

用照射型动态莫尔轮廓法 测量机翼模型的颤振

吴敏达 倪树槐
(浙江大学光学仪器系)

提 要

本文提出了用照射型动态莫尔轮廓法来测量机翼模型的颤振。和用加速度传感器的电测法比较,本方法的优点是:在测量过程中不需要逐点配重,简单方便,并能获得机翼模型的翼面全貌振动信息量;同时还将其记录在电影胶片上,供事后观察分析。

文章中首先用计算光强度和光栅的傅氏级数展开,推导出在任意配置情况下得到的照射型莫尔轮廓图形的光强度分布函数和轮廓线深度计算公式;同时对公式作了误差分析并得出:为了达到精度要求,光栅周期误差 δp 要求小于 0.02 mm

文章接着叙述了测试原理,装置尺寸及测量结果。我们用任意配置情况的照射型莫尔轮廓法,以 ZL1 型反射镜补偿式高速摄影机作轮廓图形的记录装置。对机翼模型的一级和二级振动作了实测,并进行了数据分析。求出翼面上 15 个座标点的振幅比,画出“位置-振幅”和“时间-振幅”曲线。为了得到这种方法的精度,文章中还将本方法的测试结果和使用加速度传感器的电测法所得的结果进行比较,两者非常接近;机翼模型的展向中线,在一级振动时,振幅偏差小于 $\pm 0.03 \text{ mm}$,弦向中线在二级振动时,振幅偏差小于 $\pm 0.065 \text{ mm}$ 。

测试结果表明,这种方法是可行的,精度可满足使用要求。

一、前 言

在空气动力学测试技术中,为了研究机翼模型的颤振情况,必须进行一级、二级或更高级振动的测试。通常都是采用加速度传感器对它的型面进行有限点的逐点测量。由于这种电测法是属于接触式测量,需要逐点配重,因此测试过程繁琐复杂,化时多;而且得不到机翼模型的全貌振动信息量。为了克服上述缺点,我们提出用非接触式的照射型莫尔轮廓法与高速摄影相结合的方法对机翼模型的颤振进行测量;这样,既不需要配重,使测试过程简单方便,又能获得面型的全貌振动信息量;并将整个振动过程记录在电影胶片上,便于保存和重现,以供事后观察分析。

二、计算公式和误差分析

高崎宏教授等曾用几何光学方法导出了当光源和观察点在同一平面内,而此平面又平行于光栅平面的特殊配置情况下的照射型莫尔等高线的深度计算公式^[1, 2]。当使用高速摄

影机作记录手段时, 往往受到光源强度的限制而不能实现这样的配置。为了提高对被测物

体的照度, 光源必须尽量靠近物体, 而高速摄影机由于受到物距, 视场和像的大小等条件的限制又不能很靠近物体, 因此只能采用任意配置情况的方式^[8]。这时被记录的莫尔条纹不是等高线而是莫尔轮廓线, 即同一条纹上各点离开光栅平面的距离 h_N 随点的位置而不同, 如图 1 所示。

设光栅的透射函数为:

$$T(y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} g\left(\frac{2\pi}{P} y\right), \quad (1)$$

式中: g ——振幅在 $+1$ 和 -1 之间的任意周期函数;

P ——光栅周期。

物体上点 $a(0, y, l+h_N)$ 的光强度为:

$$I_a = \frac{I_0}{2} \cos \alpha \left[1 + g\left(\frac{2\pi}{P'} y\right) \right], \quad (2)$$

式中: I_0 ——光源的光强;

$\cos \alpha$ ——光源照射的方向因子;

P' ——物体上光强度变化的周期; 即:

$$P' = \frac{(h_N + l)}{l} \cdot P. \quad (3)$$

光栅上点 $b(0, y_b, l)$ 的透射率为:

$$T_b(y) = \frac{1}{2} \left[1 + g\left(\frac{2\pi}{P'} y_b\right) \right], \quad (4)$$

式中:

$$y_b = \frac{h_N d - h_N \Delta l \operatorname{tg} \theta + l y}{h_N + l}, \quad (5)$$

式中: θ ——观察角; 即为观察方向和过 E 点的 Z 轴平行线 Z' 的夹角在 ZOY 平面上的投影; 其符号规定为: 从观察线转向 Z' , 逆时针为负, 反之为正。 Δl 的符号和坐标值 Z 一致。

显然我们观察到的光强度为 I_a 和透射率 $T_b(y)$ 的乘积。即:

$$I = I_a \cdot T_b(y) = \frac{I_0}{4} \cos \alpha \left\{ 1 + g\left[\frac{2\pi l y}{P(h_N + l)}\right] \right\} \cdot \left\{ 1 + g\left[\frac{2\pi(h_N d - h_N \Delta l \operatorname{tg} \theta + l y)}{P(h_N + l)}\right] \right\}. \quad (6)$$

其光干涉项为:

$$I' = \frac{I_0}{4} \cos \alpha \cdot g\left[\frac{2\pi l y}{P(h_N + l)}\right] \cdot g\left[\frac{2\pi(h_N d - h_N \Delta l \operatorname{tg} \theta + l y)}{P(h_N + l)}\right]. \quad (7)$$

当为黑白等间隔光栅时, 其周期函数为矩形函数:

$$g(y) = \begin{cases} 1 & 0 < y < \frac{P}{2}, \\ -1 & -\frac{1}{2} < y < 0. \end{cases} \quad (8)$$

将其傅氏级数展开:

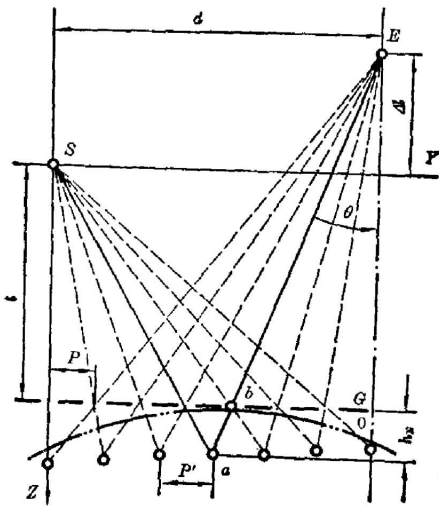


图 1 在任意配置光源和观察点时的照射型莫尔轮廓法原理图

Fig.1 The principle drawing of shadow Moiré topography under any arrangement of light source and view point

$$g(y) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{2\pi(2n-1)y}{P} \right]. \quad (9)$$

将式(9)代入式(7),并取其低频分项即莫尔轮廓项,得莫尔轮廓图形的光强度分布函数为:

$$f(h_N) = \frac{I_0}{4} \left\{ 1 + \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cos \left[\frac{2\pi(2n-1)(dh_N - h_N \Delta l \operatorname{tg} \theta)}{P(h_N + l)} \right] \right\} \cos \varphi. \quad (10)$$

取基频项,即令 $n=1$,则在亮条纹时:

$$2\pi N = \frac{2\pi}{P} \left(\frac{h_N d - h_N \Delta l \operatorname{tg} \theta}{h_N + l} \right) \quad (N=0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

最后可得:

$$h_N = \frac{NP l}{d - NP - \Delta l \operatorname{tg} \theta}. \quad (10')$$

式(10')是在任意配置光源和观察点时的照射型莫尔轮廓法的条纹深度计算公式。

下面对公式(10')作一误差分析。将式(10)作一阶微商得:

$$\delta h_N = \frac{N(d - NP - \Delta l \operatorname{tg} \theta)(\delta P + P \delta l) - NPl(\delta d - N \delta P - \operatorname{tg} \theta \delta \Delta l - \Delta l \sec^2 \theta \delta \theta)}{(d - NP - \Delta l \operatorname{tg} \theta)^2}. \quad (11)$$

由于在现场测试中,通常取 $d \gg NP$, $\operatorname{tg} \theta \ll 1$, $\sec \theta \approx 1$, $d \approx l \approx \Delta l$, $P \approx 1$;则式(11)可简化为:

$$\delta h_N = N \left[\delta P - \delta \theta + \frac{1}{d} (\delta l - \delta d) \right],$$

故 h_N 的均方根误差为:

$$\overline{\delta h_N} = \sqrt{(\delta P)^2 + (\delta \theta)^2 + \frac{1}{d^2} [(\delta l)^2 + (\delta d)^2]}. \quad (12)$$

例如: $d=1000$ mm, $\delta P=0.02$ mm, $\delta l=\delta d=5$ mm, $\delta y=0.1$ mm,

$$\delta \theta = \frac{1}{l + \Delta l} \sqrt{2(\delta y)^2 + [\delta(l + \Delta l)]^2} = 0.005.$$

则由(12)式得: $\overline{\delta h_N} = \sqrt{0.02^2 + 0.005^2 + \frac{2 \times 5^2}{1000^2}} \approx 0.02$ mm。

从上面的例子可知:光栅周期误差对 δh_N 的影响最大;在实际应用中,应该严格控制光栅周期误差 δP 的数值。

三、测试装置

为了避免重复的测试工作,我们只测试了机翼模型的一级和二级振动。

图2是测试装置的原理图。其中1为记录用的ZL1型反射镜补偿高速摄影机^[4]。在测量一级振动时选用250f/s的拍摄频率,二级振动时选用750f/s,画幅尺寸为18×24mm,光圈为2。使用35-航微1型胶片,其反差系数 $\gamma=2$ 。2为光源,选用2000W线状碘钨灯,其灯丝方向平行于光栅刻线。同时为了改善线度,不用灯的反光罩,而在灯的后面装上表面粗糙的黑色遮光罩。3为黑白等间隔的光栅, $P=0.47$ mm,光栅面积为250×300mm²。4为表面刷有氧化镁的机翼模型,其表面按展向和弦向划分15个位置点,这些点如图3所示,它们的坐标值列于表1中。高速摄影机的视轴对准第8点。机翼模型的左端固定在振动台的基座上(图3中未画出),另一端悬臂。5为激振器,处在机翼模型的下方来激振模型。为了

测量机翼模型处于较纯的模式下的振动，将固定在第 5 点下方的加速度传感器 6 引出的信号和直接由激振器 5 引出的信号组成相互垂直的两个信号输入示波器，在示波器的荧光屏上观察利萨如圆 (Lissajour's circle) 来判别振动模式的纯度。

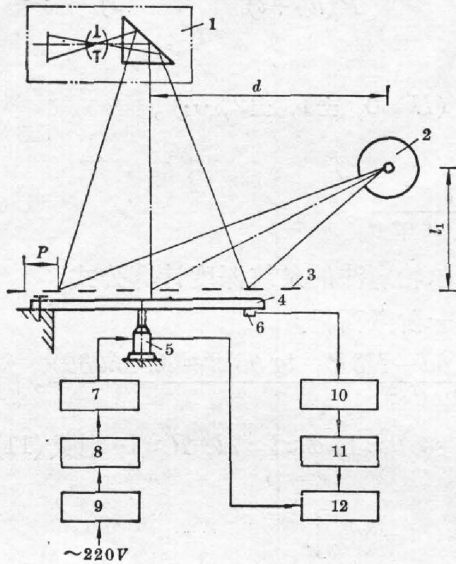


图 2 测试装置原理图

Fig. 2 The principle drawing of experimental arrangement.

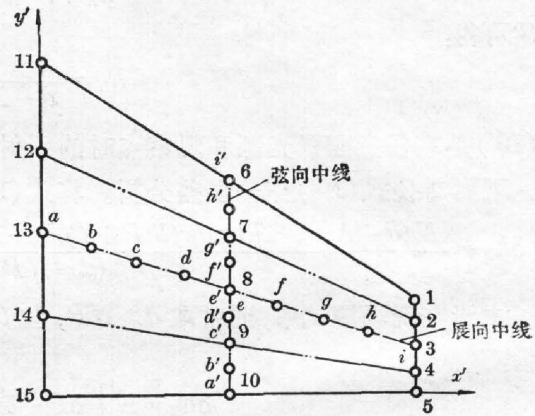


图 3 机翼模型各坐标点的位置

Fig. 3 The positions of each coordinate points on the plane model

在测试中，所采用的配置尺寸为： $l_1 = 430 \text{ mm}$ ； $d = 680 \text{ mm}$ ； $l_2 = 1150 \text{ mm}$ （光栅到摄影机物镜孔径光阑的距离。）

为了进行比较，我们还将这 15 个点的振幅用电测法进行测量，并求出各点的振幅比 A/A_{\max} ，分别列于各级振动状态的数据表中。

四、测试 结 果

图 4 为机翼模型在静态时所拍摄的莫尔轮廓图照片。为了求出振动时模型上 15 个点的振幅值，首先按公式 (10') 计算这 15 个点在静态时的 h_{No} 值，并列于表 (1) 中。

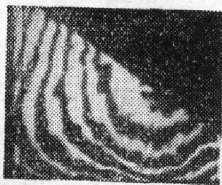


图 4 机翼模型静态时的莫尔轮廓图照片

Fig. 4 The profile photograph of static Moiré topography on the plane model

图 5 是用 ZL1 型高速摄影机拍摄到的机翼模型在二级振动时一个周期内的 10 幅动态莫尔轮廓图照片，相邻两幅照片间的时间间隔为 $1 \sim 2 \text{ ms}$ 。我们从这 10 幅莫尔轮廓图照片中，分别计算出点 5 的振动振幅值，得到点 5 在二级振动时的振幅和时间的关系（列于表 2 中），并画出“时间-振幅”曲线，如图 6 所示。

图 7(a) 和 (b) 是两幅在一级振动时最大振幅位置的莫尔轮廓图照片。我们分别对这两幅莫尔轮廓图照片进行数据处理，得到模型表面 15 个位置的振幅值（列于表

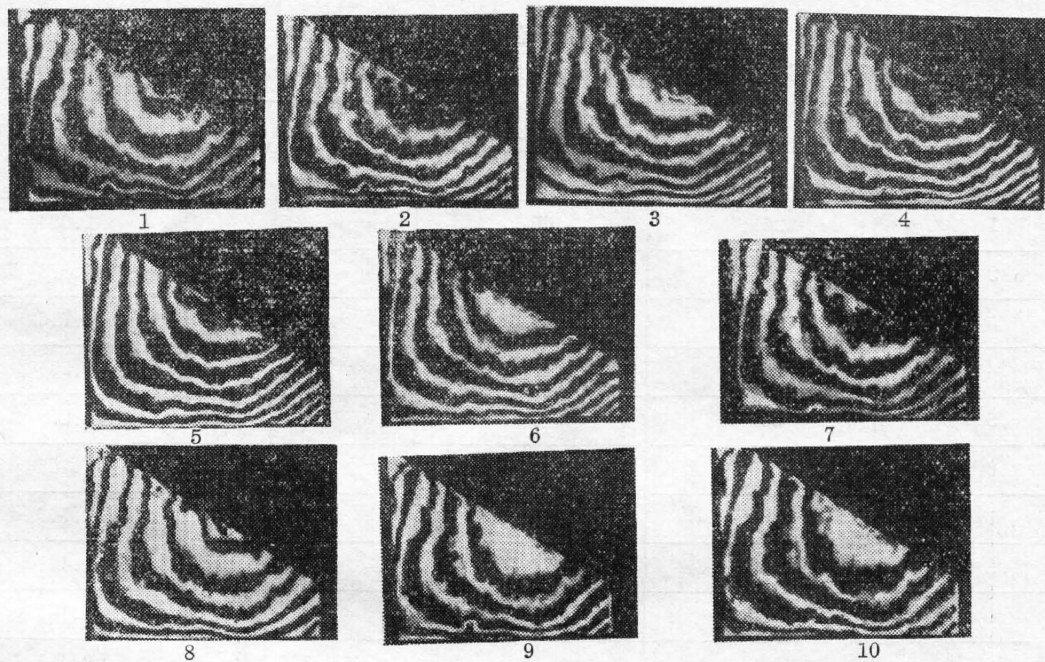
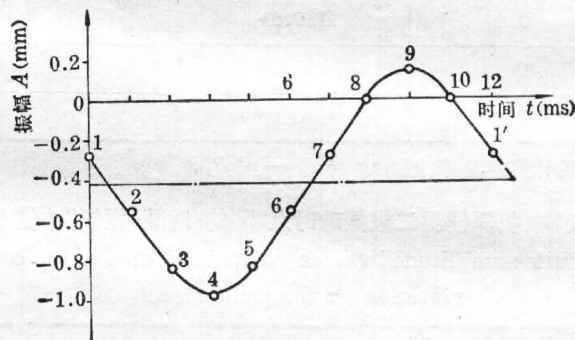


图 5 机翼模型二级振动时一个周期内的 10 幅莫尔轮廓图照片

Fig. 5 The 10 profile photographs of Moiré topography on the plane model during a period of the second order vibration



注: 点 5 的 $\Delta \tan \theta = -46.800$, $h_{ND} = 0.278$.

图 6 点 5 在二级振动时的时间-振幅曲线

Fig. 6 The time-amplitude curve of point 5 during the second order vibration

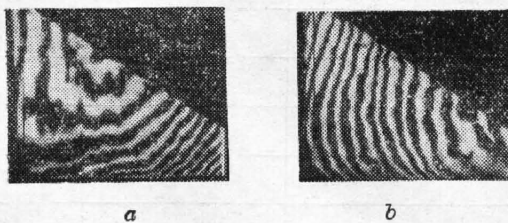


图 7 机翼模型在一级振动时最大振幅位置的莫尔轮廓图照片

Fig. 7 The profile photographs of Moiré topography with maximum amplitude position on the model during the first order vibration

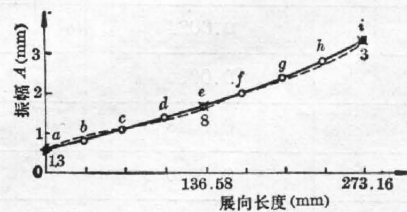


图 8 机翼模型展向中线的一级振动曲线
×—电测法数据; ○—莫尔照相法数据

Fig. 8 The curves along spanwise center-line on plane model during the first order vibration
×—with electric measurement method;
○—with Moiré topography method

表 1 机翼模型在静态时的 h_{N0} 值Table 1 The h_{N0} values at static state on the plane model

点 号	座 标 (mm)		条纹级 N	h_{N0} (mm)
	x'	y'		
1	261	65	3.5	1.034
2	261	48.75	3	0.873
3	261	32.50	2.5	0.716
4	261	16.25	2	0.565
5	261	0	1	0.278
6	180	149.40	5.5	1.763
7	180	112.05	5.5	1.700
8	180	74.70	5	1.491
9	180	37.35	4	1.153
10	180	0	1.5	0.417
11	0	233.21	0	0
12	0	174.91	0	0
13	0	116.61	1	0.309
14	0	58.30	1	0.293
15	0	0	0	0

注: 由于 $h_N \ll l_2$, 在 $\text{tg } \theta$ 的计算中, 将简化为 $\text{tg } \theta \approx (y_N - y_c) / l_2$ 。

表 2 机翼模型二极振动时点“5”的“时间-振幅”数值

Table 2 The “time-amplitude” values of point 5 during the second order vibration on the plane model

照片号 No.	时 间 (s)	条 纹 级	h_N (mm)	振幅 A (mm)
1	0	0	0	-0.278
2	0.0012	-1	-0.278	-0.556
3	0.0024	-2	-0.559	-0.837
4	0.0036	-2.5	-0.696	-0.975
5	0.0048	-2	-0.559	-0.837
6	0.0060	-1	-0.278	-0.556
7	0.0072	0	0	-0.278
8	0.0084	1	-278	0
9	0.0096	1.5	0.418	+0.140
10	0.0108	1	-278	0

注: 点 5 的 $\Delta \text{tg } \theta = -46.800$, $h_{N0} = 0.278$ 。

表 3 机翼模型的一级振动状态

Table 3 The state of first order vibration on the plane model

点号 Point No.	莫尔轮廓照片(a)的数据				莫尔轮廓图照片(b)的数据				振幅比的精度比较		
	N	h_N (mm)	振幅 mm	振幅比	N	h_N (mm)	振 幅 (mm)	振幅比	光测平均值	电测值	偏 差
1	16	4.766	3.732	1	-6.3	-1.848	-2.882	0.933	0.967	0.99	+0.023
2	15.5	4.547	3.674	0.985	-7	-2.022	-2.895	0.937	0.959	0.981	+0.022
3	15	4.335	3.618	0.970	-8	-2.277	-2.993	0.969	0.970	0.996	+0.026
4	15	4.273	3.708	0.994	-9	-2.523	-3.088	1	0.997	1	+0.003
5	14	3.929	3.650	0.978	-10	-2.763	-3.041	0.985	0.982	1	+0.018
6	10.8	3.476	1.713	0.459	1.2	0.383	-1.316	0.433	0.446	0.509	+0.063
7	11.2	3.470	1.770	0.474	1	0.308	-1.392	0.451	0.463	0.493	+0.030
8	11	3.294	1.803	0.489	0	0	-1.491	0.483	0.486	0.499	+0.013
9	10.5	3.038	1.885	0.505	-1.5	-0.431	-1.584	0.513	0.509	0.518	+0.009
10	8.5	2.376	1.959	0.525	-4.5	-1.247	-1.665	0.539	0.532	0.543	+0.016
11	1	0.348	0.348	0.093	-1	-0.348	-0.348	0.113	0.103	0.074	-0.029
12	1.8	0.590	0.590	0.153	-1	-0.327	-0.327	0.106	0.132	0.123	-0.004
13	3	0.929	0.620	0.166	-0.5	-0.155	-0.465	0.150	0.158	0.157	-0.001
14	3.5	1.027	0.734	0.197	-0.5	-0.147	-0.440	0.143	0.170	0.153	-0.017
15	2.5	0.696	0.696	0.187	-2	-0.555	-0.555	0.180	0.184	0.190	+0.006

表 4 机翼模型展向中线在一级振动时的振幅值

Table 4 The amplitude values along spanwise center-line during the first order vibration on the plane model

点号 No.	y_N (mm)	照 片 (a)		照 片 (b)		振幅(mm) $A = \frac{h_{Na} - h_{Nb}}{2}$	电测振幅值 (mm)	偏 差 (mm)
		N	h_{Na} (mm)	N	h_{Nb} (mm)			
a	116.610	3	0.929	-0.5	-0.155	0.543	0.563	+0.021
b	106.137	5.4	1.661	0.1	0.031	0.815		
c	95.646	7.2	2.193	0.3	0.091	1.051		
d	85.731	9.3	2.809	0.3	0.089	1.360		
e	74.710	11	3.294	0	0	1.649	1.656	+0.007
f	64.227	12.2	3.622	-1.3	-0.382	2.002		
g	53.754	13.4	3.943	-3	-0.873	2.408		
h	43.281	14	4.082	-5.2	-1.497	2.790		
i	32.500	15	4.335	-8	-2.277	3.306	3.306	0

注: 电测法的振幅值以 i 点为基准, 按表(3)中的电测法的振幅比求得。

3 中), 同时将加速度传感器的电测数值也列于表 3 中。从表 3 可以看出, 这两种不同的测试方法所得的结果很接近, 振幅比的偏差小于 ± 0.06 。我们还将这两幅莫尔轮廓图照片中计算出机翼模型展向中线 $a-i$ 在一级振动时的振幅值列于表 4, 并画出振动状态曲线, 如图 8 所示; 同时在图 8 中也画出电测值的振动状态曲线。将这两条曲线进行比较, 可看出两者也很吻合, 偏差小于 0.021 mm。

图 9 表示机翼模型在二级振动时的最大振幅位置的莫尔轮廓图照片。由这张照片计算得到的二级振动状态数值列于表 5 中。

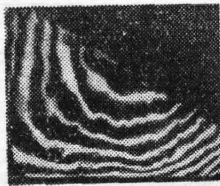


图 9 机翼模型二级振动时最大振幅位置的莫尔轮廓图照片

Fig. 9 The profile photograph of moiré topography with maximum amplitude position on the plane model

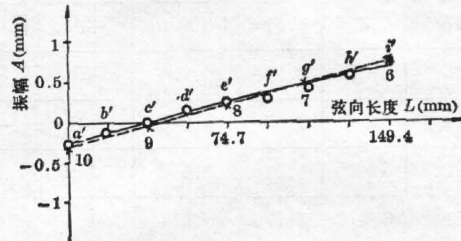


图 10 机翼模型弦向中线的二级振动曲线

—○—轮廓线计算值; —×—电测量值
Fig. 10 The curves along chordwise center-line on plane model during the second order vibration
—○—the calculating value of topography; —×—the electric measuring value

表 5 机翼模型的二级振动状态

Table 5 The state of second order vibration on the plane model

点号 No.	条纹级 N	h_N (mm)	振幅 (mm)	振 幅 比		
				莫尔轮廓法	电 测 法	偏 差
1	2.1	0.620	-0.414	0.425	0.41	-0.015
2	1.2	0.349	-0.524	0.538	0.55	+0.012
3	0	0	-0.716	0.735	0.74	+0.005
4	-1	-0.282	-0.847	0.869	0.88	+0.011
5	-2.5	-0.696	-0.975	1	1	0
6	7.8	2.505	0.742	-0.762	-0.91	+0.148
7	7	2.165	0.466	-0.478	-0.61	+0.132
8	5.8	1.731	0.240	-0.246	-0.25	+0.004
9	4	1.152	-0.001	+0.001	+0.08	+0.079
10	0.5	0.139	-0.278	0.286	0.38	+0.094
11	2	0.697	0.697	-0.716	-0.60	-0.116
12	2.2	0.720	0.720	-0.739	-0.54	-0.199
13	3	0.929	0.620	-0.636	-0.38	-0.256
14	3	0.880	0.587	-0.603	-0.15	-0.453
15	1	0.278	0.278	-0.286	-0.04	-0.246

我们按图 9 所示的莫尔轮廓图照片计算出机翼模型在二级振动时弦向中线 $a'-i'$ 的振幅数值(列于表 6 中);并由表 6 中的数值画出它的二级振动状态曲线,如图 10 所示。同时将相应的电测数值也画成曲线示于图 10 中进行比较,两者也较接近,偏差小于 ± 0.065 mm。

表 6 机翼模型弦向中线在二级振动时的振幅值

Table 6 The amplitude values along chordwise center-line during the second order vibration on the plane model

点号 No.	y'_N (mm)	静 态		振 动		振幅(mm) $A=h_N-h_{N0}$	电测振 幅值(mm)	偏 差 (mm)
		N	h_{N0} (mm)	N	h_N (mm)			
a'	0	1.5	0.417	0.5	0.139	-0.278	-0.310	-0.032
b'	18.675	3	0.850	2.6	0.736	-0.113		
c'	37.350	4	1.153	4	1.152	-0.001	-0.065	-0.064
d'	56.025	4.5	1.319	5	1.466	0.147		
e'	74.700	5	1.491	5.8	1.731	0.240	0.204	-0.036
f'	93.375	5.2	1.576	6.2	1.884	0.308		
g'	112.050	5.5	1.700	7	2.165	0.466	0.498	+0.032
h'	130.725	5.5	1.731	7.4	2.332	0.601		
i'	149.430	5.5	1.763	7.8	2.505	0.742	0.742	0

注: 电测值振幅是以 i' 点为基准,按表 5 中的电测法的振幅比求得。

五、结 论

从以上所介绍的用照射型莫尔轮廓法和高速摄影相结合的方法对机翼模型颤振的一级和二级振动的测试结果证明,这种方法是可行的,其测试精度可满足实用要求。对于三级或更高级的振动,只要合理选用光栅周期 P 和高速摄影机的拍摄频率,上述方法同样也能使用。

最后,空气动力研究中心卢奇正、敖占元、李伟和周绍富同志,以及研究所测振组同志也参加这项测试,作者对他们的大力支持表示感谢。

参 考 文 献

- [1] H. Takasak; *Appl. Opt.*, 1970, 9, No. 6 (Jun), 1467.
- [2] D. M. Meadows et al.; *Appl. Opt.*, 1970, 9, No. 4 (Apr), 942.
- [3] H. Takasak; «*Proceedings of the 13th International Congress on High Speed Photography and Photonics (JSPE, 1979)*», 186.
- [4] А. С. Дубовик; «*Фотографическая регистрация быстротекущих процессов*», (НАУКА) 1975, 238~239.

Measuring the flutter of plane model with dynamic shadow Moiré topography method

WU MINDA AND NI SHUHUAI

(Zhejiang University, Department of Optical Instrument, Hangzhou)

(Received 25 June 1981)

Abstract

This paper presents an optical method for measuring the flutter of plane model with dynamic shadow Moiré topography. There are some advantages of this method in comparison with the electric method by using acceleration sensor, such as getting all information of the measured surface instead of that from only several points, simplified the testing process, and especially the information are recorded on the film for reconstruction.

In this paper, the function of intensity distribution of Moiré topography using the principle of light intensity and Fourier series expansion under any arrangement, and the formulae of the depth of Moiré topography are derived. The errors of the formulae are analysed. In order to satisfy the accuracy requirement, the error of grating pitch must be less than 0.02 mm.

This paper also describes the principles and dimensions of an arrangement device in test, which combined with shadow Moiré topography and ZL1 high-speed camera, was used to measure the first and second order vibrations of plane model. Data analysis of the maximum amplitude of 15 coordinate-points, drawing of the "position-amplitude" curves for first and second order vibrations, as well as "time-amplitude" curves for second order vibration were made. We have compared the results of this method in accuracy with the electric method by using acceleration sensor. The deviation of amplitude is less than ± 0.03 along the spanwise center-line for first order vibration, and less than ± 0.065 mm along the chordwise center-line for second order vibration on the measured surface of plane model.

The results of the experiments show that this optical method can be used for measuring the flutter of plane model, and its accuracy is quite satisfactory.