



绪 论

1.1 界 面 分 类

本书将重点研究摩擦学中的界面力学问题。界面的通常意义是指由两种材料形成的边界面,所以一般的界面力学考虑的界面是固体和固体形成的边界面。

但是在工程实际中,界面的形成是多种多样的。首先,界面可以是光滑的和粗糙的。另外,在界面的形成过程可以不考虑变形,即刚性界面;但有时则必须考虑变形,即弹性界面或塑性界面。此外,许多固体边界面间还存在有中间介质,这些介质可能是由于氧化形成的氧化膜,由涂镀形成的表面膜,也可能是由润滑剂形成的润滑膜^[1,2]。

从整体来看,由于这些中间介质形成的中间层很薄,从几何尺寸的角度上来看,可以认为是界面的一部分。但是实际上它们的作用对界面的力学性能有着显著的影响,必须要特殊考虑。文献[3]中从力学的角度对界面做了描述,鉴于本书涉及的内容不仅仅与力学作用有关,而且包含许多摩擦学的问题,因此下面将根据本书研究的内容和特点对不同的界面加以更细化的分类。

1.1.1 光滑与粗糙界面

从宏观上看,许多表面是由光滑的面、线组成的,但实际上从微观的角度上研究,可以发现所有表面都具有一定的粗糙度。这是因为所有物质都是由原子(分子)构成的,因此在原子的尺度上,物体的表面至少不是光滑的,而是具有周期性原子粗糙变化的。另外,由于大多数的物体的表面是加工制造而成,由于加工方法的不同,物体表面或多或少都会产生表面公差、波纹度和粗糙度,因此两个物体接触后所形成的界面也不可能是绝对光滑的,如图 1.1 所示。

虽然绝对光滑的界面并不存在,但是当在研究界面力学时,如果表面粗糙对界面力学的性能影响可以忽略不计时,仍然可以把界面视为光滑的。

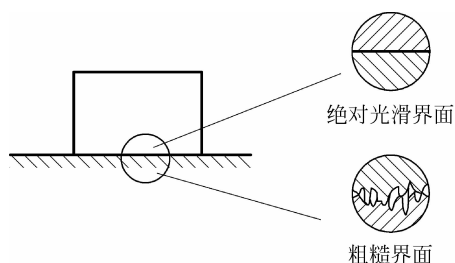


图 1.1 光滑界面与粗糙界面

1.1.2 界面间的介质

本章一开始就指出：大多数物体表面都存在氧化膜、吸附膜等，另外还有可能形成有意制造出来的表面膜，如镀膜或涂膜。在这样的物体所接触形成的界面之间，或多或少都会存在介质。另外，在工程中，常常在两个接触的固体界面间加入一定量的润滑剂，从而形成边界润滑膜或流体润滑膜。因此，界面间常会存在一定的介质层。当不考虑介质层的影响时，我们可以仅考虑物体直接接触产生的作用。但是在某些情况下，尽管介质层与形成界面的物体尺寸相比很小，但是界面介质层对界面的力学性能可能产生显著的影响，不容忽略。例如，流体动压润滑或弹性流体动压润滑。对这样的问题，必须考虑接触物体和介质层的共同作用，从而构成含有介质层的界面力学问题，如图 1.2 所示。

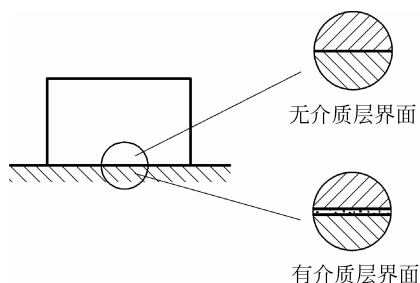


图 1.2 无介质层界面与有介质层界面

1.1.3 不同物质间的界面

在通常的界面力学中，大多数研究的是由两个固体物体形成的界面。当流体与固体相互作用时，若流体的尺寸与固体相当，则它们形成的界面可以看成是不同物质形成的界面。这样的界面力学问题就需要分析两种不同物质间的相互作用，如图 1.3 所示。这里所说的流体可以是液体（润滑油、水等）、气体、类固体（润滑脂、液晶等）。

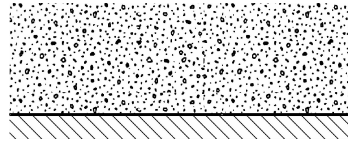


图 1.3 流体与固体物质形成的界面

1.1.4 界面组成的尺度比较

在界面力学研究中,常常关心的是表面膜作为介质层与接触物体间的作用。它们的实际厚度与物体(滚动轴承中滚球)真实尺寸之比如图 1.4(a)所示。由于这些中间介质层的厚度极薄,在真实尺度下,几乎无法显示出它们的厚度,因此在图 1.4(b)中,给出了对数坐标下的比较结果。

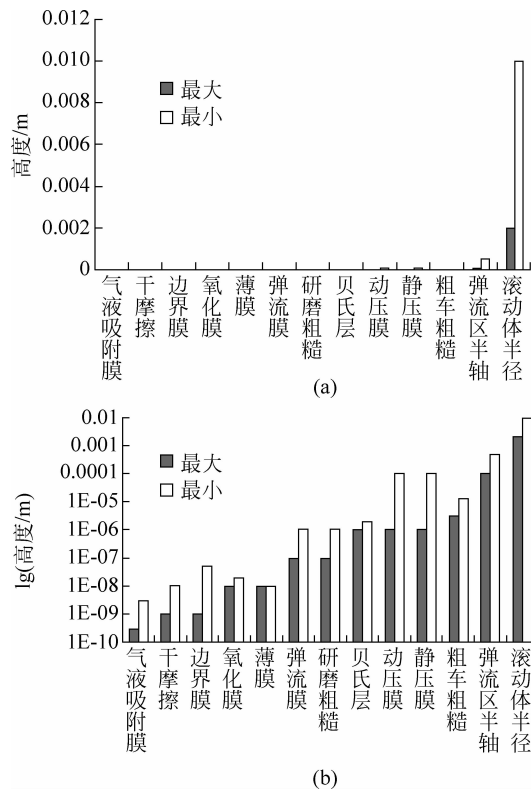


图 1.4 各膜厚与物体尺寸比较

(a) 真实尺度; (b) 对数尺度(以 10 为底)

从图 1.4(a)中可以看出,从几何尺度上看,除了弹流接触区的大小与物体的尺寸尚须考虑,其他的尺度在接触力学的原则上其尺寸可以忽略。

1.2 界面形成

1.2.1 表面接触

物体的表面形状是多种多样的,有平面、曲面、尖点,甚至更加复杂的形状。从几何角度上来分析两个物体接触形成的界面时,可以将其接触形式分为:同形接触和异形接触,如图 1.5 所示。

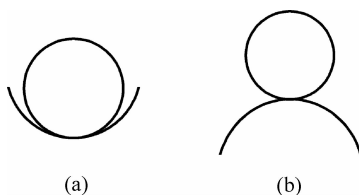


图 1.5 同形接触和异形接触
(a) 同形接触; (b) 异形接触

在几何处理上,可以把两个曲线或曲面接触的问题转化成一条直线和一个当量圆或是一个平面与一个当量球面接触的问题(详见第 2 章)。这时,这个当量圆或当量球面的当量半径 R 为

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} \quad (1.1)$$

式中, R_1 为小圆半径; R_2 为大圆半径; 当为同形接触时取+, 当为异形接触时取-, 如图 1.6 所示。

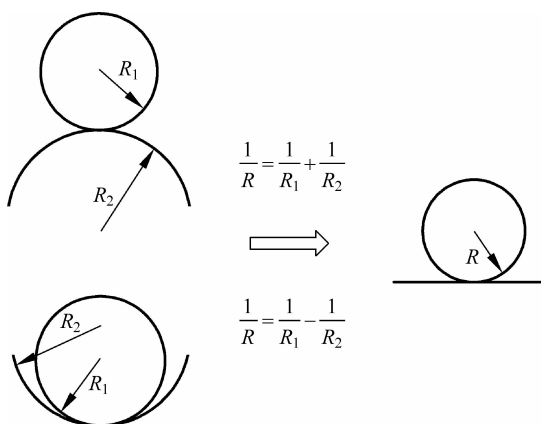


图 1.6 一般接触转化为当量接触

1.2.2 表面变形

在物体接触形成界面时,还必须确定是否需要考虑界面的变形,一般而言界面如

果发生明显的变形会对界面力学性能分析带来显著的影响。

在机械工程中,我们常将两物体通过接触形成的界面分为低副和高副两大类。两物体通过面接触形成的运动副称为低副。平面低副如移动副,如图 1.7(a)所示,曲面低副如转动副,如图 1.7(b)所示。低副一般是同形接触。两物体通过点或线接触形成的界面称为高副,如图 1.7(c)和图 1.7(d)所示。高副一般是异形接触。

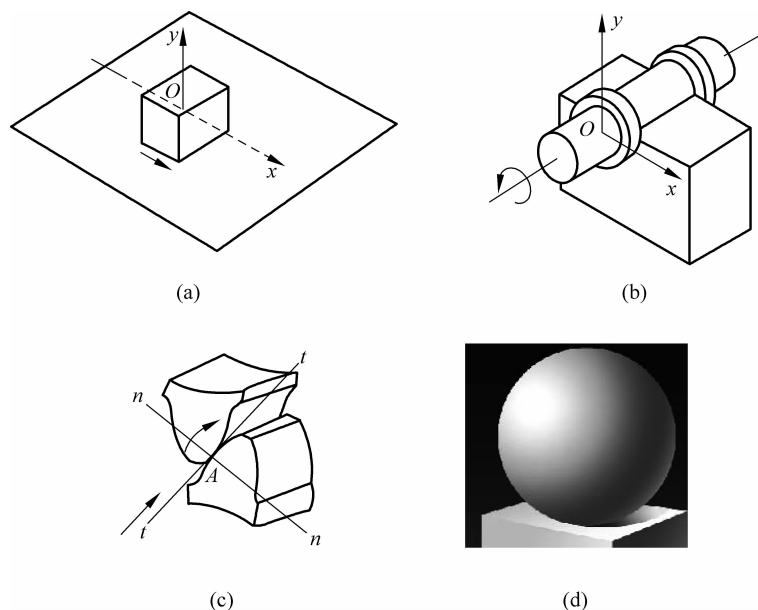


图 1.7 低副与高副接触

(a) 平面低副; (b) 曲面低副; (c) 线接触高副; (d) 点接触高副

低副因通过面接触而构成运动副,故其接触处的压强小,因此一般无须考虑物体的变形,除非构成低副的材料弹性模量很小,如橡胶、海绵等。

而高副由于形成的界面名义接触面积为零,局部应力很大,物体通过变形增加界面接触面积,因此在高副接触下的界面力学分析一般必须考虑物体的变形,例如赫兹(Hertz)接触问题和弹性流体动压润滑问题,如图 1.8 所示。

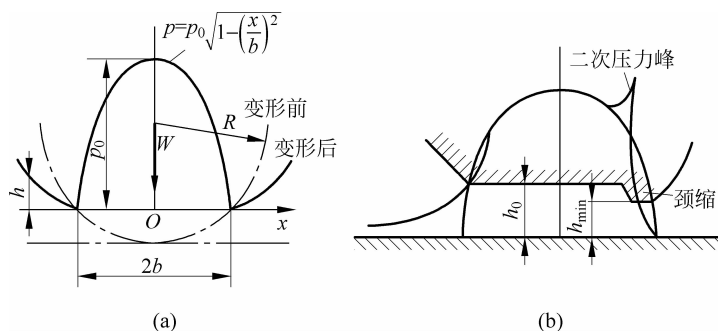


图 1.8 表面的变形

(a) 赫兹接触; (b) 弹性流体动压润滑

1.3 表面运动与受力

1.3.1 表面运动

当两物体接触形成界面后进行摩擦力学分析时,另一个需要考虑的问题就是形成界面的两个表面是否存在相对运动,以及其运动的形式如何。

对于没有运动的两个物体接触,其形成的界面为静止界面。静止界面是最简单也是最基础的界面,许多摩擦力学的基本理论是在假设界面静止的基础上得到的。因为当两个接触物体的表面间没有相对速度时,通常可以不考虑切向力(摩擦力)的作用,这样一来,只考虑法向载荷作用引起的应力和应变,相对来说比较容易。因此,有时即便存在表面间的相对运动,如果这些运动引起的变化相对法向作用很小时,也可以忽略切向作用的影响。如图 1.8 给出的赫兹接触应力的分布就是按照静止界面且不考虑摩擦力情况下得到的。

然而在工程实际中,接触更多的则是具有相对运动的界面,而且不少切向运动引起的作用不可以忽略,这时在使用经典的接触理论时必须考虑切向载荷、中间介质等的影响。

除静止外,表面间存在的相对运动还应当根据运动的形式分成滑动、滚动和滑滚运动,如图 1.9 所示。滑动是指界面上的两表面存在有与表面切向方向相同的相对速度的两接触物体间的运动形式。纯滚动是指界面上的两表面不存在有与界面切向方向相同的相对速度的两接触物体间的运动形式。也有些运动同时存在滑动和滚动运动,这时称运动为滑滚运动。

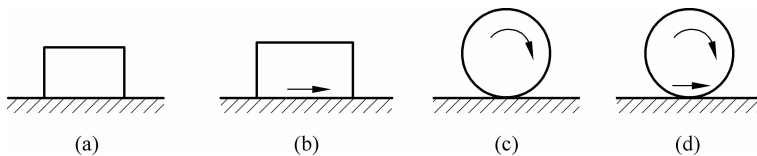


图 1.9 表面运动形式

(a) 静止; (b) 滑动; (c) 滚动; (d) 滑滚

1.3.2 表面受力

由于通常表面所受载荷是来自物体的外部,所以界面上的载荷实际上相当于物体内部载荷。一般而言,接触的两个表面所受的载荷是大小相等、方向相反的,它们是相互作用力和反作用力。

表面上所受载荷要通过与外载的平衡分析得到,由于一般表面上所受载荷为法向载荷和切向载荷,所以总载荷的方向则需要得到两种载荷后得出。

但是,如果假设接触的表面不存在摩擦力(注:通常说表面绝对光滑,但这种说法不准确,因为绝对光滑有可能存在摩擦力,而且可能会很大),那么表面上没有切向

载荷。因此,这时表面所受的载荷只能沿界面的法向指向物体的内部,如图 1.10 所示。同样,如图 1.8(a)给出的赫兹接触应力的分布就是在只考虑法向载荷而不考虑摩擦力情况下得到的。

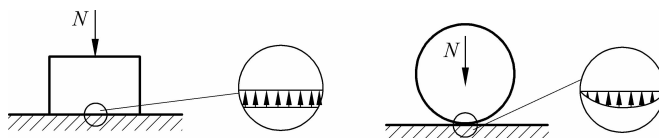


图 1.10 表面只有法向载荷情况

摩擦是界面存在切向载荷的根本原因。无论是滑动、滚动还是滑滚运动,界面上都会存在摩擦,从而产生摩擦力,即切向载荷。目前,运动情况下的摩擦力可以通过测量摩擦系数加以确定。但是,必须指出:用摩擦系数计算摩擦力(切向载荷)是工程中的一个实用方法,最终切向载荷的大小依然是由外载决定的。

另外,即便是静止物体接触也可能存在有摩擦力(静摩擦力)。根据物体所受外载的情况,静摩擦力是从零到最大静摩擦力之间变化的,因此切向载荷的确定也是要通过与外载的平衡得到。

一般认为,摩擦力与运动方向(或趋势)相反,因此对滑动时而言,表面上的摩擦力很容易根据表面的切线画出,如图 1.11(a)所示。然而,对滚动运动来说,摩擦力可能会与运动方向相同。

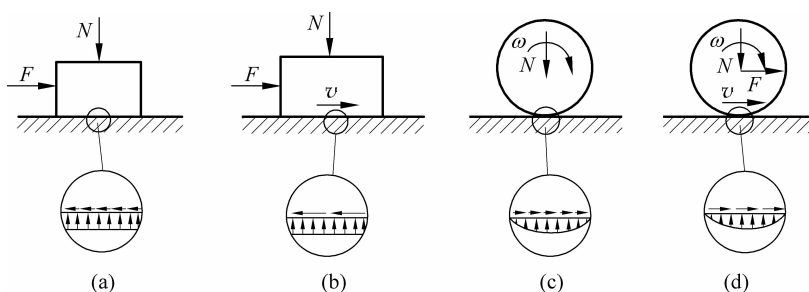


图 1.11 一般表面受力形式

(a) 静止; (b) 滑动; (c) 滚动; (d) 滑滚

表面受力状况是分析摩擦、磨损和润滑问题的基础。表面几何特征对于混合润滑和干摩擦状态下的摩擦、磨损和润滑起着决定性影响。任何摩擦表面都是由许多不同形状的微凸峰和凹谷组成。表面几何特征对于混合润滑和干摩擦状态下的摩擦、磨损和润滑起着决定性影响,也使摩擦学机理研究能够更深入地探索微观本质。

1.4 粗糙表面

从宏观上看,光滑平整的表面,在显微镜下观察时,却显示出表面是由许多不规则的凸峰和凹谷所组成的。这是因为加工过程中,形成的任何表面都是由许多不同形状的微凸峰和凹谷组成,如图 1.12 所示。

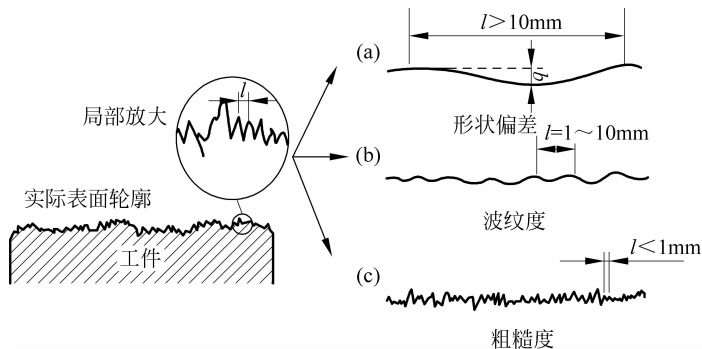


图 1.12 表面形貌轮廓曲线

1.4.1 表面形貌参数

表面几何特征采用形貌参数来描述。最常用的表面形貌参数是表面粗糙度,它取表面上某一个截面的外形轮廓曲线来表示。根据表示方法的不同可分为一维、二维和三维的形貌参数。

一维形貌通常用轮廓曲线的高度参数来表示,如图 1.12 所示,它描绘沿截面方向(x 方向)上轮廓高度 z 的起伏变化。选择轮廓的平均高度线即中心线为 x 轴,使轮廓曲线在 x 轴上下两侧的面积相等。一维形貌参数种类繁多,最常用的有如下几种。

(1) 轮廓算术平均偏差或称中心线平均值 Ra

它是轮廓上各点高度在测量长度范围内的算术平均值,即

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (1.2)$$

式中, $z(x)$ 为各点轮廓高度; L 为测量长度; n 为测量点数; z_i 为各测量点的轮廓高度。

(2) 轮廓均方根偏差或称均方根值 Rq 或 σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L [z(x)]^2 dx} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (1.3)$$

(3) 最大峰谷距 $R_{\max}$

在测量长度内最高峰与最低谷之间的高度差,它表示表面粗糙度的最大起伏量。

(4) 支承面曲线

支承面曲线是根据表面粗糙度图谱绘制的。理论的支承面曲线如图 1.13 所示。假设粗糙表面磨损到深度 z_1 时,在图 1.13(a)中形成了宽度为 a_1 和 b_1 的两个平面,将 a_1 和 b_1 求和绘制在图 1.13(b)中相应的 z_1 处。这样得到支承面为随深度 z 变化的曲线即支承面曲线。

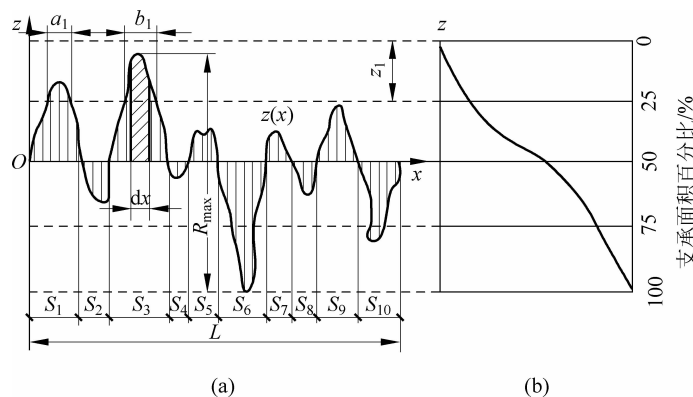


图 1.13 支承面曲线

(a) 表面粗糙与测量参数; (b) 支承面曲线

(5) 中线截距平均值 S_{ma}

它是轮廓曲线与中心线各交点之间的截距 S_m 在测量长度内的平均值。该参数反映表面不规则起伏的波长或间距,以及粗糙峰的疏密程度。

应当指出:一维形貌参数不能完善地说明表面几何特征,如图 1.14 所示,四种表面轮廓的 Ra 值相同,但形貌却很不一致,甚至完全相反,如图中的 a 和 b 。虽然均方根值 σ 比中心线平均值 Ra 稍好一些,但对于图中(a)和(b)两个相反的轮廓仍然无法区别。通常,一维形貌参数仅适用于描述用同一方法制造的具有相似轮廓的表面。如果将一维高度参数和一维波长参数相配合,可以粗略地构成表面形貌的二维图像。

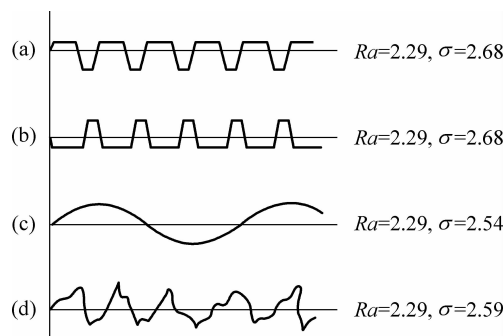


图 1.14 不同轮廓的 Ra 值和 σ 值

实践证明：一维形貌参数不足以表征表面的摩擦学特性，而表面轮廓曲线的坡度和曲率与粗糙表面的摩擦磨损特性密切相关。因此，为了更好地反映粗糙表面的润滑效应和接触状况，人们又采用如下的二维形貌参数。

(1) 坡度 $\dot{z}_a$ 或 $\dot{z}_q$

它是表面轮廓曲线上各点坡度即斜率 $\dot{z} = dz/dx$ 的绝对值的算术平均值或者均方根值 $\dot{z}_a$ 或 $\dot{z}_q$ 。该指标对于微观弹流润滑效应十分重要。

(2) 峰顶曲率 C_a 或 C_q

采用各个粗糙峰顶曲率的算术平均值 C_a 或者均方根值 C_q 。它对于润滑和表面接触状况都有影响。

然而二维形貌参数还不够全面，描述粗糙表面的最好方法是采用三维形貌参数，例如：

(1) 二维轮廓曲线族

如图 1.15 所示，通过一组间隔很密的二维轮廓曲线来表示形貌的三维变化。

(2) 等高线图

如图 1.16 所示，用表面形貌的等高线表示表面的起伏变化。

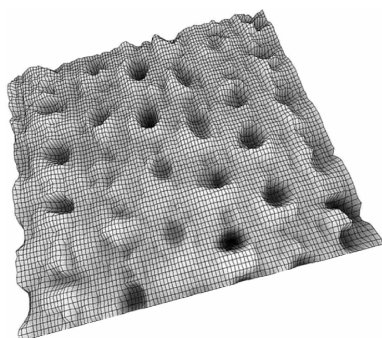


图 1.15 二维轮廓曲线族

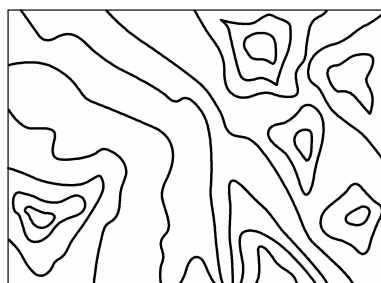


图 1.16 等高线图

1.4.2 表面形貌的统计参数

切削加工的表面形貌包含着周期变化和随机变化两个组成部分，因此采用形貌统计参数比用单一形貌参数来描述表面几何特征更加科学，能够反映更多的信息。形貌统计参数就是将轮廓曲线上各点的高度、波长、坡度或曲率等用概率密度分布函数来表示它们的变化。

1. 高度分布函数

如图 1.17 所示，以平均高度线为 x 轴，轮廓曲线上各点高度为 z 。概率密度分布曲线的绘制方法如下。

由不同高度 z 作等高线，计算它与峰部实体 (x 轴以上) 或谷部空间 (x 轴以下)