

红外光学系统设计

赵秀丽 编著

机械工业出版社



红外光学系统设计

赵秀丽 编著



机械工业出版社

本书总结了红外光学系统的设计原理及方法。对大量的设计实例进行了设计计算与分析比较。全书共分十章。第一、二、三章为基础部分，第四、五、六章为红外光学系统部分，第七、八、九、十章列举了各类红外光学系统设计一百余例。

本书可供光学设计工作者、红外系统的总体设计者、光学研究人员和高等院校光学专业、红外专业的师生阅读参考。

红外光学系统设计

赵秀丽 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32·印张 11 7/8·字数 258 千字

1986年10月重庆第一版·1986年10月重庆第一次印刷

印数 0.001—1.470·定价 2.85 元

*

统一书号：15033-6196

前 言

随着现代光学、半导体电子学的迅速发展，红外技术在军事、工农业、医学和科学研究等方面都得到了广泛的应用。如红外跟踪系统、红外夜视、前视系统等军事应用已日趋成熟；利用红外遥感技术，可以对地球资源进行勘探，预报农作物的产量，探测气象资料，进行天气预报；利用红外热成像技术，可以对人体的热图象进行医学研究，有助于癌症的早期诊断等等。可以预料，随着科学技术的不断发展，红外技术将得到更迅速的发展和更广泛的应用。

红外光学系统是红外技术中不可缺少的重要部分。随着红外技术的不断发展，国内外也陆续发表过一些专业书籍，但往往是从系统的观点来论述红外装置各部分的工程设计及相互关系，而对红外光学系统论述不多。一些专门介绍光学系统设计的文章，也往往是以某特定系统的设计为目的，而不能给红外光学系统设计人员提供一个全面的设计思想和设计方法。

本书旨在从红外光学系统的设计特点出发来论述红外光学系统的材料、设计原理、具体设计方法，并给出了大多经过实践考验的设计实例一百余个，这在已有的著作中介绍不多。本书对给出的实例进行了分类，力求按照不同的结构特点进行讨论与比较。根据需要，读者可以从直接选用或稍作修改即可使用。同时希望一般光学专业毕业的同志在此书的帮助下，能进行红外光学系统的设计。在编著的过程中也

注意到目前各大专院校从事红外工程和光学工程教学中的一些需要。

本书经浙江大学光学仪器系何国雄副教授审阅。在选材和内容安排上得到了匡定波研究员、张幼文教授的指导和帮助。编著过程中徐仲英同志帮助编写“非球面非共轴系统光学计算”的程序，并进行了许多有益的讨论。对于上述来自各方面的帮助，作者在此一并致谢。

本书匆促写成，同时限于作者的水平，书中难免有缺点、遗漏或错误之处，希望读者批评指正。

一九八四年三月

目 录

绪论	1
第一章 红外光学系统的特点和设计原则	2
一、红外光学系统的特点	3
二、红外光学系统的设计原则	5
第二章 红外光学材料	6
一、红外光学材料的性能	6
二、红外光学材料的种类与使用范围	8
1. 晶体	8
2. 玻璃	25
3. 塑料	33
三、常用红外光学材料的有关参数	38
参考文献	51
第三章 光学设计基础	53
一、几何光学的基本定律	53
1. 符号规则	53
2. 几何光学的基本定律	54
二、近轴光学	55
三、光学系统中光束的限制	63
1. 光学系统中的光阑及其作用	63
2. 孔径光阑和视场光阑	64
3. 探测器与瞬时视场的关系	66
4. 探测器与象点的关系	70
5. 消杂光光阑	74
6. 渐晕	75

7. 焦深和景深	76
四、光学系统的象差	77
1. 轴上点的单色象差——球差	78
2. 彗差、正弦条件	80
3. 场曲、轴外点球差	85
4. 象散	86
5. 畸变	88
6. 色差	89
7. 波象差	93
8. 衍射	97
9. 初级象差	101
五、光线追迹	114
1. 近轴光线追迹	115
2. 非近轴子午光线追迹	119
3. 空间光线追迹	135
六、象差自动平衡概述	153
1. 象差自动平衡中的数学手段	154
2. 象差的选取和评价函数的选取	159
3. 权因子的选取	160
4. 阻尼因子和阻尼系数的选取	162
5. 边界条件的处理	163
参考文献	168
第四章 红外物镜的设计	169
一、反射式物镜的设计	169
1. 单反射镜	169
2. 双反射镜	175
二、折-反射系统的设计	178
1. 施密特系统	178
2. 曼金折-反射镜	180

3. 包沃斯-马克苏托夫系统	182
三、折射式物镜的设计	187
1. 单薄透镜	188
2. 组合透镜	198
参考文献	200
第五章 探测器光学系统的设计	201
一、场镜	201
二、浸没透镜	209
1. 半球浸没透镜	211
2. 超半球浸没透镜	212
三、光锥	214
1. 空心光锥的设计	216
2. 实心光锥的设计	218
四、场镜与光锥的组合	220
参考文献	222
第六章 扫描器	223
一、扫描器的种类	223
二、常用的光机扫描器部件	224
1. 摆动的平面镜	224
2. 旋转的 45° 平面反射镜	232
3. 旋转的多面体反射棱镜	233
4. 旋转的折射棱镜	239
5. 旋转的齿状反射棱镜	244
6. 旋转的折射光楔	246
7. 其他扫描器	248
三、扫描效率与限制扫描效率的因素	251
1. 视场形状与扫描图样的关系	251
2. 边界损失	251
3. 重叠	251

V

4. 无信号区	252
5. 扫描速度的恒定性	252
6. 回程时间	252
7. 余弦因子	252
四、各种扫描图形的产生	253
五、常用扫描器的性能比较	255
参考文献	258
第七章 反射系统实例	259
一、各类经典的反射系统	259
1. 球面镜加平面镜系统	259
2. 牛顿系统	261
3. 格里高利系统	262
4. 卡塞格林系统	262
5. $S_I = S_{II} = 0$ 的双反射系统	263
6. $S_I = S_{II} = S_F = 0$ 的双反射系统	265
二、由 $S_I = S_{II} = 0$ 解得的各类共轴与非共轴双反射系统	267
1. F 数变化时象质的变化情况	268
2. 口径 D 变化时象质的变化情况	273
3. 视场变化时象质的变化情况	277
4. 遮挡比 α 变化时象质的变化情况	281
5. 次镜放大倍数 β 变化时象质的变化情况	286
6. 卡氏双反射系统偏心率 e 变化时象质的变化情况	290
7. 经典的卡氏系统在 $e_1 = 1, e_2 = 3, 2\omega = \pm 3^\circ$ 时的象质情况	294
第八章 折-反射系统实例	296
一、同心系统	296
二、折-反射(制导头)系统	297
三、曼金组合系统	298
四、折-反射带校正透镜系统	300

五、主反射镜非球面化的折-反射系统	301
第九章 折射系统实例	303
一、单透镜	303
1. 熔石英单透镜	303
2. 硫化锌单透镜	304
3. 硅单透镜	305
4. 锗单透镜	307
二、透镜组	308
1. 两片式物镜	308
2. 三片式物镜	315
3. 多片式物镜	330
4. 有限工作距离物镜组	337
参考文献	339
第十章 综合典型系统实例	340
一、红外跟踪光学系统	340
1. 十字形多元跟踪器光学系统	341
2. 带探测器光学系统的跟踪光学系统	342
二、红外热成像光学系统	348
1. 由折-反射望远系统、八面外反射行扫描转鼓、平面 摆动帧扫描镜、准直透镜组成的热成像仪光学系 统	349
2. 由有限工作距离成像系统、八面外反射行扫描转 鼓、平面摆动帧扫描镜、准直透镜组成的热成 象仪光学系统	352
3. 由折射成像物镜、平面摆动帧扫描镜、望远镜后 组、八面外反射行扫描转鼓与准直透镜组组成的 热成像仪光学系统	354
4. 由折射物镜、内转鼓行与帧扫描器、准直透镜组 成的全透射热成像仪光学系统	356

5. 由平面镜转动(或摆动)作物扫描、折射物镜与平面摆镜象扫描组成的热成像仪光学系统	358
三、红外遥感光学系统	360
1. 十二通道的多光谱仪光学系统	360
2. 高空红外相机光学系统	362
四、红外CCD成像光学系统	364
1. 红外CCD成像中等视场系统	364
2. 红外CCD成像大视场系统	365
五、红外测温光学系统	366

绪 论

红外光学系统是指对光波中红外波段进行工作的系统，即接收或发射红外光波的光学系统。一般地说，红外光学系统作为光学系统的一个类别，它和其他光学系统相比，在光能接收、传递、成象等等光学概念上没有原则上的区别。但是，由于红外光学系统工作波长在红外区域又多数同光电探测器作为接收元件，因此有其本身的特点，有别于一般光学系统。

红外光学系统的工作波长范围往往较宽，目前可供选择的红外透射材料品种不多，象差校正，特别是色差校正十分困难，因此红外光学系统在结构上较多地采用非球面反射系统或折射-反射系统。随着红外应用范围的不断扩大，红外热成象等技术的不断发展，反射式物镜已不能满足大视场、大孔径成象质量要求，因此近年来又广泛地用高折射率、低色散的晶体材料作各类折射物镜。红外光学系统是以红外探测器作为接收元件的，为了提高探测灵敏度、增大信噪比，在系统中多采用了包括浸没透镜、场镜与光锥等组成的二次聚光系统（也称探测器光学系统）以及实行光机扫描用的各类光学扫描器。从设计原理上，大部分红外光学系统是透用几何光学原理进行设计的。考虑到红外光学系统常常采用非球面、非同轴系统，本书在介绍几何光学中的一些常用计算公式的同时，还特别详细地讨论了非球面、非同轴光学系统的光学计算问题，比较了同轴、非同轴系统的设计特点。

本书在简要阐述红外光学系统设计理论基础和基本方法，并介绍目前常用红外光学材料之后，着重给出了包括反射系统、折-反射系统、折射系统和综合典型系统在内的实用性较强的设计例子一百多个，并提供了设计的原始数据、结构图、光学特性参数并对成象质量情况进行了分析比较。这是一般应用光学书中，甚至红外技术方面的专著中很少详细涉及到的。书中所给的大部分实例是从科研、生产实践中收集并经过加工整理而成的，另一部分是新的设计成果。为便于读者选择比较并节省篇幅，大部分内容采用了图表表示的形式，给出的全部数据均用电子计算机进行过验算，读者可以直接选用。

根据红外光学系统的工作特点，全书在评价系统的成象质量时，采用了弥散盘直径 Δd 这一指标。

第一章 红外光学系统的特点和设计原则

一、红外光学系统的特点

由于红外辐射的特有性能,使红外光学系统具有下列与普通光学系统,特别是目视和照相系统不同的特点。

1) 红外辐射源的辐射波段位于 $1\mu\text{m}$ 以上的不可见区。普通光学玻璃对 $2.5\mu\text{m}$ 以外的光波不透明。而在所有有可能透红外波段的材料中,只有几种材料有必需的机械性能,并能得到一定的尺寸,这就大大限制了透镜系统在红外光学系统设计中的应用,使反射式和折反射式光学系统占有比较重要的地位。

2) 几乎所有的红外系统都属于光电子系统,它的接收器不是人眼,也不是照相底片,而是各种光电器件。因此,相应光学系统的性能、质量、应以它和探测器匹配的灵敏度、信噪比作为主要评定依据,而不是以光学系统的分辨率为主。这是因为分辨率往往要受到光电器件本身尺寸的限制,因而相应地对光学系统的要求有所降低。

3) 视场小、孔径大。在应用单元探测器时,由于红外探测器的接收面积较小,所以一般红外光学系统的视场不太大,轴外象差通常可以少考虑。又由于反射系统没有色差,在多数情况下,对这样的反射系统只要消球差和满足正弦条件就可以了。同时这类系统对象质要求不太高,而要求具有高的灵敏度,因此,大多数采用大相对孔径,即小 F 数的光学系统。在一般情况下,由于加工等方面的限制, F 数取

2~3为宜。

4) 随着跟踪成像、热成像等技术的发展, 为了实现对空间目标进行扫描成像的目的, 各类扫描器的应用越来越多。这种扫描器可以安置在成像系统之前, 此时其尺寸大, 功率消耗大, 但对光学系统的成像质量影响最小。如图 1.1 所示, 比较常用的是将扫描系统放在会聚光路中。此时系统尺寸小, 功率消耗小, 但其会影响成像光学系统的特性, 造成离焦和引入其他象差, 以致使象质变坏, 故在光学系统的象差平衡中必须考虑这一点。另外, 带这种扫描系统的光学系统要求有较长的后焦距, 并对场曲有某些特殊的要求。其典型系统如图 1.2 所示。

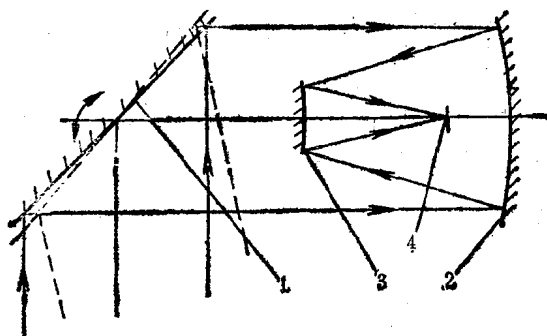


图 1.1 扫描系统

1—扫描摆镜 2—主镜 3—次镜 4—探测器

5) 常用红外波段的波长约为可见光的5~20倍。这样在系统光孔尺寸较小时, 由于衍射极限, 使热成像系统的分辨率较低, 也就是说要得到高的分辨率的热成像系统必须有大的孔径。这使得系统的重量重、成本高。

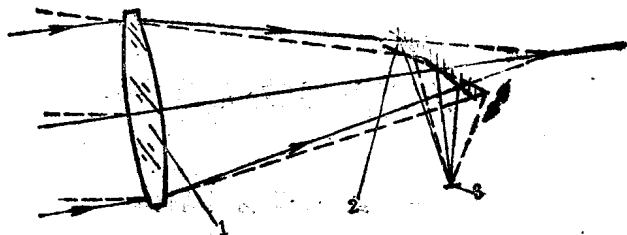


图 1.2 带扫描系统的典型光学系统

1—物镜 2—扫描摆镜 3—探测器

二、红外光学系统的设计原则

鉴于上述特点,设计红外光学系统时,应遵循下列原则,

1) 光学系统应对所工作的波段有良好的透过性能,即具有高的光学透过效率。

2) 光学系统在尺寸、象质和加工工艺许可的范围内,应使接收口径尽可能大,同时应具有尽可能大的相对孔径,以保证系统有高的灵敏度。

3) 光学系统应对噪声有较强的抑制能力,如用调制盘等作空间滤波器,这就要用探测器光学系统,如场镜、浸没透镜与光锥等来减小探测器尺寸,提高信噪比。

4) 光学系统的形式和组成应有利于充分发挥探测器的效能,如合理利用光敏面面积,保证高的光斑均匀性等。

5) 光学系统和组成元件力求简单,以利于减少能量的损失。

6) 反射系统成象良好的视场不大,但为了对大视场进行搜索成象,引入了各种物扫描器;又因接收器件的面积小,但为对具有大视场的光学系统成象,引入了各种象扫描器。

第二章 红外光学材料

一、红外光学材料的性能

在红外仪器和装置中红外光学材料用来制造透镜、窗口、滤光片、棱镜和整流罩等等。这些是任何红外仪器和装置的主要组成部分。这些材料应具备一定的物理性能和化学性能，以满足使用要求。随着红外技术及其应用的发展，目前，红外光学材料不仅广泛地使用在通常的红外装置和仪器中，而且也应用于超音速飞机、导弹、卫星以及各种跟踪、遥感和地球到卫星或到其他星球的气象通讯等研究领域。对红外光学材料的物理性能与化学性能也提出了愈来愈高的要求。

红外光学材料的最重要的物理性质之一就是它在某特定红外波段内的透过率。对于一各向同性的晶体材料，不计其反射损失，其透过率为：

$$T = I/I_0 = e^{-\alpha t} \quad (2.1)$$

式中 T ——透过率；

I_0 、 I ——入射、透射辐射强度；

α ——吸收系数(cm^{-1})；

t ——被测材料样品的厚度(cm)。

其中吸收系数 α 是波长的函数。一般来说，只有当 $T > 50\%$ 时，这种材料才可能用作透射材料。

任何红外光学材料，一般都不可能在整个波段而只能在红外光谱的某一波段具有透明性。光学材料的透射波段及透