

FY-4 大气垂直探测仪干涉系统 光学元件容差分析

王战虎

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要 干涉分光系统是风云四号气象卫星 (FY-4) 大气垂直探测仪的核心部分, 该系统对光学元件的加工和装校精度有着很高的要求。本文主要分析给出了光学零件加工误差对干涉系统性能影响的计算方法, 并针对 FY-4 大气垂直探测仪的干涉系统计算了光学元件的容差要求。

关键词 干涉仪 干涉图 干涉效率 波面差

1 引言

FY-4 大气垂直探测仪是我国新一代地球同步轨道气象卫星风云四号上搭载的主要载荷之一。它采用了先进的干涉分光计技术, 在空间遥感大气温度、湿度和大气成分的垂直分布, 实现大范围、快速、连续和长期的气象测量, 对发展我国的数值天气预报有着十分重大的意义。

干涉分光系统作为 FY-4 大气垂直探测仪的核心部分, 是一种高精度的光学系统, 对系统中各光学元件的精度要求都非常高, 为了确定干涉系统对光学容差的要求, 本文将对几种常见的光学零件误差进行分析和计算。

2 干涉原理

典型的干涉仪为迈克尔逊干涉仪, 如图 1 所示。输入的准直辐射被分束器分为两路, 每一路的辐射光束通过两块反射镜返回至分束器。在分束器位置, 返回的每一路光束在此被分成两路, 一部分投向探测器, 另一部分返回辐射入口。如果投向探测器的两束光平行, 则探测器上得到的信号是被干涉仪两臂产生的光学相位差调制的信号。

相位差定义为

$$\phi = 2\pi \cdot \Delta x / \lambda \quad (1)$$

式中, Δx 为两臂产生的光程差, λ 为入射光线的波长。

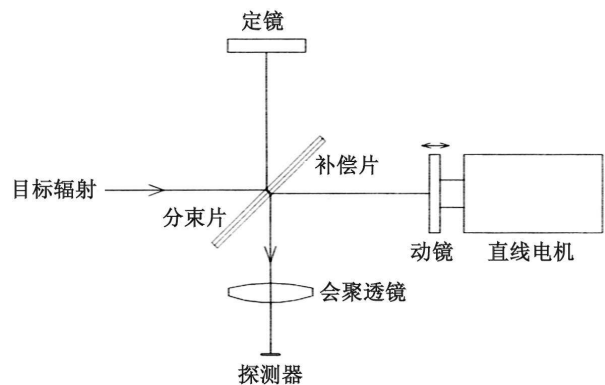


图 1 迈克尔逊干涉仪原理图

当干涉仪动镜运动时, 光程差 Δx 就发生变化, 对于单色光 λ , 探测器接受到的信号强度可表示为

$$I(v, \Delta x) = \frac{1}{2} I_0 [1 + \cos(2\pi v \Delta x)] \quad (2)$$

式中, $v = 1/\lambda$, 是波数 (通常以 cm^{-1} 计算), I_0 = 零光程差 (ZPD) 时的强度, 此时 $\Delta x = 0$ 。

收稿日期: 2005-05-26

作者简介: 王战虎 (1978 —), 男, 中国科学院上海技术物理研究所 2002 级硕士研究生, 主要从事大气探测光学系统的研究。

上式为假定分束器透过率和反射率都为 0.5, 且其它光学元件效率都为 1 的情况下, 单色光的干涉信号。

对于通常的多色光目标光谱辐射 B_v , 在光学元件存在损失的情况下, 探测器接收到信号为

$$s(x) = 2 \int_0^{\infty} S_v [1 + \cos(2\pi vx)] dv \quad (3)$$

这里定义光谱信号 S_v 为

$$S_v = \frac{1}{4} A_0 \Omega \tau \eta B_v \quad (4)$$

式中, $\eta = 4RT =$ 分束片效率, τ 为除分束片以外的光学系统传输, A_0 为光学孔径面积, Ω 为接受到的辐射的立体角。

取探测器接收信号的带有调制的交流部分为 $m(x)$, 称之为干涉图信号, 若定义光谱信号的正负波数对称, 即 $S_v(-v) = S_v(v)$, 则干涉图信号 $m(x)$ 可表达为

$$m(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_v [\cos(2\pi vx) + i \sin(2\pi vx)] dv \quad (5)$$

或

$$m(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_v e^{i2\pi vx} dv \quad (6)$$

从式 (6) 看出, $m(x)$ 和 S_v 为傅里叶变换对, 经傅里叶变换得

$$S_v = \int_{-\infty}^{+\infty} m(x) e^{-i2\pi vx} dx \quad (7)$$

由式 (7) 就可以将干涉图信号 $m(x)$ 还原成输入辐射的光谱图 S_v 。

3 干涉系统的相关参数

在 FY-4 大气垂直探测仪中, 干涉系统的相关参数如表 1 所示。

表 1 干涉系统相关参数

工作波段	长波 685 ~ 1130cm ⁻¹ 中波 1650 ~ 2250cm ⁻¹
光束入射角度	30°
光束口径	41mm
分束器材料	ZnSe
参考激光波长	0.6328μm

4 光学零件面型误差对干涉调制度的影响

迈克尔逊干涉仪对两光束和束中产生的波面误差非常敏感, 下面将对干涉仪中分束器及反射镜镜面面型偏差产生的波面误差进行分析。在通常情况下, 动镜位置引起的光程差 x 被称为光学延迟。由各部件失真造成的光程差被称为波面误差, 也就是干涉仪两臂的波面经分束器合成并消去光学延迟 x 后仍然存在的波面差别。

将波面误差考虑在内后, 探测信号可表示为

$$s(x) = 2 \int_0^{\infty} S_v [1 + H_{\delta}(v, x)] dv \quad (8)$$

式中

$$H_{\delta}(v, x) = \frac{1}{\pi R^2} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^R \cos [2\pi v(x + \delta(r, \varphi))] r dr d\varphi \quad (9)$$

式中, R 为孔径光阑半径, x 为来自两臂的理想平面波形的光学延迟, $\delta(r, \varphi)$ 是孔径光阑半径 r 和极角 φ 处的波面误差。对孔径积分, 并由余弦展开可得

$$H_{\delta}(v, x) = \frac{1}{\pi R^2} [P_1 - P_2] \quad (10)$$

式中,

$$P_1 = \cos(2\pi vx) \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^R \cos(2\pi v\delta(r, \varphi)) r dr d\varphi \quad (11)$$

$$P_2 = \sin(2\pi vx) \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^R \sin(2\pi v\delta(r, \varphi)) r dr d\varphi \quad (12)$$

式中, $v\delta(r, \varphi)$ 是波数为 v 的波面误差以其波长为单位的表示形式。为了得到有效的干涉图, 必须使 $v\delta(r, \varphi) \ll 1$ 。对 \cos 和 \sin 函数展开:

$$\cos(2\pi v\delta(r, \varphi)) = 1 - \frac{1}{2}(2\pi v\delta(r, \varphi))^2 + \dots \quad (13)$$

$$\cos(2\pi v\delta(r, \varphi)) = 2\pi v\delta(r, \varphi) - \frac{1}{2}(2\pi v\delta(r, \varphi))^3 + \dots \quad (14)$$

我们定义 δ 对整个孔径的平均值为 0:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \int_0^R \delta(r, \varphi) r dr d\varphi \equiv 0 \quad (15)$$

而且 $v\delta(r, \varphi)$ 的三次和更高次幂对孔径的平均值也近似为 0，则有

$$P_1 \approx \cos(2\pi vx) \left[\pi R^2 - 2\pi^2 \int_{\pi}^{-\pi} \int_0^R (v\delta(r, \varphi))^2 r dr d\varphi \right] \quad (16)$$

或

$$P_1 \approx \pi R^2 \cos(2\pi vx) \left[1 - 2\pi^2 v^2 \langle \delta^2 \rangle \right] \quad (17)$$

$$P_2 \approx 0$$

式中， $\langle \delta^2 \rangle$ 为波面误差均方值。所以

$$H_\delta(v, x) = \cos(2\pi vx) \left[1 - 2\pi^2 v^2 \langle \delta^2 \rangle \right] \quad (18)$$

即干涉图信号调制度下降至 M_δ

$$M_\delta \approx 1 - 2\pi^2 v^2 \langle \delta^2 \rangle \quad (19)$$

与理想情况相比下降了

$$-\Delta M_\delta \approx 2\pi^2 v^2 \langle \delta^2 \rangle \quad (20)$$

式中，波面误差 $\langle \delta^2 \rangle$ 由干涉仪的各部件在孔径位置引起的总的波面误差决定。

式 (20) 可用来确定各光学元件的面型容限。因此我们需确定由干涉仪中每个元件表面偏差引起的波面误差。图 2 为干涉仪中各个光学元件的结构图。

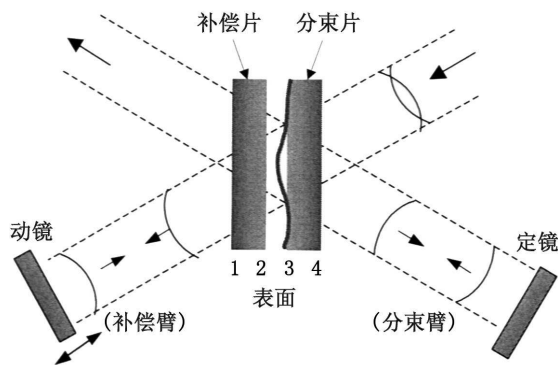


图 2 分束片面形不规则引起波面失真

图 3 画出了光入射在折射原件表面的光路，折射表面缺陷由距离 S 代替，反射光线和折射光线均已在图中画出。在入射点构造光线的垂线（与波面平行），很容易导出 S 引起的光程差的增

量，反射和折射光线的计算公式如图 3 所示。反射光线的光程差同样可以用于迈克尔逊干涉仪两臂的反射镜面，在这种情况下 $\cos(\theta) = 1$ 。

图 4 为光束在光学元件内表面的折射和反射情况，由表面缺陷引起的光程差变化如图中公式所示。与图 3 相比，对于折射光线，表达式相同；对于反射光线，相差一个折射率倍数 n。

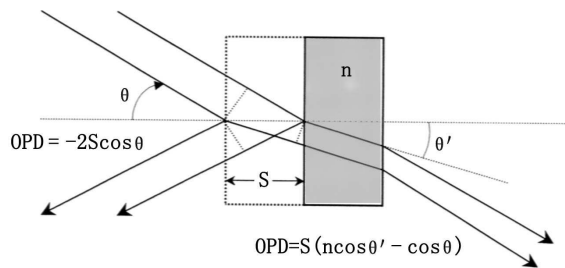


图 3 几何光线在外表面的折射和反射

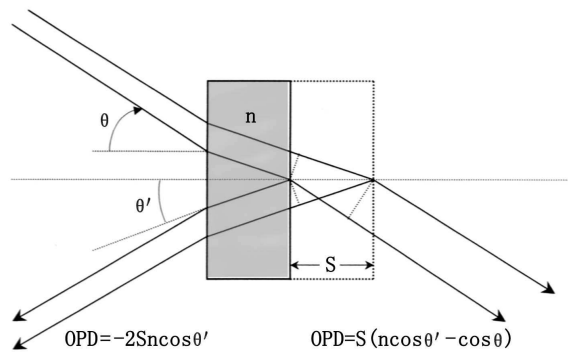


图 4 几何光线在内表面的折射和反射

因此图 2 所示干涉仪的两支臂的波面光程差为

$$\delta(r, \varphi) = 2 \left[S_3(n \cos \theta' + \cos \theta) + S_{MS} - S_{MC} + (S'_4 - S'_1 - S'_2)(n \cos(\theta' - \cos \theta)) \right] \quad (21)$$

式中， θ 为分束片的入射角， θ' 为分束片和补偿片的折射角， n 为分束片和补偿片的折射系数，根据 Snell 定理，有 $n \cos \theta' = \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}$ ； S_i 为 i 表面的面形失真度，由孔径处的射线位置 (r, φ) 测得； S_{MS} 为定镜表面对应孔径 (r, φ) 位置的面形失真； S_{MC} 为动镜表面对应孔径 (r, φ) 位置的面形失真。

注意到对小角度的入射光线，分束片 OPD 是定动镜面 OPD 误差的两倍。这是因为一支臂

的正表面偏离引起正的波面变化, 而另一臂补偿负的变化。所以它的表面的光程差都是两倍于镜面波面误差。这与定镜和动镜面的波面误差是不同的。

通常测量传输波面不规则度比测量面形不规则度要容易的多。补偿片和分束片的传输波面误差各自表示为:

$$\delta_{CT}(r, \varphi) = (S'_1 + S'_2)(n \cos \theta' - \cos \theta) \quad (22)$$

$$\delta_{ST}(r, \varphi) = (S'_3 + S'_4)(n \cos \theta' - \cos \theta) \quad (23)$$

公式 (21) 变为

$$\delta(r, \varphi) = 2[S_{MS} - S_{MC} + \delta_{ST} - \delta_{CT} + 2S_3 \cos \theta] \quad (24)$$

若各光学元件的表面不规则度已知 (使用公式 (21)), 或传输波面误差已知的话 (使用公式 (24)), 那么根据式 (20) 可预期干涉图调制度的损失。为了确定面型参数, 假定面型误差是随机的, 不可校正, 它们的均方值则为累加的。同时把波面误差 P-V (peak-to-valley) 测量值以固定测试波长 λ_{test} 的形式表示。假定 P-V 值和均方根值有如下关系:

$$F_i \approx \frac{4}{\lambda_{test}} \sqrt{\langle \delta^2 \rangle} \text{ 和 } W_{jT} \approx \frac{4}{\lambda_{test}} \sqrt{\langle \delta_{jT}^2 \rangle} \quad (25)$$

式中, F_i 为 i 表面面型误差, W_{jT} 为 j 部件传输波面误差。式 (20) 变为

$$-\Delta M_\delta \approx \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{\lambda_{test}}{\lambda} \right)^2 \left[F_{MS}^2 + F_{MC}^2 + 4F_3^2 \cos^2 \theta + W_{ST}^2 + W_{CT}^2 \right] \quad (26)$$

式中, λ 为干涉仪的最小工作波长 ($\lambda = 1/\nu$)。

假设动镜与定镜面型参数相同, 分束片与补偿片波面传输误差相同, 公式 (26) 简化为

$$-\Delta M_\delta \approx \pi^2 \left(\frac{\lambda_{test}}{\lambda} \right)^2 \cdot \left[F_M^2 + 2F_3^2 \cos^2 \theta + W_T^2 \right] \quad (27)$$

该式的所有参数均已包含了装配形变、热效应以及原始的制造误差。

在 FY-4 大气垂直探测仪干涉系统中, $\theta = 30^\circ$, $\lambda \geq 4.44 \mu\text{m}$, $\lambda_{test} = 0.633 \mu\text{m}$, 分束片和

补偿片材料为 ZnSe, 折射率 $n(4.44 \mu\text{m}) = 2.432$ 。为了估计波面误差影响, 假定镜面制造误差为 $1/4$ 波长, 装配和热变形引起 $1/8$ 波长误差, 所以 $F_M \approx 3/8$ 。对于传输波面, 制作误差为 $1/4$ 波长, 加上 $1/20$ 波长的装配和热变形误差, 因此 $W_T \approx 3/10$ 。分束片表面平整度是至关重要的, 制作误差为 $1/8$ 波长, 加上 $1/8$ 波长的波面失真, 则 $F_3 \approx 1/4$ 。代入式 (27) 可知, 在波长 $4.44 \mu\text{m}$ 处干涉系统调制度下降了 6.8%。因此, 要提高干涉系统的干涉调制度, 需进一步减小加工和装配变形引起的光学零件面型误差。

5 系统对分束片、补偿片厚度差异的要求

在干涉仪系统中, 分束器是由分束片和补偿片共同组成, 补偿片是为了消除由分束片对不同波长产生的色散现象, 但是衬底的色散现象要求补偿片衬底具有和分束片衬底完全相同的成分和厚度。

在制作过程中, 分束片和补偿片的厚度必然存在一定的差异。当一束光通过一厚度为 t 、折射率为 n 的平片时, 产生的光程差 Δ 和光束入射角 θ 有关, 光程差表达式为

$$\Delta = t[n \cos \theta' - \cos \theta] = t \left[\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right] \quad (28)$$

若分束片和补偿片厚度相差 Δt , 因此而产生的光程差为

$$\delta = 3\Delta t \left[\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right] \quad (29)$$

波长位置从 λ_1 到 λ_2 , 相应的折射率为 n_1 和 n_2 , 光程差的变化为

$$\delta = 3\Delta t \left[\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta} - \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta} \right] \quad (30)$$

由于分束片与补偿片不等厚, 就会引起干涉仪两臂光程的色散偏移效应, 从而导致干涉图的不对称。零光程差位置只在某个波数是零, 在其它位置则发生漂移。干涉图或完整的傅里叶变换域的定标过程, 需要校正这种偏移。作为系统设计的指导, 为使相位恢复明确, 建议相位角差值小于 2π 。

对于 FY-4 大气垂直探测仪中设计的干涉系统，波长范围从 $4.44\mu\text{m} \sim 14.6\mu\text{m}$ ，入射角度为 30° ，分束片与补偿片采用 ZnSe 材料。ZnSe 材料的折射率计算公式为

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{K1 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - L1} + \frac{K2 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - L2} + \frac{K3 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - L3}} \quad (31)$$

其中，
 $K1 = 4.2980149$
 $K2 = 6.27765570 \times 10^{-1}$
 $K3 = 2.89556330$
 $L1 = 3.68881960 \times 10^{-2}$
 $L2 = 1.43476258 \times 10^{-1}$
 $L3 = 2.20849196 \times 10^{-3}$

将以上数据代入式 (30) 后可知，在波长范围 $4.44\mu\text{m} \sim 14.6\mu\text{m}$ 内，光程差的变化为 $\delta = 0.189\Delta t$ 。

在波长 $4.44\mu\text{m}$ 处，系统产生最大相位差，若要求该相位差小于 2π ，则 $\Delta t < 23.5\mu\text{m}$ ，即要求分束片与补偿片厚度之差小于 $23.5\mu\text{m}$ 。

6 结束语

通过上述分析计算，可以初步确定 FY-4 大气垂直探测仪干涉系统对光学零部件在加工方面的一些基本要求。由于干涉系统对光学零部件误差的灵敏度非常高，在实际应用中除了考虑光学零部件本身的误差外，还需考虑系统装校、动态控制方面的因素，才能更好地提高干涉系统的性能。

参考文献

[1] 王文贵. 《干涉光谱仪》，北京：宇航出版社，1988.
 [2] D. R Hearn. Fourier Transform Interferometry. Lincoln Laboratory, 1999.

国外专利介绍

供飞机用的被动电力线探测系统

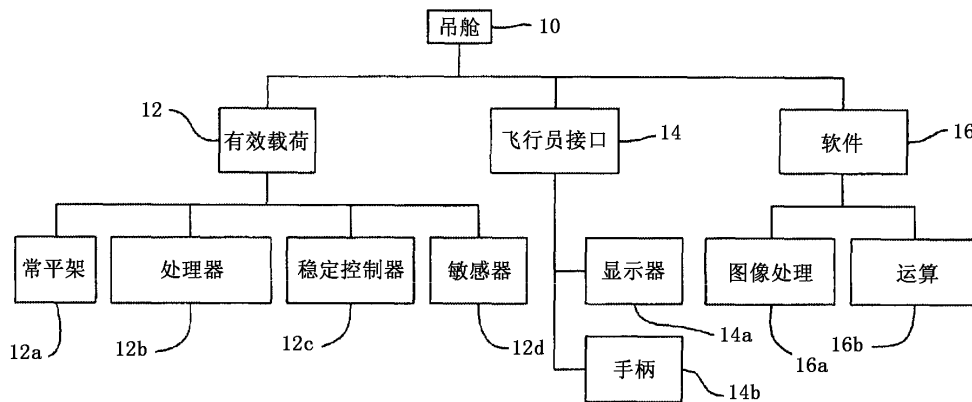
美国专利 US6940994
 (2005 年 9 月 6 日授权)

对于在低空飞行的飞机来说，为了确保飞行安全，

具备探测和躲避诸如电力线之类障碍物的能力是非常重要的。

本发明提供一种能够确定是否存在诸如电线之类小的曲线类物体的被动式实时障碍物探测系统。该系统由有效载荷、飞行人员接口和软件算法三部分组成。有效载荷中有一个红外图像探测系统；飞行人员接口中有一个用于显示图像的显示器；而软件算法则是用来处理图像的。

本专利说明书共 16 页，其中有 9 张插图。



高编译