

轮廓表面测量及评定方法

洛阳轴研科技股份有限公司 朱孔敏

1. 轮廓表面测量方法概述

工程中所用的固体表面，实际上是由许多不规则的大小不同和形状各异的凸峰和凹谷构成的，这种表面几何形态，称之为表面形貌。相互运动表面的表面形貌对于表面润滑、摩擦力、耐磨性、接触疲劳、配合精度、密封性等都有很重要的影响，轴承是典型的机械基础件，准确测量其运动表面形貌对控制质量有重要意义。

表面形貌的测量仪器从测量功能上区分一般有二维测量和三维测量两种，从测量方法上区分则有接触式（一般为触针式轮廓仪）和非接触式（如干涉显微镜、白光干涉仪、激光式表面粗糙度测量仪）两种。触针式表面形貌仪是目前最常用的可靠的形貌测量仪，特别是二维轮廓仪应用更为广泛，并且一直是各国国家标准及国际标准制定的依据，下面以洛阳轴研科技股份有限公司开发的XM200表面形貌测量仪为代表介绍表面形貌测量和表面轮廓测量。

2. XM200 表面形貌测量原理

XM200 表面形貌测量仪（图 1、图 2）采用三维直角坐标测量原理，即 X 方向的直线运动，Z 方向的位移测量，Y 方向的间断直线运动。X 方向由直流电机通过同步带带动精密滑动导轨移动，并通过高精度的光栅尺实现 X 坐标的位移测量，建立 X 坐标系；Z 坐标由高精度大量程差动电感式传感器实现 Z 坐标的位移测量，实现单一截面内零件表面轮廓的测量，立柱导轨的上下位移量可通过绝对编码器进行测量和定位；Y 坐标方向由步进电机和滚珠丝杠带动精密滚动导轨间断移动，光栅传感器精确测量步距，实现多截面的轮廓测量，X 坐标、Y 坐标、Z 坐标信息送计算机处理实现表面形貌测量。当 Y 坐标固定时 XM200 表面形貌仪就是常用的轮廓测量仪，轴承行业常用的是轮廓仪的功能。在对被测件进行测量时，被测件置于多维调整台上。将电感传感器探头伸到被测部位，按规定的 X 向移动范围开始测量。测量过程中，传感器由 X 向电机拖动，沿工件表面拾取单一截面内表面轮廓变化信号，同时 X 向光栅以 $0.5\mu\text{m}$ 间距同步记录传感器相应位置信号，传感器的位移信号和光栅采样的 X 向位置信号经处理后进入计算机，两坐标信息通过专门的轮廓仪软件处理得到各种需要的轮廓、波纹度、粗糙度等技术参数和曲线。



图 1 XM-200 表面形貌仪

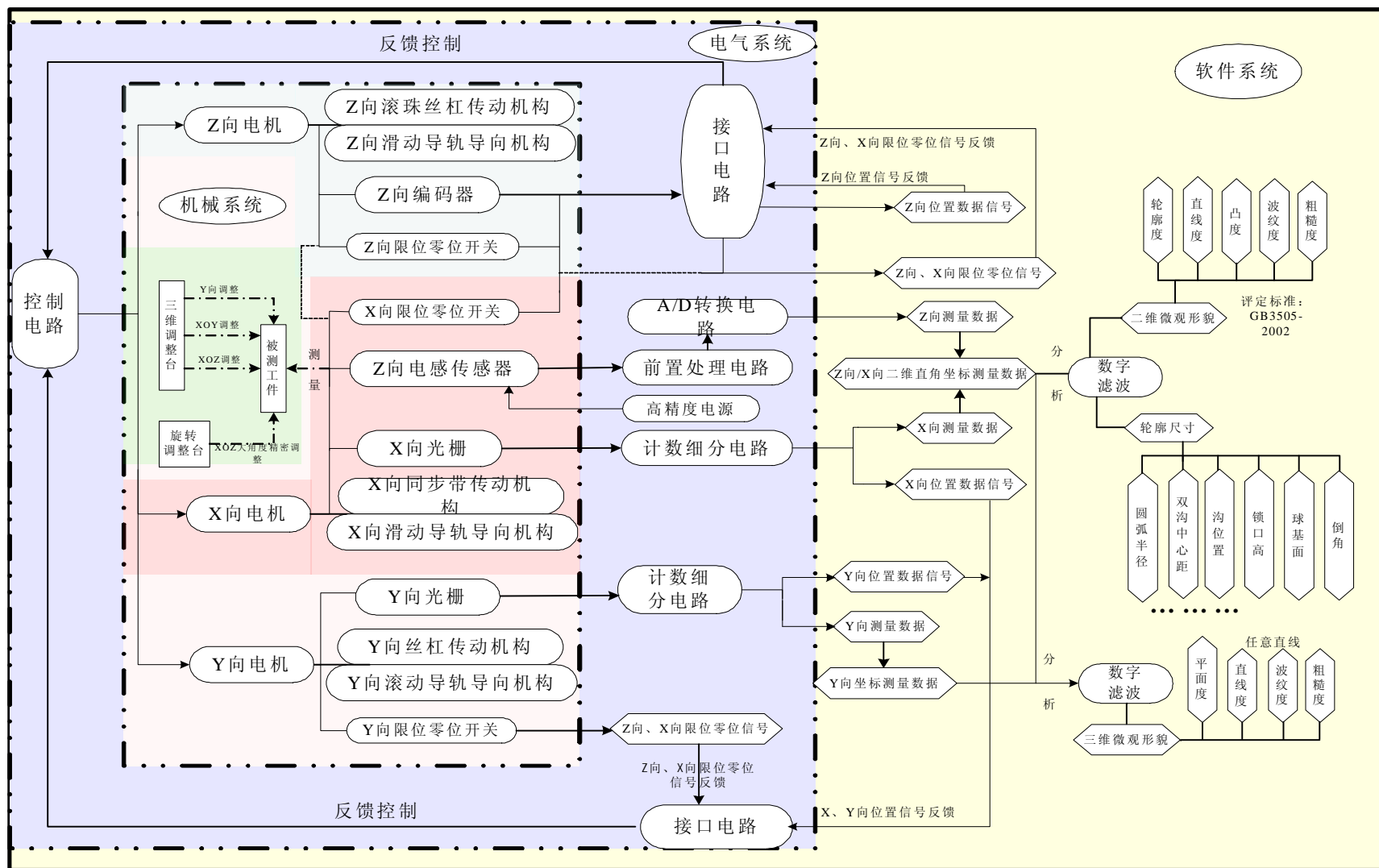


图 2 XM200 表面形貌仪工作原理图

3. 主要技术指标

3.1 测量范围

3.1.1 粗糙度测量

测量范围：Ra0.01 μm ~10 μm ；触针位移： $\pm 500 \mu\text{m}$ ；测量力：0.75mN；
分辨率：0.015 μm ；示值变动性：2% + 4nm。

3.1.2 轮廓测量：

X 坐标：0~200mm，分辨率：0.5 μm

Y 坐标：0~100mm，分辨率：1 μm

Z 坐标： $\pm 500 \mu\text{m}$ ，分辨率：0.016 μm

$\pm 4\text{mm}$ ，分辨率：0.26 μm

半径测量精度：0.5%—0.2%

X 坐标导轨精度：0.5 $\mu\text{m}/100\text{mm}$

Y 坐标导轨精度：1.0 $\mu\text{m}/100\text{mm}$

3.2 单一截面测量参数：

3.2.1 宏观轮廓参数：形状误差、波纹度、直线轮廓的直线度、凸度、对数曲线等；

3.2.2 微观轮廓参数：表面粗糙度

3.2.3 尺寸测量：球半径和沟道等圆弧轮廓的半径，滚子的球基面半径，双沟中心距、沟位置、锁口高、密封槽深度以及倒角尺寸等。

3.3 多截面测量参数：宏观形状误差

3.4 仪器特定功能：

CAD 尺寸标注，数据存储分析、开放二次开发平台等。

4. 单一截面测量参数的定义及评定方法：

4.1 术语定义

4.1.1 表面轮廓：平面与实际表面相交所得的轮廓（本文定义的单一界面）。

4.1.2 轮廓变换：把表面轮廓通过一定的数学变换，变换成可以评定的表面轮廓曲线。

4.1.3 轮廓滤波器：把轮廓分成长波和短波成分的滤波器。

4.1.4 I_s 滤波器：确定存在于表面上的粗糙度与比它更短的波的成分之间相交界限的滤波器。

4.1.5 I_c 滤波器：确定粗糙度与波纹度成分之间相交界限的滤波器。

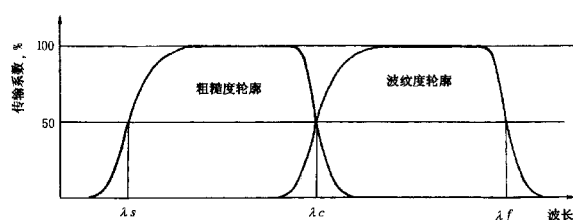
4.1.6 I_f 滤波器：确定存在于表面上的波纹度与比它更长的波的成分之间相交界限的滤波器。

4.1.7 原始轮廓：在应用短波长滤波器 I_s 之后的总的轮廓，原始轮廓是评定原始轮廓参数的基础。

4.1.8 粗糙度轮廓：是对原始轮廓采用 I_c 滤波器抑制长波成分以后形成的轮廓，是人为定义的轮廓，是评定粗糙度轮廓参数的基础。

4.1.9 波纹度轮廓：是对原始轮廓采用 I_c 滤波器抑制短波成分，采用 I_f 滤波器抑制长波成分以后形成的轮廓，是人为定义的轮廓，是评定波纹度轮廓参数的基础。

4.1.10 粗糙度和波纹度轮廓的传输特性及划分表。



I_c (mm)	I_s (μ m)	I_f (mm)	I_c / I_s	I_f / I_c	最大采样 间距 (μ m)	测针最大 半径 (μ m)
0.08	2.5	0.8	30	10	0.5	2
0.25	2.5	2.5	100	10	0.5	2
0.8	2.5	8	300	10	0.5	2
2.5	8	25	30	10	1.5	5
8	25	80	300	10	5	10

4.1.11 中线：具有几何轮廓形状并划分轮廓的基准线。

4.1.12 原始轮廓中线：用标称形式的线穿过原始轮廓并按最小二乘法拟合所确定的中线。

4.1.13 取样长度：用于判别被评定轮廓的不规则特征的X轴向上的长度。

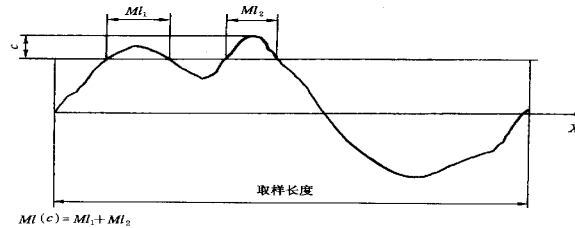
一般取样长度为：0.08mm，0.25mm，0.8mm，2.5mm，8mm

注：球轴承测量时因测针的移动方向不能保证任一点均在法向方向，所以建议取样长度数值减少一档。这一点在实验中得到了验证（本建议与标准不符，

属个人意见)。

4.1.14 评定长度: 用于判别被评定轮廓的X轴方向上的长度, 评定长度包含n个取样长度, 一般选取样长度为的5倍, 对于粗糙度均匀测量长度短的表面轮廓, 评定长度可以小于5, 在测量结果中要注明取样长度个数。

4.1.15 材料实体长度: 在一个给定水平位置上用一条平行于想X轴的线与轮廓单元相截所获得的各段截线长度之和。



4.1.16 P-参数: 从原始轮廓上计算所得的参数。

4.1.17 R-参数: 从粗糙度轮廓上计算所得的参数。

4.1.18 W-参数: 从波纹度轮廓上计算所得的参数。

5. 单一截面轮廓测量参数定义及评定方法

轮廓测量参数定义及评定方法公式中的, P. R. W 分别代表从原始轮廓、粗糙度轮廓和波纹度轮廓中得到的相应值。

5.1 轮廓的变换方法

5.1.1 直线轮廓的变换方法: 直线轮廓采用最小二乘法进行轮廓变换。

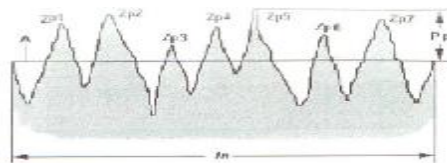
5.1.2 圆弧轮廓的变换方法: 圆弧轮廓采用最小二乘法进行轮廓变换。

5.2 在取样长度内的测量参数

5.2.1 最大轮廓峰高 (Pp, Rp, Wp)

在一个取样长度内, 纵坐标值 $Z(x)$ 最大的轮廓峰高 Z_p 。

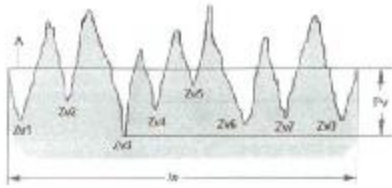
$$P_p, R_p, W_p = \max(Z(x)) = Z_p$$



5.2.2 最大轮廓谷深 (Pv, Rv, Wv)

在一个取样长度内, 最大的轮廓谷深 Z_v (纵坐标值 $Z(x)$ 最小)

$$P_v, R_v, W_v = \min(Z(x)) = Z_v$$

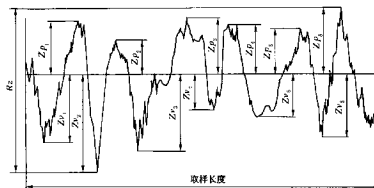


对摩擦表面轮廓谷可以保存润滑油，具有均匀合适的轮廓谷和圆滑的谷底形状可以减少表面摩擦、提高寿命。

5.2.3 轮廓的最大高度 (Pz, Rz, Wz)

在一个取样长度内，最大轮廓峰高 Zp 和最大轮廓谷深 Zv 之和的高度。

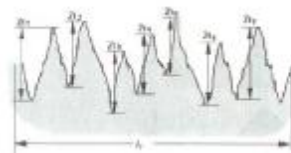
$$P_z \cdot R_z \cdot W_z = P_p \cdot R_p \cdot W_p + P_v \cdot R_v \cdot W_v$$



5.2.4 轮廓单元的平均(线)高度 (Pc, Rc, Wc)

在一个取样长度内，轮廓单元高度 Zt (相邻峰谷) 的平均值

$$P_c \cdot R_c \cdot W_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{t_i}$$



峰高的判别标准为取样长度内 Pz, Rz, Wz 的 10%

5.2.5 轮廓的算术平均偏差 Pa, Ra, Wa

在一个取样长度内纵坐标值 Z(x) 绝对值的算术平均值。

$$P_a \cdot R_a \cdot W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad \text{式中, } l = l_p, l_r \text{ 或 } l_w. l_p, l_r, l_w \text{ 分别为轮廓、粗糙度和波纹度下的取样长度。}$$

和波纹度下的取样长度。

5.2.6 轮廓的均方根偏差 Pq, Rq, Wq

在一个取样长度内轮廓偏离平均线均方根值

$$P_q \cdot R_q \cdot W_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx}, \quad \text{依据不同情况, 式中 } l = l_p, l_r \text{ 或 } l_w.$$

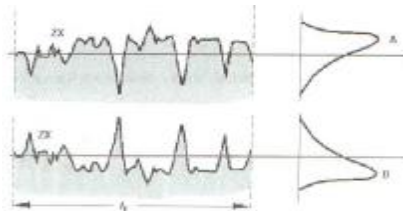
5.2.7 轮廓的偏斜度 Psk, Rsk, Wsk

在一个取样长度内纵坐标 $Z(x)$ 三次方的平均值分别与 Pq 、 Rq 和 Wq 的三次方的比值。这些参数是纵坐标值概率密度函数的不对称性的测定，它们受离散的峰或谷的影响很大。

$$Psk.Rsk.Wsk = \frac{1}{(Pq.Rq.Wq)^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right]$$

该参数反应了轮廓高度幅值曲线相对平均线的不对称度，可以较好的评价表面抗磨损能力。

如下图：具有相同 Pa, Ra, Wa 的表面，A 为具有负偏斜的表面，其抗磨损的性能好；B 为具有正偏斜的表面，其抗磨损的性能差。

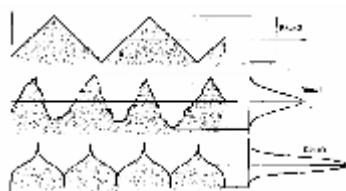


5.2.8 轮廓的陡度 Pku, Rku, Wku

在一个取样长度内纵坐标 $Z(x)$ 四次方的平均值分别与 Pq 、 Rq 或 Wq 的四次方的比值。这些参数是纵坐标值概率密度函数锐度的测定。

$$Pku.Rku.Wku = \frac{1}{(Pq.Rq.Wq)^4} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^4(x) dx \right]$$

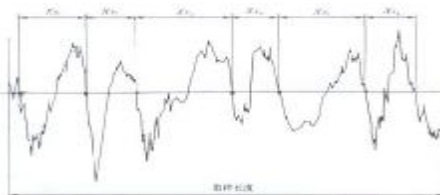
理想的表面轮廓的陡度为 3，下图为不同粗糙度轮廓陡度的表面轮廓。



5.2.9 轮廓单元的平均宽度 PSm, RSm, WSm

在一个取样长度内轮廓单元宽度 Xs 的平均值。

$$PSm.RSm.WSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i$$



5.2.10 轮廓的均方根斜率 $P\Delta q$, $R\Delta q$, $W\Delta q$

在一个取样长度内纵坐标斜率 dZ/dX 的均方根值。

$$P\Delta q.R\Delta q.W\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left[\frac{d}{dx} Z(x) \right]^2 dx}$$

5.3 在评定长度内的测量参数

5.3.1 轮廓的总高度 (P_t , R_t , W_t)

在评定长度内最大轮廓峰高 Z_p 和最大轮廓谷深 Z_v 之和。

$$P_t.R_t.W_t = \max(Z_{p_i}) + \max(Z_{v_i})$$

5.3.2 轮廓的支承长度率 $Pmr(c)$, $Rmr(c)$, $Wmr(c)$

在给定水平位置 C 上轮廓的实体材料长度 $MI(c)$ 与评定长度 l_n 的比率。

$$Pmr(c).Rmr(c).Wmr(c) = \frac{MI(c)}{l_n}$$

$Pmr(c)$, $Rmr(c)$, $Wmr(c)$ 的物理意义在于在用数学参数描述摩擦表面的摩擦特性和配合表面稳定性, 数值大耐磨性好, 数值大配合表面的配合性能稳定性好。

5.3.3 轮廓的支撑长度率曲线

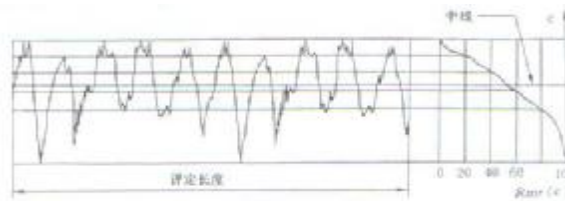
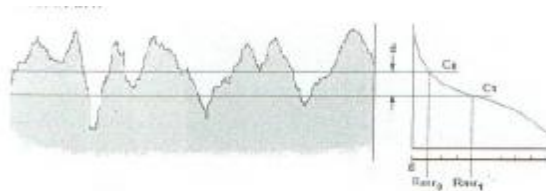


图 11 支承比率曲线

5.3.4 轮廓截面高度差 $P\delta c$, $R\delta c$, $W\delta c$

给定支承比率的两个水平截面之间的垂直距离。

$$P\delta c.R\delta c.W\delta c = C(Pmr_1.Rmr_1.Wmr_1) - C(Pmr_2.Rmr_2.Wmr_2)$$



5.3.5 相对支承比率

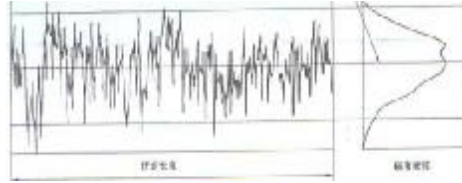
在一个轮廓水平截面 $R\delta c$ 确定的, 与起始零位 C_0 相关的支承比率。

$$Pmr.Rmr.Wmr = Pmr.Rmr.Wmr(C_1)$$

式中, $C1 = C0 - Pdc.Rdc.Wdc, C0 = C(Pmr_0.Rmr_0.Wmr_0)$

5.3.6 轮廓幅度分布曲线

在评定长度内纵坐标值 $Z(x)$ 采样的概率密度函数。



5.3.7 轴承沟曲率半径

评定长度内轮廓曲线各点曲率半径的平均值, 当用最小二乘圆进行轮廓变换后为最小二乘圆半径。

5.3.8 沟形 ΔR

评定长度内轮廓曲线各点曲率半径的变动量, 当用最小二乘圆进行轮廓变换后为轮廓各点相对最小二乘圆(中线)的最大轮廓峰高 Z_p 和最大轮廓谷深 Z_v 之和。 $\Delta R = P_i$

5.4 三维表面轮廓参数及评定方法

5.4.1 最大轮廓峰高 (P_{sp}, R_{sp}, W_{sp})

在一个取样平面内, 纵坐标值 $Z(xy)$ 最大的轮廓峰高 Z_{sp} 。

$$P_{sp}.R_{sp}.W_{sp} = \max(Z(x, y)) = Z_{sp}$$

5.4.2 最大轮廓谷深 (P_{sv}, R_{sv}, W_{sv})

在一个取样平面内, 最大的轮廓谷深 Z_{sv} (纵坐标值 $Z(xy)$ 最小)。

$$P_{sv}.R_{sv}.W_{sv} = \min(Z(x, y)) = Z_{sv}$$

5.4.3 轮廓的最大高度 (P_{sz}, R_{sz}, W_{sz})

在一个取样平面内, 最大轮廓峰高 Z_{sp} 和最大轮廓谷深 Z_{sv} 之和的高度。

5.4.4 轮廓的总高度 (P_{st}, R_{st}, W_{st})

在评定平面内最大轮廓峰高 Z_{sp} 和最大轮廓谷深 Z_{sv} 之和。

5.4.5 轮廓的算术平均偏差 P_{sa}, R_{sa}, W_{sa}

在一个取样平面内纵坐标值 $Z(x, y)$ 绝对值的算术平均值。

$$P_{sa}.R_{sa}.W_{sa} = \frac{1}{S} \iint_S |Z(xy)| dx dy$$

6. 结束语

表面轮廓测量仪，特别是两维轮廓粗糙度测量仪在机械行业应用十分广泛。轴承行业计量室普遍使用两维轮廓仪，轮廓仪测量参数多，国内外新旧标准也有变化，对其正确理解非常重要。本文以洛阳轴研科技生产的 XM200 形貌仪为代表介绍了仪器的测量原理，结合国内外标准，通过图文介绍了二、三维表面的测量参数的定义及评定方法，帮助有关人员正确理解表面轮廓测量参数及在工程中的应用，旨在使仪器使用者正确使用仪器，使仪器生产企业和轴承行业有一共同的理解规范和相同的参考标准。

（朱孔敏：教授级高工，洛阳轴研科技股份有限公司仪器开发部部长，中轴协技委会轴承检测与试验技术专委会主任委员）

BEARING · 2010

2010 上海国际轴承峰会演讲之十七（2010/9）