形位误差测量技术

专　辑

中　集

《计量技术》编辑部编

内 容 提 要

本书是《计量技术》编辑部为厂矿企业基层计量人员、检验人员和检定人员贯彻形位误差国家标准而专门编辑出版的。书中介绍了一些具有实用价值的测试方法。其中包括导轨的直线度、任意方向上的直线度、圆环形工件的平面度、圆度、圆柱度、键槽对称度、平行度、垂直度和轮廓度等生产中经常遇到的测量、数据处理和精度分析方面的问题，可作为工作中的参考，或作为学习班的参考材料，也可供大专院校师生和科研系统的科技人员阅读。全书约30余万字，分上、中、下三集出版。

《形位误差测试技术》专辑
中集
内 部 发 行

编　辑：《计量技术》编辑部
出版者：国家计量局情报研究所
印刷者：北京通县建新印刷厂

1985 年 8 月出版　定价：0.90 元

形 位 误 差 测 量 技 术

（专　辑）

中　集　　目　录

形状误差

大型垂直平面检查仪

一、概　　述

在有关资料上，对于垂直平面或垂直导轨的垂直度、直线度的论述已比较多，测量方法也有多种。但就垂直平面的直线度对垂直度的影响的论述较少，当垂直平面的高度较高（500mm 以上）时，靠一般的测量方法就满足不了要求。再加上当两垂直平面间有障碍物时，给测量带来一定的困难。为解决这类问题，以适应大型产品发展的需要，我们设计制成了“五棱镜转向装置”，并附加一个平面反射镜装置，与我厂现有的1秒自准直仪配合使用，组成了能测量大型垂直平面或垂直导轨的垂直度和直线度的装置，简称为“大型垂直平面检查仪”。

通过一年多的实践和在某产品上的大量试验证明：不仅测量精度可以保证4秒，而且不受两垂直平面之间的相互位置的限制。充分利用现有设备，扩大了仪器的使用范围，垂直面的量程可达6m。操作方便，安全可靠，减轻了劳动强度，测量效率提高了一倍。

二、五棱镜装置和平面反射镜装置的结构

1. 五棱镜装置：

如图1所示，五棱镜1（精度为1秒）装在镜体2内，镜体2在支承座3上可作任意角度旋转，用压板4通过螺钉5可将镜体2压紧。

2. 平面反射镜装置

如图2所示，反射镜片1装在镜座2内，通过三个微调螺钉3可使反射镜片微动。

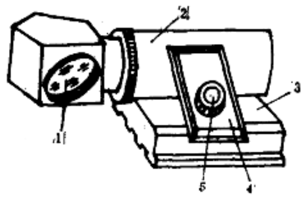

图 1

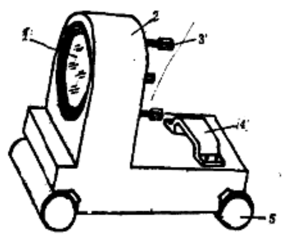

图 2

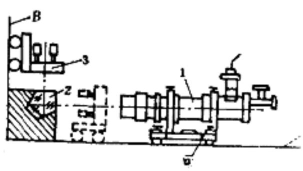

图 3

为了便于操作，在镜座2的上面安有手柄4，为了提高测量精度，在镜座2的上面用两个直径相等的圆柱5做支承面，两圆柱的中心距做成100mm。

三、测量及操作方法

1. 如图3所示，将五棱镜和自准直仪置于A面，调节自准直仪的三个地脚螺钉a，使自准直仪里面的十字线照射到五棱镜上，并使五棱镜将棱镜表面反射象（十字线）反射回自准直仪的视场，与视场中原有十字线重合，这时，五棱镜和自准直仪就不动了。

2. 将平面反射镜置于自准直仪和五棱镜之间，调节平面反射镜的三个微调螺钉，使自准直仪里面的十字线照射到反射镜上，经反射镜反射回自准直仪的视场，也与视场中原有的十字线重合。

此时，五棱镜，平面反射镜，自准直仪三者调整一致了，记下鼓轮读数 α_1。

3. 将平面反射镜放在 B 平面上（可用磁性表座固定），适当调整平面反射镜，使自准直仪里面的十字线经五棱镜转向射到平面反射镜上，再由平面反射镜反射回自准直仪的视场。若与视场中原有的十字线重合，则不垂直度误差为 0。否则将发生偏移，从鼓轮上记下读数 α_2，两垂直平面的不垂直度为：

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (秒)$$

4. 若要测量垂直平面 B 的直线度，按照"节距法"，只需将平面反射镜沿垂直平面上、下移动即可。

实际上，被测垂直导轨存在着直线度误差。当被测垂直导轨的直线度误差为"0"时，垂直度误差的测量才能按"测量及操作方法"中的第 3 点进行计算，否则应通过"节距法"测量之后，进行数据处理，才能正确得出被测垂直导轨的垂直度和直线度误差。举例如下：

规格为 800mm 的方箱，测量其某一截面的直线度和垂直线度误差，跨距为100mm，取七个跨距（转向镜高度占去一个跨距）。平面反射镜放在方箱的被测垂直截面上，从上往下移动，测得的数据如下表。

由表中数据作出如图 4 的误差曲线，根

测量位置	0	0～100	100～200	200～300	300～400	400～500	500～600	600～700
测量点序	0	1	2	3	4	5	6	7
相对读数	0	−9″	+5″	−27″	+6″	−9″	0″	−6″

据"最小条件"求出此垂直截面的直线度误差为 21 秒，与基准平面的垂直度误差为 36 秒。

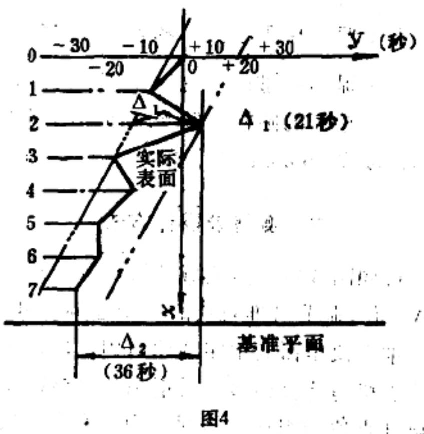

图4

上述角度误差值可换算成为长度误差值：

直线度误差 $\Delta_1 \approx 0.01$mm

垂直度误差 $\Delta_2 \approx 0.017$mm

注：(1)根据目前使用分析，影响测量精度的主要参数有五棱镜的制造精度，自准直仪的精度，光侧安装调整的方法也有些影响。

(2)从实际工作中来看，五棱镜的精度必须在 2 秒以内才能适应生产的需要，外形尺寸以大为宜（目前我们使用的入射光和出射光的夹角为 1 秒，通光口径为 60mm）。

(3)对于精度要求很高时，对五棱镜的精度实测以后应给于修正。

(4)为了便于制作，将五棱镜转向装置的尺寸结构示意图标注出来，供参考（见图 5）。

说明：1. 装五棱镜的镜体头部用铝合金制

造，其余可用一般的黑色金属材料。

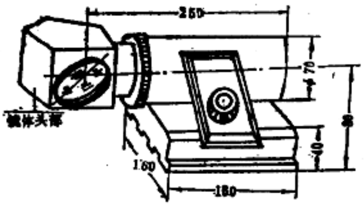

图 5

2. 镜体尺寸大小的设计由五棱镜的尺寸确定。

3. 五棱镜中心高度由自准直仪的中心高度确定。

4. 镜体里面应氧化或染黑。

（重庆市国营双溪机械厂
计量室　杨见清）

公共基准轴线和公共基准中心平面维见

零件或部件采用公共基准轴线或公共基准中心平面定位，在实际设计和生产工作中经常遇到。过去的一些有关资料，对这一问题没有引起足够的重视。在新颁布实施的《形状和位置公差》GB 1182～1184—80、GB 1958—80 中，已经对上述问题作了明确的规定。

根据 GB1958—80 规定，公共基准轴线或公共基准中心平面，由两条或两条以上实际轴线、两个或两个以上实际中心面（组合基准要素）建立公共基准轴或公共基准中心平面时，公共基准轴线或公共基准中心平面为这些实际轴线或实际中心面所共有的理想轴线或平面。或者说，公共基准轴线就是同时包容两条或两条以上实际轴线的最小圆柱面的轴线；公共基准中心平面就是同时包容两个或两个以上实际中心面，且距离为最小的两平行平面的中心面。根据上述定义，公共基准轴线和公共基准中心平面，都是未给定位置的基准，其位置是由有关要素经过加工后得到的实际状态来决定。

假如两个有关要素经过加工后存在位置误差△，根据最小条件，其公共轴线（或公共中心面）将是一条什么样的直线（或平面）呢？为了确定其唯一的理想状态，我们先就最小条件进行简要分析。

在图 1 中，设两要素轴线的实际位置误差为 $\phi\Delta$，根据定义，我们得到相互平行的三对包容直线 A 和 B、C 和 D、E 和 F。这三对平行线，那一对符合最小条件——即距离为最小呢？

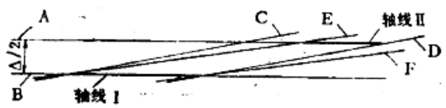

图 1

由图看出，直线 A 和 B 的距离，为两轴线实际位置误差之半 $\Delta/2$。

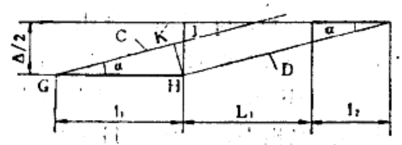

图 2

直线 C 和直线 D 的距离，由图 2 中几何关系得：

在 $\triangle GHK$ 中：$\sin\alpha=\dfrac{HK}{l_1}$，

$$\alpha=\arcsin\frac{HK}{l_1};$$

在 $\triangle IJH$ 中：$\mathrm{tg}\alpha=\dfrac{\Delta/2}{L_1+l_2}$，

$$\alpha=\mathrm{arctg}\frac{\Delta/2}{L_1+l_2}.$$

当 α 很小的时，$\sin\alpha\approx\mathrm{tg}\alpha$ ，即

$$\frac{HK}{l_1}\approx\frac{\Delta/2}{L_1+l_2}\qquad(1)$$

根据式（1），当 $l_1<L_1+l_2$ 时，

$$HK<\Delta/2\qquad(2)$$

当 $l_1>L_1+l_2$ 时，

$$HK>\Delta/2\qquad(3)$$

当 $l_1=L_1+l_2$ 时，

$$HK=\Delta/2,$$

当 $l_1/2=L_1+l_2$ 时，

$$\frac{HK}{2}=\Delta/2\qquad(4)$$

由上列诸式可知，当 $l_1/2<L_1+l_2$ 时，

$$\frac{HK}{2}<\Delta/2。$$

直线 E 和直线 F 的距离，由图 3 中几何关系得：

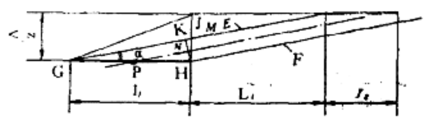

图 3

在 $\triangle GHJ$ 中：$HM<HJ$

在 $\triangle HKM$ 中：$HK<HM$，

$$\therefore\quad HK<HM<HJ=\Delta/2\qquad(5)$$

比较上述分析结果可知，当 $l_1>l_2$ 时，直线 E 和 F 的距离 HK 为最小，符合最小条件。从 HK 中点 N 作直线与 l_1外端至 l_2 内端连线相平行，交于 HG 中点 P，则 PN 即为该二要素的公共轴线。其倾斜角

$$\alpha=\mathrm{arctg}\frac{\Delta/2}{l_1+L_1}\qquad(6)$$

确定公共线轴的倾斜角，对于设计综合量规来说（此时取位置误差最大允许值），是必不可少的。

现在，我们用一根轴或综合量规定位杆来模拟体现公共基准轴线，其直径大小则按图 4 的几何关系计算得出。

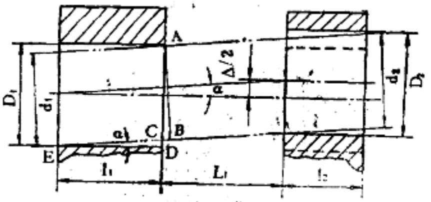

图 4

在 $\triangle ECD$ 中，$CD=l_1\mathrm{tg}\alpha$

在 $\triangle ABC$ 中，$AB=AC\cos\alpha$

又：$D_1=AD$，$AC=AD-CD$

$$\begin{aligned}\therefore\quad d_1&=AB\\&=AC\cos\alpha\\&=(D_1-l_1\mathrm{tg}\alpha)\cos\alpha\end{aligned}\qquad(7)$$

$$d_2=D_2-(D_1-d_1)\qquad(8)$$

式中：d_1——较长零件要素相应定位杆的磨损极限尺寸；

D_1——较长零件要素的最大实体尺寸；

l_1——较长零件要素的长度；

d_2——较短零件要素相应定位杆的磨损极限尺寸；

D_2——较短零件要素的最大实体尺寸。

如果没有预先给定有关要素的位置公差——位置误差的允许变动量，则综合量规定位杆的直径是无法确定的，要采用该公共基准轴线用综合量规对其它要素进行检测，也是无法实现的。

在 GB1958—80 同轴度误差和对称度误差检测方案5—1中（见图 5），对决定公共基准轴线（和公共基准中心平面）的有关要素，提出了位置公差要求，看来与上述定义相矛盾，即违背了“有关要素的实际位置

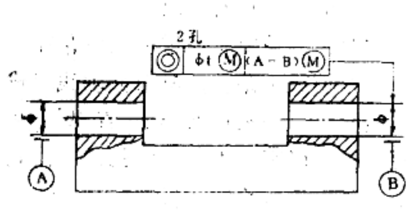

图 5

误差是决定公共基准的前提"这一基本原则。因为公共基准轴线 A—B 的实际状态是由两孔的实际轴线决定的，如果按图5公差框格中的标准方法，则变为由一个未确定位置的公共基准轴线来决定两孔的实际轴线了。故其标注方案应改为图6所示为妥，不宜采用公共基准轴线。

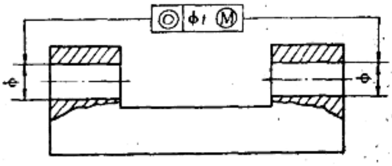

图 6

根据上述理解，我们认为：

1、当采用公共基准轴线（或公共基准中心平面）时，应给出有关要素的位置公差——位置误差的允许变动量，以确定公共基准轴线（或公共基准中心平面）的最大倾斜角和计算相应偶件的尺寸。

2、对用以确定公共基准轴线（或公共基准中心平面）的有关要素，不宜再提出对公共基准的位置公差要求。

（国营长虹机器厂　林智伯）

对角线测量平面度误差的一步运算法

所谓一步运算是把截面上右测点的角值简化换算成线值后，置于已知的两端点上，求出中间各测点的平面度误差来。运算要点是：

1. 各测点的误差值运用下面的简化公式依次求出。

$$\delta_i=\delta_{i-1}+a_i+K$$

式中：δ_i——第 i 点的误差值；

δ_{i-1}——第 i 点的前一点的误差值；

a_i——第 i 点的读数值（线值）；

K——该截面的综合修正量常数。

2. 综合修正量常数 K 的录取

$$K=\frac{\delta n-\delta_0-\sum a_n}{n}$$

式中：δn——末端点的误差值；

δ_0——起始端点的误差值；

$\sum a_n$——该截面所有读数（简化后）的总累计数（线值）；

n——该截面测量时的总跨数数。

3. 除 EA_4 截面以中心点 C_2 为始点向上、下运算外，其他截面的两端点都是依次求得的，可由上（下）往下（或上）算。而在其中间出现已知值测点时，应当成未知数来运算，以便校核测量过程的可靠性。

［例］用 0.01 mm/m 合像水平仪测量 750×1000mm 平板的数值如下。

A	A_1	A_2	A_3	A_4
+0.4	−3.3	−5.6	−4.9	−6.2
B	B_1	B_2	B_3	B_4
+1.6	+0.4	−0.6	−1.3	−4.0
C	C_1	C_2	C_3	C_4
+3.0	+3.9	+2.6	+1.7	−0.4
D	D_1	D_2	D_3	D_4
−2.1	+0.6	+2.3	+3.2	+5.7
E	E_1	E_2	E_3	E_4
−3.8	−1.2	+1.4	+2.8	+6.0

(1) AE_4 截面：桥跨距的水平仪读数，简化后换算成线值，线值的总累计依次记录如表。

因为：$\delta_n=\delta_0=0$　（E_4 和 A）

$\Sigma a_n = +5.6$

所以：$K = 1/4 \times [0-0-(+5.6)] = -1.4$

故 $B_1 = 0+0+(-1.4) = -1.4$;

$C_2 = (-1.4)+2.2+(-1.4) = -0.6$;

$D_3 = (-0.6)+0.6+(-1.4) = -1.4$;

$E = (-1.4)+2.8+(-1.4) = 0$.

(2)EA_4 截面：桥跨距的水平仪读数，读数简化后换算成线值，线值总累计记录如表。

因为：$\delta_n = \delta_0$　(A_4 和 E)

$\Sigma a_n = -20.4$

所以 $K = 1/4 \times [\delta_n - \delta_0 - (-20.4)] = 5.1$

故 $B_3 = (-0.6)+(-8.4)+5.1 = -3.9$、

$A_4 = (-3.9)+(-9.5)+5.1 = -8.3$;

$D_1 = (-0.6)-(-2.5)-5.1 = -3.2$;

$E = (-3.2)-0-5.1 = -8.3$.

(3).AA_4 截面：桥跨距的水平仪读数，简化后换算成线值，线值的总累计记录如表。

因为：$\delta_n = -8.3$　(A_4)

$\delta_0 = 0$　(A)

$\Sigma a_n = 8.1$

所以 $K = 1/4 \times [(-8.3)-0-8.1] = -4.1$

故 $A_1 = 0+0+(-4.1) = -4.1$;

$A_2 = (-4.1)+1.4+(-4.1) = -6.8$

$A_3 = (-6.8)+4.4+(-4.1) = -6.5$;

$A_4 = (-6.5)+2.3+(-4.1) = -8.3$.

(4).EE_4 截面：

因为 $\delta_n = 0$　(E_4)

$\delta_0 = -8.3$　(E)

$\Sigma a_n = -0.5$

$K = 1/4 \times [0-(-8.3)-(-0.5)] = 2.2$

故 $E_1 = (-8.3)+0+2.2 = -6.1$;

$E_2 = (-6.1)+0+2.2 = -3.9$;

$E_3 = (-3.9)+(-1.2)+2.2 = -2.9$;

$E_4 = (-2.9)+0.7+2.2 = 0$.

(5).CC_4 截面：因两端点要由 A_4E_4 截面和 AE 截面运算后才求知，故放在最后运算（如 A_2E_2 截面，略）。

(6).AE 截面：（如 AA_4 截面，略）

(7).A_4E_4 截面：（如 EE_4 截面，略）

(8).A_2E_2 截面：

因为 $\delta_n = -3.9$　(E_2)

$\delta_0 = -6.8$　(A_2)

$\Sigma a_n = 10.7$

$K = 1/4 \times [(-3.9)-(-6.8)-10.7]$

≈ -2.0

故 $B_2 = (-6.8)+5.9+(-2.0) = -2.9$;

$C_2 = (-2.9)+4.2+(-2.0) = 0.7$;

$D_2 = (-0.7)+0.6+(-2.0) = -2.1$;

$E_2 = (-2.1)+0+(-2.0) = -4.1$。

从运算实例可知，只要掌握运算要点，运用心算，即可在记录表上直观算出。最后一个已知端点的运算实为复核，其误差依求 K 时的舍入而定。

上述简化是指将该截面各读数分别减去第一点读数所得的差数或者各读数分别减去该截面中最小一个读数所得的差数。

(衡阳市计量管理处　云昌荣)

大尺寸圆平板平面度误差测量

圆平板分圆形和环形两种。圆形平板的主要优点是各向对称，刚性和稳定性好，所以高精度平板最好采用圆形。环形平板则主要用于检测大尺寸环形件的几何精度，在制造和修理上较同尺寸方形平板容易，而且使用也比较方便。本文分别介绍圆形和环形平板平面度误差的测量方法、数据处理与测量精度分析。

一、圆形平板平面度误差测量

1、测量方法

对大尺寸圆形平板平面度误差的测量

通常采用水平面测量法。首先将被测平板调整到大致水平，然后用水平仪和桥板，以水平面为测量基准，按节距法分别测量若干个直径截面。测量后画出各截面的误差曲线，就可以获得各测量点相对于通过平板中心的水平面的高度。

例1 圆形平板直径1500mm，用分度值为0.02/1000的水平仪和跨距为250mm的桥板测量。共测四个直径截面，如图1所示。

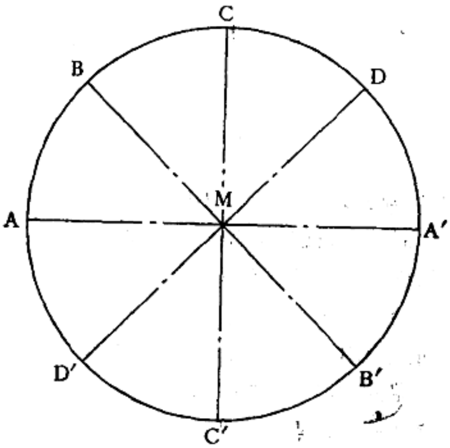

图 1

测量各截面时须按同一测量基准，但不一定必须严格按水平面读数，为简便起见，可按水准管上任一基准刻度（长刻度线）读数。

设四个直径截面的读数格为：

AA′：+1， 0，−1，−1， 0，−1

BB′：−1，−3，+1，+3，+1，+2

CC′： 0，−1， 0，+2，+1，+1

DD′：+1，+2，+3，+1，−2，−1

根据以上测量读数分别画出误差曲线，如图2所示，因为各截面都通过平板中心M点，所以假设作为测量基准水平面通过M点，这在各截面的误差曲线图上，就是通过中心点M的横座标线（R线）。因此，曲线上各点到R线的距离，就反映了平板上各该点对同一平面的高度，如图3所示。

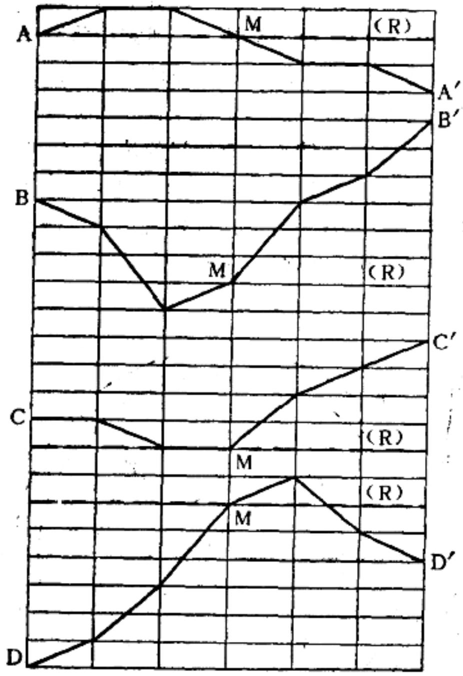

图 2

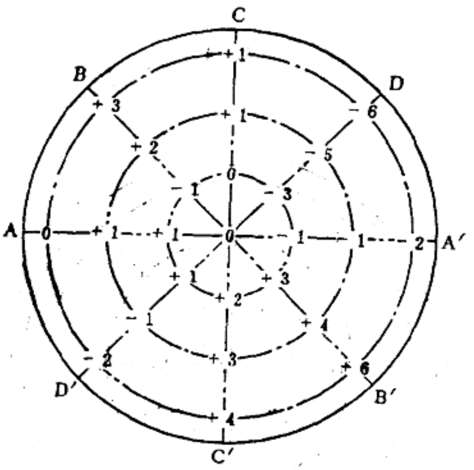

图 3

2、数据处理

数据处理的目的就是在图3原始测量数据的基础上，运用基面转换法，以排除安装

水平误差及读数零位并非水平面等因素的影响，使评定结果尽可能接近最小条件。为了便于选择旋转轴和旋转量，通常先将原始测量数据全部变为同号，故在图 3 数据的基础上先各加 6，使全部变为正值，得图 4 所示的结果。对旋转轴和旋转量的选择，一般原则为：旋转轴选在直径上，以同一截面上差值最大的两点为目标，旋转后尽可能减小其差值，但不允许出现异号数值。故先绕

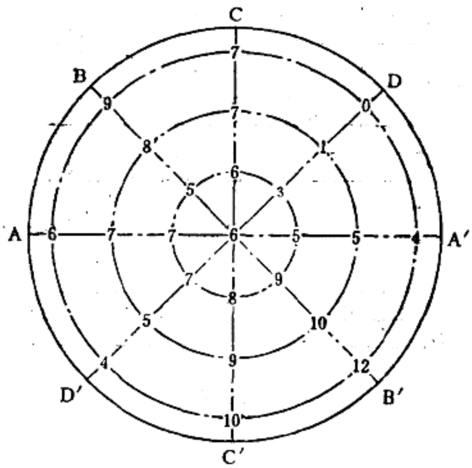

图 4

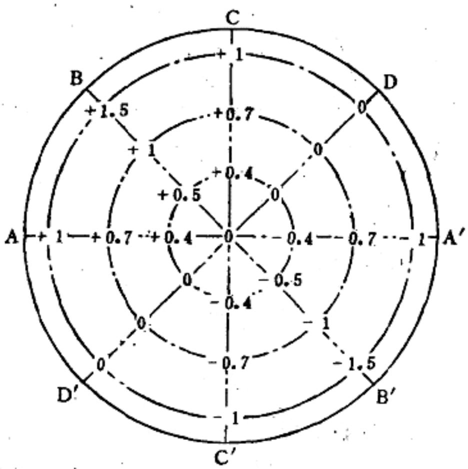

图 5

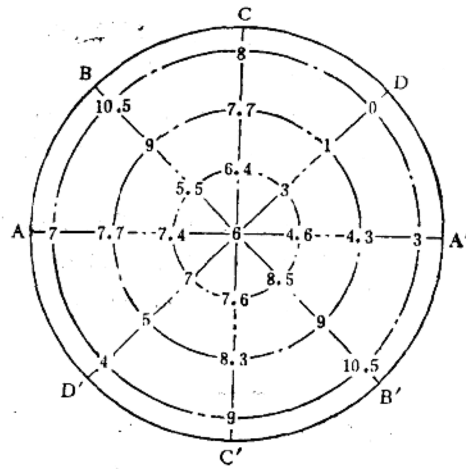

图 6

CD′ 旋转，目的是使 BB′ 截面上最外端的“9”和“12”两点的数值变为相等，各点的旋转量如图 5 所示。将图 4 和图 5 相应各点的数值相加后，得图 6 所示结果。下一步再绕 BB′ 旋转，目的是使 DD′ 截面上最外端的“4”和“0”两点的数值变为相等（旋转后这两点都变为 2）。同时可看出，在旋转之后，在 BB′ 的上侧不会出现比 10.5 更大的数值，在 BB′ 的下侧则不会出现负值，所以就可以不必把所有各点在旋转后的数值都计算出来。旋转后将符合交叉准则，两个极峰为 10.5，两个极谷为 2。这里每格相当于 $(0.02/1000)\times 250=0.005$ mm$=5\mu$m，故按最小条件评定的平面度误差 f 为：

$$f=(10.5-2)\times 5=42.5\mu m$$

对圆形平板，因为测量点不能象矩形平板那样按栅格分布，所以当用基面转换法作数据处理时，图解法往往可以显示出更大的优越性。因此，当极值点的位置可以预先判定时，宜尽量采用图解法。譬如对此例，如果从图 3 的原始测量数据中预先判定极值点的位置，就可以用图解法处理，如图 7 所示所获结果与旋转法是相同的，图中 f=8.5

格。

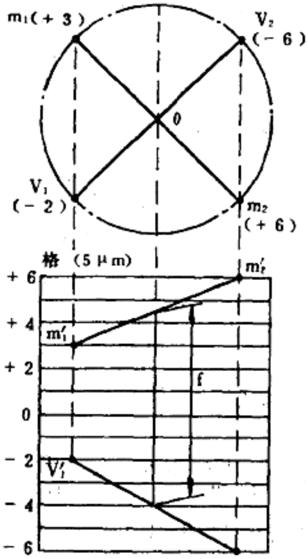

图 7

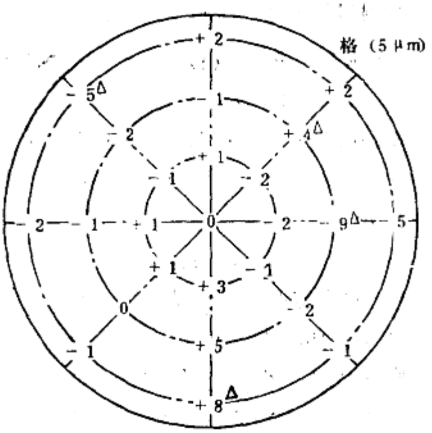

图 8

为有助于理解图解的方法，故再举一例：

例2 设原始测量数据如图 8 所示，并判定极值点的位置为图中标有△号的四点，可用图解法处理如图 9 所示，平面度误差 $f = 12.5\mu m$。

这种图解法的原理可以扼要说明如下：

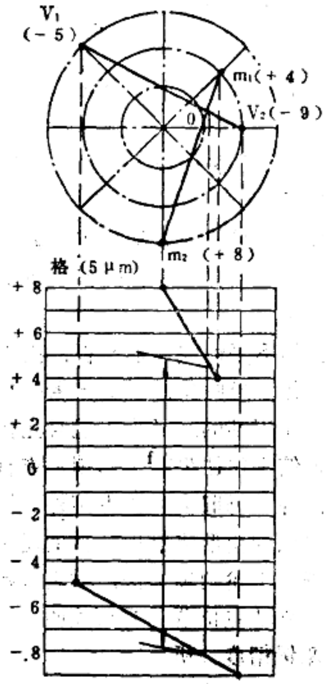

图 9

若用旋转法处理，可以设想需经两次旋转：先绕两个极谷的连线 $\overline{V_1V_2}$ 旋转，使两个极峰 m_1 和 m_2 的数值变为相等；再绕两个极峰的连线 $\overline{m_1m_2}$ 旋转，使两个极谷 V_1 和 V_2 的数值变为相等。经这两点旋转后，数值的分布就将符合交叉准则，然后计算上下包容平面之间的距离，就是平面误差值。在这两次旋转中，旋转轴都通过 $\overline{m_1m_2}$ 和 $\overline{V_1V_2}$ 的交点 0，所以，在 0 点上，上下包容平面之间的距离并不因旋转而改变。因此，只要从下图求出 $\overline{m'_1m'_2}$ 和 $\overline{V'_1V'_2}$ 之间在交点 0 处的距离，就是经上述两次旋转后上下包容平面之间的距离，即平面度误差值。

图解法具有简捷的优点，但须预先判定极值点的位置是其主要缺陷。如果极值点位置判断不准确，将会使所评定的平面度误差值偏小，就是说，有可能将不合格产品误判为合格。为预先判定极值点的位置，如同

矩形平板一样，实用上主要采用以下两种方法：

(1). 如果原始数据极值点不明显，判断有困难，可以先作一二次旋转，极值点就明显了，再用图解法处理，就可以达到既简捷又可靠的目的。

(2). 对有可能的几种分布方案，分别用图解法处理，以其中平面度误差值最大者作为评定结果。

无论矩形平板或圆形平板，由于实测数据千变万化，要归纳出一套严密的预判极值点的程序是困难的。不少人已对此作过许多探讨，但结果往往失之于烦琐，难有实用上的价值，并且仍旧会有不少例外的情况。好在实际平板的变形或磨损总会呈现一定的规律性，辅以上述两项方法，对大多数情况，预先判定极值点位置还是可能的。

3. 测量精度分析

因为假设作为测量基准的理想平面通过平板中点 M，所以中点 M 的均方误差为零；又设各档为等精度测量，测量值的均方误差都为 σ_0，则各测量点高度的均方误差如图 10 所示。

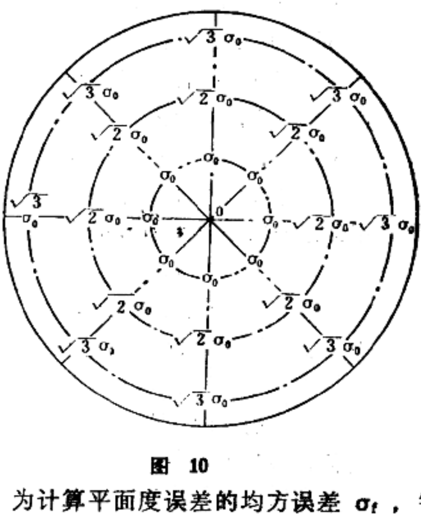

图 10

为计算平面度误差的均方误差 σ_f，需要首先推导出平面度误差和极值点高度之间的函数式，推导方法与矩形平板相同，对于交叉准则的情况，此项函数式为：

$$f=\left(h_{m1}\times\frac{Om_2}{m_1m_2}+h_{m2}\times\frac{Om_1}{m_1m_2}\right)-\left(h_{V1}\times\frac{OV_2}{V_1V_2}+h_{V2}\times\frac{OV_1}{V_1V_2}\right)$$

式中 h_{m1}、h_{m2}、h_{V1}、h_{V2} 为 m_1、m_2 V_1、V_2 四点的高度。

譬如按图 8 所示的原始测量数据，根据极值点的位置，从图 9 中沿纵座标或横座标按比例关系可以求得以下线段的长度比：

$$\frac{Om_1}{m_1m_2}\approx 1/7,\quad \frac{Om_2}{m_1m_2}\approx 6/7$$

$$\frac{OV_1}{V_1V_2}\approx 4/5,\quad \frac{OV_2}{V_1V_2}\approx 1/5$$

$$\begin{aligned}f&=\left(h_{m1}\times\frac{Om_2}{m_1m_2}+h_{m2}\times\frac{Om_1}{m_1m_2}\right)-\left(h_{V1}\times\frac{OV_2}{V_1V_2}+h_{V2}\times\frac{OV_1}{V_1V_2}\right)\\&=(h_{m1}\times 6/7+h_{m2}\times 1/7)\\&\quad-(h_{V1}\times 1/5+h_{V2}\times 4/5)\end{aligned}$$

按测量误差传播定律，可得：

$$\begin{aligned}\sigma_f&=[(6/7)^2\sigma^2_{m1}+(1/7)^2\sigma^2_{m2}+(1/5)^2\times\\&\quad\times\sigma_{V1}+(4/5)^2\sigma^2_{V2}]^{1/2}\\&=[(6/7)^2\times 2+(1/7)^2\times 3+(5)^2\times 3\\&\quad+(4/5)^2\times 2]^{1/2}.\sigma_0\\&=1.4\sigma_0\end{aligned}$$

式中 σ_{m1}、σ_{m2}、σ_{V1}、σ_{V2} 为 m_1、m_2、V_1 V_2 四点的均方误差，其值从图 10 中查得。

设 $\sigma_0=0.3$ 格 $=0.3\times 5=1.5\mu m$

则 $\sigma_f=1.4\times 1.5=2.1\mu m$

$\sigma_{f\lim}=\pm 3\sigma_f=\pm 3\times 2.1=\pm 6.3\mu m$

二、环形平板平直度误差测量

环形平板主要为检验大尺寸环形件的几何精度而设置，一般直径较大而宽度较小。对环形平板的平面度，通常是分别控制中心圆截面上的高低起伏和径向的扭曲。对径向扭曲，用水平仪沿径向测量数据即可。至于中心圆周截面上的高低起伏，既不同于形位

公差国标的平面度，也不同于直线度，为区别起见，通常称“平直度”。以下介绍两种测量平直度误差的方法：

1、**测量方法**

(1). 圆周测量法

圆周测量法是将被测环形平板大致调平后，如图 11 所示，用水平仪和桥板按节距法沿圆周逐档测量环形平面对水平面的倾斜度，看起来似乎和测量直平面的直线度误差一样，不过，两者之间其实还是存在性质上的差异：测量直平面时，水平仪是沿直线移动，安装水平误差对各档水平仪示值的影响是一致的，从测量性质看，是属于直线度测量的范畴；而用同样方法测量环形平面时，水平仪是沿圆周移动，安装水平误差对各档水装平仪示值的影响是不一致的，只因各测量档是以同一平面作为测量基准，所以将各档测量读数累计相加后，可以获得各测量点相对于同一平面高度，从测量性质看，是属于平面度测量范畴。

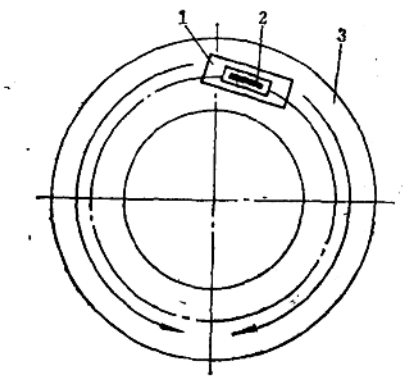

图 11

为缩短测量链长度，通常按两个半圆分别测量，如图 11 中的箭头所指。

例3 环形平板外径 1300mm，内径 900mm 用分度值为 0.02/1000 的水平仪和跨距为 300mm 的桥板，沿圆周逐档测量，读数(格)为：

−1.5，+2.5，+3，+3，−1，−1 和 −2，+1，0，+2，+1.5，+1.5

将这些测量读数按两个半圆累计相加后，就获得环形表面上各测量点相对于同一平面的高度，如图 12 所示，其中 G 点的高度系取两个数值的平均值。这里每格相当于 $(0.02/1000)\times300=0.006\text{mm}=6\mu\text{m}$。

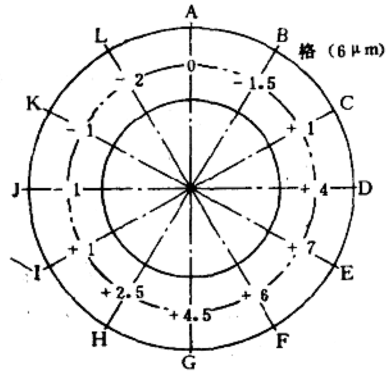

图 12

(2). 半径桥板测量法

半径桥板测量法是将被测环形平板大致调平后，如图 13 所示，在其中心设置一支承点（通常采用钢球和研磨过的中心孔接触的形式），将桥板跨在支承点和环形表面上，在桥板上放水平仪，气泡应基本上处于

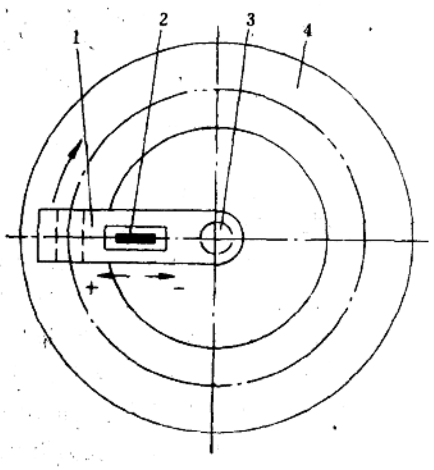

图 13

中间位置。转动桥板，沿圆周测量若干位置。读数的正负按以下规则确定：

气泡向圆周偏移时读数为正，这反映平板在该处凸起；气泡向中心偏移时为负，这反映平板在该处凹下。

在这种测量方法中，测量读数本身就反映了平板上各测量点相对于同一平面的高度。

例4 环形平板外径 2000mm，内径 1500mm，半径桥板跨距900mm，用分度值为0.02/1000 的水平仪，每隔 30° 测量一次，读数(格)为：

0，+0.5，+1，0，−0.5，−0.5，−1，−0.5，−1.5，−1，−0.5，+0.5

这些读数就是平板上各测量点的高度，如图 14 所示，每格相当于 (0.02/1000) × 900＝0.018mm＝18μm。

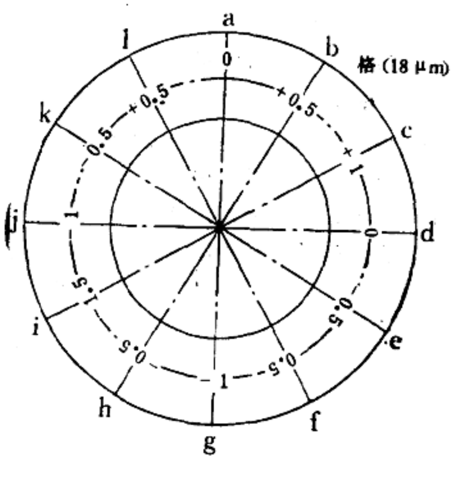

图 14

2、数据处理

在以上原始测量数据的基础上，可运用基面转换法以排除安装水平误差及读数零位并非水平面等因素影响，使评定结果尽可能接近最小条件。对旋转轴和旋转量的选择，一般是以相对 180° 高度差为最大的两点为目标，旋转后使这两点的高度变为相等。根据例 3 的原始测量数据（图 12），基面转换的过程如图 15 ～ 17 所示，外圈字母为各测量点高度，内圈数字为旋转量，0—0为旋转轴。

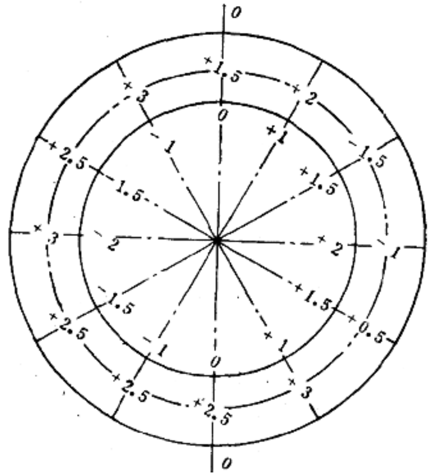

图 15

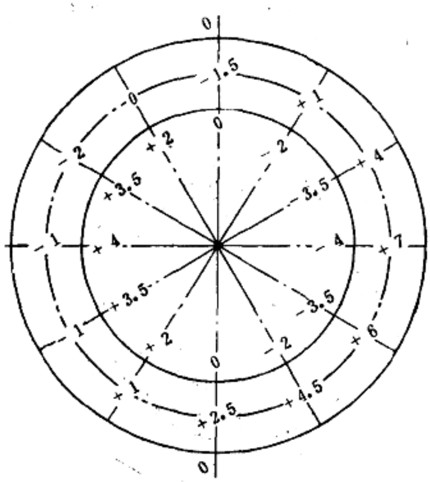

图 16

在获得图 17 所示的结果后，已可判定极值点的位置如图中虚线所指，于是可用图解法求平直度误差，如图 18 所示，图中f＝3 格，故 f＝3×6＝18μm

在环形平板制造或修理的过程中，需要重复测量多次，在这样的场合，可以采用更

简便的图解法。原理是：可以证明，如果环形平面本身是理想平直的，仅有安装水平误差，那么水平仪沿圆周逐档测量时，其示值按正弦函数变化，根据这样的读数画出的误差曲线，为一条正弦曲线。因此，根据圆周测量法的测量读数画出误差曲线后，只需要以一条正弦曲线作为评定基准，就排除了安装水平误差对评定结果的影响。

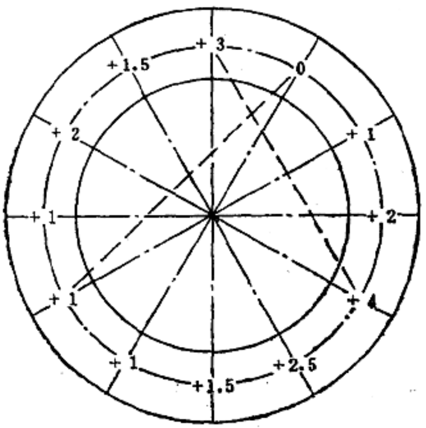

图 17

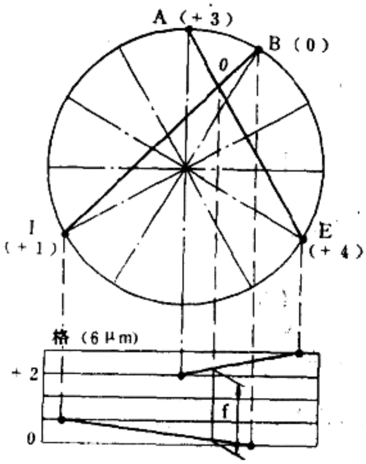

图 18

下面根据例 3 的测量读数按此法进行处理：

根据测量读数画出误差曲线，从 A 点开始分别向两边画，如图 19 中的实线。然后以这条误差曲线上最高点与最低点之间的座标距离作为发生圆直径，在透明纸上画一条正弦曲线，复盖在误差曲线上，作上下、左右移动，直到两条曲线之间的最大座标距离为最小，即图 19 中的虚线。现两条曲线之间的最大座标距离为 3.5 格，即作为平直度误差，可见和最小条件（3 格）是接近的。

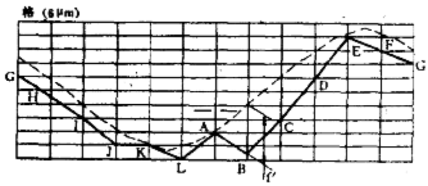

图 19

对环形平板原始测量数据的处理，旋转法是最基本的方法，不过计算旋转量时要用到正弦函数，当测量点数更多时会是较麻烦的，则每次旋转可用以下的图解法：

图解的方法是在圆周投影座标上作误差曲线。所谓“圆周投影座标”，就是作一圆，将圆周按测量点数均分，并投影到直径上作为纵座标。然后从旋转量最大的截面（即垂直于旋转轴的截面）开始，将各点高度顺次标在座标上，把这些点连起来，就是误差曲线。曲线上各点到两端连线的座标距离，就是旋转后各点的高度。

譬如按例 4 的原始测量数据（图 14），旋转轴选在 f–L，旋转量最大的截面为 c–i，故从 c 点或 i 点开始作图，如图 20 所示。曲线上各点到两端连线（ci）的座标距离，就是旋转后各点的高度，不过已经平移了一段距离，使 c、i 两点的高度变为零。

这种图解法的原理可以说明如下：

假想一个理想平直的环形平面绕一侧旋转某一角度，则各点的旋转量如图 21 所示，将这些点的旋转量标在圆周投影座标上，如图 22 所示，可见为一直线。因此，曲线上各点到两端连线的座标距离，就是各点原始高

度和旋转量的代数差。

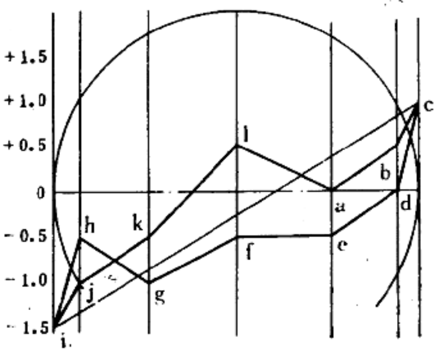

图 20

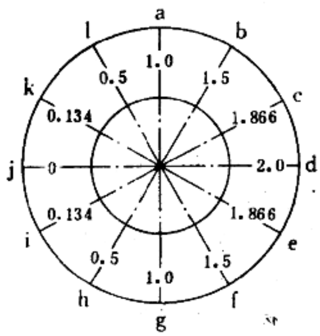

图 21

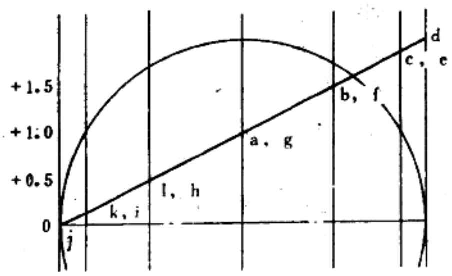

图 22

3. 测量精度分析

圆周测量法为闭合测量，测量精度是根据闭合差的大小来衡量，各档测量值的均方误差 σ_o 按下式计算：

$$\sigma_o = S/\sqrt{n}$$

式中，S—闭合差，作真误差看待；

n—测量档数。

圆周上各点高度的均方误差如图 23 所示，其中 G 点（即发生闭合差处）的高度是取两次测量结果的平均值，故均方误差为 $(\sqrt{6}/\sqrt{2})\ \sigma_0$。

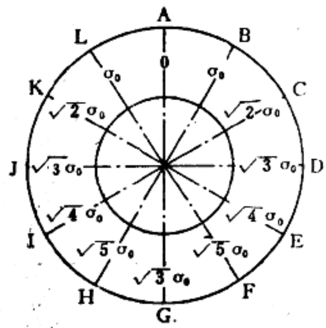

图 23

对例 3，S=1 格，n=12，故

$$\sigma_0 = 1/\sqrt{12} = 0.29\ 格 = 0.29 \times 6$$

$$= 1.74\mu m$$

按图 18 所示极值点位置，可得以下函数式：

$$f = \left(\left(h_A \times \frac{OE}{AE} + h_E \times \frac{OA}{AE}\right) - \left(h_B \times \frac{OI}{BI} + h_I \times \frac{OB}{BI}\right)\right.$$

$$= \left(h_A \times \frac{3}{4} + h_E \times \frac{1}{4}\right) - \left(h_B \times \frac{4}{5} + h_I \times \frac{1}{5}\right)$$

按误差传播定律，可得：

$$\sigma_f = \left[(3/4)^2 \sigma_A^2 + (1/4)^2 \sigma^2_E + (4/5)^2 \sigma_B^2 + 1/5)^2 \sigma^2_I\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 1.03\sigma_o = 1.03 \times 1.74$$

$$= 1.8\mu m$$

$$\sigma_{flim} = \pm 3\sigma_f = \pm 3 \times 1.8 = \pm 5.4\mu m$$