

表面粗糙度的评定和测量

毛起广 编著

本书较系统地阐述了表面粗糙度的基本术语和评定参数,表征特性和评定原则,国家标准的特点和应用,与制件功能的关系和选用,以及测量、计算和评定的方法和程序。介绍了表面波度的评定原则和测量方法。

本书可供从事机械设计、制造工艺、质量检验、计量测试的工程技术人员和工人使用,也可供大专院校和中等技校有关专业师生参考。

表面粗糙度的评定和测量

毛起广 编著

责任编辑:贺篋鑫 责任校对:贾立萍

封面设计:姚毅 版式设计:吴静霞

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街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $6^{1/2}$ · 字数 170 千字

1991年2月北京第一版·1991年2月北京第一次印刷

印数 0,001—3,260 · 定价:6.70 元

SBN 7-111-02152-5/TG·553

前 言

近十几年来对于表面特征及其测量的研究日趋深入，促使有关表面粗糙度的标准化工作在国际上得到迅速发展。我国近期也相继颁布了多项表面粗糙度国家标准，而且基本上是参照引用了当今的国际标准。为了有效地贯彻使用这些标准，需要对加工后产生的表面特征即表面粗糙度、表面波纹度以及加工纹理等有比较全面的了解。

控制产品零件加工表面质量的核心环节，在于满足其各自的使用功能要求。虽然选择什么样的反映表面特性的表征参数对某制件最适宜的问题，尚待多方位的深入探讨，但反映加工表面粗糙程度特性的众多表征参数，仍提供了广泛选用的可能。因而有必要确切的理解表面微观几何形状定量评定的原则和各种表征参数的含义。

在工业生产中实现监控表面质量的手段在于测量，而测量方法的选择和可信结果的取得，则建立在对表面特征认识的基础上。因此本书着重于从测量的角度对表面粗糙度和表面波纹度的评定原则进行较深入的剖析，系统阐述评定参数的意义，国家标准的特点和应用等基本概念。在测量手段方面，则侧重于介绍实用的测量程序和计算方法。

本书疏漏和不当之处在所难免，恳请读者指正。

目 录

前 言

第一章 表面特征及其偏差的分类	1
一、表面特征	1
二、表面几何形状偏差的分类	3
第二章 表面粗糙度的基本术语和评定基准制	7
一、有关表面的术语	7
二、有关轮廓的术语	10
三、评定基准制	11
四、有关轮廓峰、谷和微观不平度的术语	18
第三章 表面粗糙度的评定参数	23
一、与微观不平度高度特性有关的表面粗糙度参数	23
二、与微观不平度间距特性有关的表面粗糙度参数	29
三、与微观不平度形状特性有关的表面粗糙度参数	35
四、其他有关的表面粗糙度参数和函数	40
第四章 国家标准GB 1031—83的特点和应用	47
一、选用的参数及数值系列	47
二、取样长度	53
三、评定长度	60
四、新增评定参数的意义和特点	62
五、各参数之间的关系	70
第五章 表面粗糙度的标注	75
一、表面粗糙度的符号	75
二、表面粗糙度数值和其他要求的标注	76
第六章 表面粗糙度标准化的国际概况	82
一、表面粗糙度标准化的发展过程简述	82
二、国际标准化组织表面特性和计量技术委员会工作情况	84
三、各国表面粗糙度标准简介	88

第七章 表面粗糙度比较样块	97
一、机械加工表面粗糙度比较样块	97
二、铸造表面粗糙度比较样块	102
三、电火花加工表面粗糙度比较样块	105
四、抛(喷)丸、喷砂和抛光加工表面粗糙度比较样块	106
五、比较样块的检定	109
第八章 表面粗糙度与零部件功能特性的关系	111
一、表面特征对各种功能特性的影响	111
二、对典型零件表面粗糙度的控制要求	116
三、表面粗糙度的选用	121
第九章、表面粗糙度的测量方法和测量仪器	129
一、表面粗糙度测量方法的分类	129
二、表面粗糙度测量的基本原则	132
三、针描法(触针法)测量表面粗糙度	133
四、显微干涉法测量表面粗糙度	156
五、光切法测量表面粗糙度	164
六、比较法检验表面粗糙度	168
七、印模法间接测量表面粗糙度	169
八、表面粗糙度的其他测量方法	170
九、表面粗糙度参数的具体测量计算方法	183
第十章 表面波纹度的评定和测量	195
一、限制粗糙度影响获得波度曲线的方式	195
二、限制宏观形状误差影响的方式	198
三、表面波纹度的评定参数和数值系列	198
四、表面波纹度的测量	200

第一章 表面特征及其偏差的分类

一、表面特征

在各种生产过程中，任何物体都不可避免地会产生表面，所谓表面是指该物体材料与周围介质（通常指空气）之间的边界。经过加工的表面一般认为有粗糙的表面与光滑的表面之差别，这可以用视觉或触觉的方法直观地区分：光滑表面大多能反射光线，在表面上看不出有花纹，手感平滑，阻力小；粗糙表面不反光，能看见明显的纹理和沟痕、凹坑，用手指触摸时感到凹凸不平，摩擦力大。但是这种判别带有主观因素，而且只是定性地相对说明比较光滑或粗糙一些，没有确切地表达表面特征之细节和全貌。

在现代工业生产中，一个制件的许多技术性能的评价常常依赖于制件表面特征的状况，诸如：制件表面的耐磨性、密封性、配合性质、摩擦力、传热性、导电性以及光线和声波的反射性，液体和气体在壁面的流动性、腐蚀性，涂层的附着力，薄膜、集成电路元件以及人造器官的性能，测量仪器和机床的精度、可靠性、振动和噪声等等功能，都与表面的几何结构特征有密切联系。因此，控制加工表面质量的核心问题在于它的使用功能，应该根据各类制件自身的特点规定能满足其使用功能要求的表面特征参量。

表面质量的含义还应扩大到表面层的物理结构性质和化学成分。例如，表面的镜反射特性和耐磨性实质上不仅取决于粗糙的程度，尚依赖于表面层的物理性能，抛光表面与研磨表面相比较，由于抛光后的表面有微量的结晶层，因而具有较好的镜反射特性。金属表面层的基本结晶结构受加工过程的影响和外界化学反应的沾染，并被外界的尘埃微粒和分子薄膜所覆盖。正是这些复杂的几

何、物理、化学结构形成了某一特定表面的功能特性。这里我们主要讨论表面的几何特征。

表面的形成机理及其特征取决于特定的加工方式和工艺规范。当加工一个零件时,用切削工具切削掉金属颗粒(切屑),或者用喷丸、轧延的方法迫使表面变形,于是在零件上留下刀印、划伤或压痕等加工痕迹。用砂轮磨削和单刃刀具切削或其他加工方式加工的表面各有不同的形成机理,因此加工表面上留下的纹理、沟槽和凹坑的形状各异。例如单刃刀具切削中,刀尖半径和进给量影响垂直于切削方向上的表面轮廓,形成周期性的走刀痕迹;切屑瘤、刀具振动等因素既改变了切削方向,又改变了垂直于切削方向的表面轮廓。这些因素随着切削条件、切削速度、进给量、切削深度以及刀具几何形状的变化而变化,形成了具有随机性的起伏不平的表面。这反映了形成机理的随机性。

在各种加工过程中任何条件的变化,包括刀具的磨损,材料中的应力,表面硬度的差异,周围环境条件的变化以及不正确的工艺规范,都将在表面上留下痕迹,反映在制件表面的某些几何特征参量的变化之中。所以,一旦确认按预定的工艺方法加工后所产生的制件表面能够合乎使用要求后,就必须把这一表面几何结构控制在一定的允许范围内,以求加工后的同一类制件保持相同的性能。

可见,合理地控制加工表面质量的程序,首先应该通过大量的实验分析或实践检验,确定能反映特定使用功能要求的最优化的表面特征参量,然后选择经济合理的工艺方法获得这一预定的表面。同时必须引入测量环节,通过测量来确认设计要求的合理性,并监视工艺过程的稳定可靠。

由于各类制件功能要求的多样性,工艺方法也在不断改进和扩展,需要测定的表面几何形状具有随机场的特征,量值又非常微小(达百分之几或千分之几微米),因而给表面特征的定量评定方法的标准化提出了十分复杂的任务。所以应该随着表面特征与使用功能之间关系研究的逐步深入,在进一步完善测量手段的基础上,不断探索更为科学合理的控制方式。

二、表面几何形状偏差的分类

制件在制造过程中产生的表面几何形状总是不够完善的，加工后的实际表面形状相对于理想表面形状存在一定的偏差。通过测量会发现，在表面上有一系列不同间距和高度的峰谷所组成的不规则几何形状叠加在一起的复杂表面结构。

对于实际表面偏离理想表面的几何形状偏差，现今一般仍采用分为三类结构型式——形状误差、表面波纹度和表面粗糙度来描述。形状误差是指从表面整体形状观察分析表面的宏观状况，例如一平面中间有凸起或凹入，一根轴弯曲变形。通常，宏观几何形状误差只含一个或几个起伏不平，如图1a、b所示，表面虽然弯曲、不平直，但仍然是光滑的。若把不平度间距缩小，如图1c所示，表面上呈现波浪性的起伏，称之为波纹度。如果再缩短间距，如图1d所示（图中的横向比例即水平放大率已增大，便于人眼分辨其峰和谷）的表面，虽然宏观上可能是平直的，但从微观来观察，则表面粗糙不平，这便属于表面微观几何形状偏差，即表面粗糙度的特征范畴。

形状误差、波纹度和粗糙度这三类表面几何形状偏差在一个表面上并非孤立存在，大多数加工表面常受其综合的影响，图1e)所示的表面轮廓就是由图1b)、c)、d)所示三类几何形状偏差叠加在一起的典型的表面轮廓图形。图2为该表面

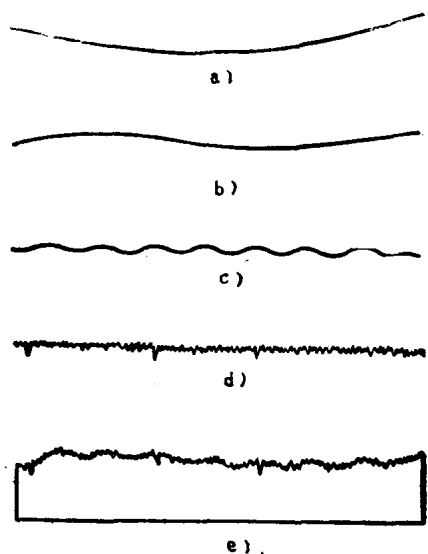


图1 各类几何形状偏差的示意图
a)、b) 形状误差 c) 表面波纹度 d) 表面粗糙度 e) 三类偏差叠加的实际表面轮廓

的全貌图形(局部)。有的加工表面似乎不存在某一类偏差,实际上是因其量值甚小不易察觉或者可忽略不计而已。

虽然表面几何形状偏差的整体状况对制件表面功能产生综合的影响。但是各类偏差形成的原因和特性,以及他们与各种使用功能的因果关系均不相同,而且受测量手段的约束,因此目前仍采取分别地评定,这就提出了如何区分各类偏差的问题。

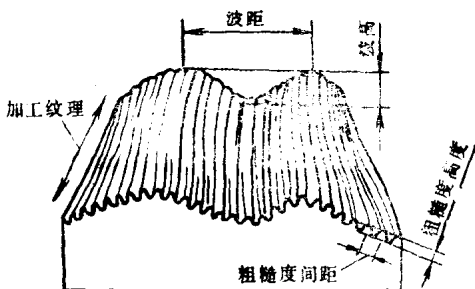


图2 表面全貌图形

从表面几何结构的型式来分析,三类几何形状偏差之差别与不平度的间距相关,因而曾有人提出以间距大小来区分:间距小于1mm者属于表面粗糙度;间距在1~10mm范围内按表面波纹度处理;间距超过10mm者为形状误差。显然,这种区分方法不严密,因为零件大小不同以及工艺方法变化,常打破这种分类方法的界限。例如:在大型机床导轨上用宽刀精刨加工的表面粗糙度的加工纹理的间距远大于1mm,但在钟表小轴上的振纹间距则不会比1mm大;在一个集成元件芯片上有一个波形起伏应视为平面度误差,但在大工作台表面或大型轴承上的同样间距的波形起伏,则一般认为属于表面波纹度或表面粗糙度。

另一种意见是用起伏不平的间距和幅度的比值来划分:其比值小于50者算作表面粗糙度;当比值范围为50~1000时属于表面波纹度范畴;在比值大于1000时则按形状误差处理。这是在分析通常使用的各种加工方法所产生的各类几何形状偏差后的综合统计结果。有的还认为应更细一点,以不同加工方法分别取比值界限。但实际上并不存在截然的分界线。

合理的区分方法应该根据三类几何形状偏差各自的形成原因

和特点进行具体的分析。上述的数值范围只能作为一般概念，供分析时参考使用。图3给出了分别用Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ类表示的形状误差、波纹度和粗糙度的一般区段。各区段的不平度间距 S 和高度（幅度） H 的数值范围列于表1。可见它们是相互交错重叠的，不可能用单一的数值将其区分开。

实际表面的总体外形相对于理想的表面形状在宏观形貌上产生的偏离（如平表面的直线度和平面度，圆柱形表面的圆度、素线直线度和圆柱度等形状误差），形

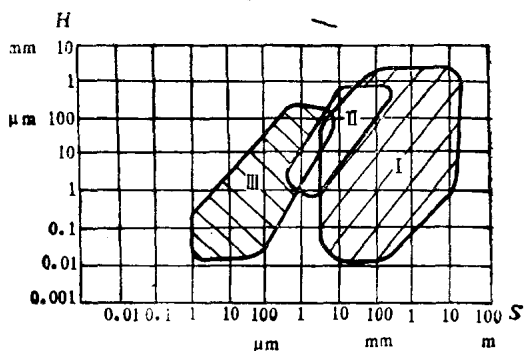


图3 三类几何形状偏差的一般范围

Ⅰ—形状误差 Ⅱ—表面波纹度 Ⅲ—表面粗糙度

成的原因主要由于加工机床的几何精度、工件的安装误差、工艺系统的弹性变形、刀具的磨损、工件的挠曲和材料的内应力等因素所致。根据它们的定义，一般可借助于通用几何量量仪以及圆度测量仪之类的专用量仪进行测量。除了圆度和圆周方向的波纹度两者间的分界频率（波数/周）尚有异议外，在评定时一般不会把形状误差和另外两类几何形状偏差混淆起来。

表1 各类几何形状偏差的不平度间距和高度的范围

表面几何形状偏差的类型		代号	不平度间距 S	不平度高度 H
Ⅰ	形状误差	F	几毫米~几十米	0.02微米~几毫米
Ⅱ	表面波纹度	W	0.5毫米~300毫米	0.1微米~500微米
Ⅲ	表面粗糙度	R	0.2微米~几毫米	0.01微米~200微米

表面波纹度是加工表面上重复出现的具有一定周期性的中间型几何形状偏差，对于同一表面而言，它的波距以及波距和波幅之比值都介于宏观和微观的几何形状偏差之间。波纹度系由于加

工过程中机床-刀具-工件系统的振动、颤抖，回转质量不平衡，造成材料应变的各种原因以及其他外部影响等因素所形成。若改善机床的安装和调整，消除引起振动的根源，则可避免在加工表面上出现振纹或者能将其控制在较小的范围内。

表面粗糙度完全由加工方法固有的内在作用所产生，是制件在加工过程中由实际加工介质——切削刀具、磨粒、喷丸等在完工表面上留下的微观不平度。例如切削过程中的残留面积，刀具对制件表面的摩擦、切屑分裂时材料的塑性变形以及刀瘤和灼伤等因素，形成各种形式凹凸不平的微细加工痕迹。采用不同的工艺方式便构成特定的表面微观几何结构。以往曾称为表面光洁度，这个名称有时易于和表面光泽性、反射能力等其他表面特性相混淆。鉴于国际上已普遍采用表面粗糙度这一名称，我国的现行国标亦改称表面粗糙度。

表面波纹度和表面粗糙度的几何量数值十分接近，虽然波纹度的波峰间距一般要比粗糙度的间距大一些，而且周期性较为明显，但有时也很难严格区分。由于波纹度和粗糙度的形成因素截然不同，采用的改进措施和手段各异，因此为了更有效地提高加工表面质量，仍有必要对它们分别给以评定。

表面波纹度和粗糙度在评定原则和测量方法方面非常相似。常把两者合称为表面特征或表面结构，并包含表面加工纹理方向这一特征在内。但在某些场合，表面特征只是狭义地被用来单指表面粗糙度。

第二章 表面粗糙度的基本术语和评定基准制

采用特定的几何量参数来表示表面的微观几何形状特征,至今已有40年左右的历史。由于国际间经济贸易和技术交流的发展,近十余年来世界各国对表面粗糙度的有关术语和表征参数的解释逐步趋近,已较为系统、完整。国家标准GB 3505—83即为引用国际标准ISO 4287/I,对表面及其参数的术语作出了规定。该标准共分为四个部分,有61条术语。本章主要阐述GB 3505—83的第一部分,属于基本术语性质的内容共有34条,为下一章介绍各种粗糙度表征参数建立必要的基础概念。

一、有关表面的术语

该标准采取由面到线,循序渐进的叙述方式,从表面→截面→轮廓→微观不平度的峰和谷→基准制,以引导出粗糙度评定中所涉及的一系列专用术语。有些术语是为了后面的定义中要用到而设置的。

与表面相关的术语可归纳为8个。

1. 实际表面

一个物体经过加工后实际存在的表面称为实际表面,我们所要研究的对象就是这个实际表面的粗糙程度,它的严格定义是物体与周围介质分隔的表面(见图4)。物体都是固体、所谓周围介质通常是空气。

2. 几何表面

几何表面是个理想表面,其形状由图样或其他技术文件规

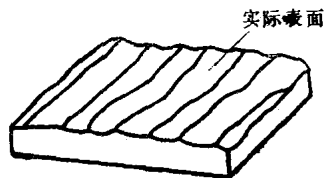


图4 实际表面

定, 如平面, 圆柱面, 圆锥面, 球面或其他曲面。所谓理想表面就是在这个表面上不存在任何宏观和微观的几何形状误差, 是理论上的几何形表面(见图 5)。而表面粗糙度则是指在微观上实际表面对理想的几何表面的偏离。

3. 基准面

几何表面相对于实际表面在空间所处的位置需要确定, 才能有效地确定表面粗糙度的量值。

这一给定了空间位置并用以评定

表面粗糙度参数值的几何表面称为基准面。这个人为给定的基准面应具有被评定的几何表面形状, 它的方位要与实际表面在空间总的走向一致, 而在空间的位置可由最小二乘法或其他数学规则确定。

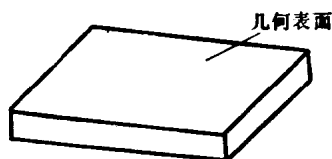


图5 几何表面

当评定三维表面粗糙度时, 便需要按此定义设定其基准面。

4. 等距截面

等距截面是具有几何表面的形状, 与基准面等距并和实际表面相交的截面(见图 6), 用以表征表面粗糙度在和基准面等距的不同截面上截取实际表面的情况。

在按此方法获取的等距截面上所求得的粗糙度参数仍属三维粗糙度评定, 如支承面积率。

5. 切向截面

切向截面只是等距截面为一平面时的一种特殊情况。即当被评定的几何表面为平面时, 给定的基准面自然也是平面, 与基准面等距, 平行相截于实际表面的这一截面称为切向截面(见图 7)。

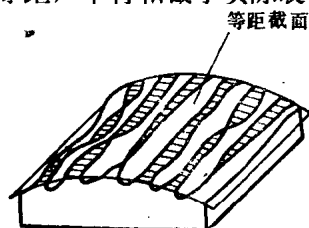


图6 等距截面

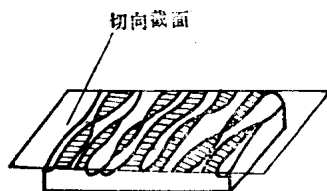


图7 切向截面

6. 表面的等高线图

用一系列等距截面在实际表面上相截, 所得的轮廓交线综合在一张图上即形成表面的等高线图(见图8)。它类似于反映大地表面形貌(地貌)的, 在地形图上用各种颜色表示的等高线图。

表面的等高线图是评定三维表面粗糙度的一种方法, 它直观地表达了三维表面形貌的综合状况。

7. 法向截面

法向截面是垂直于基准面的截面(见图9)。由于被评定的几何表面有各种形状, 因而基准面的型式也各异, 不一定是平面, 故法向截面实际上是与工件的切向平面相垂直, 而且在确定方位时可不考虑被测定部位的表面微观不平度的情况, 仅从宏观上确定。

法向截面是目前按二维方式在表面轮廓曲线上评定表面粗糙度所引用的截面。

8. 斜向截面

斜向截面是与基准面成一倾角相截所得到的截面(见图10)。与法向截面

一样, 它实际上是倾斜于工件的切向平面。在确定其方位时也不考虑被测定部位的表面微观不平度的情况。

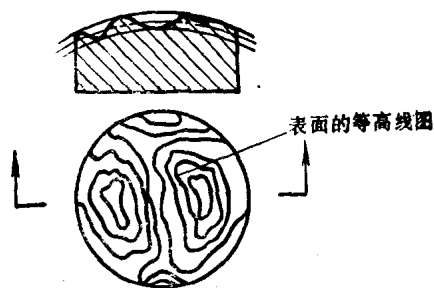


图8 表面的等高线图

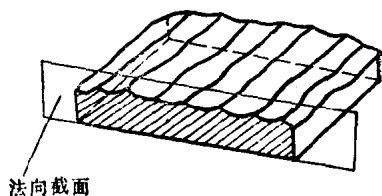


图9 法向截面

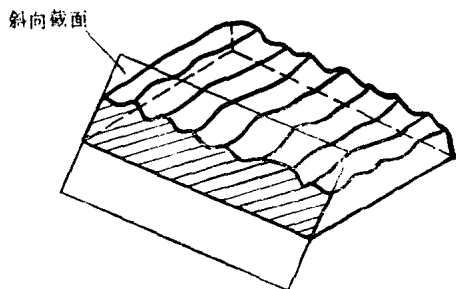


图10 斜向截面

按规定要从法向截面上计取表面粗糙度的参数值，而用斜向截面与实际表面相交所得轮廓线的峰谷高度则是被放大的了，因此需要把它折算至法向截面上进行评定。例如以 45° 倾斜角剖切所得的斜向截面，实际结果便被放大了 $\sqrt{2}$ 倍。

常用的光切显微镜就是以斜向截面的方式获取轮廓信息的实例。

二、有关轮廓的术语

关于轮廓的术语共列出 7 个

1. 表面轮廓

表面轮廓是指一平面与表面相交所得的轮廓线。它是广义的，泛指一般的轮廓，在不表示特定的含意时均可采用。

2. 实际轮廓

平面与实际表面相交所得的轮廓线为实际轮廓（见图11）。现行采用的二维表面粗糙度参数就是在这个轮廓线上进行评定的，是在垂直于基准面的截面——法向截面上计算粗糙度各种参数的数值。

3. 几何轮廓

平面与几何表面相交所得的轮廓线为几何轮廓（见图12）。它的形状随几何表面的形状以及平面与其相交的方位而定，图中所示一平面与平表面相交所得的轮廓线为直线。几何轮廓是一条理想形状的轮廓线，表面粗糙度也可以说是实际轮廓线微观上相对其偏离的程度。

4. 横向轮廓

垂直于表面加工纹理方

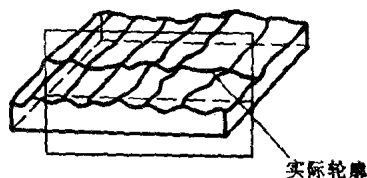


图11 实际轮廓

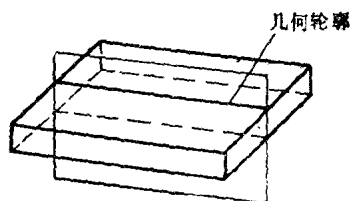


图12 几何轮廓

向的平面与（实际）表面相交所得的轮廓线为横向轮廓（见图13）。通常在该轮廓上测得的表面粗糙度数值为最大，因此对于有明显加工纹理方向的表面，应该选定在横向轮廓上评定。对于车、刨加工，从横向轮廓上可反映出切削刀痕和进给量引起的表面粗糙度。

5. 纵向轮廓

平行于表面加工纹理方向的平面与（实际）表面相交所得的轮廓线为纵向轮廓（见图14）。纵向轮廓上的表面粗糙度是切削时刀具撕裂工件材料的塑性变形所引起的，通常在这个方向上测得的表面粗糙度数值要比横向轮廓的小。

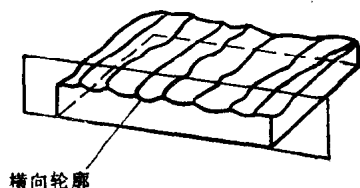


图13 横向轮廓

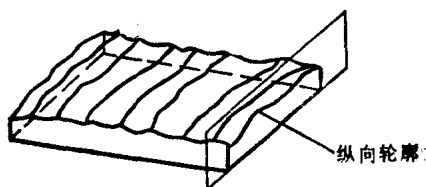


图14 纵向轮廓

6. 周期轮廓

周期轮廓和随机轮廓是用来反映表面微观不平度形状组成规律的性质的，与加工方法有密切关系。所谓周期轮廓是指可用周期函数表达的轮廓。如车削、刨削获得的表面轮廓常形成较强的周期性，但也时常叠加有不同程度的随机成分。校准样板通常亦制成周期轮廓的型式。

7. 随机轮廓

可用随机函数表达的非周期轮廓为随机轮廓。如磨削、喷丸或喷砂处理所得的表面轮廓属于典型的随机轮廓。一般来说，在任何一个表面轮廓上，周期成分和随机成分都不同程度地混合叠加在一起，只是哪一种占主导的问题，如磨削表面主要含随机成分，但也有某些周期成分，只是一般比较弱。

三、评定基准制

关于评定基准制的术语有7个。

1. 基准线

通过测量手段获得表面轮廓曲线以后,需要预先提供一条定量评定表面粗糙度量值的基准线,作为计算各种参数的基础。

所谓基准线是按照某一原则或用某种规定的方法,相对于实际轮廓线作出的给定线。

由于基准面是在三维空间相对于实际表面确定的,而基准线是在某一段实际轮廓线上作出的,因此基准线不一定落在基准面上。

2. 取样长度 (l)

取样长度是用于判别具有表面粗糙度特征的一段基准线长度(见图15)。规定和选择这段长度是为了限制和减弱表面波纹度对表面粗糙度测量结果的影响。

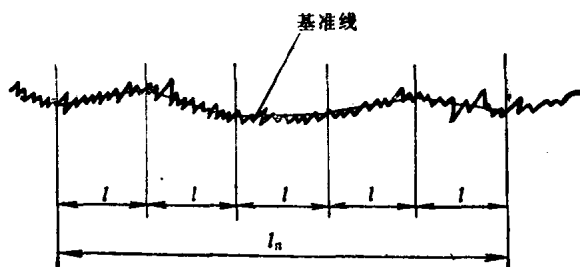


图15 取样长度

如何合理地选择取样长度,对于表面粗糙度的评定结果至关重要,因此将于第四章中进一步专门论述。

3. 评定长度 (l_n)

评定长度是评定轮廓所必需的一段长度,它可包括一个或几个取样长度(见图15)。在这个长度上构成表面粗糙度的一次测量结果。

评定长度的选取原则亦在后文另行介绍。

4. 轮廓偏距 (y)

在测量方向上轮廓线上的点与基准线之间的距离称为轮廓偏