

## 红外双波段/双视场望远系统设计

潘枝峰<sup>1</sup>, 刘莎<sup>2</sup>, 张鹏<sup>1</sup>

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009;

2. 北京市复兴路14号80分队, 北京 100843)

**摘要:** 红外双波段/双视场光学系统能提升红外系统的探测能力, 为了满足探测要求, 提出了双波段/双视场红外望远光学系统的设计方法, 设计了一种双波段/双视场红外望远光学系统, 采用切换式视场变换方式, 使用了锗、硒化锌和氟化钡3种光学材料。仿真结果表明, 该系统结构简单, 像质良好, 在16 lp/mm处的MTF值大于0.5。

**关键词:** 光学设计; 红外光学; 双波段; 双视场

**中图分类号:** V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)09-0071-05

## Design of a Dual-Band/Dual-FOV Infrared Telescope

PAN Zhi-feng<sup>1</sup>, LIU Sha<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China;

2. Element 80, No. 14 Fuxing Road, Beijing 100843, China)

**Abstract:** The dual-band/dual-FOV optical system can improve the detection capability of an IR system. The optical design theory of dual-band/dual-FOV telescope system was studied and a dual-band/dual-FOV telescope system was designed. The system can switch between the FOVs, and three kinds of optical material were used, including Ge, ZnSe and BaF<sub>2</sub>. The simulation result shows that the system has simple structure and fine imaging quality, and the MTF value is higher than 0.5 at the spatial frequency of 16 lp/mm.

**Key words:** optical design; infrared optics; dual-band; dual-FOV

### 0 引言

红外成像系统具有隐蔽性好、抗干扰能力强以及在一定程度上识别伪装目标的能力, 因而在军事上广泛应用于红外夜视、红外侦察和红外制导等领域。但是随着伪装技术的发展, 侦察识别目标难度的增大, 单一波段的红外探测已经难以满足各种需求。由于目标在中波红外(3~5 μm)和长波红外(8~12 μm)表现出不同的特性, 因而可以利用双波段红外成像来获取更多的目标信息, 从而提高对目标的探测概率, 降低虚警率, 提升伪装识别能力。双视场红外成像光学系统因具有大小不同的两个视场, 可以实现大视场的目标搜索与小视场的跟踪。因此, 双波段/双视场成像系统能显著提高系统的性能和在各种武器平台上的通用性; 将广泛应用于机载前视红外和侦察系统, 武装直升机和舰载机目标指示系统, 水面舰船的预警、火控和近程

反导系统及目标探测和追踪等领域<sup>[1-2]</sup>。

对于双波段红外光学系统, 能用的光学材料种类较少, 色差难以校正, 通常采用两种办法来解决: 1) 在折射系统中引入衍射光学, 利用衍射光学元件具有负色散特性, 消除色差; 2) 采用反射式系统, 这种构型不会引入色差。国外从20世纪90年代开展研究设计密接三片透射式双波段光学系统, 目前已经实现工程应用<sup>[3-4]</sup>, 比较典型的是美国Raytheon公司研发的第三代前视红外设备, 采用透射式双波段/双视场红外系统加离轴无焦反射系统, 具有4个视场<sup>[5]</sup>; 国内在2000年以后开展了很多关于采用衍射元件辅助双波段光学系统设计的研究<sup>[6-7]</sup>。反射式系统存在结构复杂、装调困难等不利因素, 衍射元件加工困难、衍射效率低, 透射式双波段/双视场光学系统的设计难度大, 但其结构简单以及加工、装调技术成熟等特点使其在很多场合很受欢迎。

基于此背景, 本文对中、长波红外光学材料色散特性进行了分析, 设计了一种透射式红外双波段/双视场望远光学系统, 工作波段为3.7~4.8 μm/7.7~9.5 μm, 像质评价结果良好。

收稿日期: 2014-04-09

修回日期: 2014-04-22

作者简介: 潘枝峰(1980—), 男, 湖南耒阳人, 硕士, 工程师, 研究方向为光学设计与光电探测。

## 1 设计思想

### 1.1 光学结构形式

双视场光学系统一般有两种变倍方式:变倍组移入移出切换式变换视场,或变倍组沿光轴平行移动式变视场<sup>[8]</sup>。轴上移动方式具有体积紧凑、径向空间小等优点,但是由于存在移动的元件,大、小视场的光轴重复性精度不好保证;切换式构型能够保证一个视场光学零件固定不动,可以较好地保证光轴稳定性,但其具有体积大的缺点,而采用旋转切换方式,在一定程度上可减小体积。对于军用红外系统,尤其是红外、激光组合使用的系统,一般要求小视场有较好的光轴稳定性,切换式构型是军用红外系统常用的构型。切换式双视场光学系统结构如图1所示。

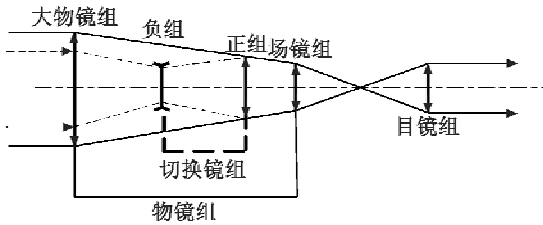


图1 光学系统结构图

Fig.1 Configuration of the optical system

图1中包含3组透镜:物镜组、切换镜组和目镜组。其中:物镜组焦距非常大,以保证有足够空间放入切换组,它由大物镜组和场镜组组成,将入射光线会聚在一次像点处;切换镜组由切换组负组和切换组正组组成,保证其插入光路后的新像面位置与大物镜组的像面位置保持不变;目镜组将一次像点处的像转移到无穷远处。

### 1.2 红外双波段设计

红外光学材料比较少,且有些材料在两个波段的性能差异很大(如锗在长波红外表现为低色散,在中波红外则表现为高色散),如何选择合适的光学材料,同时校正双波段的色差,是红外双波段光学系统设计的难点。把双波段光学系统当成一个宽波段光学系统(3.7~9.5 μm),设计的难点转换为宽波段二级光谱的校正。二级光谱是高级色差的一种,是对两端色光校正色差后与主色光之间的位置差,对于普通光学系统此值较小,但对于宽波段、长焦距光学系统,是必须考虑的重要像差<sup>[9-10]</sup>。双波段红外光学系统的设计可以先通过宽波段设计思路确定初始结构,再针对中、长波两个波段的像差进行优化设计。

折射元件的色散性质和二级光谱分别通过材料的阿贝数和相对部分色散来表示,即

$$V = \frac{n_R - 1}{n_S - n_L} \quad (1)$$

$$P = \frac{n_S - n_R}{n_S - n_L} \quad (2)$$

式中: $V$ 为阿贝数; $P$ 为相对部分色散系数; $n_S$ 、 $n_R$ 、 $n_L$ 分别为短波、参考波和长波对应的材料折射率。

对于宽波段光学系统,要同时校正色差与二级光谱,需要满足

$$\frac{1}{h_1 \phi} \left( \sum_{i=1}^n h_i \phi_i \right) = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n h_i^2 (\phi_i / V_i) = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n h_i^2 (\phi_i / V_i) P_i = 0 \quad (5)$$

式中: $h_i$ 为第一近轴光线在第*i*片透镜上的高度; $\phi$ 为光学系统的光焦度; $\phi_i$ 为第*i*片透镜的光焦度; $V_i$ 为第*i*片透镜材料的阿贝数; $P_i$ 为第*i*片透镜材料的相对部分色散系数。

图2为红外光学材料  $P$ - $V$  关系图。图中,大部分光学材料分布在中间线附近,通过对式(3)~式(5)分析可知,选择至少3种不同材料,其中一种材料偏离中间线,就有可能校正二级光谱。3种材料在图2中所围的三角形越大,越容易成功<sup>[9]</sup>。常见的中、长波红外光学材料如表1所示。

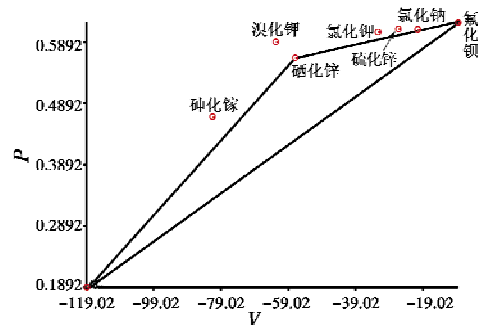


图2 红外光学材料  $P$ - $V$  图

Fig.2 The  $P$ - $V$  of infrared material

表1 光学材料参数

Table 1 The parameters of the infrared material

材料	折射率 $n_R$	阿贝数 $V$	部分色散 $P$
锗	4.0084	119	0.18916
碲化锌	2.4234	56.8	0.56371
硫化锌	2.2351	26.2	0.60945
氟化钡	1.4392	8.772	0.62116
氯化钠	1.5131	20.734	0.61028
氯化钾	1.4671	32.773	0.60591
溴化钾	1.5324	63.063	0.58984
砷化镓	3.294	81.563	0.46717

根据以上分析,考虑光学材料加工的可行性,选择锗、碲化锌、氟化钡作为双波段光学材料,其中,色散较小的碲化锌作为正透镜,色散较大的氟化钡材料作为负透镜,锗材料透镜辅助修正球差与彗差等,通过合适的光焦度分配,同时校正各种像差。

## 2 光学设计实例

### 2.1 设计参数

设计了一个红外双波段望远光学系统,其后面接的会聚光学系统焦距为 35 mm,采用 Sofradir 公司 320 × 240 中/长波红外凝视面阵制冷探测器,像元中心距为 30 μm。光学系统设计参数如表 2 所示。

表 2 光学系统设计参数

Table 2 Design parameters of the optical system

参数	数值
入瞳直径/mm	小视场 140
	大视场 34
视场/(°)	2.44/9.76
波长/μm	3.7 ~4.8/7.7 ~9.5
变倍比	8/2

### 2.2 光学系统设计

光学系统采用锗、硒化锌、氟化钡设计,为了修正光学系统的彗差,在物镜组中锗透镜上引入一个非球面。采用 CODE V 软件进行优化,设计过程中进行红外宽波段的设计,在像差优化到一定程度后,再使用多层结构对中波红外和长波红外进行相应的像差平衡,

最终优化得到的光学系统结构如图 3 所示,光学系统的参数如表 3 所示。

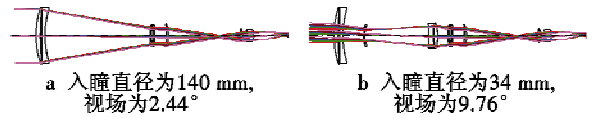


图 3 光学结构图

Fig. 3 Optical system layout

表 3 光学系统参数

Table 3 The parameters of the optical system

序号	名称	曲率半径/mm	材料
1	大物镜 1	229.22/776.25	硒化锌
2	大物镜 2	3007.08/1247.40	氟化钡
3	视场切换镜 1	92.73/54.913	硒化锌
4	视场切换镜 2	-600.61/121.136	氟化钡
5	视场切换镜 3	140.0365/-128.83	硒化锌
6	场镜 1	-764.42/-322.65	锗
7	场镜 2	-120.35/-207.84 (非球面)	锗
8	场镜 3	-120.63/-84.14	硒化锌
9	目镜 1	1298.65/-52.87	硒化锌
10	目镜 2	-32.97/-74.08	氟化钡

### 2.3 像质评价

双波段/双视场望远光学系统的传递函数(MTF)如图 4~图 7 所示。

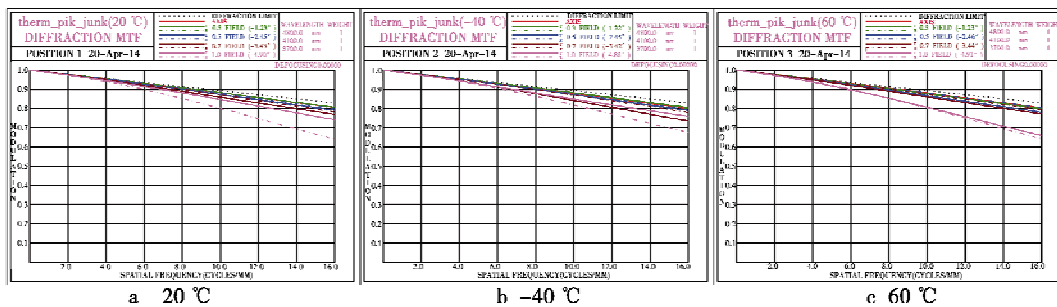


图 4 中波大视场 MTF 图

Fig. 4 MTF of the MWIR system in WFOV

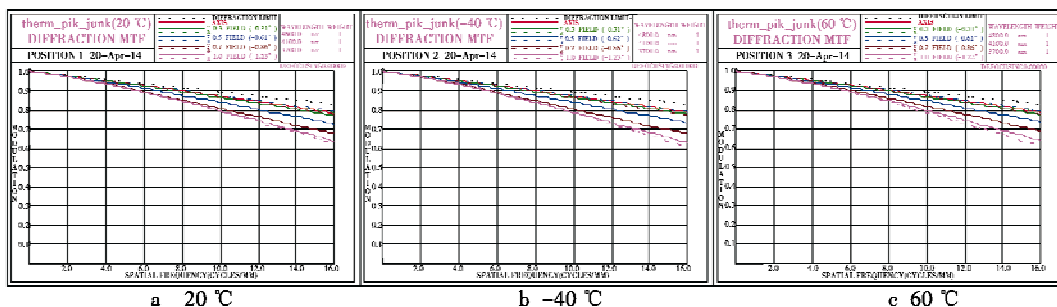


图 5 中波小视场 MTF 图

Fig. 5 MTF of the MWIR system in NFOV

军用红外系统的环境温度一般为 -40 ~ 60 °C,调整目镜组的前后位置,可以消除环境温度对像质的影响。在空间频率 16 lp/mm 处,中波光学系统 MTF 大于 0.6,长波光学系统 MTF 大于 0.5,光学系统成像质量良好。

光学系统的点列图如图 8 所示。中、长波大小视场的弥散板最大分别为 19 μm、21 μm、24 μm 和 25 μm,均小于探测器的像元尺寸。光学系统的色差如图 9 所示,均小于 14 μm,色差得到了良好的校正。

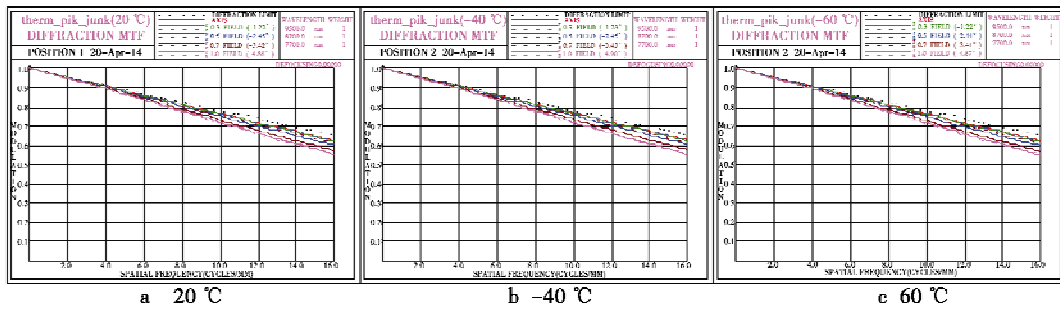


图6 长波大视场 MTF 图

Fig.6 MTF of the LWIR system in WFOV

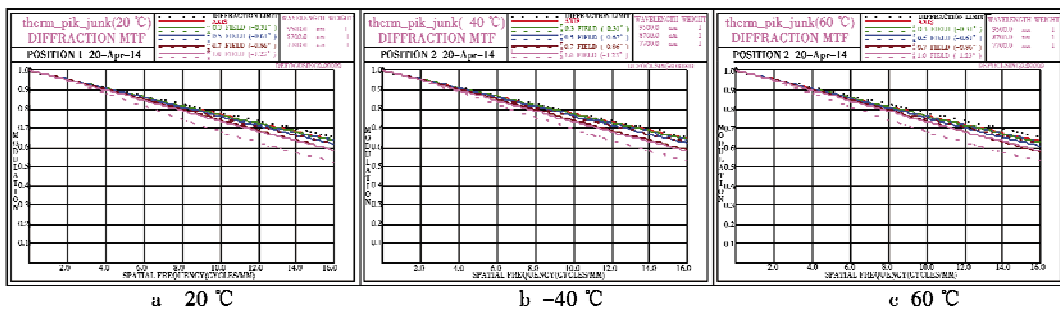


图7 长波小视场 MTF 图

Fig.7 MTF of the LWIR system in NFOV

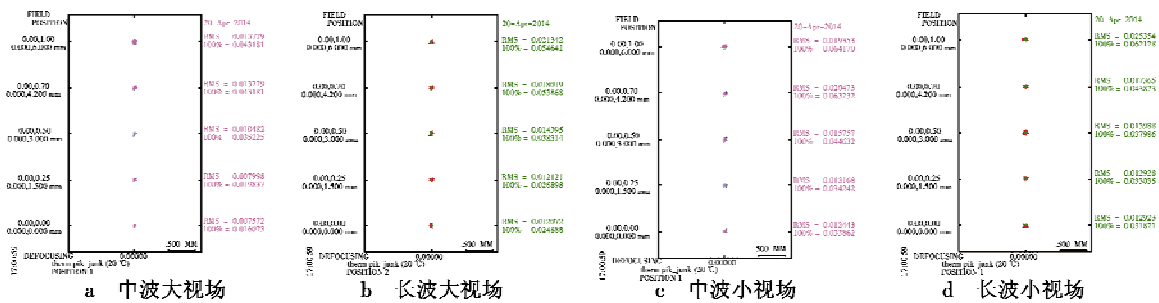


图8 光学系统点列图

Fig.8 Spot diagrams of the optical system

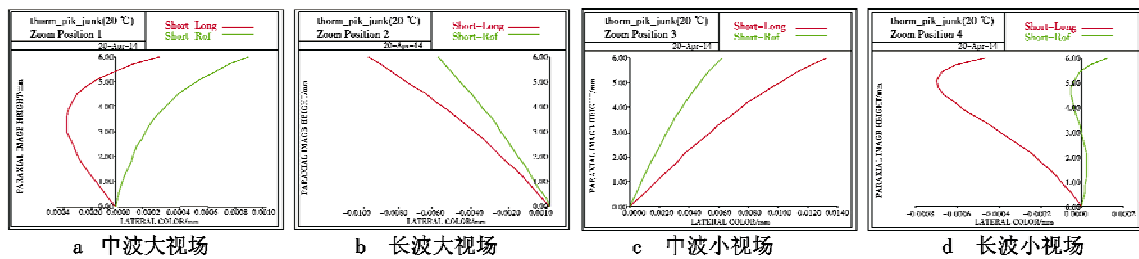


图9 光学系统色差曲线

Fig.9 Lateral color of the optical system

### 3 结论

本文研究了双波段/双视场望远光学系统设计的方法,并设计了一种红外双波段/双视场望远光学系统,它由物镜组、切换镜组和目镜组组成,结构简单,成像质量良好,能够适用于双波段的红外搜索跟踪系统和前视红外系统。

### 参考文献

[1] 吴海清,王海霞,赵新亮,等. 双波段/双视场红外光学系统设计[J]. 红外技术,2010,32(11):640-644.  
WU H Q, WANG H X, ZHAO X L, et al. Design of dual-band/dual-field IR optical system [J]. Infrared Technology, 2010, 32(11):640-644.

- [2] 王海涛, 耿安兵. 一体化红外双波段成像光学系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 489-492.  
WANG H T, GENG A B. Unified infrared imaging optical system of dual spectral[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(3): 489-492.
- [3] AMON MAX. Dual infrared band objective lens[P]. US Patent; US7408159, 2008-8-28.
- [4] 范永杰, 金伟其, 刘崇亮. 前视红外成像系统的新进展[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 189-194.  
FAN Y J, JIN W Q, LIU C L. New progress on FLIR imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2): 189-194.
- [5] VIZGAITIS J. Third generation infrared optics [J]. Proc SPIE 6940, 2005, doi:10.1117/12.779095.
- [6] 李爱民. 衍射双波段红外光学系统设计[J]. 光学仪器, 2010, 32(3): 64-67.  
LI A M. Design of dual band infrared optical system using diffractive elements[J]. Optical Instruments, 2010, 32(3): 64-67.
- [7] 刘环宇, 张良, 刘玉, 等. 红外双波段衍射光学系统设计[J]. 电光与控制, 2011, 18(5): 50-53.  
LIU H Y, ZHANG L, LIU Y, et al. Optical design of a dual-band infrared system based on a harmonic diffraction [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(5): 50-53.
- [8] 顿雄, 孟军合, 张振. 被动无热化切换式长波红外双视场望远镜[J]. 应用光学, 2011, 32(4): 767-772.  
DUN X, MENG J H, ZHANG Z. Athermlised dual FOV LWIR telescope[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(4): 767-772.
- [9] 王之江. 光学设计理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1985.  
WANG Z J. The basic theory of optical design [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [10] 徐明. 长波红外成像系统复消色差研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
XU M. Study on apochromatism of long wave infrared imaging optical system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

(上接第 57 页)

- recognition based on fuzzy bayesian network model [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(3): 37-41.
- [5] 张铁柱, 蒋宏. 机载雷达和红外数据融合的智能目标识别[J]. 红外与激光技术, 2010, 39(4): 756-760.  
ZHANG T Z, JIANG H. Intelligent target recognition based on the data fusion of radar and infrared imaging sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 756-760.
- [6] 许敬, 王晓锋. 基于贝叶斯概率的运动目标识别方法[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(1): 76-80.  
XU J, WANG X F. Recognition method of moving target using Bayesian probability theory [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013, 37(1): 76-80.
- [7] 杨磊, 王晓丹, 张玉玺. 一种基于多特征提取的雷达目标识别方法研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(12): 35-38.  
YANG L, WANG X D, ZHANG Y X. A radar target recognition approach based on multi-feature extraction[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(12): 35-38.
- [8] 柴慧敏. 态势估计中的关键技术研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2009.  
CHAI H M. Research on key technology in situation assessment[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [9] 史志富, 张安. 贝叶斯网络理论及其在军事系统中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.  
SHI Z F, ZHANG A. The theory and application of Bayesian network in military system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [10] 刘嘉敏, 谢海军, 刘强, 等. 基于改进小波矩特征的快速无损图像描述算法[J]. 自动化学报, 2009, 35(10): 1278-1282.  
LIU J M, XIE H J, LIU Q, et al. A fast non-destructive algorithm for image description based on improved wavelet moment features [J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(10): 1278-1282.
- [11] 王灵刚, 张蕾, 普杰信, 等. 改进 BP 神经网络在物体识别中的应用[J]. 电光与控制, 2012, 19(4): 68-71.  
WANG L G, ZHANG L, PU J X, et al. Application of improved BP neural network in object recognition [J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(4): 68-71.
- [12] KLEIN L A. 多传感器数据融合理论及应用[M]. 戴亚平, 刘征, 郁光辉, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.  
KLEIN L A. The theory and application of multi-sensor data fusion [M]. Translated by DAI Y P, LIU Z, YU G H. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [13] 于昕, 韩崇昭, 潘泉, 等. 一种基于 D-S 推理的异源信息目标识别方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(5): 788-790.  
YU X, HAN C Z, PAN Q, et al. Method based on evidence theory for multi-source target recognition [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(5): 788-790.