

文章编号: 1002-1582(2008)01-0017-04

红外光学系统系列化方案^{*}

麦绿波^{1,2}, 金伟其¹, 冯生荣³

(1. 北京理工大学 信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

(2. 中国兵器工业标准化研究所, 北京 100089; 3. 昆明物理研究所, 昆明 650223)

摘 要: 分析了红外光学系统品种随意发展带来的问题, 研究提出了专用组件系列化发展的技术途径。选择适合的系列化的数学方法, 分析了红外光学系统的应用特性及系列化的条件, 研究提出了红外光学系统系列化的方案和型谱架构。

关 键 词: 光学系统; 红外; 系列化; 方案

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A

Serialization scheme for infrared optical system

MAILV-bo^{1,2}, JIN Wei-qi¹, FENG Sheng-rong³

(1. Beijing Institute of Technology, Department of Optical Engineering, Beijing 10008, China)

(2. China Ordnance Industrial Standardization Research Institute, Beijing 100089, China)

(3. Kunming Physics Research Institute, Kunming 650223)

Abstract: The problems of random development for infrared optical systems are analyzed. The development technology ways for special assemble serialization are researched out. The suitable mathematics methods for serialization are chosen. The application characteristics and serialization conditions for infrared optical systems are analyzed. The serialization scheme and serialization spectrum frame are researched out.

Key words: optical system; infrared; serialization; scheme

0 引 言

红外热成像系统主要由红外光学系统、扫描系统(或无扫描系统)、探测器、杜瓦瓶、制冷器(或非制冷)、处理电路、显示器等组成。由于热像仪是由红外光学、半导体材料、光电技术、电子学、制冷学等多学科技术组成的产品, 产品的广泛应用和各学科技术的发展形成了热像仪多品种、小批量的状况, 由此带来了高价格和低工程化水平的不利发展局面^[1]。在热像仪的主要组成部分中, 每种探测器根据应用要求可匹配多种规格的红外光学系统, 红外光学系统是随应用目的不同变化较大的组件, 该组件应用的个性化突出, 形成了大量的品种发展状况。红外光学系统材料昂贵、制造费用高, 红外光学系统品种的随意发展是热像仪价格昂贵的因素之一。在光学系统参数的系列化方面, 国内外主要采取对已有品种进行相近参数的归并方法, 还未见到应用科学的数值规律进行 F 数和放大倍率方面(尤其是红外光学系统)系列化的报导。但是, 在电器领域, 国内外已较为普遍地应用科学的优先数系对电器参数进行

系列化。实际上, 光学领域中 F 数和放大倍率系列化的要求也是很迫切的, 它们关系到对红外光学系统品种大量发展的控制。

红外光学系统与应用相关的主要因素为接收辐射通量的大小、成像质量、空间分辨力、视场、图像放大率、成本、系统的重量和体积等。各种应用对辐射通量、空间分辨力、视场、放大率、体积、重量、成本等因素要求不同, 形成了这些因素组合的品种。这些因素反映在设计参数上, 主要是红外光学系统口径、F 数、放大倍率、系统结构形式。红外光学系统口径与辐射通量和空间分辨力、成本相关, F 数与线分辨力相关, 放大率与视场相关, 结构形式与重量、体积、成本相关。以上数值型的因素有: 口径、F 数、放大倍率。非数值型的因素有结构形式。对于数值型因素, 只要其中一个数值有一微小变化(甚至小数点后的数有变化)就产生出新的品种。只要这些数值未进行统一规划, 就会有大量不必要的数值品种产生。对于非数值因素的结构形式, 品种因素来自于成像方式、扫描方式。成像方式有透射、反射、折反射等。扫描有平面镜扫描、转鼓扫描、折射扫描等。结构形

* 收稿日期: 2007-02-07; 收到修改稿日期: 2007-05-23

基金项目: 国防科工委技术基础计划项目(B0920050801)

作者简介: 麦绿波(1956-), 男, 广东省人, 中国兵器工业标准化所研究员, 在读博士研究生, 从事热成像总体技术研究。

E-mail: mailb7@yahoo.com.cn

式的不同和相互组合又产生出各种结构形式品种。对于每一种红外探测器,红外光学系统都会因性能参数和结构因素的变化产生许多品种,品种产生的关系如图 1 所示。

由于红外光学系统的品种是在探测器的基础上产生的,如红外

图 1 红外光学系统品种产生关系

光学系统的品种不进行规范,红外光学系统发展的品种数将会比探测器的品种多得多,将带来巨大的成本负担。红外光学系统品种发展的负担主要有两个方面,一方面是设计开发费用,另一方面是参数变化带来的光学模具等工装重新设计、制造的费用。红外光学系统要控制不必要的品种发展,就需规范其数值发展关系和结构匹配关系。规范和控制红外光学系统品种的发展,是热像仪优化发展的组成部分。红外光学系统在热像仪中属性为专用组件,专用组件的优化发展方向是组件的系列化,通过制定合理的参数间隔关系,形成科学的参数系列,控制不必要的品种发展,降低产品过多新品研制的成本,使红外光学系统的发展有很好的可计划性、可获得性和可生产性。

1 系列化优化方法

压缩产品品种的方法通常有两种:一种方法是提高产品的通用化程度,发展为通用产品;另一种方法是使产品随使用变化的主参数规律化,发展成系列化产品。在产品系统中,产品使用功能兼容能力强的分系统或组件适合发展为通用化部分,产品使用功能随应用变化大的组件适合发展为系列化产品,即产品系统中的专用组件适合发展成系列化产品。

系列化是根据同一类产品的发展规律和使用需求,将其主要参数按一定数列作合理安排或规划,对其形式和结构进行规定或统一,从而有目的地指导同类产品发展的一种标准化形式。系列化一方面是对现有品种进行压缩简化,另一方面是开发新的品种、规格,使这类产品构成品种齐全、数量适宜、结构和功能优化的产品体系,以最少的品种满足最大的使用范围。产品系列化的形成关系如图 2 所示^[2]。产品系列化前品种按任意需求随意发展,品种规格较多、较杂乱。应用系列化方法对产品主参数进行规整,压缩了不必要的品种规格,建立科学的品种发展关系。系列化应用的科学数值规律可以有多种方案,可以采用等差数列、等比数列、模数数列或其他

数列。等差数列一般用于参数范围比较狭隘的优化对象。等比数列一般用于机电产品的参数分级,最常用的是优先数系。优先数系是一种科学的数值制度,是一种无量纲的分级数系,适用于各种量值的分级。它又是十进几何级数,有许多优点,已制定为国际标准和国家标准。优先数系对优化对象起品种简化和协调作用。优先数系的公比分别可取 $\sqrt[5]{10}$ 、 $\sqrt[10]{10}$ 、 $\sqrt[20]{10}$ 、 $\sqrt[40]{10}$ 或 $\sqrt[80]{10}$,项值中含有 10 的整数幂的理论等比数列导出的一组近似等比的数列。优先数系各数列分别用符号 R_5 、 R_{10} 、 R_{20} 、 R_{40} 和 R_{80} 表示,称为 R_5 系列、 R_{10} 系列、 R_{20} 系列、 R_{40} 系列和 R_{80} 系列。它们的公比分别为:1.60、1.25、1.12、1.06 和 1.03。不同的优先数系有不同数值间密度,选用哪个数系要根据密度的合理性要求决定。例如, R_5 系列的数值为:1.0、1.60、2.50、4.00、6.30、10.0; R_{10} 系列的数值为:1.0、1.25、1.60、2.00、2.50、3.15、4.00、5.00、6.30、8.00、10.0。红外光学系统参数的优化采用优先数系数学方法进行系列化标定是比较适合的^[3]。

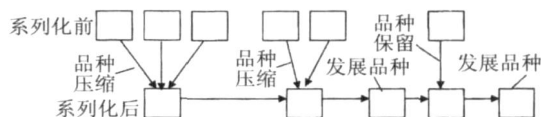


图 2 产品系列化形成关系

系列化实施的途径主要有三种:

- 1) 规整现有产品品种,建立合理的产品系列;
- 2) 应用科学的数值规律,结合产品的特点,在新产品开发一开始预测合理发展规律,建立指导未来发展的产品参数系列;
- 3) 规整现有产品和预测未来发展结合起来,建立合理的产品系列化关系。

系列化中每一规格的产品都应具有一定范围的通用性。因此,系列化是对同一类产品在“纵”、“横”方向上综合地进行优化。

2 光学系统应用特性及其系列化

红外光学系统是指红外光学成像、放大或扫描系统,主要用于接收、会聚目标发出的红外辐射或者完成特定的扫描功能。它主要包括红外物镜(望远镜)、扫描镜(选项)和其它辅助光学元件。对红外光学系统进行应用特性分析是开展参数系列化的基础。红外光学系统的系列化以现实为基础,因为现实的就是需求的。对已有数据进行统计,用科学的数学方法来规整和标定数值,使其合理化。制定系列化的方法就是使需求的技术关系更合理。

2.1 光学系统应用特性分析

红外光学系统的主要应用特性是放大倍率、视场、瞬时视场、相对口径或 F 数、口径等,它与热成像系统的图像大小、视场、分辨力和辐射灵敏度密切相关。放大倍率可改变视场和图像的大小,口径与辐射灵敏度相关,F 数、瞬时视场、口径与分辨力相关,视场决定物方的观察范围。红外光学系统的设计主要保证:红外辐射充分汇聚到探测器传感元上、获得必要的探测灵敏度和分辨力;视场设计实现使用目的所要求的物方空间;放大倍率设计使显示图像方便观察;光学系统结构设计要考虑用途对重量、体积和成本的要求。同时红外光学设计还要考虑经济性,避免过设计(红外光学材料价格昂贵)。口径和 F 数可决定热像仪的角分辨力和线分辨力。F 数与光学系统的衍射斑直径的关系为

$$d = 2.44F\lambda \quad (1)$$

式中 d 为瑞利斑的直径(μm); F 为 F 数(焦距与口径比); λ 为辐射波长(μm)。对于长波探测器,当 λ 为 $10\mu\text{m}$ 时, F 数为 1,衍射直径为 $24.4\mu\text{m}$ 。对于中波探测器,当 λ 为 $4\mu\text{m}$ 时, F 数为 1,衍射直径为 $9.76\mu\text{m}$ 。由(1)式可看出,波长、 F 数与分辨力成反比。波长越短分辨力越高, F 数小分辨力高。光学设计通常是使物点的衍射斑与探测器的尺寸相对应,使探测单元对点辐射充分接收,同时发挥好探测器分辨力作用。在空气介质中, F 数的理论极限值是 0.5,即 F 数 ≥ 0.5 。

光学系统口径与衍射斑角直径的关系为

$$D_b = 2.44\lambda D_0 \quad (2)$$

式中 D_b 为瑞利斑的角直径(μrad); D_0 为光学系统口径(mm)。可以看出:光学系统口径越大角直径越小,角分辨力越高。在光学分辨力方面, F 数与口径相关,分辨力的设计主要考虑 F 数, F 数的性能更综合一些,因此,参数系列主要考虑 F 数的系列化。光学系统物镜口径设计重点考虑辐射灵敏度的要求。热成像系统的角视场和瞬时视场取决于探测器的尺寸、探测元的尺寸和光学系统的有效焦距。 F 数和口径确定后,有效焦距也就确定了。光学系统有效焦距不需系列化。光学系统的放大倍率是可个性化设计的值,但它是一种不必要随意大量发展的值,应该进行系列化规范。

2.2 F 数系列化

红外光学系统组件的 F 数选择应与探测器匹配。 F 数的系列化值的选择确定主要考虑覆盖大部分应用。军用热像仪的主要工作波段为长波和中波。根据对商用探测器一维在 200 像元以上、700

像元以下的短波、中波、长波的大部分探测器统计^[1-8],可获得如下尺寸:

14(MW); 24; 25; 26; 28; 30; 31; 31.5; 35; 36; 37; 38; 40; 42; 43; 45; 46; 50(μm)。

设物点衍射斑直径为探测元尺寸,长波中值为 $10\mu\text{m}$,由式(1)求出以上探测元尺寸长波对应的 F 数:

0.98; 1.02; 1.07; 1.15; 1.23; 1.27; 1.29; 1.43; 1.48; 1.52; 1.56; 1.64; 1.72; 1.76; 1.84; 1.87; 2.05。

设物点衍射斑直径为探测元尺寸,中波中值为 $4\mu\text{m}$,由式(1)求出以上尺寸中波对应的 F 数:

1.43; 2.46; 2.56; 2.66; 2.87; 3.07; 3.18; 3.23; 3.59; 3.8; 3.9; 4.1; 4.3; 4.4; 4.6; 4.7; 5.1。

以上长波和中波 F 数值多达 34 种,需用优先数系数学对这些数值进行科学规律的数值划分、数量压缩和数值规整。以上尺寸是多国(6 个国家以上)探测元尺寸统计的结果。实际上,一个国家军事应用的主要器件一般只有 3~5 种,否则将给热像仪的研制和生产带来巨大的成本负担。根据以上计算的两列 F 数列的数值分布情况, F 数小于 1 的数一个就够,最大数应小于 6。为了考虑用光学系统适当延伸热像仪系统的性能,又不要增大光学系统多品种的成本负担, F 数的数量可考虑为器件数的两倍左右, F 数选 9~10 个为宜。从统计计算的 F 数看出, $1 < F < 2$ 的数最密, F 数的选择的密度可采用向大数值方向变疏的取向,这也符合器件采用大面阵的趋势。而优先数系 R_{10} 的数值系列的公比为 $\sqrt[10]{10}$,其化整值系列 R_{10}'' 为:

1.0; 1.2; 1.6; 2.0; 2.5; 3.0; 4.0; 5.0; 6.0; 8.0; 10.0

采用优先数系的 R_{10}'' 化整值系列对 F 数进行系列化较为合适。用以上分析的 F 数上、下限值对 R_{10}'' 数系截取,得红外光学系统专用组件 F 数的参数系列:

F 数系列: {0.8; 1.0; 1.2; 1.7; 2.0; 2.5; 3.0; 4.0; 5.0}

通过数学优化, F 数由 34 种优化为 9 种,使红外光学系统的品种大大压缩。以上 F 数的系列化,反过来也可规范探测器的尺寸,使优化关系相互作用,形成协调发展格局。对于系列化取掉的档间 F 数值,这些探测元尺寸的匹配可用 F 数系列的上档离焦匹配实现。

2.2 放大倍率系列化

红外光学系统的放大率是对应目标探测、分类、

识别、辨认等的需要。四种任务的内涵为：

- 1) 探测。在图像中确定某一特定部位存在有效军事目标的过程；
- 2) 分类。确定被测目标的类型,如装甲车辆或牵引炮等等；
- 3) 识别。确定目标的细类,如坦克或者装甲运兵车；
- 4) 辨识。确定目标的型号类别,如辨识出 M1A1 主战坦克。

以上任务观察能力与目标像临界尺寸(目标最小尺寸)覆盖探测器空间周频率有关。临界尺寸覆盖的周频率不同,观察能力的实现概率就不同。一个像元表征成像中的一个瞬时视场,图像空间频率一周包含两个像元。根据美国夜视实验室的研究,得出目标临界尺寸覆盖不同周期数时的观察能力概率,任务概率与观察能力对应关系见图 3^[4]。当目标临界尺寸覆盖 1 周时,探测概率为 50%,覆盖 2 周时,探测概率为 95%,覆盖 3 周时,探测概率为 100%。当目标临界尺寸覆盖 6 周时,分类概率 100%。当目标临界尺寸覆盖 10 周时,识别概率 100%。当目标临界尺寸覆盖 24 周时,辨认概率 100%。各观察能力所要求目标临界尺寸覆盖的周期数,基本上是 2 的倍数和 3 的倍数关系。根据对已有放大率的统计,统计值为：

0.75[×];1[×];1.5[×];1.9[×];2[×];2.3[×];2.4[×];2.5[×];2.6[×];2.7[×];2.8[×];3[×];3.2[×];3.3[×];3.8[×];4[×];4.4[×];4.6[×];4.9[×];5[×];5.3[×];5.6[×];6.6[×];6.7[×];7[×];7.5[×];8[×];9[×];9.5[×];10[×];12[×];13[×];14[×];15[×];15.4[×];20[×];30[×]

以上统计倍率为不完全统计,总数为 38 种。考虑任务观察能力的规律,倍率数一般为 2 倍或 3 倍数关系。从倍率现有数值看,大部分倍率值在 10[×]前,就是说 10[×]前间隔很密,数值的增加规律性差,许多倍率是在整数后的小数点差异,对倍率的贡献意义不大,10[×]后的数值较规整。10[×]前应重点规整,两头的极端情况可不考虑。应用优先数系选数系 R_{10}'' 进行倍率数值优化,公比为 $\sqrt[10]{10}$ 。10[×]前取 $R_{10}'' = P, P = 2 (R_{10}'' \text{系列隔 } 2 \text{ 个数取值})$ 的派生系列较为合适,10[×]后取 R_{10}'' 化整系列为宜。按以上数学

关系优化出放大倍率系列。红外光学系统专用组件放大倍率的参数系列为：

放大倍率系列:{1[×];1.5[×];2.5[×];4[×];6[×];10[×];12[×];15[×];20[×]}

经过系列化优化,放大倍率由原来的 38 种优化为 9 种,减少了 29 种。该放大倍率系列化方案对现有的放大倍率数值进行了大量压缩和优化,为未来红外光学系统的设计提供有益的指导。

2.3 光学系统结构与系列型谱

红外光学系统结构形式主要有 3 种:透射式、反射式、折反射式。它们各自有不同的优缺点,要根据系统的应用目的和成本要求来决定光学系统结构形式的选择。通常,选择透射系统还是反射系统与整机对重量、尺寸和成本要求有关。透射和反射系统选择的关系见表 1。折反射系统结构可对透射和反射两种结构的优缺点进行综合平衡。

表 1 透射和反射结构使用的优缺点对比

优缺点	优点	缺点
结构形式		
透射式	1)全通光口径,无中心遮挡; 2)像质优化潜力大; 3)容易获得多视场系统; 4)光学系统安装误差灵敏度较低; 5)结构设计简单。	1)可用材料品种有限; 2)温度效应严重(热敏感); 3)成本高。
反射式	1)无色差; 2)温度效应小; 3)基片材料成本低。	1)存在中心遮挡(光通量、MTF 降低) 2)次镜支撑、对准困难; 3)易受杂散辐射影响; 4)安装误差灵敏度高,装配难度大; 5)结构设计复杂
透射式和反射式有利使用段的评述	1)直径在几十毫米以下时,应用透射系统可得到重量轻、成本低的望远镜; 2)当直径超过几十毫米以上时,应用反射系统可得到重量轻、成本低的望远镜。	

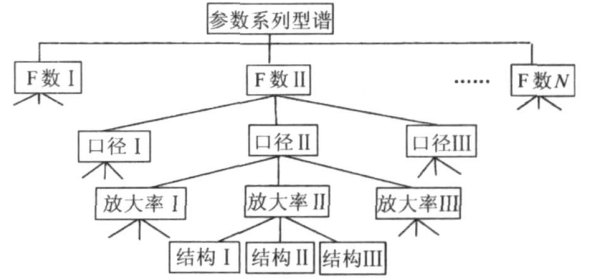


图 4 红外光学系统系列型谱组成关系

在参数系列主参数不变时,根据重量、体积和成本的要求不同,选取透射、反射或折反射等不同的光学系统结构形式,派生出了不同的产品类型,这些

(下转第 25 页)

的变化关系,随着输入功率的增大增益谱强度增强,产生调制不稳定性起始波数向布拉格波数趋近。

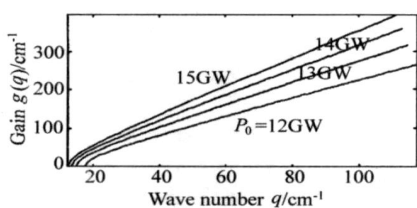


图 8 $Z=2$ 时,调制稳定性增益谱随输入临界功率的关系

2 结 论

在局部高斯变迹布拉格光纤光栅中在反常色散区和正常色散区都能产生调制不稳定性。

在反常色散区对于任何输入功率都可以产生调制不稳定性。但因为光纤光栅有较小非线性系数,由于光纤光栅的性质(前向波和后向波的相互作用)和调制不稳定性共同作用的结果,当只有输入功率达到一定数值时,才能产生明显的有规律的增益谱;并且,当输入功率一定时,增益谱随着传输距离的增加,增益谱强度不变宽度增加,增益谱中心频率远离布拉格频率,当传输距离达到耦合系数 κ 的最大值时(即 $Z = L/2$),增益谱的宽度最大;当输入功率、传输距离一定时,当 $f = -1$ 禁带之上能带底时,调制不稳定性增益的强度最强、宽度最窄;当远离能带底时强度减弱、宽度变宽。整个增益谱受到局部高

斯变迹函数的限制。

在正常色散区,当 $P_0 > \kappa/\gamma$, $q > (\kappa + G)[\kappa/(2G - \kappa)]^{1/2}$ 或 $q < -(\kappa + G)[\kappa/(2G - \kappa)]^{1/2}$ 时,调制不稳定性存在并一直持续到 $|q| \rightarrow \infty$; 同样整个增益谱受到局部高斯变迹函数的制约。

参考文献:

- [1] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. third Edition, Boston: Academic Press Inc., 2001. 228—234. 458—475.
- [2] Tai K, Hasegawa A, Tomita A. Observation of modulation instability[J]. Optical Fibers Physical Review Letters, 1986. 13(2): 135—137.
- [3] Eggleton B J, deSterke C M, Slusher R E, et al. Distributed feedback pulse generator based on nonlinear fibre grating[J]. Electron. Lett., 1996, 32: 2341—2342.
- [4] Eggleton B J, et al. Modulation instability and multiple soliton generation in apodized fiber gratings[J]. Opt. Commun., 1998. 149: 267—271.
- [5] Sterke C M. Theory of modulation Instability in fiber Bragg gratings[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1998. 15: 2660—2667.
- [6] Winful H J, Zamir R, Feldman S. Modulation instability in nonlinear periodic structures[J]. Appl. Phys. Lett., 1991. 58: 1001—1003.
- [7] Lee S, Khosravani R, Peng J, et al. Adjustable compensation mode dispersion using a high-birefringence nonlinearly chirped fiber Bragg gratings[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1999. 11: 982—983.
- [8] de Sterke C M, Sipe J E. Coupled modes and the nonlinear Schrödinger equation[J]. Prog. Opt., 1994. 33: 203—260.
- [9] 贾维国, 杨性愉. 强双折射光纤中任意偏振方向矢量调制不稳定性[J]. 物理学报, 2005, 54(3): 1054—1059.
- [10] 贾维国, 史培明, 杨性愉, 等. 保偏光纤中相近频率传输区域的调制不稳定性[J]. 物理学报, 2006, 55(9): 4575—4581.

(上接第 20 页)

类型与参数系列值构成了参数系列型谱。红外光学系统在同一个主参数时,可选择多个辅参数和多种结构与其相匹配,派生出许多型号产品。这些派生型号是主参数的系列型谱。红外光学系统的系列主参数定为 F 数,辅参数为:口径、放大倍率、焦距等。口径系列化已制定了国家军用标准 GJB3203^[9]。红外光学系统的结构形式只考虑透射、反射、折反射形式,不考虑扫描形式,红外光学系统参数系列型谱的组成关系如图 4 所示。图 4 中假设每种辅参数和光学系统结构形式最多选 3 种可能,一个 F 数主参数最多可派生出 27 个型号产品,整个 F 数系列型谱数量是很大的。如果每个辅参数都系列化,辅参数对应的光学系统品种就得到了控制,即使系列型谱数很大,他们都是这些有限系列参数的组合,不会带来大量的新设计工作。

3 结 论

以上的分析与研究得到了红外光学系统的 F 数系列化、放大倍率系列化和系列型谱组成关系的

方案。通过对红外光学系统的主参数和主要辅参数制定参数系列,并建立参数系列型谱关系,两者构建了红外光学系统优化发展的参数系列型谱体系。按照优化的参数系列开发少数优化产品,便可组合出大量各种用途的红外光学系统型号产品,不必再对每个用途的红外光学系统的组成因素——重新设计和研制。由此,可大大减少研制费用,缩短研制周期,降低生产成本。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 金烈元, 黄策斌, 麦绿波, 等. 武器装备的通用、系列化、组合化(模块化) [M]. 北京: 国防科工委军标出版发行部出版, 1996.
- [3] 王兴玲, 李晓沛, 王忠滨, 等. GB321-2005 优先数系 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [4] 孙再龙, 等. 被动光电系统 [Z]. 天津: 航天 8358 所, 1997.
- [5] 孙再龙, 等. 光电器件 [Z]. 天津: 航天 8358 所, 1998.
- [6] Singh R N. Design of high performance FLIR for multiple applications[J]. SPIE, 1996, 2818: 172—183.
- [7] Cabanski W. 3rd generation focal plane array IR detection modules at AIM[J]. SPIE, 2001, 4369: 547—558.
- [8] Cabanski W. High resolution focal plane array IR detection modules and digital signal processing technologies at AIM[J]. SPIE, 2000, 4028: 113—124.
- [9] 谭欣明, 麦绿波, 等. GJB3203-1998 军用光学仪器目镜物镜系列 [M]. 北京: 国防科工委军标发行部, 1998.