

典型光学系统总体研究及结构分析

田 铁 印

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

摘要 较系统地研究了各典型系统的光学总体问题, 详细分析了光学通道中各个环节的能量及信息的传递特性。采用并推导了作者认为较合理的公式及计算方法, 编制了确定光学系统总体参数的软件, 同时探讨了光学系统组元间的最佳匹配问题。

关键词: 光学总体; 光学系统; 结构分析

1 引 言

光学总体设计是光学仪器中光、机、电总体设计其中的一个重要环节, 它是整个仪器设计的先行和关键。

在以往的总体方案论证中, 多是首先选定光学系统的相对孔径及焦距值, 以此来分析是否满足系统作用距离的要求。本文则是在满足作用距离等技术指标的前提下, 探讨如何选取满足要求的光学系统的相对孔径和焦距值以及最佳结构的确定等。

2 地对空跟踪测量系统

系统若要探知目标的存在应满足以下条件: (1) 目标和背景在接收器上的对比度要大于接收器的对比度阈值; (2) 目标或背景在接收器上的能量要大于接收器的灵敏度阈值; (3) 目标在接收器上的像点尺寸要有一定大小。

2.1 摄影系统相对孔径的确定

空中目标经大气、光学系统在底片上曝光, 最后经判读仪由人眼进行判读。人眼对底片进行判读, 首先要求目标或背景在底片上形成一定的光密度, 由于这里目标是叠加于背景之上的, 为了达到最佳判读, 要求背景形成的光密度要大于灰雾度某一量值。由背景所需要的曝光量 H_b , 在根据选定的曝光时间 t 及曝光效率 τ_0 , 可求得背景应在底片上形成的照度 E_b :

$$E_b = H_b / (t \cdot \tau_0)$$

这样可求得系统的相对孔径值:

$$D/f' = \left[\frac{4E_b}{(1 - \theta^2) \cdot \pi \cdot B_b \times 10^4 \cdot K_o \cdot K_L} \right]^{1/2}$$

这里 θ 是对折反射系统而言的遮拦比, 透射系统 θ 为零; K_o 为光学系统的透过率; K_L 为滤光片对背景的滤光系数; B_b 为天空背景亮度, 其值在不同的天气状况下, 不同的太阳高角、不同观测方向有所不同。观测方向有所不同。

2.2 系统焦距的确定

设人眼判读所需的底片反衬底为 C_P , 底片反差系数为 γ , 则满足人眼判读要求的允许像点弥散的最大均方根角值 σ_Σ 由下式决定:

$$(C_P + 1)^{1/\gamma} = \frac{B_m \cdot K_D \cdot K_C \cdot (\sigma_M^2 / \sigma_\Sigma^2)}{B_b \cdot K_L}$$

其中: B_m 为等效目标亮度, K_D 为大气透过率, K_C 为滤光片对目标的滤光系数, σ_M 为目标对仪器张角的均方根值:

σ_Σ 又可用下式表示:

$$\sigma_\Sigma = (\sigma_m^2 + \sigma_r^2 + \sigma_x^2 + \sigma_z^2 + \sigma_w^2 + \sigma_c^2)^{1/2}$$

上式右边各项依次为: 目标、大气抖动、衍射、像差、接收器等各环节引起的像点弥散均方值。

经分析可知 σ_Σ 是焦距 f' 的函数, 因此可得系统的焦距为:

$$f' = \left[\frac{A_Y^2 + A_X^2 + A_Z^2 + A_C^2}{\sigma_\Sigma^2 - \sigma_M^2 - \sigma_D^2 - \sigma_w^2} \right]^{1/2}$$

其中: A_Y, A_X, A_Z, A_C 为与衍射、像移、振动、底片有关的系数。

3 空对地摄影成像系统

空对地摄影成像系统最重要的技术指标要求就是地面分辨率, 摄影的目的就是将地面上的各种信息, 经光学通道中的各环节成象到接收器上。作为成象系统, 追求的技术指标主要是分辨率, 故应以光学传递函数来讨论信息传递的各个环节。

3.1 CCD 摄影成像系统焦距的确定

系统的焦距与摄影比例尺 Q 以及 CCD 对角线尺寸 $2y'$ 有关。

(1) 根据摄影比例尺寸求焦距则有: $f' = Q \cdot H$ 其中 H 为摄影高度

(2) 根据 CCD 尺寸确定焦距则有:

$$f' = y' / + gw$$

其中 W 为视场角。最后权衡二式, 选取某一合适的焦距值。

3.2 系统 F^* 的确定

F^* 的确定依据两条原则: (1) 满足系统的能量要求; (2) 满足系统的最终的传递函数的要求。

3.2.1 由能量要求确定 F^*

地面目标信息经光学通道各环节达到 CCD 接收器, 目标在其上形成的曝光量 H_P 可用下式表示:

$$H_P = \frac{E_0}{4 \cdot F^{*2}} \cdot P \cdot K_D \cdot K_0 \cdot t$$

式中 E_0 为各种自然光在地面处形成的照度, ρ 为地面反射率, K_D 为大气透过率, K_0 为光学系统透过率, t 为帧积分时间, 取 H_P 为 CCD 要求的曝光量, 则由上式即可求出系统的 F^* 。

3.2.2 由传递函数要求确定 F^*

由于光学通道中各环节的传递函数多与系统的 F^* 有关, 因此很难写出满足总体要求的 F^* 的显函数形式, 故本文采用下列步骤确定满足传递函数要求的 F^* 。

a 初步选定某一规范化频率值(例如, $\nu_n=0.5$)这样就可以根据下式初步确定系统的 F^* :

$$F^* = \nu_n / (\lambda \cdot N)$$

其中 λ 为中心波长, N 为系统的特征频率

b 根据初步选定的 F^* 以及系统各环节应满足的质量要求, 可求出各种环节的 MTF。

c 在求得光学通道各环节的传递函数后, 就可以获得目标进入眼瞳的调制度 M_r , 即:

$$M_r = M_M \cdot M_Q \cdot M_C \cdot M_g \cdot M_J \cdot M_w \cdot M_x \cdot M_T \cdot M_Z$$

等式右边依次为: 目标、大气、窗口、光学系统、接收器、离焦、像移、电学系统、杂光所造成的调制度下降因子。

根据人眼能感知的最小调制度值来判断计算结果是否满足我们的要求, 如果计算出的 M_r 小于人眼要求的最小调制度值, 则应适当减小规范化频率值, 即增大系统的相对孔径, 亦即减小系统的 F 值; 反之, 则增加规范化频率值, 即增大系统的 F^* , 直到计算机给出合理的满足要求的 F 值为止。

最后, 权衡由能量要求及传递函数要求所确定的 F^* ; 同时考虑到满足结构上的一些特殊要求, 对 F^* 进行合理选取。

4 激光测距与激光角跟踪系统

激光测距与激光角跟踪系统光学参数选择要满足系统的测距方程。激光测距测程的远近, 主要取决于测距接收系统收到的激光回波功率是否大于由探测器信噪比决定的最小可探测功率。

不同情况下, 有不同的测距方程, 被跟踪体可以带合作目标, 可以不带合作目标; 激光光束截面, 也可能小于等效目标截面; 目标的反射特性可能接近余弦漫反射体, 也可能接近均匀漫反射体, 作为余弦漫反射体, 其各个方向的漫反射亮度相等; 作为均匀漫反射体, 则其各个方向的漫反射强度相等。

本文推导出了各情况下的测距方程, 现述如下:

a 光束面积大于目标有效面积, 目标看作余弦漫反射体

$$P_r = \frac{P_t \times \rho \times \tau_F \times \tau_U^2 \times \tau_J \times \tau_L \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times D_M^2 \times D_g^2}{4 \times \theta_F^2 \times R^4}$$

b 光束面积大于目标有效面积, 目标看作均匀漫反射体

$$P_r = \frac{P_t \times \rho \times \tau_F \times \tau_U^2 \times \tau_J \times \tau_L \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times D_M^2 \times D_g^2}{8 \times \theta_F^2 \times R^4}$$

c 光束面积小于目标有效面积, 目标看作余弦漫反射体

$$P_r = \frac{P_t \times \rho \times \tau_F \times \tau_U^2 \times \tau_J \times \tau_L \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times D_g^2}{4 \times R^2}$$

d 光束面积小于目标有效面积, 目标看作均匀漫反射体

$$P_r = \frac{P_t \times \rho \times \tau_F \times \tau_U^2 \times \tau_J \times \tau_L \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times D_g^2}{8 \times R^2}$$

e 带合作目标情况下

$$P_r = \frac{P_t \times \rho \times \tau_F \times \tau_U^2 \times \tau_J \times \tau_L \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_N^2 \times D_N^2 \times D_g^2}{\theta_F^2 \times \theta_J^2 \times R^4}$$

其中 P_r 为激光最小回波功率, 亦即为满足一定信噪比条件下探测器的最小可探测功率, P_t 为激光发射功率, ρ 为目标漫反射系统, τ_F 为发射系统的透过率, τ_J 为接收系统透过率, τ_U 为大气透过率, τ_L 为窄带滤光片的峰值透过率, K_1 为激光器的发射光功率, K_2 为探测器的光电效率, K_3 为跟踪误差引起的激光回波功率减小系数, D_M 为目标的等效值直径, D_g 为光学系统的通光口径; θ_F 为系统发射光束的整个发射角, θ_J 为角反射器的衍射角, D_n 为合作目标的等效直径, R 为最大测量距离。

本文在推导激光测距方程中, 考虑到了激光光束能量分布的高斯特性, 因此跟踪误差的存在可能使激光发射系统高斯光束的能量峰值偏离作用目标, 因而造成激光回波功率减少, 故本文引用了 K_3 这一系数。

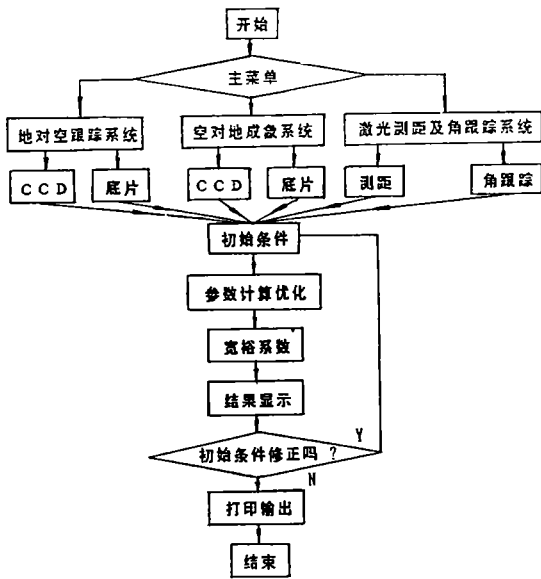


图1 程序框图

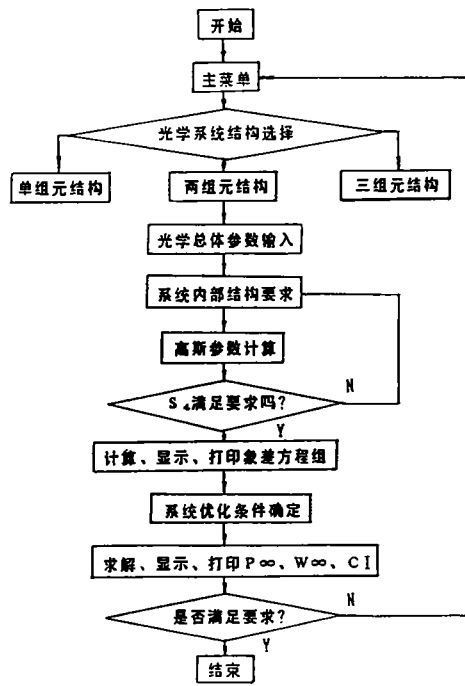


图2 程序框图

5 程序设计

5.1 总体参数优化程序

总体参数优化程序是根据以上各典型系统的分析，而编制的求解各系统光学总体参数程序，本程序采用人机对话的方式进行数据输入及合理性判断，最后给出满足总体要求的不同宽裕系统的光学系统参数，程序框图如下：

5.2 光学系统组元间像差匹配优化程序

光学系统总体参数确定以后，就可以选择具体的结构型式，如何利用最简单、最少透镜组元满足要求，这就需要各组元之间的像差达到较好的匹配，也就是光学系统总体要求的 P_{∞} 、 W_{∞} 、CI 在系统内分配问题。这是光学总体设计的另一重要环节。为此本文编制了组元间像差匹配的优化程序。这为系统结构的优化提供了有利工具。程序框图如下：

6 结束语

光学总体工作有着较重要的实际意义，本文只结合光机所的主研究方向和科研任务，探讨了几种典型光学系统的总体问题。然而，光学总体工作有着广泛的内容，如红外探测系统、微光夜视系统、光谱分光系统等等，如何去考虑它们的光学总体问题，同样是比较重要的。因此，本文工作需不断发展和完善，这将是作者后继工作的主要内容。

本文的指导老师是尤英奇研究员。史光辉、王立升、孔世维等许多老师给予了耐心的指导在此表示衷心的感谢。

本文获 1993 年度大恒光学奖学金优秀奖。

Study and Analysis on the Several Typical Optical System

Tian Tieyin

(Changchun Institute of Optics and fine Mechanics Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130021)

Abstract

The total optical problems of the several typical systems are studied, and the transfer characteristics of the energy and the information in optical channel are analysed in detail. the more rational formulae and calculation methods are inferred, the program for determining the parameter of the total optical system is designed.

Keywords: Total optical system, Optical system design, Optical configuration analysis