



北京航空航天大学

BEIHANG UNIVERSITY

2022 – 2023 学年第一学期

《光电探测和目标识别》

课程设计

班	级	191714 班
学	号	19375221
姓	名	陈博非
日	期	2023 年 2 月 15 日

摘要

本次课程设计综合运用了光电探测技术、成像技术、红外成像技术相关的知识，进行了给定要求下的红外成像系统设计（含光学设计），对经过大气消光作用后的目标辐射、成像元件 NETD 以及识别准则进行了分析和陈述，最后进行了光学系统的设计并检验了其孔径和视场要求，除所设计的系统尺寸较大（约 32cm）以外，其他要求均符合预期。

目录

一. 实验目的 1

二. 题目要求 1

2.1 红外成像芯片参数 1

2.2 红外成像系统性能指标 1

三. 要点提醒 2

四. 系统设计分析 2

4.1 目标发光情况 2

4.2 大气对光传输的影响分析 4

4.3 目标的探测与识别分析 6

4.3.1 不同辨别等级的准则 6

4.3.2 NETD 的修正 6

4.3.3 探测和识别距离的计算 7

五. 光学设计 7

5.1 照相系统设计 8

5.2 孔径参数检验 14

5.3 视场参数检验 15

一. 实验目的

- 1、熟悉大气对光电探测影响的分析方法；
- 2、熟悉红外热像仪性能的分析方法；
- 3、熟悉红外热像仪光学系统的设计方法；
- 4、了解影响热像仪空间分辨能力的因素（选做）。

二. 题目要求

2.1. 红外成像芯片参数

利用表中的红外成像芯片设计一款红外热像仪。

表 1 红外成像芯片参数表

项目	参数	备注
探测器类型	非制冷氧化钒	
响应波段	8 ~ 14 μ m	
红外分辨率	640 \times 480	
成像单元尺寸	12 μ m \times 12 μ m	
NETD	50mK@F1.0/50Hz	50mK 表示噪声等效温差为 50mK，F1.0 指相对孔径为 1.0，50Hz 表示此参数是帧频 50Hz 下测得的
帧频	50Hz	

2.2. 红外成像系统性能指标

- 目标参数：大小 3m \times 2m、目标表面温度 320K、背景温度 300K；
- 大气模型：考虑 USSA1976 大气模型；
- 天气条件：气象能见度 20km；

- 探测距离：>10km（水平）；
- 识别距离：>2km（水平）（不考虑大气传输产生的图像模糊）；

三. 要点提醒

对于所有的处理过程都要给出理论依据，不能只给出处理结果，要写成正式的课程设计报告。

本课程设计需要考虑以下几个方面的问题：

- 1、 大气对光传输的影响（采用 USSA1976 大气模型，大气透过率的理论计算依据，可以利用 Modtran 软件计算大气透过率）；
- 2、 目标的探测与识别问题（不同辨别等级的准则、NETD 的修正、探测和识别距离的计算方法）；
- 3、 光学系统的设计（光学系统参数的计算：孔径、焦距、视场、光阑等）。

四. 系统设计分析

4.1. 目标发光情况

将目标当作黑体，计算其辐射的情况：

辐射辐亮度随波长的关系：

$$L_{O\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [e^{C_2/(\lambda T)} - 1]} = \frac{C_1}{\pi \lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/(\lambda T)} - 1} \quad (1)$$

辐射辐亮度随波数的关系：

$$L_{O\nu}(T) = \frac{2\pi hc^2 \nu^3}{e^{C_2\nu/T} - 1} = \frac{C_1 \nu^3}{\pi} \frac{1}{e^{C_2\nu/T} - 1} \quad (2)$$

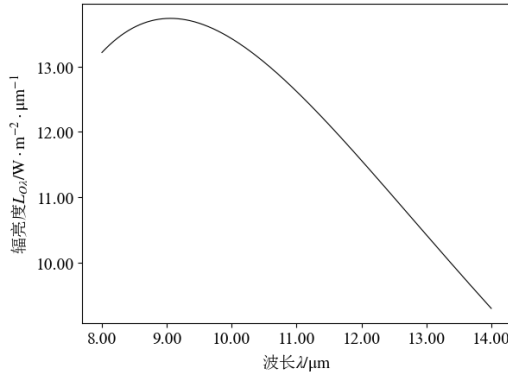


图 1.1. 目标辐射体辐射亮度与波长的关系

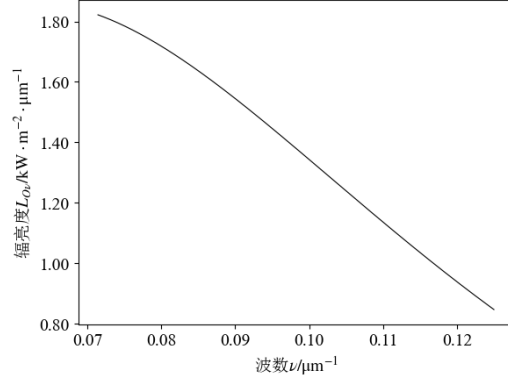


图 1.2. 目标辐射体辐射亮度与波数的关系

图 1 目标辐射体亮度

由于红外成像芯片的敏感波段是 $8 \sim 14\mu\text{m}$ ，因此着重考查这部分的辐射情况。代入第一辐射常数 $C_1 = 2\pi c^2 h = 3.7413 \times 10^8 \text{W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$ 和第二辐射常数 $C_2 = hc/K = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 以及目标辐射体的温度 $T = 320\text{K}$ ，可知黑体的辐射情况如图1所示。

同理，根据维恩位移公式可得：

$$\lambda_m = \frac{a}{T} \quad (3)$$

其中： $a = 2.897 \times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{K}$ 是维恩常数。

因此峰值辐射波长为： $\lambda_m = \frac{2.897 \times 10^{-3}}{320} = 9.053 \times 10^{-6} \text{m} = 9.053 \mu\text{m}$ 。

总辐射出射度可以使用对全波长积分，即有：

$$M_O(T) = \int_0^\infty M_{O\lambda}(T) d\lambda = \frac{C_1 \pi^4 T^4}{15C_2^4} = \sigma T^4 \quad (4)$$

其中： $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数。

因此总辐射强度为： $M_O(T) = 594.54 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

最大辐射出射度：

$$M_{O\lambda_m}(T) = BT^5 \quad (5)$$

式中， $B = 1.2862 \times 10^{-11} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-5}$ 。

因此最大辐射出射度为： $M_{O\lambda_m}(T) = 0.132 \text{MW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

4.2. 大气对光传输的影响分析

一般来说，根据课堂讲义^[1]和文献^[2]知，可以通过以下的十二个步骤人工查表计算，如：

第一步：查表知海平面 1km 大气中，已知相对湿度 H_r 时的可降水厘米数；

第二步：求在已知相对湿度 H_r 情况下，1km 大气中的可降水毫米数；

第三步：计算水分高度修正路径长度： $L_0(\text{H}_2\text{O}) = L \times e^{-0.05938z}$ ；

第四步：计算沿路径长度水分含量；

第五步：查表求得与水气相关的大气透过率 $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$ ，必要时，使用函数内插；

第六步：计算 CO_2 的高程修正路径长度： $L_0(\text{CO}_2) = L \times e^{-0.178z}$ ；

第七步：查表求得与 CO_2 相关的大气透过率 τ_{CO_2} ；

第八步：根据大气能见度，计算气溶胶衰减系数，其中大气的密度可按下式求得：
 $\rho(z) = \rho_0 \times e^{-\frac{R}{RT}(z-z_0)}$ ，此处的 R 是气体常数，值为 $287.06\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ；

第九步：计算气溶胶对大气透过率的贡献： $\tau_{\text{asl}} = e^{-\frac{3.912}{R_v} R}$ ；

第十步：根据经验公式计算雨的散射系数 $\beta_{\text{rain}} = 0.248V^h$ ，式中 h 为降雨速率；

第十一步：计算雨对大气透过率的贡献，根据波盖耳定律： $\tau_{\text{rain}} = e^{-\beta_{\text{rain}} \rho S}$ ；

第十二步：计算总的大气透过率；

采用 USSA1976 大气模型，因此首先需要使用 MODTRAN 软件对大气透过率进行仿真计算，其大气模式的吸收曲线如下图2所示：

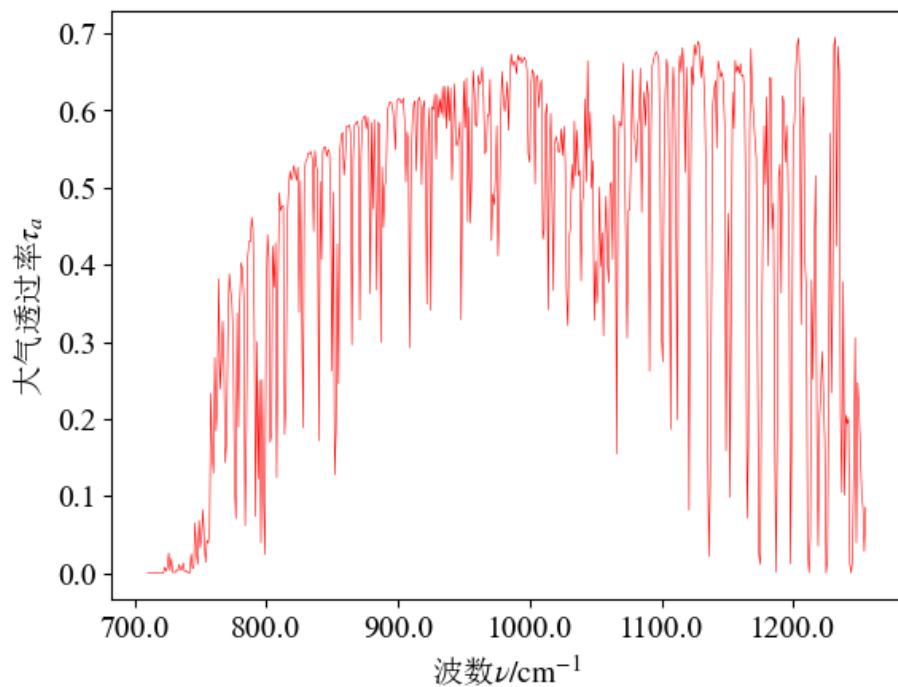


图2 USSA1976 大气模型吸收曲线，水平路径 12km，海拔 1km

按波数表达的目标辐射体辐亮度在经过大气消光作用后到达探测器物镜的图线如图3所示：

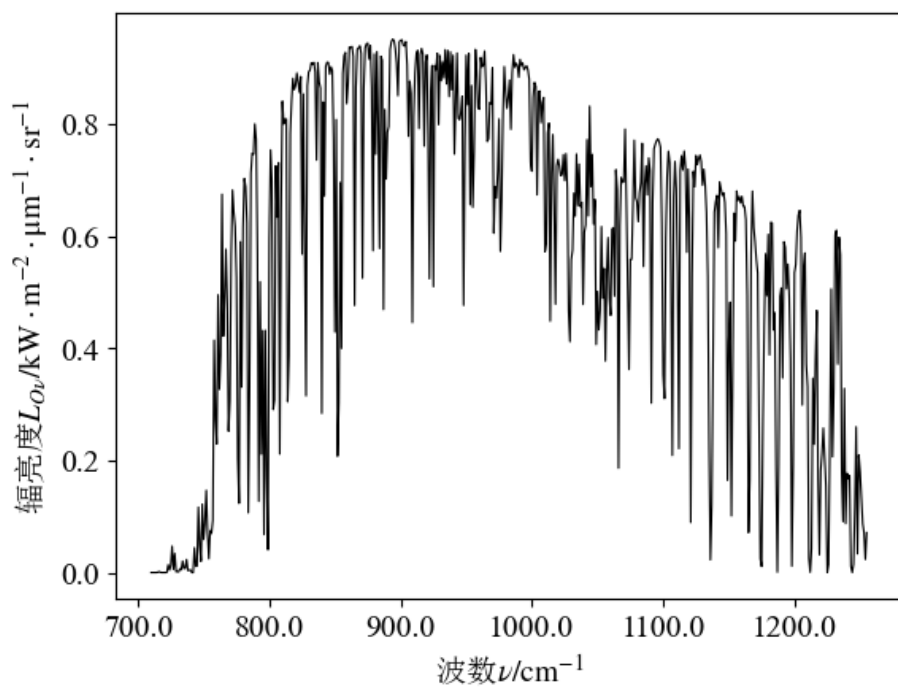


图3 经过 12km 传播大气消光作用的辐亮度

如果取峰值波数 $\nu_m = 1104.6\text{cm}^{-1}$ 处的辐亮度，其经过消光作用后得到的值为 $L_{O\nu_m} = 172\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ，并不是消光之后的最大亮度，查阅消光后辐亮度的列表，可得最大辐亮度应该是波数 $\nu_0 = 849\text{cm}^{-1}$ 处的辐亮度，其经过消光作用后得到的值为 $L_{O\nu_0} = 978.3\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$

4.3. 目标的探测与识别分析

4.3.1. 不同辨别等级的准则

首先根据 Johnson 准则，对识别和探测所需要的条纹数进行界定，得到表2如下：

表 2 工业上采用的 Johnson 准则辨识标准

辨别等级	定义	最小尺寸上的周期数
探测	存在一个目标，把目标从背景中区别出来	1
识别	识别出目标属于哪一个类别	4
辨别	认出目标，并能足够清晰地确定其类型	8

4.3.2. NETD 的修正

假设目标辐射体在探测器上的成像尺寸小于探测器单元的尺寸，则不妨设目标的大小为 $\alpha \times \beta$ ，探测单元的大小为 $a \times b$ ，像的大小为 $a' \times b'$ ，则利用修正公式 $\text{NETD}' = \frac{ab}{a'b'} \times \text{NETD}$ 。

解得修正系数为 $k = \frac{ab}{a'b'} = \frac{\Delta T}{\text{NETD}} = \frac{20}{50 \times 10^{-3}} = 400$ ，因此目标像在探测平面上的大小为 $a'b' = \frac{ab}{k} = \frac{12 \times 12}{400} = 0.36\mu\text{m}^2$ 。

由于目标大小为 $3\text{m} \times 2\text{m}$ ，因此根据比例关系： $\frac{a'}{b'} = \frac{3}{2}$ ，解得：

$$\begin{cases} a' = 1.5 \times \sqrt{0.24} = 0.7348\mu\text{m} \\ b' = \sqrt{0.24} = 0.4899\mu\text{m} \end{cases}$$

4.3.3. 探测和识别距离的计算

假设红外成像仪的焦距为 f'_0 ，探测距离为 L_d ，根据几何光学成像条件，在符号设计要求的前提下，其临界条件应当满足：

$$\frac{f'_0}{L_d} = \frac{a'}{\alpha} \Rightarrow f'_0 = \frac{a'}{\alpha} \times L_d = \frac{0.7348 \times 10^{-6}}{3} \times 10 \times 10^3 = 2.45\text{mm}$$

而 Johnson 准则只要求检测到一个周期就可以了，因此上式不用再作修正，计算得到的结果就是焦距的临界值，而要求探测距离 $L_d > 10\text{km}$ ，即焦距应当比这个值更大， $f'_0 > 2.45\text{mm}$ 。

根据 Johnson 准则，识别目标辐射体应当在目标的最小尺寸上分辨出 4 个周期，因此对应目标像的大小应该至少覆盖 8 个像素，即探测器所能测量的最小尺寸，因此，如果设能够识别的目标像的大小为 $a'' \times b''$ ，其应该满足：

$$\begin{cases} a'' \geq a' \times 8 = 96\mu\text{m} \\ b'' \geq b' \times 8 = 96\mu\text{m} \end{cases}$$

由于目标像的宽度尺寸更小，因此需要保证在宽度上能够识别，则长度应该按比例计算为 $a'' = 1.5 \times b'' = 144\mu\text{m}$ 。同理，可以利用识别条件，计算得到有关成像仪焦距的另一个约束条件：

$$\frac{f'_0}{L_c} = \frac{a''}{\alpha} \Rightarrow f'_0 = \frac{a''}{\alpha} \times L_c = \frac{144 \times 10^{-6}}{3} \times 2 \times 10^3 = 96\text{mm}$$

实际的焦距应该大于这个临界值，即 $f'_0 > 96\text{mm}$ 。

五. 光学设计

本红外成像光学系统，由于是对远距离物体成像，所以在本质上是一个照相系统，根据孔径的关系，再判断需不需要在照相系统的物方增加一个望远系统。考虑以上条件，本系统应至少一个提供光焦度的会聚透镜 $f'_3 = f'_0$ ，可能含有两个会聚透镜 f'_1 和 f'_2 ，以及红外成像芯片安装在会聚透镜 f'_3 的焦平面上，除此以外，目前还有以下约束条件：

- 1、系统的总焦距为 $f'_0 > 96\text{mm}$ ；
- 2、系统的相对孔径为 $F = 1.0$ ；

- 3、系统的孔径光阑是望远镜的物镜；
- 4、系统的视场光阑是望远镜的分划板；
- 5、系统的渐晕光阑是望远镜的目镜；
- 6、系统的入瞳距为 0；

5.1. 照相系统设计

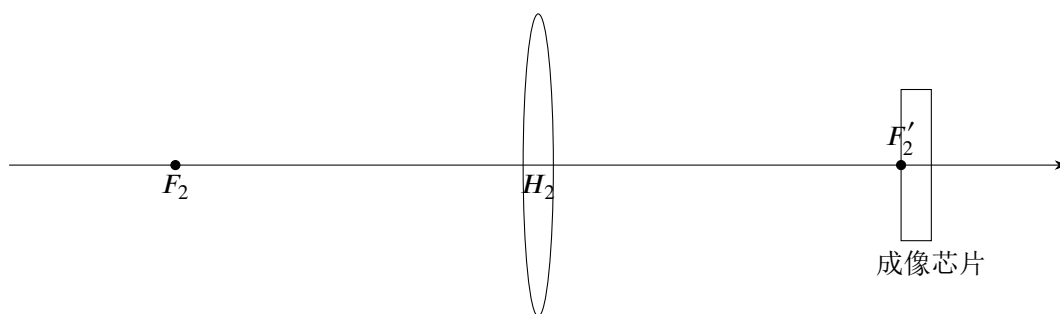


图 4 仅含一个物镜的红外成像仪的光学系统设计光路

不考虑引入望远系统，只考虑照相系统。由于照相系统物镜相对孔径为 $\frac{D_3}{f'_3} = 1.0$ ，因此照相系统的入瞳，即是这里的物镜框 H_3 的尺寸 D_3 应该等于其焦距 $f'_3 = 100\text{mm}$ ，红外成像芯片位于照相物镜的焦平面上，查工程光学设计手册^[3]中照相物镜的参数列表可知，最接近成像要求入瞳直径的物镜参数如下表所示：

表 3 满足相对孔径要求的照相物镜参数列表

标准值序号	焦距 f'	相对孔径 D/f'	入瞳直径 D
1	500mm	1 : 4.5	111.1mm
2	600mm	1 : 5.6	107.14mm
3	1200mm	1 : 11	109.09mm

可见单独使用任意一个照相物镜都不满足相对孔径 $F = 1.0$ 的要求，因此必须在原物镜后面或者前面再增加一组放大镜，以构成远距型光路，使系统的等效焦距得以缩小，从而达到设计要求。

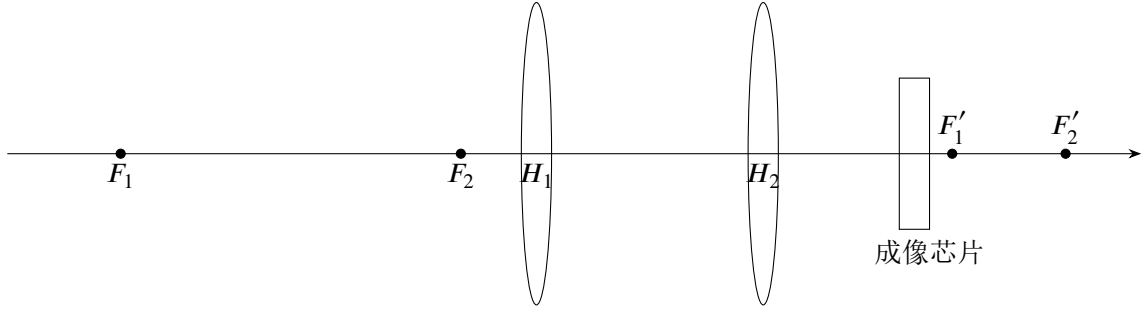


图 5 由两组透镜组成的物镜的红外成像仪的光学系统设计光路

即使新增加放大镜，如果能保证其在原照相物镜的物方空间的虚物尺寸大于物镜入瞳，整个照相系统的孔径光阑仍然是原照相物镜的入瞳 D 。如考虑兼顾最小尺寸，选取表3中第 2 行的数据，则需要将整个系统的等效焦距缩短至 107.14mm。

候选的放大镜的焦距为 150mm，相对孔径 $D/f' = 1 : 1.4$ ，以此可求得放大镜的入瞳直径为 107.14mm。设 $H_1H_2 = \Delta l_1$ ， H_2 到成像芯片的距离为像距 l'_2 ，假设一束平行光轴的光线从整个系统的物方入射，经两个透镜偏折后，其最终会聚于成像芯片的正中心，如下图所示：

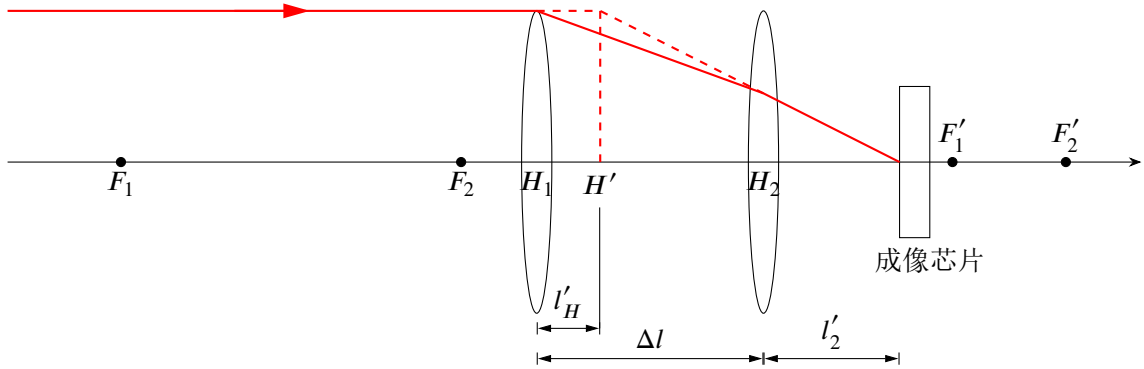


图 6 由两组透镜组成的物镜的红外成像仪的光学系统设计光路

根据透镜成像的高斯公式^[4]：

$$-\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l'_1} = \frac{1}{f'_1} \quad (6)$$

$$-\frac{1}{l_2} + \frac{1}{l'_2} = \frac{1}{f'_2} \quad (7)$$

其中，下标为 1 的代表透镜 H_1 的物方截距、像方截距和焦距，下标为 2 的代表透镜 H_2 的物方截距、像方截距和焦距，暂设 $\Delta l + l'_2 = 250\text{mm}$ ，则可得 $l'_2 = 250 - \Delta l$ ， $l_1 \rightarrow -\infty$ 。转镜公式

为:

$$l'_1 - \Delta l = l_2$$

联立以上各式可解得:

$$\Delta l^2 - 850\Delta l + 97500 = 0 \Rightarrow \begin{cases} \Delta l = 136.69\text{mm} \\ l'_2 = 113.31\text{mm} \end{cases} \quad (8)$$

解算其等效主点 H' ，设入射光线在第一面透镜上的投影高度为 h_1 ，在第二面上的投影高度为 h_2 :

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_1}{h_2} &= \frac{f'_1}{f'_1 - \Delta l} \\ \frac{h_2}{l'_2} &= \frac{h_1}{\Delta l + l'_2 - l'_H} \end{aligned} \right\} \Rightarrow l'_H = 103.26\text{mm}$$

等效的焦距 $f' = \Delta l + l'_2 - l'_H = 146.74\text{mm}$ ，这个等效的焦距在长度上满足题目设计要求，在相对孔径上稍微大了一点，因此，考虑调整以上布置使之符合相对孔径的设计要求。

设 $\Delta l + l'_2 = L$ ，公式7仍然成立，求主面的公式也成立，这里归纳在一起，如下列所示:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l'_1} &= \frac{1}{f'_1} \\ -\frac{1}{l_2} + \frac{1}{l'_2} &= \frac{1}{f'_2} \\ l'_1 - \Delta l &= l_2 \\ \frac{h_1}{h_2} &= \frac{f'_1}{f'_1 - \Delta l} \\ \frac{h_2}{l'_2} &= \frac{h_1}{\Delta l + l'_2 - l'_H} \\ \Delta l + l'_2 &= L \\ f' = \Delta l + l'_2 - l'_H &= 107.14\text{mm} \end{aligned} \quad (9)$$

解得 $l'_2 = 123.215\text{mm}$ ， $\Delta l = -90.02\text{mm}$ ，并不符合物理模型，因此需要将两个透镜的位置对换，再考察其安装，这里，沿用9的算式，将其中的 $f'_1 = 150\text{mm}$ ， $f'_2 = 600\text{mm}$ 代入式中，再次求解上述方程组，解得： $l'_2 = 173.27\text{mm}$ ， $\Delta l = -90.02\text{mm}$ 也不成立，说明仅用这两个透镜构成

[illegible]

相应的参数物理意义已如图7所表示。同理，高斯公式7仍然成立，这里，考虑到引入的透镜组物像主平面之间不一定是重合的，因此需要将公式中的 $l_2 = l'_1 - l'_{H_2} - l_{H_2H'_2}$ 。仍然有：

单靠以上各式并不能解出最终结果, 需要考察此光组内部结构, 根据公式^[4], 由于是两个

相同的透镜组合，则有以下各式成立：

$$\frac{1}{f'_2} = \frac{1}{f'_{21}} + \frac{1}{f'_{22}} - \frac{d}{f'_{21}f'_{22}} \quad (11)$$

$$l_H = -f' \frac{d}{f'_{21}} \quad (12)$$

$$l'_H = -f' \frac{d}{f'_{22}} \quad (13)$$

$$l_{H_2H'_2} = -l_H + l'_H + d \quad (14)$$

式中 d 是两个透镜之间的距离， l_H 是等效物方主平面到左透镜的距离， l'_H 是像方主平面到右透镜的距离，化简结果得：

$$f' = \frac{22500}{300 - d}$$

$$-l_H = l'_H = \frac{150d}{300 - d} \Rightarrow l_{H_2H'_2} = \frac{300d}{300 - d} + d \quad \text{单位：mm}$$

因此，两个透镜之间距离的设计与其等效主平面的位置是耦合的，考察什么情况下可以进行设计：

$$\text{令 } \frac{300d}{300 - d} + d = y \Rightarrow d^2 + (600 + y)d - 300y = 0$$

$$\Rightarrow \text{判别式 } \Delta = y^2 + 2400y + 360000$$

这里的 y 就是 $l_{H_2H'_2}$ ，它总是为正的，因此这样的设计是存在解的。本着最小尺寸的原则，先尝试取尽量小的主平面，即 $d = 50\text{mm}$ ，则 $l_{H_2H'_2} = 110\text{mm}$ ， $f'_2 = 90\text{mm}$ ，代入上式10可得：

$$\begin{cases} l'_{H_2} = 67.31\text{mm} \\ l'_2 = 223.08\text{mm} \\ l'_H = 293.24\text{mm} \end{cases}$$

尝试使所设计的光学系统体积更小，首先考虑减小总长度 L ，真正需要调节的是两个放大透镜的距离以及 l'_{H_2} ，而这两个距离实际上最终起作用的是放大透镜间距 d ，而真正需要控制的

目标函数是总长度 L 。因此先求解这个目标函数：

$$\begin{aligned} & \frac{f'_1}{f'_1} l_{H_2}'^2 - \left[f' + \frac{f'}{f'_1} (l_1' - l_{H_2 H_2}') - f'_2 + \frac{f'_2 f'}{f'_1} \right] l_{H_2}' \\ & + \frac{f'}{f'_1} (l_1' - l_{H_2 H_2}' f'_1 - f'_2 l_1' + f'_2 f' + f'_2 l_{H_2 H_2}') = 0 \end{aligned}$$

应用二次方程求根公式可得到解析解，同时，改变参数 d ，绘制出如下图像：

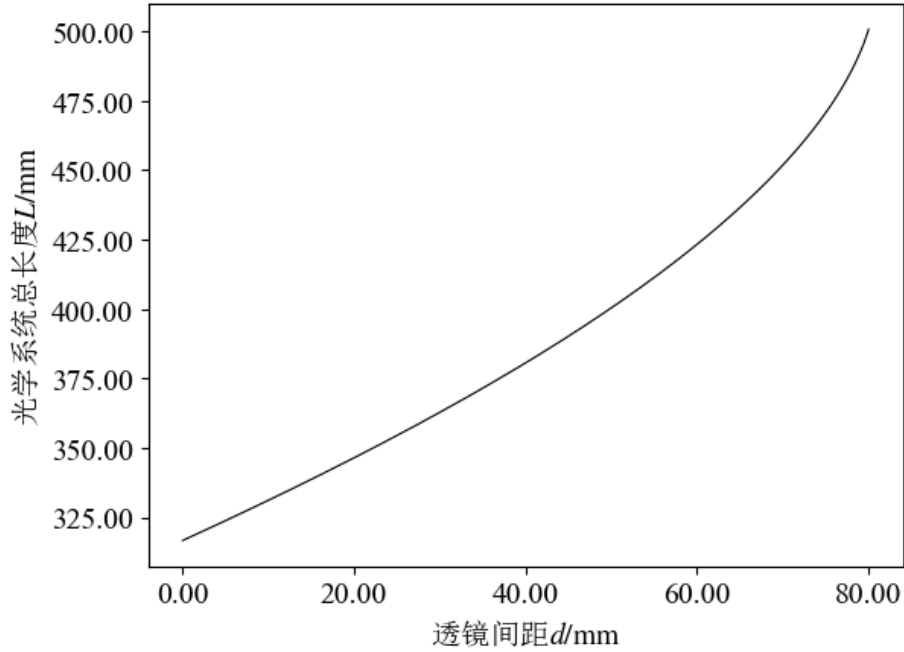


图 8 改变总长度 L 情况下的组合透镜参数变化情况

可见，当透镜的间距增加，系统的总长度将会以更快的速度增长，从而对整体结构造成不利影响，从最小尺寸出发，选取两个透镜的间距为 0，即两透镜密接，解得：

$$\left\{ \begin{array}{l} l_H' = 209.46\text{mm} \\ l_{H_2}' = 254.99\text{mm} \\ l_2' = 61.61\text{mm} \\ L = 316.57\text{mm} \\ l_{H_2 H_2}' = 0\text{mm} \end{array} \right.$$

可见，即使选用最小的尺寸进行设计，得到的光学系统体积仍然较为庞大，这主要是受限

于系统的口径和焦距要求。因此，基本的参数设计已经完成，下面检验其孔径和视场要求，并根据这两个要求进一步修改参数，以实现符合实际要求的最佳方案。

5.2. 孔径参数检验

下面检验其通光口径仍然为 107.14mm。取靠近照相物镜的一个放大镜，将其当作孔径光阑在经过照相物镜所成像，反求此光阑：

$$-\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l'_1} = \frac{1}{f'_1}$$

这里的 $l'_1 = -l_H + l'_{H_2} = 45.53\text{mm}$ ，解得： $l_1 = 49.26\text{mm}$ ，说明孔径光阑位于照相物镜的右侧，再求其通光口径，其中垂轴放大率为 $\beta = -\frac{l'}{l} = 0.924$ ，则孔径光阑的口径为 $D = \frac{D'}{\beta} = \frac{107.14}{0.924} = 115.94\text{mm}$ ，可见变得更大了，同理对下一个放大镜进行相同的操作，得到的光阑口径也变得更大，而光学系统真实的孔径光阑是由通光口径最小的孔径光阑决定的，因此本系统的口径光阑仍然是照相物镜口径 107.14mm，成像光束口径不受组合透镜影响。

对 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 波长范围内的辐亮度进行积分，由于辐射体可以看作朗伯体，且距离较远，其立体角可以近似计算为 $\Delta\omega = \frac{\alpha \times \beta}{4\pi L_c^2} = 1.194 \times 10^{-7}\text{sr}$ 。参考讲义^[1]，根据朗伯面辐射体在微面元上的辐照度公式：

$$dE(\lambda) = L_O(\lambda) \cos \psi \cdot d\omega$$

式中， ψ 是辐射体中心对面元法线的方位角，这里取轴向对准目标，因此为 0； $d\omega$ 是辐射体面元的立体角。对波段内积分，即可得到有效的辐照度，即：

$$E = \int_{8\mu\text{m}}^{14\mu\text{m}} L_O(\lambda) \Delta\omega d\lambda = 3.741\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

上式乘以入瞳面积 $\frac{1}{4}\pi D^2$ 可得入射辐射能。

5.3. 视场参数检验

验证视场要求：首先进行光路追迹，以确定视场角允许值，带有透镜间距的光学系统光路追迹图如下图9示：

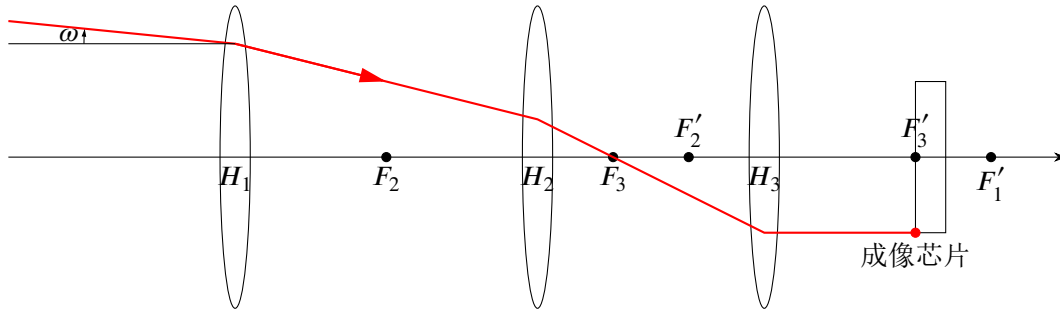


图 9 追迹光线确定视场角大小

特别地，当两组合透镜密接时，光路简化为下图：

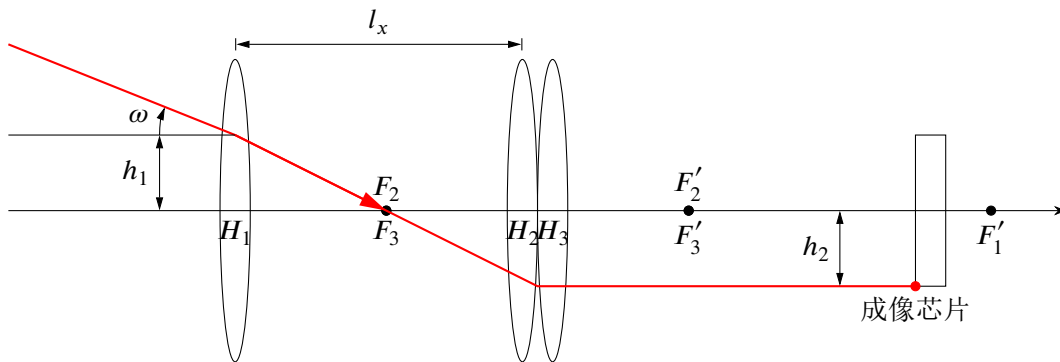


图 10 追迹光线确定视场角大小

从成像芯片的边缘处发出一条平行主光轴的光线，利用光路可逆的原理，反推得到入射光线及临界视场角 ω ，如果使用简化的模型，即两透镜密切接触，其等效焦距 $f'_2 = 75\text{mm}$ ，则可以按下列各式解算投影高度：

$$-\frac{1}{\Lambda_2} + \frac{1}{\Lambda'_2} = \frac{1}{f'_2}, \Lambda'_2 = l'_{H_2} - f' = 147.85\text{mm} \Rightarrow \Lambda_2 = -152.21\text{mm}$$

$$h_2 = \frac{480}{2} \times 12 = 2.88\text{mm} \quad \text{以最短视场限制计算}$$

$$h_1 = \frac{h_2}{l'_{H_2} - \Lambda'_2} = \frac{2.88}{107.14} \times 147.85 = 3.974\text{mm}$$

入射的视场角为：

$$\omega = \arctan \frac{h_1}{-\Lambda_2} = \arctan \frac{3.974}{152.21} = 1.496^\circ$$

可见允许的最大视场角 $\omega = 1.496^\circ > \arctan \frac{2}{2000} = 0.057^\circ$ ，系统的视场满足题目设计要求。

参考文献

- [1] 许东.《光电探测与目标识别》课程讲义第 2 讲[M]. 北京, 2022: 14.
- [2] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 54-86.
- [3] 李士贤, 郑乐年. 光学设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990: 225.
- [4] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2017: 18-26.