光学精加工检验原理及方法讨论

陈培仁

（海军第二炮兵学院）

摘要：应用等厚干涉对精加工光学零件进行检验在偏差小于四分之一波长时遇到困难。本文通过复色光干涉色的分析定量建立了干涉色与偏差之间的关系，论证了光学精加工检验原理并提出了具体的检验方法。这将有助于提高和保证光电制导、军事摄影、遥感、测距等技术领域对光学零件加工精度所提出的越来越高的要求。

一、前　　言

在光电制导、军事摄影、测距、遥感等技术领域，对光学零件加工精度提出了越来越高的要求。产品误差已达到低于波长的量级。对于这类光学精加工产品的检验，以往采用的牛顿环等厚干涉检验法受到限制。

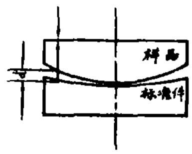

图 1　牛顿环等厚干涉检验光学零件示意图

如图 1 所示，设光线垂直入射，波长为 λ，样品和标准件的偏差为d，则等厚干涉光的程差为：

$$\triangle = 2d + \frac{\lambda}{2} \tag{1}$$

K级明纹位置所对应的偏差（即气膜厚度）d由下式决定，

$$2d + \frac{\lambda}{2} = K\lambda \tag{2}$$

其中　$K = 1, 2, 3, \cdots\cdots$

所以，明纹的最小偏差值仅对应于$K = 1$，此时

$$2d_{min} + \frac{\lambda}{2} = 1 \cdot \lambda \qquad 即 \qquad d_{min} = \frac{\lambda}{4} \tag{3}$$

因此，在单色光照明情况下，偏差 d小于四分之一波长时，就观察不到干涉条纹。因而牛顿环等厚干涉检验法在此无能为力，它仅限于偏差大于四分之一波长的范围内使用。

然而，在复色光或白光照明下，即使偏差值d很小（$d<\frac{\lambda}{4}$），也能观察到一定的颜色。这些颜色的出现是复色光干涉的结果，其颜色与偏差存在着必然的内在联系。但是，目前尚未从理论上去详细研究分析它们之间的定量关系，更确定不了一套色度数据来作为光学精加工的检验标准。

本文试图从色度学和光的相干原理出发，对解决上述问题作探索性的讨论。

二、色　度　分　析

如图 1，设观察光圈所用光源的光谱功率分布为 $E(\lambda)$。我们可以把 $E(\lambda)$ 看作是由许多单色光混合而成的。对于任意波长λ的单色光垂直照射时，相干光的程差已由式（1）决

定，而相位差应是

$$\delta = \frac{2\pi\triangle}{\lambda}$$

即 $$\delta = \pi + \frac{4\pi d}{\lambda} \tag{4}$$

如图 2 示出了两束光的相位差，它们的合振幅由下式决定

$$B^2 = A^2 + A^2 + 2A \cdot A\cos\left(\pi + \frac{4\pi d}{\lambda}\right)$$

$$= 2A^2\left(1 - \cos\frac{4\pi d}{\lambda}\right)$$

$$= 4A^2 \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda} \tag{5}$$

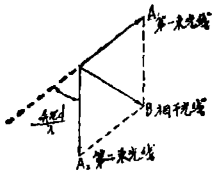

图 2　相干光线的振幅

这里忽略第二束光线较第一束光线的减弱，B表示相干光振幅，A 表示入射光振幅。由式（5），我们就能求出相干光的相对光谱功率分布$E_f(\lambda)$，

即 $$E_f(\lambda) = E(\lambda) \quad \sin^2\frac{2\pi d}{\lambda} \tag{6}$$

于是，我们可以计算相干光的相对三刺激值X、Y、Z及色度坐标x，y，

$$X = \int_{380(nm)}^{760(nm)} E(\lambda)\sin^2\frac{2\pi d}{\lambda}\,\bar{x}(\lambda)\,d\lambda \tag{7}$$

$$Y = \int_{380(nm)}^{760(nm)} E(\lambda)\sin^2\frac{2\pi d}{\lambda}\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda \tag{8}$$

$$Z = \int_{380(nm)}^{760(nm)} E(\lambda)\sin^2\frac{2\pi d}{\lambda}\,\bar{z}(\lambda)\,d\lambda \tag{9}$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \tag{10}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \tag{11}$$

可见，只要知道光源$E(\lambda)$的光谱功率分布，就能计算出偏差d与色度值(x，y)之间的一一对应关系。

三、色度计算及分数光圈标准

在光学检验中，光学零件偏差值d 常用光圈数 n 来说明。所谓光圈数即偏差为 $\frac{\lambda}{2}$ 的倍数，或写成

$$n = d \div \frac{\lambda}{2} = \frac{2d}{\lambda} = \frac{d}{273.05} \tag{12}$$

式中$\lambda = 546.1$nm，d取单位(nm)。

下面给出计算色度的程序和实际计算结果。光源$E(\lambda)$采用CIE $D_{65}(\lambda)$标准日光程序设计使用 BASIC 语言。

```
5   DIM D(76),X(76),Y(76),Z(76),C(76)
10  FOR I=0 TO 76
15  READ D(I),X(I),Y(I),Z(I)
```

```
20 NEXT I
25 FOR D=13.6525 TO 546.1 STEP 13.6525
30 FOR J=380 TO 760 STEP 5
35 LET C((J—380)/5)=1-cos(4*3.141593*D/J)
40 NEXT J
45 LET X1=0;Y1=0;Z1=0
50 FOR I=0 TO 76
55 LET X1=X1+D(I)*C(I)*X(I)
60 LET Y1=Y1+D(I)*C(I)*Y(I)
65 LET Z1=Z1+D(I)*C(I)*Z(I)
70 NEXT I
75 LET X2=X1/(X1+Y1+Z1)
80 LET Y2=Y1/(X1+Y1+Z1)
85 LPRINT "D=";D,"X=";X2,"Y=";Y2
90 FOR I=0 TO 76
95 LPRINT C(I),
100 NEXT I
105 NEXT D
110 INPUT D X Y Z
115 END
```

表 1　计 算 结 果

光圈数值 n	偏差值 d(nm)	色度值 x	色度值 y
1/20=0.05	13.6525	0.266046	0.281738
2/20=0.10	27.3050	0.267508	0.283171
3/20=0.15	40.9575	0.269338	0.285846
4/20=0.20	54.6100	0.272158	0.289608
5/20=0.25	68.2625	0.275998	0.294570
6/20=0.30	81.9150	0.280983	0.300854
7/20=0.35	95.5675	0.287308	0.308619
8/20=0.40	109.2200	0.295247	0.318066
9/20=0.45	122.8725	0.305179	0.329448
10/20=0.50	136.5250	0.317629	0.343078
11/20=0.55	150.1775	0.333327	0.359313
12/20=0.60	163.8300	0.353273	0.378495
13/20=0.65	177.4825	0.378789	0.400733
14/20=0.70	191.1350	0.411349	0.425240
15/20=0.75	204.7875	0.451534	0.448385
16/20=0.80	218.4400	0.494775	0.458559
17/20=0.85	232.0925	0.519268	0.427383
18/20=0.90	245.7450	0.476527	0.320342
19/20=0.95	259.3975	0.352988	0.174463
20/20=1.00	273.0500	0.233160	0.091134

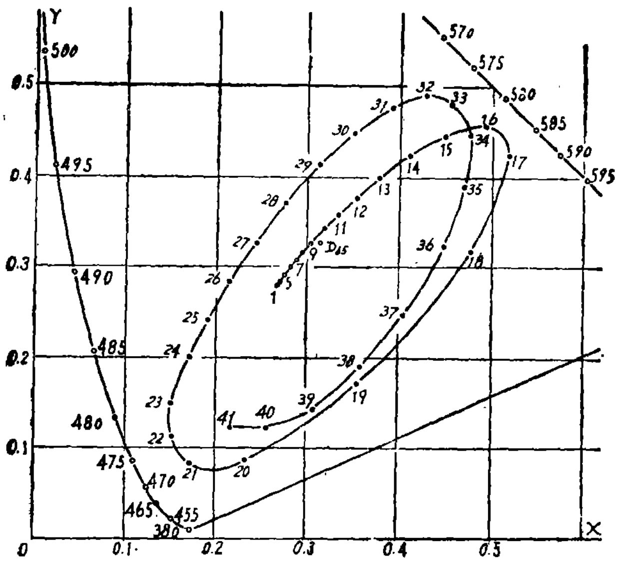

图 3　光圈标准色度轨迹图

图 3 将表 1 数据在色度图上标出。图中数字除以20就是光圈数，图中画出了 1/20～2 个光圈的连续变化的色度轨迹。

当然，上述计算纯属理论值，实际检验时准确度取决于实验方法，一般来说，有效数字保留三位即可。

四、讨　　论

上述计算结果实际上可以作为分数光圈检验的理论依据或标准。但是在实际检验中，光源往往达不到标准光源的光谱功率分布要求，因而也就降低了检验的质量。

现在我们设想若具有透过率τ为

$$\tau = K\sin^2\frac{2\pi d}{\lambda} \qquad (K<1\text{常数}) \tag{13}$$

的有色玻璃片或其它材质有色滤片。这时任意光源 $E(\lambda)$ 通过玻片的过滤后，相对三刺激值及色度坐标同样可以用（7）～(11)式表示。这说明透射光的颜色总是与干涉光的颜色一致，而不管光源作何种变化。

因此，我们可以不必去选定光源和不必去测色，可以提出一种全新的、简易的检验方法。只要做出若干块（例如20块）对应于一定偏差 d 值的滤光片，就可以作为检验光圈的实物标准。检验工作者可以在任意光源下操作，通过目视比色法比较透射色和干涉色的色差，就能使检验工作达到满意的质量要求。

滤光片的透过率曲线实际上是正弦平方曲线上的部份经过展宽后得到的。这部份曲线的区间由d值确定，区间的选取详见下表 2， 波长范围是 380nm～760nm。图 4 画出了式 (13) 对应于不同d值的曲线，为方便起见，取 $K=1$。从这些曲线来看， 有经验的同志实际上已经能够约略估计出颜色和亮度。

最后简单讨论一下有色玻材的检验。如图 1 所示，若样品为有色玻材，其光谱透过率为

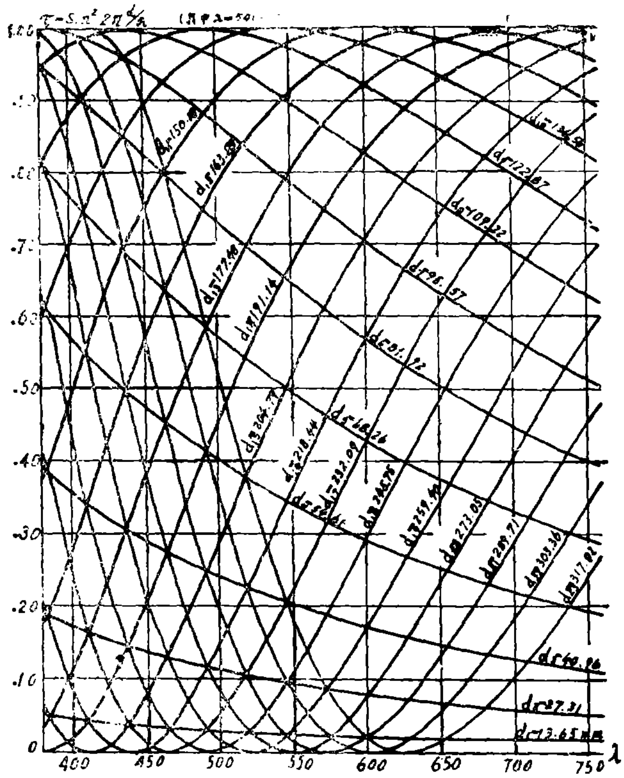

图 4　检验光圈标准滤色片透过率曲线

表 2　偏差值与角度区间对照表

光　圈　数 n	偏　差　值 d nm	角　度　区　间
1/20 = 0.05	13.65	12.93°～6.47°
2/20 = 0.10	27.31	25.87°～12.94°
3/20 = 0.15	40.96	38.80°～19.40°
4/20 = 0.20	54.61	51.74°～25.87°
5/20 = 0.25	68.26	64.67°～32.33°
6/20 = 0.30	81.92	77.61°～38.80°
7/20 = 0.35	95.57	90.54°～45.27°
8/20 = 0.40	109.22	103.47°～51.74°
9/20 = 0.45	122.87	116.40°～58.20°
10/20 = 0.50	136.56	129.37°～64.69°
11/20 = 0.55	150.18	142.28°～71.14°
12/20 = 0.60	163.83	155.21°～77.60°
13/20 = 0.65	177.48	168.14°～84.07°
14/20 = 0.70	191.14	181.08°～90.54°
15/20 = 0.75	204.79	194.01°～97.01°
16/20 = 0.80	218.44	206.94°～103.47°
17/20 = 0.85	232.09	219.87°～109.94°
18/20 = 0.90	245.75	232.82°～116.41°

$\tau(\lambda)$，则两束干涉光的振幅是不相等的。如图 2，第二束光线的振幅 A_2 与第一束光线的振幅 A_1 之间存在下面关系，

$$A_2^2 = A_1^2\tau^2(\lambda)$$

这里，透过率平方表示第二束光线两次穿过样品。这时式（5）变成

$$\begin{aligned}B^2 &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\left(\pi + \frac{4\pi d}{\lambda}\right)\\ &= A_1^2 + A_1^2\tau^2 + 2A_1 \cdot A_1\tau\left[-\cos\frac{4\pi d}{\lambda}\right]\\ &= A_1^2\left[1 + \tau^2 - 2\tau\cos\frac{4\pi d}{\lambda}\right]\\ &= A_1^2\left[(1-\tau)^2 + 4\tau\sin^2\frac{2\pi d}{\lambda}\right]\end{aligned}$$

因此，相干光的相对光谱功率分布$E_f(\lambda)$可以表示成

$$E_f(\lambda) = E(\lambda)\left[(1-\tau)^2 + 4\tau\sin^2\frac{2\pi d}{\lambda}\right]$$

于是，我们同样可以计算相干光的相对三刺激值X、Y、Z、及色坐标(x, y)。

$$\begin{aligned}X &= \int_{380(nm)}^{760(nm)} E(\lambda)\left[(1-\tau)^2 + 4\tau\sin^2\frac{2\pi d}{\lambda}\right]\bar{x}(\lambda)d\lambda\\ &= \int_{380}^{760} E(\lambda)(1-\tau)^2\bar{x}(\lambda)d\lambda + 4\int_{380}^{760} E(\lambda)\tau(\lambda)\sin^2\frac{2\pi d}{\lambda}\bar{x}(\lambda)d\lambda\\ &= X_1 + X_2\end{aligned}$$

其中，X_1是光源$E(\lambda)$两次穿过与样品成补色的滤片后的刺激值；X_2是由式（7）确定的相干光刺激值的四倍。同理，

$$Y = Y_1 + Y_2 \qquad Z = Z_1 + Z_2$$

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \qquad y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

以上分析表明，有色玻材样品进行检验时，虽然其情况较复杂，但其光圈数与颜色的定量关系同样可以计算确定。

五、结　　语

光学精加工检验是一个至今尚未得到满意解决的问题，本文对此进行了初步的探索，提出新的检验方法，这有可能为这个问题的解决提供一条途径。

Discussing the Principle and the Method of Examining Optical Accurate Elements

Chen Peiren

(Navy Second Artillery Institute)

Abstract

It is a difficult problem to examine optical accurate elements by means of isothick interference with a tolerance of less than one fourth of a wavelength. This article establishes the relations between interference colours and tolerance from a quantitative analysis, proves the principle of examining optical accurate elements and advances specific examining methods. These can improve and pledge to the higher quality requirements which is advanced by the fields of the photo-electric guidance systems, military, photography, remote sensing, range finding and so on, as processing optical accurate elements.