

红外扫描成像系统中冷像的分析和控制*

王涌天 崔桂华

(北京理工大学工程光学系, 北京 100081)

摘 要 提出了一种基于准近轴光线追迹的冷像噪声的快速分析方法, 给出了适用于这类非对称光学系统的准近轴光线追迹公式, 介绍了在光学系统自动设计阶段控制或消除冷像噪声影响的方法. 这些分析和控制已全部在北京理工大学研制的 GOSA 软件中实现.

关键词 光学设计, 冷像噪声, 红外扫描成像系统.

1 引 言

热像仪等红外扫描成像系统通常由红外望远镜、扫描机构和对热辐射敏感的接收元件(如 HgCdTe)三部分组成. 为提高接收元器件的灵敏度, 往往把它们放在低温仓液氮致冷, 零下 195°内加以冷却. 低温仓和镜筒其它部分温度的明显差别, 造成了一种像质缺陷——冷像(Narcissus). 参见图 1, 当扫描机构处于观察望远镜轴

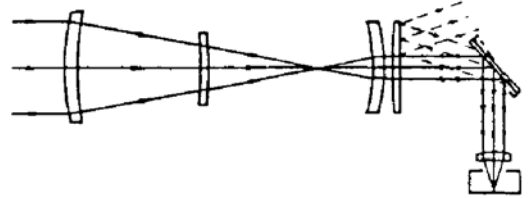


Fig. 1 The Narcissus effect

上点的位置时, 接收器除了接收到由望远镜正常成像的景物辐射, 还通过光学系统中折射面的微弱反射, 接收到本身及周围低温仓冷环境的影像, 形成冷像. 如果这种冷像噪声在扫描过程中始终存在, 则产生的直流信号可在光电转换后用电路中的交流耦合器滤掉. 但实际上更多的情况如图 1 虚线部分所示, 当扫描机构转动以观察轴外视场时, 接收器通过折射面的反射看到的不再是低温仓, 而是未被冷却的镜筒壳体其他部分. 这时, 冷像的辐射强度随视场大小变化, 成为不可滤掉的噪声信号迭加在景物信号上, 在监视屏上的视场中心形成黑(冷)斑.

为了在系统设计阶段准确、快速地分析冷像噪声对像质的影响, 实现在结构优化中对这种像质缺陷的自动控制, 本文提出了一种基于准近轴光线(Pseudo-paraxial ray)^[1]追迹的冷像快速分析方法. 红外扫描成像系统含有偏心元件、扫描反射镜, 有时还使用柱面、镞面反射镜, 属于非对称光学系统, 共轴对称系统中的近轴光学已不完全适用, 必须对近轴光线追迹

* 国家自然科学基金项目; 并得到中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室的资助.

收稿日期: 1993年3月30日; 收到修改稿日期: 1993年8月23日

公式加以改进, 这就是本文中准近轴光线的概念.

2 红外扫描成像系统的描述和准近轴光线追迹公式

关于非对称复杂光学系统在光学 CAD 软件中的描述, 在文献[1]和[2]中已有详细说明, 这里仅作一简要介绍. 为了简洁方便地描述带有偏心、倾斜、扫描元件的非对称系统, 设计了基准坐标系和面型坐标系相结合的方法. 形容一个面的几何形状和有效通光口径的结构参数相对该面的面型坐标系给出. 面型坐标系 (X, Y, Z) 的原点 A 与曲面的顶点重合, Z 轴与曲面顶点的法线重合. 其正向的选取要符合如下规定, 即 Z 轴与入射光束的主光线间的夹角为锐角. 在此规定下, 曲面的顶点曲率及其它面型参数正负号的选取与共轴系统的传统符号规则相同. 以顶点曲率为例, 从入射光线的方向看去, 曲面为凸曲时曲率为正, 凹面为负.

曲面在系统中的位置和方位在基准坐标系 (X_b, Y_b, Z_b) 中确定. 基准坐标系的 X_b, Y_b 面与物面重合, Z_b 轴通过轴上物点. 在共轴对称系统中, Z_b 轴被称为光轴, 各面的顶点都将座落其上, 面型坐标系的 Z 轴与 Z_b 轴重合, 且 X, Y 轴分别平行于 X_b, Y_b 轴. 红外扫描成像系统中有些光学面会相对基准轴偏心, 这时可用图 2 中标出的离轴量 $(\Delta X_b, \Delta Y_b)$ 给出曲面的顶点位置, 而两个相邻光学面的相对位置则用两曲面顶点连线 AA_{i+1} 在 Z_b 轴上的投影 AZ_b 描述. 光学面的倾斜及扫描运动均有相应的参量描述^[2], 因其不影响准近轴光线的追迹结果, 就不在此赘述了.

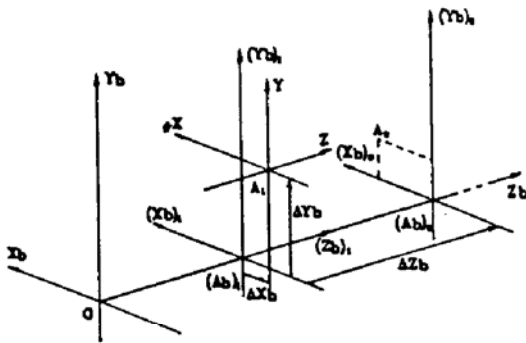


Fig. 2 Local axes and base axes

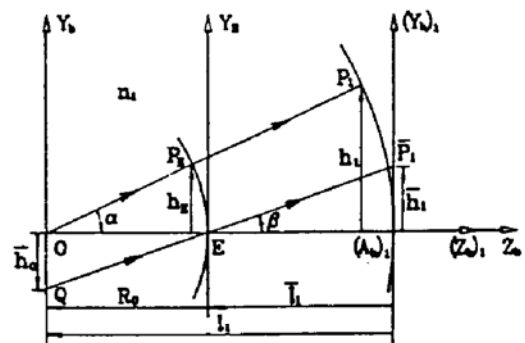


Fig. 3 Definitions of pseudo-paraxial rays in the object space

在系统物方空间, 准近轴光线的定义与共轴对称系统中的近轴光线相同, 参见图 3. 近轴边缘光线(或称第一辅助光线)从轴上物点出发并经过入瞳边缘, 其走向决定系统的物距和相对孔径. 它在物空间的初始值为 $(u_1 = -\sin \alpha, h_1)$, 其中 α 为物方半孔径角, h_1 为近轴边缘光线在系统第一个光学面上的入射高度; 近轴主光线(或称第二辅助光线)则从视场边缘出发通过入瞳中心, 其走向决定系统视场大小和光瞳位置, 它在物空间的初始值为 $(\bar{u}_1 = \tan \beta, h_1)$, 其中 β 为系统半视场角, h_1 为近轴主光线在系统第一面上的入射高度.

在红外扫描成像系统这类非对称系统中, 准近轴光线在各折射面上的折射公式为

$$u' = \frac{1}{n'} [nu + hC_0(n' - n)] \quad (1)$$

式中 n 和 n' 分别为折射面前后介质的折射率, C_0 为曲面的高斯曲率. 对于旋转对称曲面, C_0 即为顶点曲率; 对于非对称的柱面、錐面, C_0 为曲面顶点处两主截面上曲率的平均值, 即:

$$C_0 = \frac{1}{2}(C_z + C_r) \quad (2)$$

用这种方法追迹准近轴光线确定的像面位置将是系统的子午和弧矢像面的平均位置. 相应地, 在反射面上近轴光线的出射角由反射公式求出, 即

$$u' = u - 2hC_0 \quad (3)$$

而在两个光学面间的过渡公式为

$$u_{+1} = u', \quad h_{+1} = h - d' u' \quad (4)$$

为简明起见, 在以上公式中均略去各参量的面序号下标 k . 则(4)式中的面间距离 d' 为

$$\left. \begin{aligned} d' &= D' \cos \theta && \text{当第 } k \text{ 面和第 } k+1 \text{ 面均为折射面时;} \\ d' &= D' \frac{\Delta Z_b}{|\Delta Z_b|} && \text{当第 } k \text{ 面为折射面, 第 } k+1 \text{ 面为反射面时;} \\ d' &= -D' \frac{\Delta Z_b}{|\Delta Z_b|} && \text{当第 } k \text{ 面为反射面时.} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 θ 为连接两面顶点的向量 AA_{+1} 与 A 面面型坐标系 Z 轴正向间夹角; D' 为线段 (AA_{+1}) 的长度, 即

$$D' = \sqrt{[(\Delta X_b)_{+1} - \Delta X_b]^2 + [(\Delta Y_b)_{+1} - \Delta Y_b]^2 + \Delta Z_b^2} \quad (6)$$

在系统的各光学面上依次使用上述公式(1)~(6), 可以把初始值为 (u_1, h_1) 和 (\bar{u}_1, \bar{h}_1) 的两条准近轴光线分别从物方空间追迹到像方空间. 为了进行冷像分析, 需要把它们在系统中的轨迹, 即 (u_k, h_k) 和 (\bar{u}_k, \bar{h}_k) 加以存贮. 如果系统共有 m 面, 则近轴边缘光线在最后一面出射时的角度 u'_m 与系统像方空间半孔径角 α' 的关系为 $u'_m = \sin \alpha'$.

3 冷像引起的轴上点温度下降的计算

冷像分析, 实际上是对系统中各有关折射面分别计算其产生的冷像噪声强度与信号强度之比. 本文采用像方空间轴上点光束的立体角来描述信号强度, 立体角之值与为像方空间半孔径角 α' 的正弦值的平方成正比, 即

$$\Omega = 4\pi \sin^2 \alpha' = 4\pi u'_m{}^2 \quad (7)$$

为求系统中第 j 个折射面造成的冷像噪声的强度, 把接收元件视为冷源, 观察从它出发的反向近轴边缘光线. 由于光路可逆, 如果系统中各面有效口径设置正确, 这条光线将不受遮拦, 沿原光路到达第 j 面. 因此可直接利用下面的反射公式求出在第 j 面上的冷反射近轴边缘光线的参数 (\hat{u}_j, \hat{h}_j)

$$\hat{u}_j = 2h_j C_{0j} - u'_j, \quad \hat{h}_j = h_j \quad (8)$$

式中 (u'_j, h_j) 为上节中存贮的近轴边缘光线在第 j 面上的轨迹. 应用公式(1)~(6), 从求得的 (\hat{u}_j, \hat{h}_j) 出发, 可将冷反射的近轴边缘光线追迹到系统像方空间. 此光线在 j 面后各光学面及冷窗上的投射高有可能大于该面的有效口径, 表明冷反射光束被遮拦致使强度减弱, 应在追迹过程中找出光束被遮拦的最大比值, 即

$$f_j = \min (A_k/h_k) \quad k = j, \dots, m \quad (9)$$

式中 A_k 为第 k 面有效通光半径. 由近轴光线的线性关系, 可以证明当从接收元件出发的反向近轴边缘光线的初始角降至 $f_j \cdot u'_m$ 时, j 面上的冷反射近轴边缘光线将不再被遮拦. 显然, j

面上产生的冷像噪声与信号强度之比 Q_j 为

$$Q_j = \tau_j f_j^2 \quad (10)$$

式中 τ_j 为 j 面的反射率. 这里略去系统中透过率、吸收等损失不计. 以上分析假设系统中各面通光口径均为圆形, 当其中有矩形或椭圆形时, 应该用(9)式对子午和弧矢方向的通光口径分别检验, 得出 f_{s_j} 和 f_{τ_j} , 则强度比的表达式变为

$$Q_j = \tau_j f_{s_j} f_{\tau_j} \quad (11)$$

红外光学系统中的每个折射面都可能产生冷像噪声. 但是, 扫描镜后的各面的冷像强度不再随视场大小变化, 为滤去的直流噪声, 因此, 分析仅仅限于系统中最后一个扫描镜前的各折射面. 如果最后一个扫描镜的面序号为 m_s , 则系统总的冷像噪声与信号的强度比为

$$Q = \sum_{j=1}^{m_s-1} \tau_j f_{s_j} f_{\tau_j} \quad (12)$$

同理, 当系统的冷窗在扫描镜之前, 即扫描系统被放置在冷仓内时, 冷像分析则仅限于冷窗前的各折射面. 冷像噪声叠加在正常成像的景物信号上, 结果造成观察到的景物温度比实际下降. 由辐射学原理证明, 冷像引起的温度下降可将(12)式结果乘以一辐射转换因子求出即

$$AT_0 = \frac{\sum_{j=1}^{m_s-1} \tau_j f_{s_j} f_{\tau_j} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [B(\lambda, T_H) - B(\lambda, T_D)] R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\partial B(\lambda, T_s) / \partial T] R(\lambda) d\lambda} \quad (13)$$

式中, $B(\lambda, T)$ 为普朗克黑体辐射公式; T_H , T_D 和 T_s 分别为镜筒温度, 低温接收元件的温度和系统观察的景物的平均温度; $R(\lambda)$ 为光学系统和接收元件的综合频谱响应方程; λ_1 和 λ_2 为接收波段波长的上下限. 从(9)式可以看出, 系统各面的有效通光口径的大小对冷像分析结果具有决定性的影响. 因此在进行冷像分析前, 必须根据实际需要对他们进行认真设定.

4 冷像引起的视场范围内温度变化的计算

如前所述, 对红外扫描成像系统像质产生影响的仅是冷像噪声随视场变化的交流成分. 上节中计算的轴上点冷像虽然只考虑了扫描镜前的各折射面, 但仍可能含有直流成份. 这是由于在很多系统中, 在观察轴外视场时扫描元件没有把各面产生的冷像完全移出接收元件的视野. 因此(13)式中的 AT_0 只是提供了冷像影响的可能上限, 如要求出其中的真正交流成分, 及冷像引起的视场范围内的温度变化, 还需对各个轴外视场进行分析.

为了对系统中第 j 个折射面进行轴外全视场时的冷像分析, 需要将贮存的近轴主光线参数 (\bar{u}_j, \bar{h}_j) 用(8)式在 j 面上反射求出 (\bar{u}_j, \bar{h}_j) 后, 用(1)~(6)式追迹到像方空间, 求出在各面上的交点高度 \bar{h}_k . 应该注意的是, 扫描镜的作用在于改变来自轴外视场的光束的轨迹, 使之在扫描镜后各面与轴上光束的光路重合, 这点在准近轴光线追迹公式中没有体现. 因此, 在把冷反射近轴主光线追迹到扫描镜上时, 需要对数据做如下校正

$$(\bar{u}_k)_{\text{new}} = (\bar{u}_k)_{\text{old}} - \bar{u}_k, \quad (\bar{h}_k)_{\text{new}} = (\bar{h}_k)_{\text{old}} - \bar{h}_k \quad (14)$$

再继续进行追迹. 轴外视场与轴上点的区别, 在于冷像光束中心从各面的顶点移到了 \bar{h}_k , 使其受到各面通光口径和冷窗更加严厉的遮拦. 由于失去了对称性, 必须分别对上、下冷反射

边缘光线检验其受遮拦的程度，最后计算第 j 面引起的轴外全视场冷像噪声与信号强度之比。如果冷反射光束被全部遮拦，说明第 j 面产生的轴上点冷像噪声完全是有害的交流成份。在把扫描镜前各折射面的轴外冷像强度累加后，用类似上节方法求出冷像引起的轴外全视场点温度下降值 ΔT_1 ，而 ΔT_0 和 ΔT_1 的差值即是冷像噪声中的交流成分造成的视场内温度变化的幅度。

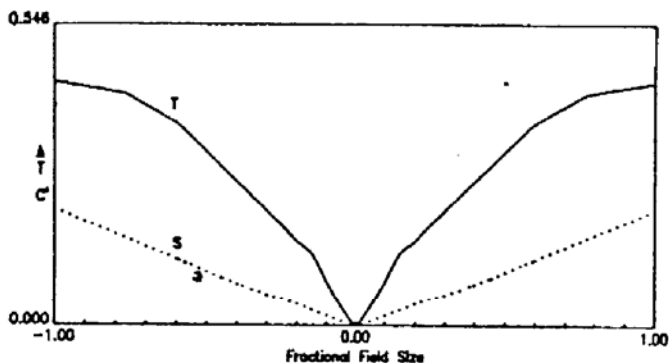


Fig. 4 Narcissus-induced temperature variation over the field for a FLIR thermal imager

当系统中含有矩形或椭圆通光口径时，或当弧矢和子午方向的扫描是由两个不同的摆镜分别实现时，应在子午和弧矢方向分别进行轴外冷像噪声分析；还可以对不同大小的中间视场进行计算以给出冷像温度随视场变化的曲线。这些分析中都不再需要新的光线追迹，只是利用准近轴光线的线性特性，对已经追迹过的冷反射近轴边缘光线和冷反射近轴主光线的结果进行适当缩放和叠加计算即可。

图 4 为一红外前视热像仪冷像分析的计算结果。图中显示冷像引起轴上点温度下降值为 $0.546\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该系统中子午和弧矢方向的扫描由 A、B 两个摆镜分别实现，在两个方向上造成的冷像温度随视场变化情况不同，在图 4 中用不同线型的表示出来。

5 光学系统自动设计阶段对冷像噪声的控制

在阻尼最小二乘法光学系统优化程序中，控制冷像噪声的手段有两种：一是直接将冷像温度 (ΔT_0 或 $\Delta T_0 - \Delta T_1$) 做为惩罚函数加入评价函数，以图通过优化降低其值；二是通过控制准近轴光线在系统中的轨迹，间接达到降低冷像影响的作用。前者容易理解，毋须赘述；后者虽是间接手段，却可以针对系统中对冷像噪声影响最大的一个或几个面进行有的放矢的调控，在直接控制冷像温度不能达到目的时，不失为一种有效的辅助方法。

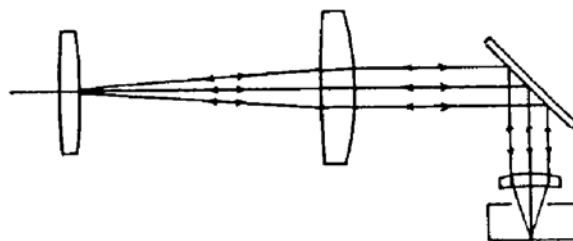


Fig. 5 Narcissus caused by a field lens

从图 1 可以看出，当近轴边缘光线垂直入射某一折射面时，冷反射后将沿原路返回像方空间，(10)式中 $f_j = 1$ ，此时该面造成的冷像强度最大。如图 5 所示，当近轴边缘光线在某面上的入射高度为 0 时，无论其入射角为何值，都将造成 $f_j = 1$ 的强冷像。故此，为了达到减小系统中第 j 面引起的冷像强度的目的，本文在优化程序中引入一控制变量 HNI

$$HNI = hni = hn(hC_0 - u) \tag{16}$$

即近轴边缘光线在该面上的投射高度 h_j 、入射角 i_j 和折射率 n_j 的乘积(为简明起见上式中略去了面序号下标 j)，将折射率包括在该控制变量中的目的是使折射前后的 i 值效果相当(因为 ni

$= n' i'$), 不难理解, 把 HNI 加入优化评价函数时的惩罚函数的形式一般为要求 HNI 大于某一指定值. 显然, 当 HNI 之值因入射角 i 接近于 0 而过于小时, 应考虑将镜片整体弯曲以设法改变该面的曲率; 当 HNI 之值因投射高 h 接近于 0 而过于小时, 则必须移动该片镜片的轴向位置. 另一个控制单面冷像噪声强度的控制变量 IIB 为近轴边缘光线和近轴主光线在该面上入射角之比, 即

$$IIB = \frac{i}{i'} = \frac{hC_0 - u}{hC_0 - \bar{u}} \quad (17)$$

可以证明, 当 IIB 之值大于 1 时, 该面产生的冷像强度将基本上不随视场扫描变化. 这时即使该面上 HNI 值很小, 但由其引起的冷像噪声大部分为可滤去的直流成分, $AT_0 - AT_1$ 很小, 仍不会真正影响像质. 除了在设计阶段对光学系统可能产生的冷像噪声强度加以控制外, 还可以在红外扫描成像系统的整体结构上想办法消除冷像影响. 如对低温接收元件加补偿热源, 在冷窗之后接收元件周围加反射镜等^[3].

结 论 本文中提出的分析计算方法已全部在北京理工大学工程光学系研制的 GOSA (General Optical System Analysis and optimization) 大型光学软件包中得以实现, 使之成为国内第一个可对红外扫描成像系统的冷像噪声进行分析和控制的光学软件. 在其优化部分, 提供了迄今为止国际上最为齐全的减小冷像影响的控制手段. 作者利用 GOSA 软件对校内外单位研制的热像仪等红外扫描成像系统进行了冷像分析、结构设计, 取得了圆满的结果.

本文经北京理工大学袁旭沧教授审阅, 特此致谢.

参 考 文 献

- [1] Yongtian Wang, H. H. Hopkins, Ray-tracing and aberration formulae for a general optical system. *J. Mod. Opt.*, 1992, **39**(9): 1897~1938
- [2] 王涌天, 计算机辅助设计中复杂光学系统的描述及其结构数据的输入和存储. 中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室年报, 1989, 19~31
- [3] A. S. Lau, The Narcissus effect in infrared optical scanning systems. *Proc. SPIE*, 1977, **107**: 57~62

Analysis and Control of Narcissus Effect in Scanning Infrared Systems

Wang Yongtian Cui Guihua

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

(Received 30 March 1993; revised 23 August 1993)

Abstract A fast analysis method for the Narcissus effect based on pseudo-paraxial ray-tracing is proposed. The definitions and tracing formulae for the pseudo-paraxial rays are given. The Narcissus induced temperature reduction for the axial point and the Narcissus induced temperature variation over the field can then be calculated. Different methods of reducing the Narcissus effect during automatic design of the optical system are discussed. All the analyses and controls are implemented in the GOSA (General Optical System Analysis and optimization) program developed at Beijing Institute of Technology.

Key words optical design, Narcissus, infrared scanning systems.