

照射型莫尔轮廓法中原理性误差的校正

袁玉麟 张勇军*
(浙江大学光仪系)

提 要

提出在照射型莫尔轮廓法中存在着原理性误差, 导出校正此类误差的计算公式。用实验拍摄锥形试件的莫尔轮廓, 经过对照片的判读和计算, 证实了所提供公式的正确性。

关键词: 莫尔轮廓, 原理性误差。

一、前 言

莫尔轮廓法在一些领域已获得应用, 如在人体脊柱侧弯症的检查方面, 它已成了一些国家的体验手段^[1]。但是, 莫尔轮廓法作为新的非接触的三维测量技术, 应用面还不是很大, 主要是受到灵敏度不够高的限制, 为此著者曾撰写专文, 论述其灵敏度极限^[2], 提高灵敏度的途径^[3], 应用曲面光栅^[4]等。结果表明, 提高此测量技术的灵敏度, 使之满足更高的检测精度的要求, 除了需考虑常规的测量误差外, 还需考虑由莫尔轮廓条纹照片再现成实物轮廓时的精度。

在放大成实物大小的照片上, 应用照射型莫尔轮廓法的常规公式计算出对应条纹的高差, 用这些条纹和它的高差所描绘出来的空间轮廓, 实际上总存在误差。本文用实验及理论来阐明, 从照射型莫尔轮廓条纹照片再现实物轮廓时, 产生原理性误差的原因及校正方法。

二、问题的提出

在照射型莫尔等高法中**, 试件表面第 N 级条纹及基准光栅间的垂直距离为

$$h_N = \frac{LNP}{D - NP}, \quad (1)$$

式中 P 是栅距, L 是光栅和镜头主面间的距离, D 是镜头光轴与灯源间的距离。镜头主点和光源间的连线与光栅平面平行而且与栅线垂直交叉(如图 1 所示)。按通常的概念, 以图 1 方式摄得的莫尔轮廓条纹照片, 上面任何一根莫尔条纹都应该是试件轮廓的等高线。实验以 $P=0.507 \text{ mm}$, $D=235 \text{ mm}$, $L=507 \text{ mm}$, 用 $f=45 \text{ mm}$ 的物镜拍摄一只锥形试件。锥形试件的总高差是 30.7 mm , 直径 $\phi=108 \text{ mm}$ 。试件处于图 1 中的位置 I 时摄得的莫尔轮廓条纹如图 2(a) 所示。图中垂直方向一根粗直线是光栅平面上与栅线平行的一根指标线。

收稿日期: 1986年2月6日; 收到修改稿日期: 1986年5月13日

* 1985年光仪系毕业生。

** 为了简化实验及计算过程, 在本文中统一采用莫尔等高法的配置方式。

在光源照射下,它在试件上的阴影成了两根斜线,由此可知照片的右边是离光源一侧,左边是近光源一侧。

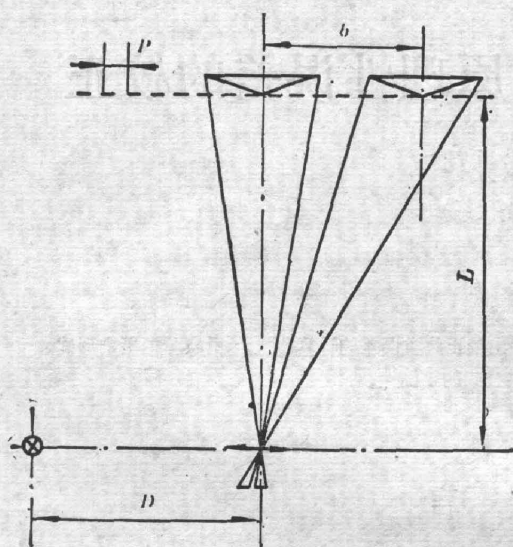


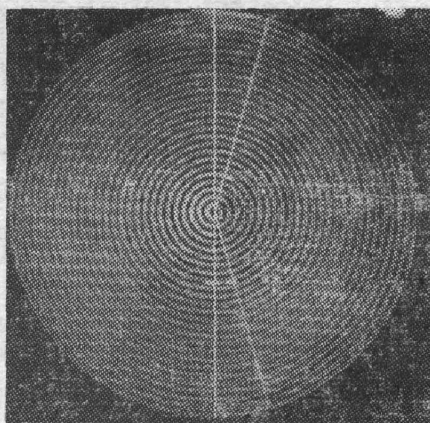
Fig. 1 Special configuration of the Moiré contour

底片上试件轮廓的直径是 $\phi=9.9\text{mm}$, 所以其放大倍率 $\beta_0=108/9.9=10.91$, 读出每一级次条纹在底片上的半径值, 乘上统一的放大倍率 β_0 , 即得到每根条纹在实际试件上的半径位置。按 (1) 式算出每一级次条纹的高差值, 绘出的断面轮廓线总是呈鼓形, 如图 2(b) 中的虚线所示。

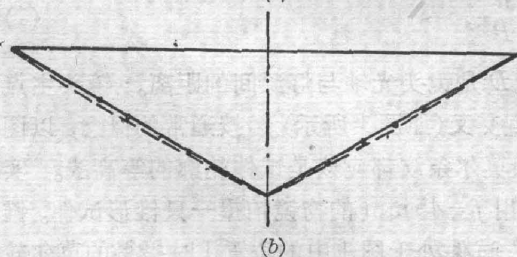
把同一只锥形试件安置于图 1 中的位置 II, 让锥形试件偏离摄影镜头光轴 $b=100\text{mm}$, 拍摄到的莫尔轮廓条纹如图 3(a) 所示。

按莫尔等高法原理, 只要装置尺寸参数 (P 、 D 、 L) 不变, 无论试件放于何处, 得到的总是等高条纹照片, 但是图 3(a) 和图 2(a) 的

条纹形状显然已有较大的差别。按常规的计算法再现实物轮廓时, 得到如图 3(b) 中虚线所



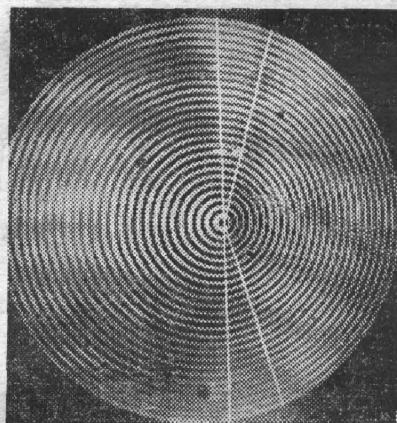
(a)



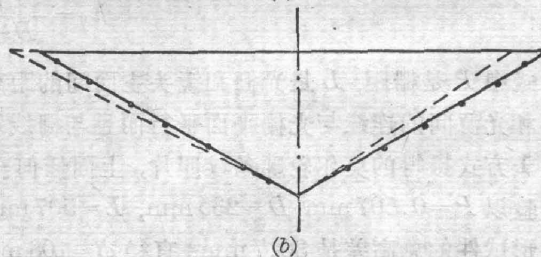
(b)

Fig. 2 Result obtained with optical axis of camera lens through the apex the conic surface

(a) Photograph of the Moiré contour; (b) Outline of the cross section determined from the photograph



(a)



(b)

Fig. 3 Result obtained with optical axis of camera lens deviated from the apex of the conic surface

(a) Photograph of the Moiré contour; (b) Outline of the cross section determined from the photograph

示的断面形状,它与实际轮廓形状相差更大。显然这种常规的底片判读、计算和再现实物轮廓的方法,在原理上就有一定的缺陷,必须给以适当的修正。

三、误差的校正

根据照射型莫尔轮廓法的原理,试件前面的基准光栅经光源照射后,在试件轮廓表面形成光栅的阴影。这个光栅阴影实际上已被试件轮廓所调制而成了“变形光栅”。图1中从E点观察到的莫尔轮廓条纹,实际上是透射的基准光栅和“变形光栅”之间重叠的结果。所以说,形成莫尔轮廓条纹的前提,是试件轮廓表面上有清晰可辨的“变形光栅”线条。

图4是拍摄斜面的莫尔轮廓条纹的装置图。Ox轴垂直光栅平面上的栅线,Oy轴垂直纸面并和光栅栅线平行。在xOy平面上的基准光栅后面放置两块与纸面相垂直的斜面,在观察点E上就可以看到一系列平行的莫尔轮廓条纹。

在斜面和基准光栅相接触的点a处形成零级条纹,它和摄影镜头光轴间的距离为b。把摄影镜头光轴到零级条纹点a的方向定为x轴的正向。斜面经E点的镜头成像于Q平面上。它的最高点a₁、最低点c₁及第N₁级条纹的位置n₁在象平面上分别为a'、c'₁和n'₁。n₁点的高差h_{N₁}及c₁点处的最大高差h_{M₁},如图4所示。把试件上n₁和c₁点与顶点a之间在x轴方向的距离设为X_{N₁}和X_{M₁}。它在象平面上所对应的尺寸就是x_{N₁}和x_{M₁}。由图上的几何关系可得

$$X_{N_1} = \frac{(b' + x_{N_1})(L + h_{N_1})}{(b' + x_{M_1})(L + h_{M_1})} (b + X_{M_1}) - b, \quad (2)$$

$$b' = \frac{b(L + h_{M_1})x_{M_1}}{(Lx_{M_1} - bh_{M_1})}, \quad (3)$$

(2)式即是由莫尔轮廓条纹照片判读成实物时,在右侧表面上的修正计算式。

对于图4中a点左侧的斜面,它也有最大宽度X_{M₂}及对应的最大深度h_{M₂},设斜面上任一点n₂的高差为h_{N₂},可得

$$X_{N_2} = b - \frac{(b' - x_{N_2})(L + h_{N_2})}{(b' - x_{M_2})(L + h_{M_2})} (b - X_{M_2}), \quad (4)$$

$$b' = \frac{b(L + h_{M_2})}{(bh_{M_2} + LX_{M_2})} x_{M_2}, \quad (5)$$

(4)式即是由莫尔轮廓条纹照片判读成实物时,在轮廓近镜头一侧表面上的修正计算式。

若将(4)式两边及(5)式分子与分母各乘上数值“-1”,则(4)、(5)式化为

$$(-X_{N_2}) = \frac{[b' + (-x_{N_2})][L + h_{N_2}]}{[b' + (-x_{M_2})][L + h_{M_2}]} [b + (-X_{M_2})] - b, \quad (6)$$

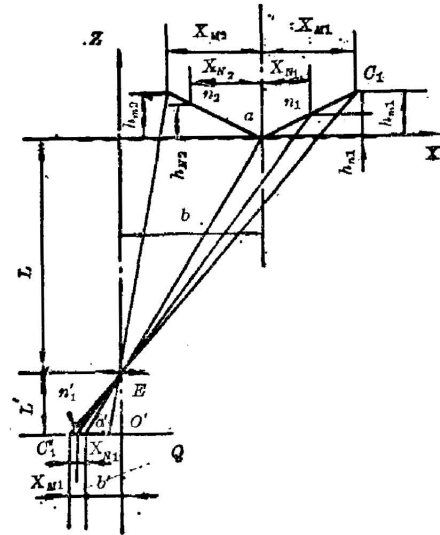


Fig. 4 Moiré topograph of the inclined plane

$$b' = \frac{b(L+h_M)}{[L \cdot (-X_M) - bh_M]} \cdot (-x_M) \quad (7)$$

将这种形式的近镜头一侧的修正计算公式(6)、(7),与离镜头一侧的修正计算公式(2)、(3)式相比较,两者形式基本相同。为此可以把修正计算式统一成

$$X_N = \frac{(b+x_N)(L+h_N)}{(b'+x_M)(L+h_M)}(b+X_M) - b, \quad (8)$$

$$b' = \frac{b(L+h_M)x_M}{(LX_M - bh_M)} \quad (9)$$

在应用公式(8)及(9)时,应作如下的符号规定:对于如图1中试件II的离镜头一侧作修正计算时,即当零级条纹指向任意级次条纹的方向若与 b 同向,则判读值 x_N 、 x_M 和测量值 X_M 应以正值代入公式(8)及(9),得到修正计算值 X_N 。对于试件II的近镜头一侧作修正计算时,判读值 x_N 、 x_M 及测量值 X_M 应分别以负值代入公式(8)、(9)进行计算,得到的 X_N 也是负值。

当试件的零级条纹处于镜头光轴上,即如图1中拍摄试件I的莫尔等高图时, $b=0$, $b'=-0$, (8)式可简化为

$$X_N = \frac{(L+h_N)X_M}{(L+h_M)x_M} \cdot x_N \quad (10)$$

四、实验结果

实验以等高配置方式,对外径 $\phi=108\text{ mm}$,总高差 $h_M=30.7\text{ mm}$ 的圆锥形试样,以光轴通过锥顶及偏离锥顶两种形式,拍摄试件的莫尔轮廓图,并验证修正计算的公式。

1. 物镜光轴通过试件锥顶

以图1形式拍摄试件I得到的莫尔轮廓图如图2(a)所示。所用光栅的栅距 $P=0.507\text{ mm}$,镜头主点和光栅平面间的距离 $L=507\text{ mm}$,镜头主点和光源之间的距离 $D=235\text{ mm}$ 。以照片水平面的近光源一侧为准,即在图2(a)照片的左侧,在工场显微镜上读出底片上各级次条纹的半径值 x_N ,如表1所示。底片上边缘的半径值(最大轮廓半径) $x_M=4.95\text{ mm}$,实物的外周半径 $X_M=54\text{ mm}$ 。当把底片放大成实物大小时,各级条纹的半径值 x_N 都应乘上同一个放大倍率 $\beta_0=54/4.95=10.91$,由此得未经修正时的各级条纹的半径值 X'_N 。

实际上每一级次条纹上的高差由(1)式可算出。根据半径为 54 mm 而总高差 $h_M=30.7\text{ mm}$ 的斜度,在每一个 h_N 位置上,可以求出对应的实际半径值 $X_N=h_N(54/30.7)$ 。 $\Delta X_1=X'_N-X_N$ 即为未经修正时的底片条纹判读半径和实际半径之间的偏差。

以 P 、 L 、 D 、 x_M 、 h_M 、 X_M 和对应级次的底片判读值 x_N 代入(10)式,得到修正计算后各级次条纹的半径值 X''_N 。 $\Delta X_2=X''_N-X_N$ 即为采用公式(10)作修正计算后尚剩的误差。

底片的判读和计算结果见表1。在用显微镜判读时,底片上的光栅线条清晰可见。为了取得整数的条纹级次,底片上必须判读“黑”条纹的位置,所以对准精度尚不够高,但从总的趋势来看,已能见到修正计算的效果。

Table 1 Corrective effect with optical axis of lens through the apex of the conic surface

 $P=0.507\text{ mm}$, $L=507\text{ mm}$, $D=235\text{ mm}$, $x_M=4.95\text{ mm}$, $h_M=30.7\text{ mm}$, $X_M=54\text{ mm}$

N	x_N	h_N	X_N	X'_N	$\Delta X_1 = X'_N - X_N$	X''_N	$\Delta X_2 = X''_N - X_N$
1	0.175	1.096	1.928	1.909	-0.019	1.804	-0.124
2	0.365	2.197	3.865	3.982	0.117	3.770	-0.094
3	0.552	3.303	5.810	6.022	0.212	5.715	-0.095
4	0.732	4.413	7.763	7.985	0.222	7.595	-0.168
5	0.930	5.529	9.725	10.145	0.421	9.671	-0.054
6	1.113	6.649	11.695	12.141	0.446	11.598	-0.096
7	1.294	7.774	13.674	14.116	0.442	13.514	-0.160
8	1.481	8.904	15.662	16.156	0.494	15.502	-0.161
9	1.669	10.039	17.659	18.207	0.548	17.508	-0.151
10	1.862	11.179	19.664	20.313	0.649	19.575	-0.089
11	2.040	12.325	21.678	22.255	0.576	21.494	-0.184
12	2.225	13.475	23.702	24.273	0.571	23.495	-0.206
13	2.415	14.630	25.734	26.345	0.612	25.558	-0.176
14	2.597	15.791	27.775	28.331	0.556	27.545	-0.229
15	2.796	16.956	29.825	30.502	0.677	29.722	-0.103
16	2.969	18.127	31.885	32.389	0.505	31.632	-0.253
17	3.156	19.303	33.953	34.429	0.476	33.699	-0.250
18	3.332	20.484	36.031	36.349	0.318	35.658	-0.370
19	3.548	21.671	38.118	38.703	0.587	38.055	-0.063
20	3.760	22.863	40.215	41.018	0.803	40.420	0.205
21	3.950	24.060	42.321	43.102	0.790	42.570	0.248
22	4.140	25.263	44.437	45.164	0.727	44.707	0.270
23	4.300	26.472	46.562	46.909	0.347	46.540	-0.022
24	4.489	27.685	48.697	48.971	0.274	48.676	-0.001
25	4.689	28.905	50.842	51.153	0.311	50.982	0.140
26	4.890	30.130	52.997	53.345	0.349	53.289	0.292

2. 物镜光轴偏离试件锥顶

用图 1 方式拍摄位置 II 上的锥形试件, 即偏置距离 $b=100\text{ mm}$ 时摄得的莫尔轮廓条纹照片如图 3(a) 所示。所用光栅栅距 $P=0.507\text{ mm}$, 镜头主点和灯源之间的距离 $D=235\text{ mm}$, 与光栅平面间的距离 $L=507\text{ mm}$ 。

从照片上可明显看到, 试件的左侧(近镜头一侧)和右侧(离镜头一侧)之间的尺寸相差

Table 2 Corrective effect with optical axis of lens deviated from the apex of the conic surface
 $b=100\text{ mm}$, $P=0.507\text{ mm}$, $L=507\text{ mm}$, $D=235\text{ mm}$, $h_M=30.7\text{ mm}$,
 $X_M=54\text{ mm}$, $x_M(\text{left})=-5.48\text{ mm}$, $x_M(\text{right})=4.29\text{ mm}$

N	near lens (left side)				off lens (right side)			
	x_N	X_N	ΔX_1	ΔX_2	x_N	X_N	ΔX_1	ΔX_2
1	-0.191	-1.928	0.183	0.166	0.150	1.928	-0.270	-0.128
2	-0.395	-3.865	0.501	0.199	0.308	3.865	-0.449	-0.172
3	-0.605	-5.809	0.882	0.169	0.495	5.809	-0.338	0.092
4	-0.801	-7.763	1.091	0.294	0.654	7.763	-0.534	0.059
5	-1.009	-9.725	1.429	0.275	0.806	9.725	-0.815	-0.048
6	-1.243	-11.695	2.045	-0.005	0.990	11.695	-0.751	0.185
7	-1.440	-13.675	2.243	0.100	1.145	13.675	-1.017	0.110
8	-1.644	-15.622	2.511	0.132	1.298	15.662	-1.314	0.012
9	-1.853	-17.659	2.825	0.112	1.482	17.659	-1.277	0.248
10	-2.049	-19.664	2.986	0.229	1.642	19.664	-1.513	0.226
11	-2.260	-21.678	3.302	0.188	1.788	21.678	-1.913	0.052
12	-2.474	-23.702	3.646	0.115	1.932	23.702	-2.345	-0.144
13	-2.679	-25.733	3.865	0.148	2.116	25.734	-2.343	0.093
14	-2.876	-27.775	4.017	0.245	2.272	27.775	-2.660	0.027
15	-3.080	-29.825	4.222	0.279	2.432	29.825	-2.941	0.004
16	-3.312	-31.885	4.727	0.012	2.602	31.884	-3.122	0.091
17	-3.502	-33.953	4.759	0.196	2.768	33.953	-3.355	0.133
18	-3.712	-36.031	5.002	0.165	2.915	36.091	-3.808	-0.032
19	-3.967	-38.118	5.734	-0.352	3.101	38.118	-3.839	0.231
20	-4.194	-40.215	6.147	-0.567	3.257	40.215	-4.211	0.164
21	-4.368	-42.321	5.964	-0.211	3.406	42.321	-4.670	0.020
22	-4.588	-44.437	6.280	-0.351	3.591	44.437	-4.741	0.273
23	-4.799	-46.562	7.372	-0.395	3.748	46.562	-5.120	0.217
24	-4.990	-48.697	6.464	-0.221	3.888	48.697	-5.718	-0.028
25	-5.200	-50.842	6.640	-0.253	4.096	50.842	-5.674	0.371
26	-5.380	-52.997	6.476	0.043	4.230	52.997	-6.237	0.170

较多,如不经修正计算,两侧极不对称。

在底片上读得试件直径 $\alpha_M=9.77\text{ mm}$, 实际试件直径 $X_M=108\text{ mm}$, 得 $\beta_0=11.054$ 。如不经修正计算,只需把底片上各级次条纹的 x_N 乘上 β_0 , 即可获得 x 方向左侧及右侧的判读尺寸 X'_N 。与前述相同,根据锥形试件通过顶点的截面是等腰三角形的特点,由每一级次

条纹的 h_N 值, 可以计算出对应级次的实际半径值 X_N 。 $\Delta X_1 = X'_N - X_N$ 即是未经修正时, 莫尔轮廓图的判读值与实际值之间的偏差, 如表 2 所示。

作修正计算时, 需要把底片上 x 方向两侧的条纹分开来计算。在试件的近镜头一侧, 判读得中心到边缘的最大半径值为 $x_M = -5.48$ mm, 工件的最大半径为 $X_M = -54$ mm, 每一级次的条纹判读值 x_N 以负值代入公式 (8)、(9), 计算得近镜头一侧的修正计算值 X''_N 。

在试件的离镜头一侧, 判读得最大半径值 $x_M = 4.29$ mm, 每一级次条纹的判读值 x_M 以正值代入 (8)、(9) 式, 计算得离镜头一侧的修正计算值 X''_N 。 $\Delta X_2 = X''_N - X_N$ 即是经修正计算后, 莫尔轮廓图的判读值和实际值之间的偏差。

修正计算后的 X''_N 和实际值 X_N 间的偏差 ΔX_2 ; 未经修正计算的判读结果 X'_N 和实际值 X_N 间的偏差 ΔX_1 , 以左、右两侧分别列于表 2。

3. 试件偏置时的全场修正

用莫尔轮廓法测量三维形状, 应能从莫尔轮廓条纹照片精确地再现出原有形状。实际上, 对于已摄得的锥形试件偏置时的莫尔轮廓图, 在任何方向上的半径值都可用前述原理进行修正计算。

我们以图 3(a) 底片上的第 10.5 条莫尔条纹为准, 迴转地判读一周, 读出此条纹上各点所对应的 x_i 和 y_i 值。 x_i 以近镜头一侧为负, 离镜头一侧为正; x_M 分别以 -5.48 mm 和 4.29 mm; X_M 分别以 -54 mm 和 54 mm; 侧置值以 $b = 100$ mm 等代入公式 (8)、(9), 计算得各点 x 坐标的修正计算值。对应各点在 y 轴方向的坐标值 y_i 以向上为正, 向下为负, y_M 统一为 4.98 mm。由于镜头仅在水平方向偏置, 就 y 方向而言, 锥顶和镜头光轴的 y 轴坐标值都为零, 所以在对 y_i 作修正计算时, 应以 $b = 0$ 代入公式 (8)、(9)。

修正计算结果(点)和未经修正计算的结果(叉)如图 5 所示。锥形试件上第 10.5 条莫尔条纹的高差 $h_{10.5} = 11.75$ mm, 由锥形试件总高差 $h_M = 30.7$ mm 和最大直径 $X_M = 108$ mm, 计算得第 10.5 条条纹的圆周形等高线见图 5 中的细实线。

从图 5 中看出, 未经修正计算的判读结果, 其轮廓线已明显地不呈圆形, 显然已不能真实地反映出圆锥形试件的实际等高轮廓。作了修正计算后, 判读值的计算结果已在实际圆周线的内外波动, 能真实地反映出实际轮廓。

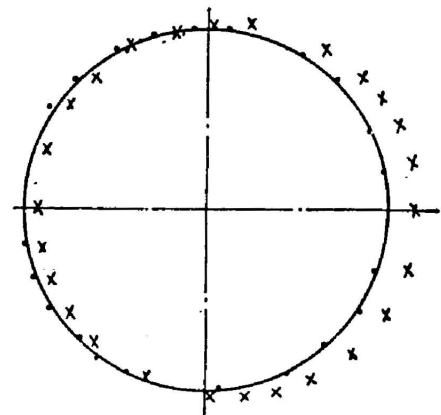


Fig. 5 Result of full-field corrective reckoning when the cone is deviated
— cone contour x x ordinary reckoning
· · corrective reckoning

五、结 果

莫尔轮廓法是一种新的三维测量技术, 进一步提高其灵敏度有可能使它获得更多的应用。在大多数情况下, 被测试件的最高点不会通过摄影物镜的光轴, 这时原理性误差反映得尤为明显, 即使采用莫尔等高法拍摄到莫尔轮廓条纹照片, 实际上它仍能不是通常概念中的

等高图,即不是正投影的等高线图案。

采用本文提供的公式(8)和(9),可以使莫尔轮廓法中的原理性误差获得相当程度的校正。当物距 L 较小而试件总高差 h_M 又较大时,由于各级次条纹间放大倍率的差异较大,修正计算往往已不可忽略。

参 考 文 献

- [1] M. S. Moreland *et al.*; «Moiré fringe topography and spinal deformity: Proceedings of an international symposium», (Pergamon press New York, 1981), 18, 92, 122.
- [2] 袁玉麟等;《仪器仪表学报》,1984, 5, No. 3 (Aug), 295。
- [3] 袁玉麟等;《浙江大学学报》, 1985, 19, No. 5 (Oct), 52。
- [4] 袁玉麟等,《光学学报》, 1985, 5, No. 12 (Dec), 1090~1096。

Rectification of principle errors in shadow Moiré topography

YUAN YULIN AND ZHANG YANGYUN

(Department of Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 6 February 1986; revised 13 May 1986).

Abstract

It is proposed that there exists principle errors in the shadow Moiré topography. The mathematical expression is derived in order to correct such errors. Moiré contour photographs are presented. Corrective reckoning of photographs indicates that these formulas are valid.

Key Words: Moiré topography; principle error.