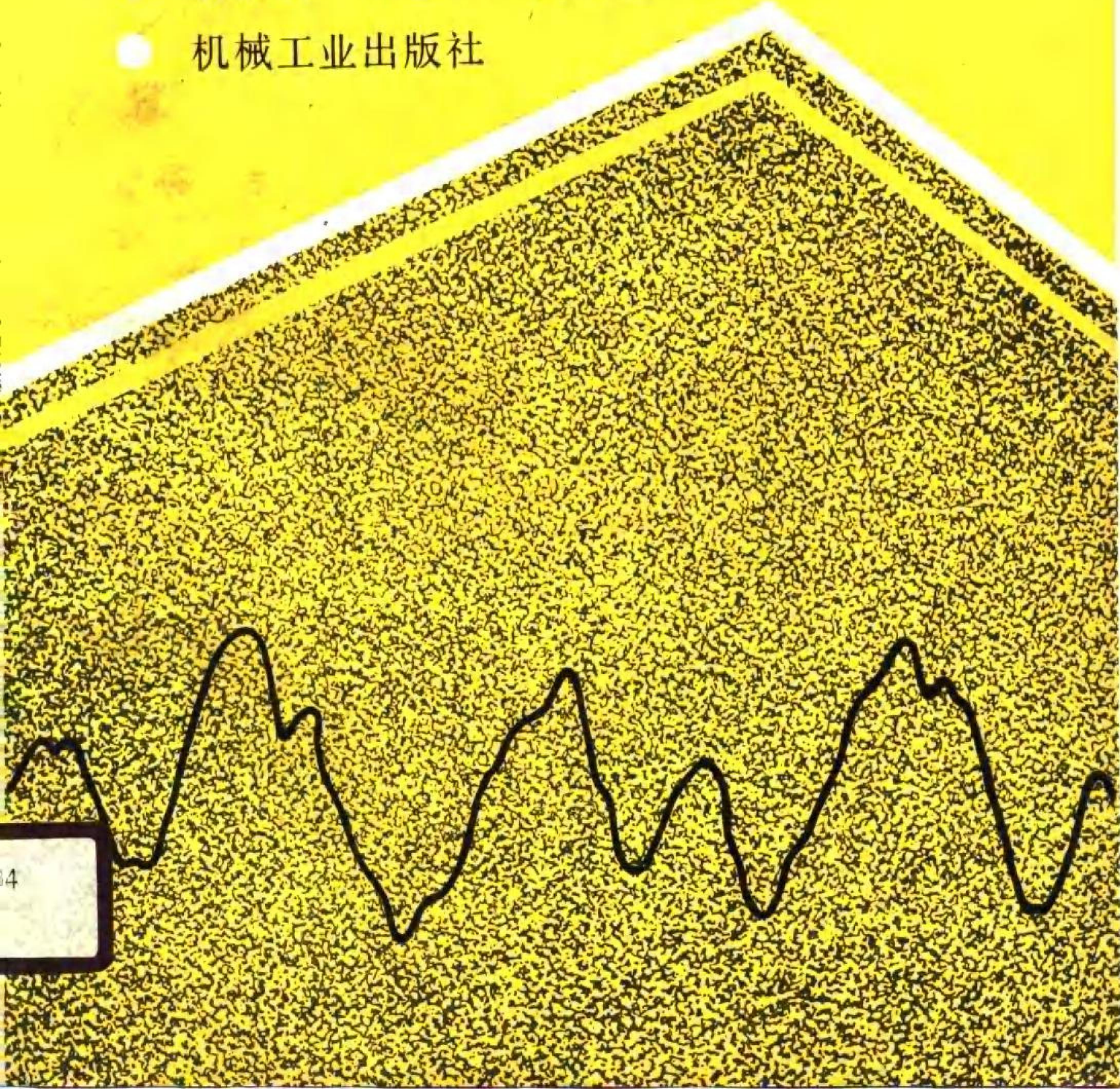


表面粗糙度 及其测量

袁长良 丁志华 武文堂 编著

机械工业出版社



4

本书综述了表面粗糙度的基本概念，评定参数及其选用，系统介绍了表面粗糙度的比较、光学、光学实时、电学和印模等测量方法和测量仪器。对微机在表面粗糙度测量中的应用和其它测量新技术也作了介绍。

本书可供从事机械设计、工艺、计量测试和标准化等工作的工程技术人员以及有关大专院校师生参考。

表面粗糙度及其测量

袁长良 丁志华 武文堂 编著

责任编辑：贺麓龠 责任校对：丁丽丽

封面设计：姚毅 版式设计：胡金瑛

责任印制：张俊民

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $12^{1/4}$ ·字数 293千字

1989年10月北京第一版·1989年10月北京第一次印刷

印数 0,001--4,000 ·定价：9.20元

ISBN 7-111-01353-0/TH·229

前 言

表面粗糙度对零件表面功能影响很大，控制表面粗糙度有助于提高产品质量，保证产品使用性能，延长使用寿命。远在本世纪20年代已有谈到表面粗糙度对零件功能影响的文章，30年代开始对表面粗糙度的参数和数值进行研究，并出现了测量仪器，50年代一些主要工业国相继颁布了本国标准，我国于1968年颁布了国家标准GB1301—68《表面光洁度》。从60年代开始，各国学者对表征表面质量的微观几何参数、评定方法及测量仪器进行了广泛深入的研究，并取得了硕果。70年代以来各主要先进工业国对表面粗糙度标准相继进行了修订，我国国家标准局在1983年也颁布了有关表面粗糙度的新标准。新标准对表面粗糙度的术语、定义和测量方法都做了科学的规定。本书在收集国内外有关表面粗糙度文献、标准的基础上，对表面粗糙度的基本概念、评定参数及其选用，以及表面粗糙度的测量作了比较系统的介绍。

本书可供从事机械设计、工艺、计量测试和标准化等工作的有关工程技术人员以及大专院校师生参考。

本书第一、二、三、四、七章由袁长良执笔，第五章由丁志华执笔，第六章由武文堂、丁志华执笔，第八、九章由丁志华、袁长良执笔，袁长良主编。

本书在编写过程中曾经毛起广同志审阅，并得到有关同志的热情帮助，谨致谢意。

由于我们水平所限，书中不当之处在所难免，热诚希望广大读者指正。

目 录

前言

第一章 表面粗糙度概述	1
一、表面粗糙度	1
二、表面粗糙度对零件功能的影响	1
1. 对摩擦和磨损的影响	1
2. 对疲劳强度的影响	2
3. 对接触刚度的影响	2
4. 对耐腐蚀性的影响	3
5. 对配合性能的影响	3
6. 对机械和仪器工作精度的影响	4
第二章 表面粗糙度的评定参数	5
一、表面粗糙度纵向评定参数	6
1. 轮廓算术平均偏差 R_a	6
2. 轮廓微观不平度十点高度 R_z	7
3. 轮廓均方根偏差 R_q	7
4. 轮廓最大高度 R_y	8
5. 表面粗糙度参数的平均值 \bar{R}	8
6. 轮廓微观不平度的平均高度 R_o	8
7. 轮廓最大峰高 R_p	9
8. 轮廓最大谷深 R_m	9
9. 平均深度 R_v	9
10. 填平深度 R_f 和填平系数 K_f	9
二、表面粗糙度横向评定参数	10
1. 轮廓微观不平度的平均间距 S_m	10
2. 轮廓的单峰平均间距 S	11
3. 轮廓均方根波长 λ_q	12
4. 轮廓算术平均波长 λ_a	12
5. 轮廓展开长度 L_o 和轮廓长度比 l_o	12
6. 轮廓峰密度 D	12
三、表面粗糙度形状评定参数	13
1. 幅度分布	13
2. 轮廓偏斜度 S_s	14
3. 驼峰度 K_p	14
4. 轮廓均方根斜率 Δ_q	14
5. 轮廓算术平均斜率 Δ_a	15
6. 轮廓支承长度 η	15
7. 轮廓支承长度率 t ,和轮廓支承长度率曲线 $t, (c)$	15

8. 峰顶曲率半径 ρ_{Δ}	16
9. 峰谷曲率半径 ρ_{∇}	16
四、表面粗糙度综合评定参数	16
1. 自相关函数 $R(\tau)$ 和相关长度 a	16
2. 功率谱密度函数 $P(\omega)$	17
3. 轮廓峰数 HSC	18
第三章 表面粗糙度标准和表面粗糙度选用	19
一、表面粗糙度标准的发展	19
二、表面粗糙度标准介绍	20
三、表面粗糙度代号及其注法	23
四、表面粗糙度的选用	27
五、各国表面粗糙度评定参数及数值系列对照	35
第四章 表面粗糙度测量概述	43
一、表面粗糙度测量技术的发展	43
二、表面粗糙度测量方法的分类	44
三、表面粗糙度的测量基准	46
1. 中线制.....	46
2. 包络线制	47
四、表面粗糙度测量的规定	48
1. 测量方向	48
2. 取样长度(基本长度) l	48
3. 评定长度(测量长度) l_r	51
4. 表面缺陷	52
五、测量仪器的校准	53
第五章 比较判别法	55
一、目测法	55
二、触觉法	58
三、比较显微镜判别法	58
四、实体剖面法	60
第六章 光学测量法	61
一、光切法与光切显微镜	61
1. 光切显微镜的工作原理	61
2. 光切显微镜的结构	62
3. 光切显微镜的使用	67
4. 表面粗糙度的光切法二维测量	83
二、干涉法与干涉显微镜	85
1. 光的干涉现象与干涉条纹	86
2. 干涉条纹的弯曲与表面微观不平度	88
3. 干涉显微镜的光源	88
4. 实现显微干涉法的几种方式	88
5. 干涉显微镜的测量范围	89
6. 干涉显微镜的误差分析	92

7. 干涉显微镜的检定	95
8. 6J型干涉显微镜	95
9. 6JA型干涉显微镜	102
10. 内表面干涉显微镜	100
11. 其它典型的干涉显微镜	108
第七章 光学实时测量	113
一、光学散射法	113
1. 镜反射法	114
2. 积分散射法	114
3. 漫反射比法	115
4. 角分布法	115
二、光学散斑法	115
1. 单幅散斑法	115
2. 干涉散斑法	118
三、光纤法	119
第八章 电学测量法	123
一、针描法与轮廓仪	123
1. 机械式、光学-机械式轮廓仪	128
2. 感应式轮廓仪	129
3. 电感式轮廓仪	133
4. 压电式轮廓仪	156
5. 光电式轮廓仪	165
二、电容测量法	169
三、微型计算机在表面粗糙度测量中的应用	171
1. 一维和二维参数的测量	171
2. 三维参数的定义和数学模型	172
3. 三维参数的测量和计算	173
第九章 其它测量法	176
一、全息干涉测量法	176
1. 单波长全息干涉测量法	176
2. 双波长全息干涉测量法	177
二、气动测量法	177
三、电子显微镜测量法	179
四、微波测量法	179
五、光栅测量法	180
六、光学传感测量法	181
七、频谱分析法	182
八、统计检验法	183
九、印模测量法	185
参考文献	187

第一章 表面粗糙度概述

一、表面粗糙度

表面粗糙度（原称表面光洁度）是反映零件表面上微观几何形状误差的一个重要指标，它主要是由于在加工过程中刀具和零件表面之间的摩擦，切屑分离时的塑性变形和金属撕裂，以及工艺系统中存在的高频振动等原因所形成的。表面粗糙度不包括由机床几何精度方面的误差等所引起的表面宏观几何形状误差

（如直线度、平面度和圆柱度等），也不包括在加工过程中由机床、刀具、工具系统的强迫振动等所引起的介于宏观和微观几何形状误差之间的波度。由图1-1可知，形状误差 F 、表面波度 W 和表面粗糙度 R 三者之间只有分级的不同，而没有原则上的区别。三者通常是按两波峰或两波谷之间的距离（即波距）的大小来区分的。波距小于1mm并呈周期性变化的，属于表面粗糙度范围；波距在1~10mm之间并呈周期性变化的，属于表面波度范围；波距在10mm以上，不呈周期性变化的，属于表面形状误差的范围。

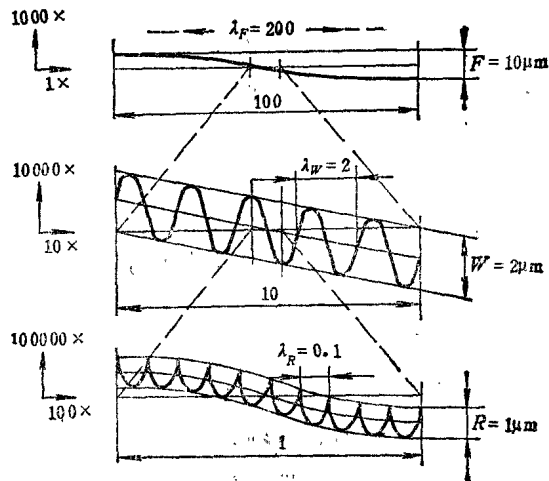


图 1-1

通过长期的生产实践使我们认识到，降低零件的表面粗糙度，对保证配合的可靠性和稳定性，对减小摩擦系数，降低动力消耗，对提高机械和仪器的工作精度和灵敏度，对增大支承面积，减少磨损，提高接触刚度，对减小应力集中，增加耐疲劳强度，减低振动和噪音等均起着重要的作用，即表面粗糙度直接影响着机械和仪器的使用性能和使用寿命。因此，在保证零件尺寸、形状和位置精度的同时，决不能忽视表面粗糙度。特别是对运转速度快，装配精度高，密封性要求严的产品，尤其需要注意。

二、表面粗糙度对零件功能的影响

1. 对摩擦和磨损的影响

众所周知，两个相互作用的表面作相对运动时，由于摩擦会消耗许多有用的能量。国际摩擦、磨损专家们认为，世界上的能源约有1/3是无用的摩擦损耗，就是说有相当可观的能量以某种形式消耗在克服机构的摩擦阻力上。而形成摩擦阻力的主要原因之一是由于零件表面粗糙不平。表面越粗糙，摩擦系数就越大，磨损现象就越严重。

美国国会最近所作的报告中指出，由于摩擦与磨损方面的原因而造成的损失有很大的节

约余地，估计每年约值1000亿美元，其中200亿是材料费。

在工业发达的国家里，国民经济总产量中约有一半是用于更换因磨损和类似原因而造成的废品。因此通过提高机器设备的寿命来节约开支，已成为生产发展的关注中心。

如果零件加工表面凸凹不平，在装配和使用过程中便会很快磨损，从而失去原有的精度。零件表面磨损情况如图1-2所示。

在最初阶段表面凸峰磨损很快，磨损曲线急速上升；在经过一段运转之后，表面接触面积逐渐增大，磨损速度减缓；当接触表面的粗糙高度降低到65~75%时，磨损速度稳定下来，曲线趋于平坦，初期磨损阶段结束，进入正常磨损阶段。这一过程表明，粗糙度较低的零件表面比粗糙度较高零件表面要耐磨。因此为了提高零件的耐磨性，必须规定表面粗糙度。

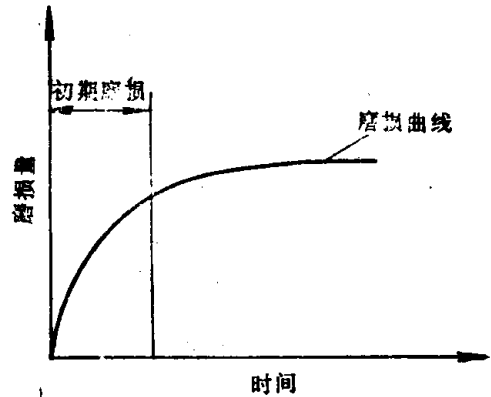


图 1-2

但必须指出，当表面过于光滑时，由于金属分子的吸附力加大，接触表面间的润滑油层将会被挤掉而形成干摩擦，使金属表面发热产生胶合，从而损坏表面。也就是说接触表面太光滑时，反而会使摩擦系数增大，加剧磨损。试验证明，最小磨损并不是在表面最光滑时获得的，而是在适当的粗糙度条件下获得的。例如，气缸壁最合适的表面粗糙度为 $R_a=0.63\sim 0.80\mu\text{m}$ ，而小型电动机轴颈最合适的表面粗糙度为 $R_a=0.32\sim 0.50\mu\text{m}$ 。

此外，表面加工纹理方向（主要指加工痕迹的方向）对摩擦也有重要的影响。试验表明，当表面纹理与运动方向重合时，摩擦阻力最大；而当两者之间成一定角度或表面纹理方向无规则时，摩擦阻力最小。

2. 对疲劳强度的影响

疲劳强度除与物理、机械等因素有关外，与零件的表面粗糙度也有很大的关系。机器零件的损坏，特别是在承受交变载荷时，多半是由于零件表面凸凹不平而引起的应力集中所造成的。零件表面越光滑，因材料疲劳而引起的表面断裂的机会就越少。

总的说来，疲劳强度随表面粗糙度参数值的增大而降低，降低零件的表面粗糙度，就可以增加零件的疲劳强度。如车削、铣削加工的零件比磨削加工的零件寿命要低得多；受冲击载荷的零件，由于表面经过抛光，寿命可提高几倍；齿轮的承载能力和耐磨性与齿面粗糙度也有很大的关系，齿面粗糙度高，将导致实际支承面积的减少，单位面积上接触压力的增大和弯曲疲劳强度的降低。

3. 对接触刚度的影响

由材料力学可知，物体受力之后，首先产生弹性变形，如果作用力相同，其变形越小，则说明刚度越大。

机器的刚度不仅决定于机器本身的刚度，而且在很大程度上取决于各零件之间的接触刚度。所谓接触刚度，是假定零件本身为绝对刚体，只考虑零件表面抵抗外力的能力。

由于已加工的零件表面粗糙不平，以这种零件相互配合之后，最初是点、线接触，实际接触面积很小，因此表面越粗糙，在一定载荷下表面层出现的塑性变形就越大，表面层的接触刚度就越差。

试验证明，光滑表面接触点上的变形应力值约为材料硬度的一半，而粗糙表面接触点上

的应力值约为材料硬度的二三倍。这种现象表明，对于粗糙表面，要在较大的作用力下，才能使凸峰表面变形，获得一定的接触面积；对于光滑表面，在表面凸峰变形比较小时，就能获得较大的接触面积。所以，为保证一定的接触刚度，应合理地规定表面粗糙度参数值。

4. 对耐腐蚀性的影响

金属腐蚀对国民经济构成了巨大的危害，它引起的后果不仅在于可以看到的金属材料和机械仪器的生锈损坏，更重要的是它还会使零件丧失功能而造成突然事故。

腐蚀一般包括金属材料表面的腐蚀与应力腐蚀两个方面。金属材料腐蚀主要是指金属表面受周围介质的化学作用而造成破坏的一种现象，如钢铁结构在空气中生锈，船舶外壳在海水中锈烂。据统计全世界每年冶炼的金属，由于腐蚀所造成的损失达1亿吨以上。其中尤以钢铁的损失最大，约占年产量的20%。

应力腐蚀破裂比金属表面腐蚀更为恶劣，虽然裂缝的扩展需要一段时间，但破坏通常在较短的时间内突然发生，因而常常造成严重的后果。

零件表面越粗糙，其谷底的曲率半径就越小，也就更易聚集腐蚀性液体和气体。如图1-3所示，腐蚀作用沿箭头方向扩散。

众所周知，抛光过的表面可大大改善表面质量，减少生锈和腐蚀。因此降低表面粗糙度，可提高抗腐蚀能力，从而延长机械和仪器的使用寿命。

5. 对配合性能的影响

零件的配合性质是根据机械和仪器的工作条件来决定的。在设计中都是以假定零件表面为理想的光滑表面来确定零件配合性能的。但实际上零件表面不是平滑的几何表面，而是存在着微观几何形状误差的。所以在零件配合时，配合件的表面不是全部都接触，而仅仅是配合面上某些突出的峰顶相接触，实际接触面积比理论的接触面积要小，如图1-4所示。

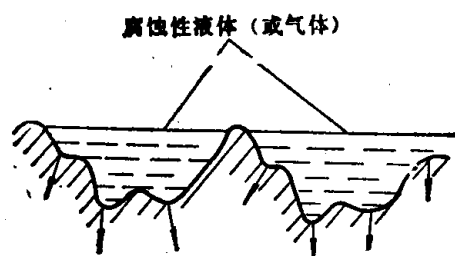


图 1-3

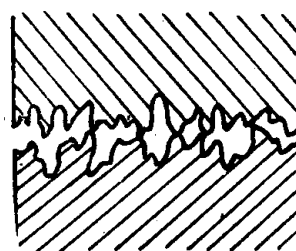


图 1-4

对车削和铣削的零件，由于表面粗糙不平的影响，两个表面实际有效接触面积仅为理论接触面积的15~20%，精磨的表面为30~50%；而精研（磨）后的表面可达90%以上。

对用于滑动轴承和滑动导轨的间隙配合，表面粗糙会破坏液体摩擦，加剧接触表面的磨损，使配合间隙扩大，从而改变了原来的配合性质。

对用于定位和对中的过渡配合，表面粗糙也会在使用和装拆过程中，使间隙扩大，从而降低了定心和导向精度。

对过盈配合，表面粗糙会使实际有效过盈减小，而达不到设计规定所能承受的扭矩，降低了连接强度。

所以降低零件表面粗糙度，对提高间隙配合的稳定性，保证过盈配合的连接强度都具有非常重要的意义。

6. 对机械和仪器工作精度的影响

从以上可知，表面粗糙不平不仅对改变配合性质，增大摩擦阻力和摩擦力矩，加快磨损和降低接触刚度有影响，而且还会影响机构的精度，仪器示值的稳定性，引起测量误差。例如，在定位表面上，由于表面粗糙使有效接触面积减小，在一定压力作用下产生较大的弹性和塑性变形，从而使定位不稳，引起较大的定位误差。又如在精密量块用光波干涉法进行测量时，测得的尺寸是量块的光学长度，而不是几何长度。两个长度的不同取决于量块与平晶表面对光的穿透程度，而这一点则与表面粗糙度有关。石英和玻璃的穿透程度为零；而抛光过的钢制零件表面大约为 $0.018\mu\text{m}$ ，如果把钢制量块研合在平晶上进行检测，则必须加上一个修正量。

除上所述，表面粗糙度对密封性，反射能力，导电性以及机件的外观质量等也有影响。

第二章 表面粗糙度的评定参数

零件表面即使经过最仔细的精密加工，在显微镜下观察仍然是粗糙不平的。整个表面层结构是由一系列具有不同幅度和间距的峰和谷来表征的。表面上微观不平度的分布根据加工方法性质的不同，可以是定向的，也可以是各向同性的。经过车削、铣削和刨削定向加工法加工的表面，分布的周期性和方向性都很强，分布规律接近于标准高斯分布。经过抛光、研磨等非定向加工法加工的表面，是以随机性为主的表面，分布的方向性不强，分布规律是偏斜的高斯分布，或是别的类型的分布。实际表面形貌特征可能象地球表面一样复杂，属三维表面轮廓，如图2-1所示。

随着模拟技术、测量技术和计算技术的不断发展，测量仪器的不断创新，有可能对零件的表面形貌进行更加精确的描述。为了能充分完整的反映表面微观几何形状的特性，各国用以研究或纳入标准采用的评定参数已达30余个，如纵坐标特征参数（又分为统计参数 R_a 、 R_q 等和单值参数 R_s 、 R_v 等）、频率特征参数 λ_a 、 λ_q 、 Δ_a 、 Δ_q 、 S_m 、 S 、 t 等和无量纲特征参数 HSC 、 S_s 、 K_s 、 N 等。目前配有微计算机、电视屏幕显示、打印和曲线记录仪的最新仪器Talysurf-6型可测量的参数已达21个。

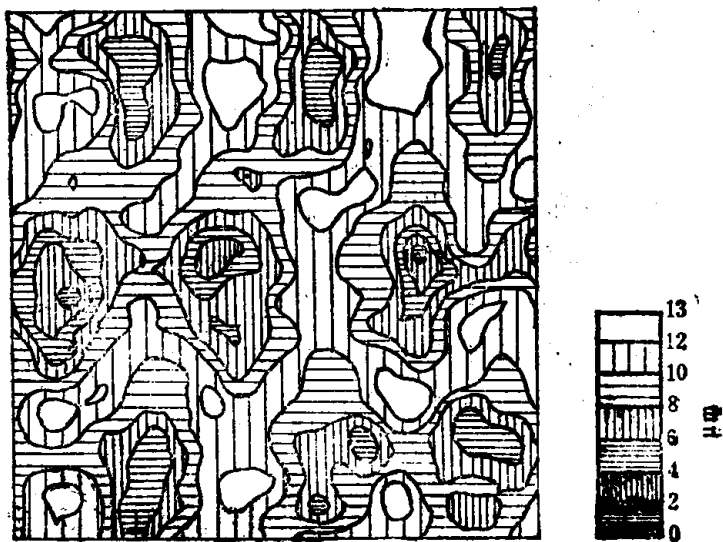


图 2-1

如此多的评定参数对满足使用要求来说确实是件好事。但由于每个参数只能局部地反映轮廓某些方面的特性，也就是说，它们对表面的功能特征并不能完整地反映出来，因此有必要对这些评定参数进行分析，弄清各个参数的特征，以便合理地选择最佳评定参数，更好地控制表面质量。

目前各国常用的表面粗糙度评定参数如下：

一维纵向评定参数（高度参数）

1. 轮廓算术平均偏差 R_a (CLA 、 AA 、 H_{av}) \ominus
2. 轮廓均方根偏差 R_q (R_{ms} 、 σ_x 、 H_{rms} 、 R_{sq} 、 R_{qz})
3. 轮廓微观不平度十点高度 R_z (H_{10-2} 、 H_{10-1} 、 R_{10-2} 、 R_{10-1})
4. 轮廓最大高度 R_v (R_{max} 、 R_t 、 R_{tm} 、 P_t)
5. 表面粗糙度参数的平均值 \bar{R}
6. 轮廓微观不平度的平均高度 R_s

\ominus 圆括号内为近似的参数。

7. 轮廓最大峰高 R_z (R_z 、 R_z 、 G)
 8. 轮廓最大谷深 R_m
 9. 平均深度 R_a
 10. 填平深度 R_v 和填平系数 K_v (K_v)
- 一维横向评定参数 (间距参数)
1. 轮廓微观不平度平均间距 S_m
 2. 轮廓单峰平均间距 S
- 二维评定参数
1. 轮廓算术平均波长 λ_n
 2. 轮廓均方根波长 λ_r
 3. 轮廓展开长度 L_0 和轮廓长度比 l
 4. 轮廓峰密度 D (HSC 、 N)
 5. 幅度分布 n
 6. 轮廓偏斜度 S_s (R_{s1})
 7. 驼峰度 K_s (E 、 R_{s2})
 8. 轮廓均方根斜率 Δ_r (S_r)
 9. 轮廓算术平均斜率 Δ_n (S_n)
 10. 轮廓支承长度 η
 11. 轮廓支承长度率 t (t_n 、 t_r)
 12. 自相关函数 $R[\tau]$
 13. 功率谱密度函数 $P[\omega]$

一、表面粗糙度纵向评定参数

1. 轮廓算术平均偏差 R_a

轮廓算术平均偏差 R_a 为取样长度内轮廓偏距绝对值的算术平均值 (图2-2), 即

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (2-1)$$

式中 $y(x)$ ——基于中线的表面轮廓高度;
 l ——取样长度。

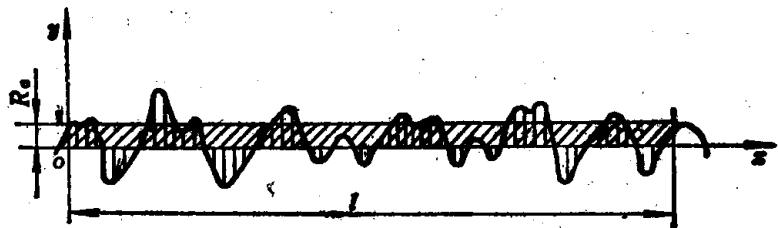


图 2-2

或近似为

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

轮廓算术平均偏差 R_a 是最早提出来用于评定表面微观几何形状的参数之一, 它是把经过滤波的粗糙度轮廓曲线的幅度分布取平均值。从统计运算考虑取平均的概念易于理解和接受, 而且采用模拟电路测量时运用积分型式便可实现, 在表面粗糙度电测量仪上不需要复杂的计算就能得到比较可靠的结果。当对模拟电路测量发生疑问需要校核时, 也可直接对轮廓记录图形进行简单的计算, 求得 R_a 值。 R_a 仍然是世界各国普遍采用的参数, 几乎每个国家的

表面粗糙度标准都以它作为最基本的评定参数(包括ISO4287/1—1984)。但它对表面微观几何形状的描述是不够完善的,最明显的表现是其数值上的不稳定性。在不同处测量的结果有达30%的离散性(当然也有一部分是测量误差)。同一截面位置上不同工件的测量结果离散性更大。这说明除了加工中的不稳定因素之外还包括了 R_a 本身的不稳定性。

尽管存在以上的不足之处,可是 R_a 与其它一维参数比较仍然是应用最广泛的。 R_a 参数的统计意义是一阶原点绝对矩,在一定程度上反映了轮廓高度(偏距)相对于一条基准线(中线)的离散程度。测量 R_a 的轮廓仪是应用最普遍的表面粗糙度测量仪器之一。但表面过于粗糙或太光滑时不宜用轮廓仪进行测量。

2. 轮廓微观不平度十点高度 R_z

轮廓微观不平度十点高度 R_z 为取样长度内5个最大的轮廓峰高的平均值与5个最大的轮廓谷深的平均值之和(图2-3),即

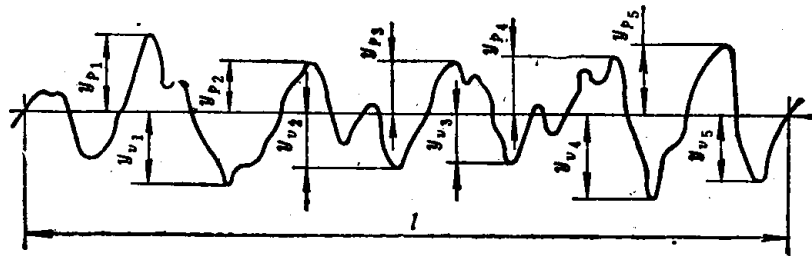


图 2-3

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 y_{p_i} + \sum_{i=1}^5 y_{v_i} \right) \quad (2-2)$$

对同一表面, R_z 的离散性比 R_a 还要大。特别是对很光滑的表面,轮廓的随机性很大,故仅取十点是不能描述整个表面微观几何形状特性的。

参数 R_z 特别适合于评定光滑表面的表面粗糙度。 R_z 适合用光学仪器测量。在用干涉显微镜进行 R_z 测量时,测量误差是比较大的。现在已研制出用带有计算机的轮廓仪对 R_z 进行测量,这是一个很大的进步。但这仅仅消除了测量者的主观误差,其它方面的测量误差仍取决于测量系统本身。

在国外早就有人提出了参数 R_z 测量的不稳定性。尤其对小面积表面(如顶尖、切削刃等处)的表面粗糙度的测量,就很难在取样长度内找到十个峰和谷的点,尤其当视场范围不够一个取样长度时,更不可能按定义取点计算。这也许就是机械工业发达的美国、英国、法国、瑞典等国家在其表面粗糙度标准中没有采用 R_z 的主要原因。但由于ISO/R468规定 R_z 为主要评定参数,因此很多国家的表面粗糙度标准还是采用了这个参数。

3. 轮廓均方根偏差 R_q

轮廓均方根偏差 R_q 为取样长度内轮廓偏距的均方根值。(图2-2),即

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} \quad (2-3)$$

参数 R_q 表示轮廓偏离中线的程度,是数理统计中常用的一个特征参数。早在40年代,美国、苏联等国家的表面粗糙度标准中就采用了此评定参数。但由于实现测量 R_q 的轮廓仪的电子线路比较复杂,致使后来各国的标准中均未采用。但近些年来研究部门却又在大量应用参数

R_z ，因为表面粗糙度具有随机特性，符合数理统计规律， R_z 则相当于数理统计中的标准偏差 σ 。此外这也是与电子技术、图象识别技术的发展和运用分不开的，因为表面粗糙度轮廓检测仪与微型计算机连接使用，直接测量记录 R_z 值已不成问题了。

4. 轮廓最大高度 R_y

轮廓最大高度 R_y 为取样长度内轮廓峰顶线与轮廓谷底线之间的距离(图2-4)，即

$$R_y = \max R_i \quad (0 \leq i \leq k)$$

$$R_i = y_{pi} + y_{vi} \quad (2-4)$$

式中， y_{pi} 、 y_{vi} 分别为第 i 个轮廓峰高和第 i 个轮廓谷深， k 为取样长度内的峰谷个数。

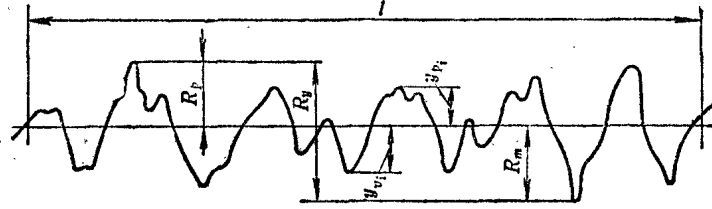


图 2-4

轮廓最大高度 R_y 是对被测轮廓区段上最大峰谷高度的单一评定，不属于一个完全的统计参数，不涉及在最大峰高与最大谷深之间的轮廓如何变化。尤其在测量均匀性较差的表面时，由于被测部位不同，在理论上会产生很大的离散性。

由于参数 R_y 的定义，决定了该参数的测量方法很简便，只要读一次数就可获得结果。特别是对某些小表面(如手表零件、刀刃、斜棱、顶尖等)和圆弧表面(如轴承滚道、钢球等)，用参数 R_y 便于处理，从而弥补了参数 R_z 的不足。因此， R_y 仍被世界各国广泛采用。从定义上分析，民主德国为改善参数 R_z 的测量条件不确切而提出的参数 $R_{z,m}$ ，以及日本和欧洲一些国家标准所采用的 R_{max} 与参数 R_y 基本一致，若遇有这些参数的要求时，可按 R_y 进行评定。

由于参数 R_y 的定义，决定了该参数的测量方法很简便，只要读一次数就可获得结果。特别是对某些小表面(如手表零件、刀刃、斜棱、顶尖等)和圆弧表面(如轴承滚道、钢球等)，用参数 R_y 便于处理，从而弥补了参数 R_z 的不足。因此， R_y 仍被世界各国广泛采用。从定义上分析，民主德国为改善参数 R_z 的测量条件不确切而提出的参数 $R_{z,m}$ ，以及日本和欧洲一些国家标准所采用的 R_{max} 与参数 R_y 基本一致，若遇有这些参数的要求时，可按 R_y 进行评定。

5. 表面粗糙度参数的平均值 \bar{R}

表面粗糙度参数的平均值 \bar{R} 为在 n 个取样长度内按评定参数确定 n 个表面粗糙度参数值取平均值，然后在 k 个评定长度内取平均值，即

$$\bar{R} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_j \right) \quad (2-5)$$

式中 R_j —— 在一个取样长度内确定的表面粗糙度参数值；

n —— 在一个评定长度内的取样长度个数；

k —— 评定长度的个数。

参数 \bar{R} 是为了避免在不同截面处和同一截面处的不同位置取样造成离散性而提出的。该参数在一定程度上起统一稳定作用，其稳定性必然要比在一个取样长度内确定的表面粗糙度参数值 R_z 高。

\bar{R} 的测量要比 R_z 麻烦的多。特别是对参数值不能进行自动处理时，测量点将 $10nk$ 倍地增加。

6. 轮廓微观不平度的平均高度 R_a

轮廓微观不平度平均值 R_a 为取样长度内轮廓峰高的平均值与轮廓谷深的平均值之和，即

$$R_a = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} y_{pi} + \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} y_{vi} \quad (2-6)$$

轮廓微观不平度的平均高度 R_a 反映的是轮廓在高度方向变化的程度。因为参数 R_a 对取样

长度十分敏感, l 减小时, R_a 值趋向于零, l 增加时, R_a 值趋向于轮廓最大高度 R_z 值, 所以按此参数评定的结果也有很大的不稳定性。此外, 测量时对随机表面轮廓也不便于一个个地分辨出轮廓的峰和谷, 而且在电动轮廓仪上处理时电路会把高频部分的轮廓谷峰滤掉, 用光切显微镜和干涉显微镜测量时, 较大的波形会被人眼所忽视。特别是对于轮廓很不相同的表面 (如圆弧、三角形、梯形、正弦曲线等), 可能得出同样的 R_a 值 (图2-5)。因此在任何情况下, R_a 均不能用来作为评定表面粗糙度的功能特性的基础。但它所提供的有关信息, 可以作为对参数 R_a 的补充。

7. 轮廓最大峰高 R_p ,

轮廓最大峰高 R_p 为取样长度内, 从轮廓峰顶线至中线的最大距离, 如图2-4所示。

8. 轮廓最大谷深 R_m

轮廓最大谷深 R_m 为取样长度内, 从轮廓谷底线至中线的最大距离, 如图2-4所示。

9. 平均深度 R_v

平均深度 R_v 是在取样长度内轮廓各点到轮廓谷底线距离之和的算术平均值, 如图2-6所示。

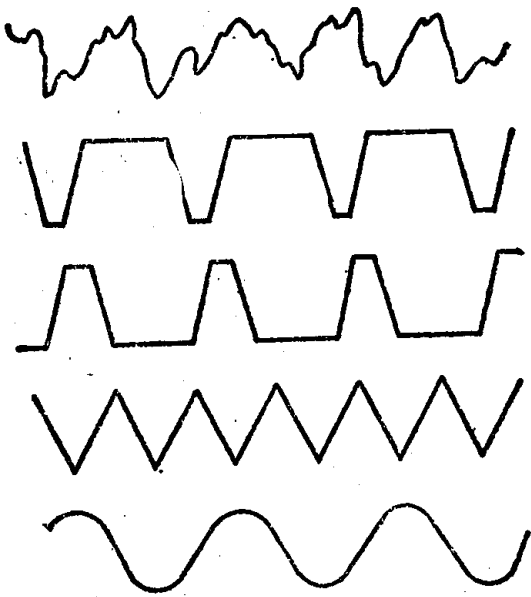


图 2-5

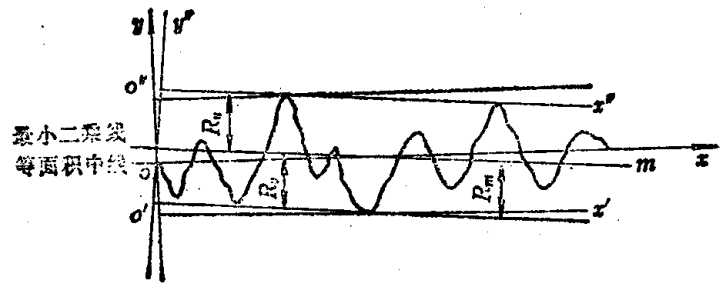


图 2-6

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y'(x) dx \tag{2-7}$$

R_a 在一定程度上反映了轮廓形状的微观不平状况, 但几乎没有一个国家的表面粗糙度标准采用此参数, 因为评定参数应能尽量反映微观不平度的变化, 而 R_a 却把它折衷了。

R_a 的测量与 R_z 一样麻烦, 反映的信息不多, 与轮廓最大谷深 R_m 差不多。

10. 填平深度 R_v 和填平系数 K ,

填平深度 R_v 是指在取样长度内, 轮廓各点到轮廓峰顶线距离总和的算术平均值[⊖], 如图2-6所示。

$$R_v = \frac{1}{l} \int_0^l y''(x) dx \tag{2-8}$$

⊖ R_v 为丹麦所用代号, 意大利代号为 R_e , 有的国家用 R_p 表示。

R_s 与轮廓最大峰高 R_p 近似相等,且有如下关系式:

$$R_s = R_a + R_p$$

填平系数 K_f 为填平深度 R_a 与轮廓最大高度 R_s 之比,即

$$K_f = \frac{R_a}{R_s} \quad (2-9)$$

显然, $0 < K_f < 1$ 。 K_f 越小,表明该表面的耐磨性和支承刚度就越好。

R_p 是一个非常实用的参数,它与 R_s 的比值可以判别峰是高而窄的,还是矮而宽的,假如 R_p 与 R_s 的比值比较大,则意味着峰是高而窄的;反之,如 R_p 与 R_s 的比值小,则峰就具有较宽的,或较圆的形状。

从图2-7可看出,图a、b的最大高度 R_s 完全相同,而 R_p 则各不相同。显然 R_p 越小,机械性能越好,因为接触面积越大越耐磨。

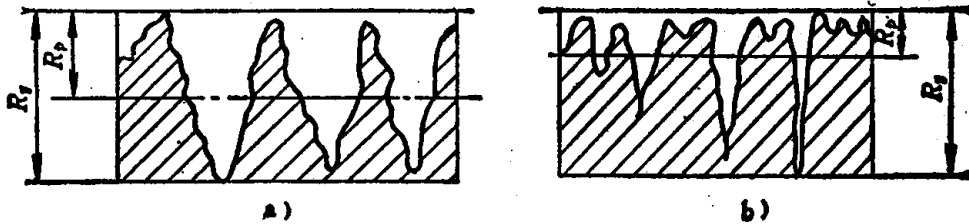


图 2-7

以上11个评定参数是描述表面微观几何形状高度方向的参数。如前所述,每个参数都有一定的不完整性。较为稳定的是 R_a 、 R_z ,容易测量的是 R_s ,应用最广的是 R_a , R_p 是用精密的光学量仪(光切显微镜和光波干涉显微镜)进行表面粗糙度测量的最合适的参数。

表2-1列出了对26个国家表面粗糙度标准中,纵向评定参数的使用频率统计。

表2-1 高度参数各国标准使用情况

评定参数	R_a	R_z	R_s	R_p	R_q	R_v
使用国家(个)	26	16	13	6	4	4
使用频率(%)	100	61.54	50	23.08	15.33	15.38

纵向评定参数虽然目前正在广泛应用,但其数值大小与表面使用性能并无定量或直接的关系。它们的完整性与使用性能之间差别较大。有些使用性能,如磨损特性、外观质量等并非高度参数所能够描述的。这些将在下面的间距方向参数中叙述。

二、表面粗糙度横向评定参数

1. 轮廓微观不平度的平均间距 S_m

轮廓微观不平度的平均间距 S_m 为取样长度内轮廓与中线相交点的各个微观不平度间距(含有一个轮廓峰和相邻轮廓谷的一段中线长度)的平均值(图2-8),即

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{m_i} \quad (2-10)$$

式中 S_{ni} ——轮廓与中线相交点的第 i 个微观不平度间距。

苏联国家标准中就规定了参数 S_m 的系列值。近十年来各国都重视了对 S_m 的研究。我国新标准中也采用了 S_m 并规定了数值系列。 S_m 是对轮廓间距的一种度量。由于 S_{ni} 之间有互相补偿的作用，故使用等面积线 ($y = \bar{y}$) 作为中线也不会产生较大的误差。

2. 轮廓的单峰平均间距 S

轮廓单峰平均间距 S 为取样长度内轮廓的单峰间距 (两相邻单峰最高点之间的距离在中线方向上的投影长度) 的平均值 (图 2-9)，即

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (2-11)$$

式中 S_i ——第 i 个相邻单峰最高点之间的间距。

轮廓微观不平度平均间距 S_m 和轮廓单峰平均间距 S 两个参数提供了轮廓表面的横向信息，都能对表面加工纹理的细密度作出评价， S_m 反映了轮廓对于中线的交叉密度， S 则表征了峰的密度。 S_m 与 S 一起在各国标准中被广泛采用，它对评价承载能力、耐磨性都具有重要的意义。

参数 S_m 和 S 的最突出优点是统计意义明确，不需要特殊的仪器便可进行测量。用光学量仪或具有记录轮廓图形装置的量仪均可从轮廓图形中测出。利用模拟或数字电路进行处理的直接读数仪器，也只需要加一个比较简单的交点计数器即可测量。用近期研制成功的触针式测量仪已能直接读出 S_m 值和 S 值。

用触针式轮廓仪测量 S_m 和 S 的方法如下：

根据被测件参数值和加工方法，选用合适的仪器截止波长和垂直水平放大倍数。所用截止波长 (取样长度) 至少应大于 S_m 的 5 倍；垂直放大率应采用最大倍率；对于一般间距大于 $100\mu\text{m}$ 的可用 20 倍水平放大，其余应采用 100 倍。一般宜采用独立参考基准 (即不用支承导头)，以免影响原始轮廓图形。

记录下轮廓图形后，按取样长度分段，在每段取样长度内确定中线位置。中线的方向和高低只需用目估定位即可，这对计算 S_m 影响不大。然后对轮廓曲线与中线交叉点计数，计数时对小于取样长度 1% 的微小间距不予计入。

按下式求得 S_m 值为

$$S_m = \frac{2l}{n-1} \quad (2-12)$$

式中 l ——取样长度；
 n ——交点个数。

同样，在轮廓图上取样长度内对相邻单峰计数，用取样长度除以峰的个数即可求得 S 值。

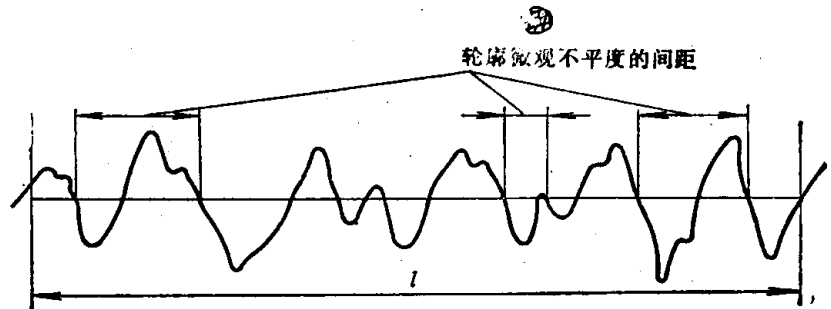


图 2-8

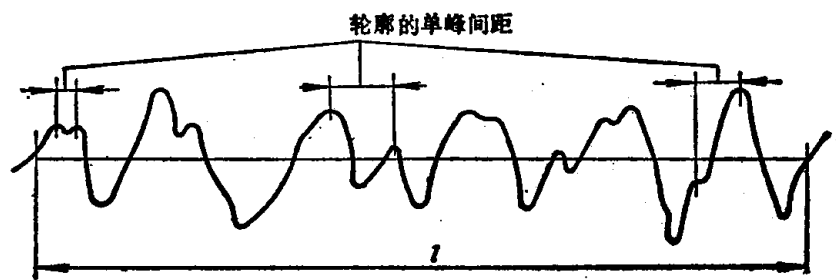


图 2-9