

文章编号: 1672-8785(2015)02-0036-06

基于 OpenGL 的飞行场景红外仿真

刘 灿¹ 陶冰洁¹ 郭雨蓉² 冯伟利²

(1. 电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 611731;

2. 北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076)

摘 要: 在现代化战争中, 红外探测与制导技术的使用已越来越广泛, 因此如何实时生成战场环境的红外图像就变得非常重要。在 Visual C++6.0 环境中, 利用 OpenGL 构建了可见光飞行场景; 主要基于红外辐射相关理论, 对场景中的目标和背景模型进行了红外辐射特性分析, 并计算出了各部分模型面元的红外辐射强度; 同时使用 LOWTRAN7 软件分析了大气衰减的影响, 并通过灰度量化和 OpenGL 渲染技术构建了一种实时、动态的飞行场景红外仿真系统。试验结果表明, 该系统能够实时生成飞行目标在不同红外波段及不同大气环境影响下的红外图像。

关键词: 飞行场景; 红外辐射特性; 大气衰减; 灰度量化

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.02.007

Infrared Simulation of Flying Scene Based on OpenGL

LIU Can¹, TAO Bing-jie¹, GUO Yu-rong², FENG Wei-li²

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: Since infrared detection and guidance technologies are more widely used in the modern war, how to generate the infrared images of battlefield environment in real time becomes very important. A visible flying scene is constructed by using Visual C++6.0 and OpenGL. The infrared radiation characteristics of the target and background models in the scene are analyzed mainly on the basis of the theory about infrared radiation. The infrared radiation intensity of each part of the models is calculated. At the same time, the effect of atmospheric attenuation is analyzed by using LOWTRAN7 and a real-time dynamic infrared flying scene simulation system is constructed through grey level quantization and OpenGL's rendering. The experimental result shows that the system can generate the infrared images of flying targets in different infrared wavebands in different atmospheric environment.

Key words: flying scene; infrared radiation characteristic; atmospheric attenuation; grey level quantization

收稿日期: 2014-12-15

作者简介: 刘灿(1991-), 男, 湖北天门人, 硕士生, 主要从事射频、微波、毫米波电路与系统研究。

E-mail: justliucan@sohu.com

0 引言

由于在历次现代战争中表现优异, 红外制导武器已成为高科技信息化战争背景下的主要武器。随着红外制导技术在军事领域的广泛应用, 红外仿真研究变得越来越重要。鉴于此, 西方发达国家纷纷投入大量人力物力进行研发。例如, Geoffrey Y G 等人基于实际拍摄的红外图像, 采用纹理映射方法生成了较为真实的背景的红外仿真图像^[1]。但由于拍摄图像固定, 很难反映出变化的红外场景。Conda T J 等人提出可考虑不同背景和环境下的红外仿真的第一原理模型, 并根据边界条件和初始条件计算物体的表面辐射分布^[2]。由于该模型几乎涵盖了所有内部因素和外界条件影响, 因此生成的红外模型十分精确, 但其计算量巨大。Sean A J 等人将 GPU 加速技术应用到红外场景仿真中, 并对导弹威胁进行了模拟, 很好地改善了图形绘制速度和效果^[3]。另外, 为了实现红外场景仿真, 国外一些著名公司还开发了多种大型红外仿真模块, 比如美国 MultiGen 公司研发的 Vega 软件系统中的 SensorVision 模块、英国 Equipe 公司研制的 Bluesky 模块以及美国 Quantum3D 公司研制的 viXsen 模块等, 但这些模块价格昂贵并对中国是禁售的。国内的红外仿真研究起步较晚, 但也取得了一些进展。李彦志等人基于红外辐射相关理论, 建立了一种分析飞机红外辐射的理论计算模型^[4]。王学伟等人采用 OpenGL 三维图形库, 将影响红外图像的各种因素作为输入参数, 模拟生成了飞机动态目标的红外图像^[5]。王敬美利用 Vega 软件中的红外模块对飞行和海洋场景进行了红外成像仿真^[6]。卢建等人分别建立了针对飞机目标和红外传感器的仿真模型^[7], 实现了飞机目标在不同条件下的红外图像生成。该方法仿真速度快, 便于工程设计与实现, 但没有考虑大气衰减以及外部环境的影响。本文利用 Visual C++ 和 OpenGL 构造了战场飞行环境的可见光场景, 并基于红外辐射相关理论, 对场景中目标和背景的红外辐射特性

进行了分析。考虑到背景辐射对飞行目标有影响, 计算出了各模型在不同状态下的红外辐射强度。在利用 LOWTRAN7 计算大气衰减之后, 根据各模型到达探测器的辐射强度进行了灰度量化处理, 并通过 OpenGL 渲染生成出了红外仿真图像。

1 飞行目标的红外模型建立

1.1 蒙皮红外辐射模型

飞行器在大气中高速飞行时, 其蒙皮与气体摩擦产生的气动加热效应不可忽视, 由此引起的蒙皮温度变化可根据以下经验公式计算:

$$T_s = T_0 \left[1 + \frac{r(\gamma - 1)}{2} M^2 \right] \quad (1)$$

式中, T_s 为蒙皮的表面温度; T_0 为飞行器周围的大气温度; r 为温度恢复系数, $r=0.82$; γ 为空气的定压热容量与定容热容量之比, $\gamma=1.4$; M 为飞行速度的马赫数。

大气温度 T_0 与海拔高度 H 有关: 当 $0 \leq H \leq 11000$ m (对流层) 时, $T_0 = 288.2 - 0.0065H$ (K); 当 $11000 \text{ m} < H \leq 20000$ m (平流层) 时, $T_0 = 216.7$ K; 当 $20000 \text{ m} < H \leq 32000$ m 时, $T_0 = 216.7 + 0.001(H - 20000)$ (K); 加力状态下的飞行器通常在平流层中飞行。

从上述分析中可以看出, 蒙皮温度与飞行速度及飞行高度有关。根据黑体辐射理论, 建立蒙皮的温度场模型后, 可由普朗克公式计算出蒙皮在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的红外辐射亮度和辐射强度:

$$L = \frac{\varepsilon_0}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_s} - 1} d\lambda \quad (2)$$

$$I = L \cdot S_0 \cdot \cos \theta_0 \quad (3)$$

式中, c_1 和 c_2 分别为第一和第二辐射常数; ε_0 为蒙皮的发射率, $\varepsilon_0=0.6$; S_0 为飞行器的截面积; θ_0 为截面法线与探测方向之间的夹角。

1.2 尾喷管的红外辐射模型

作为被排出尾气加热的圆柱形热腔体, 尾喷管可看作是发射率 $\varepsilon_1=0.9$ 的灰体。由此可根据普朗克公式计算出尾喷管在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的红外辐射强度:

$$I = \frac{\varepsilon_1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \cdot S_1 \cdot \cos \theta_1 \quad (4)$$

式中, T 为尾喷管的温度, 等于排出尾气的温度; S_1 为尾喷口的面积, $S_1 = \pi r^2$, 其中 r 为尾喷口的半径; θ_1 为尾喷口的截面法线与探测方向之间的夹角。

1.3 尾焰的红外辐射模型

由于飞行器的尾焰温度相当高, 可以忽略环境气流等因素对其的影响。发动机所排尾焰的主要成分是 CO_2 和 H_2O 这两种典型的选择性辐射体气体。尾焰的主要辐射来自于 CO_2 辐射带, 近似等效为 $2.4 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \sim 4.55 \mu\text{m}$ 、 $\varepsilon_2=0.5$ 的灰体辐射, 因此可算出尾焰的红外辐射强度:

$$I_{\text{CO}_2} = \frac{\varepsilon_2}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_2} - 1} d\lambda \cdot S_2 \cdot \cos \theta_2 \quad (5)$$

式中, S_2 为尾焰面积; θ_2 为尾焰的截面法线与探测方向之间的夹角; T_2 为喷出尾焰的静温。

设尾气通过发动机涡轮后的静温为 T_1 、静压为 P_1 , 喷出后的静温为 T_2 、静压为 P_2 , 根据流体力学的有关知识可得:

$$T_2 = T_1 (P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (6)$$

式中, γ 为气体比热, 对于航空发动机, 一般取 1.3; 对于涡轮喷气式航空发动机, P_2/P_1 一般取 0.5; 对于涡轮风扇航空发动机, P_2/P_1 一般取 0.4。

假设某飞行目标的速度 M 为 1.5 马赫, 飞行高度 H 为 15000 m, 尾喷管温度 T_1 为 1023 K, 根据上述公式可算出不考虑背景辐射和大气衰减影响时, 飞行目标的各部分面元在单元面积上的零视距红外辐射强度 (见表 1 (侧视))。

表 1 飞行目标的各部分面元在单位面积上的零视距红外辐射强度 ($\text{W}/\text{sr}\cdot\text{m}^2$)

$\lambda/\mu\text{m}$	0.5 ~ 3	3 ~ 5	8 ~ 12
蒙皮	0.0063	0.99	21.87
尾喷管	5140.4	6391.3	1508.2
尾焰	639.7	214.2	0

2 飞行场景的背景模型

通过对飞行目标表面面元的红外辐射进行建模, 可以得到目标的零视距红外辐射强度。

此外, 目标在飞行过程中会受到背景辐射的影响。背景辐射主要包括太阳直接辐射、地球反射太阳辐射和地球自身红外辐射三部分。另外, 为了模拟更加复杂的战场环境, 本文建立了海面背景的红外辐射模型。

2.1 太阳直接辐射

设 Q_1 为任一时刻飞行目标表面面元所接收到的太阳辐射强度。由于太阳距离地球很远, 可认为太阳光是辐射强度均匀的平行光。式 (7) ~ 式 (9) 分别为高空目标、低空目标和地面目标所对应的计算公式:

$$Q_1 = a_i S_0 F_{si} A_i [1 + 0.0033 \cos(360n/370)] \quad (7)$$

$$I_n = S_0 [1 + 0.0033 \cos(360n/370)] p^m \quad (8)$$

$$Q_1 = a_i I_n F_{si} A_i \quad (9)$$

式中, a_i 为面元的吸收率; S_0 为太阳常数; F_{si} 为太阳辐射角系数; A_i 为面元面积; n 为天数, 本文在春季时取 81, 夏季取 145, 秋季取 243, 冬季取 334; m 为大气质量; p 为大气透明度; I_n 为经过大气后的太阳辐射强度。

2.2 地球反射太阳辐射

设 Q_2 为任一时刻飞行目标表面面元所接收到的地球反射太阳辐射强度。式 (10) 和式 (11) 分别为高空目标和低空目标所对应的计算公式:

$$Q_2 = a_i \rho_E S_0 F_{sei} A_i \quad (10)$$

$$Q_2 = a_i \rho_E I_n F_{sei} A_i \quad (11)$$

式中, ρ_E 为反照率; F_{sei} 为地球反射辐射角系数。

2.3 地球自身红外辐射

地球表面会吸收太阳辐射的能量, 因此可以把地球看作是一个辐射强度均匀的热辐射平衡体, 其各部分的辐射强度 M_0 以及面元所接收到的地球自身红外辐射强度 Q_3 为

$$M_0 = (1 - \rho_E) S_0 / 4 \quad (12)$$

$$Q_3 = a_i M_0 F_{ei} A_i \quad (13)$$

表 2 受背景影响后的蒙皮面元在单位面积上的红外辐射强度 ($\text{W}/\text{sr}\cdot\text{m}^2$)

	春 ($n=81$)	夏 ($n=145$)	秋 ($n=243$)	冬 ($n=334$)
Q_1	271.64	271.69	274.19	278.88
Q_2	110.92	110.94	111.96	113.88
Q_3	83.11	83.11	83.11	83.11
蒙皮 ($0.5 \sim 3 \mu\text{m}$)	465.67	465.74	469.27	475.88
蒙皮 ($3 \sim 5 \mu\text{m}$)	466.66	466.73	470.26	476.86
蒙皮 ($8 \sim 12 \mu\text{m}$)	487.53	487.61	491.14	497.74

式中, F_{ei} 为地球辐射角系数。

假设目标面元的吸收率 a_i 为 0.54, 反照率 ρ_E 为 0.35, 太阳辐射角系数 F_{si} 为 0.6, 地球反射辐射角系数 F_{sei} 为 0.7, 地球辐射角系数 F_{ei} 为 0.7, 大气透明度 p 为 0.8, 大气质量 m 为 2, 此时可以计算出不同季节中蒙皮面元受环境影响后的红外辐射参数 (见表 2 (侧视))。

2.4 海面背景的红外辐射模型

由文献 [9] 可知, 在模拟海面背景的红外成像时, 对于海面发射率, 可以使用经验模型进行计算 (能获得足够高的精度), 然后根据黑体辐射的普朗克公式算出海面背景的红外辐射强度。经验模型认为, 海面发射率只与发射方向有关, 且可表述为发射方向的函数:

$$\varepsilon_3 = 0.98[1 - (1 - \cos \theta)^5] \quad (14)$$

式中, θ 为天顶角, 即入射方向与地面法线之间的夹角。

3 大气传输衰减

飞行目标在大气中飞行时, 任何红外探测器所接收到的都是经过大气衰减后的红外辐射强度。大气衰减主要与大气中的气体分子吸收、气体分子与微粒气溶胶散射以及降雨降雪等气象条件有关。本文使用 LOWTRAN7 大气传输软件建立大气传输衰减模型, 然后获得 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的平均透过率数据, 并得到经过大气衰减后的各部分的红外辐射强度:

$$I_a = \overline{\tau}_a \cdot I \quad (15)$$

4 灰度量化的

对探测器接收到的各部分模型的红外辐射强度进行均匀量化 (转换为 0~255 之间的灰度等级), 并将其赋予相应的像素, 从而得到红外仿真图像。

找出每一帧图像中的最大和最小辐射强度值 (R_{max} 和 R_{min}), 并计算对应的辐射间隔 r , 最后计算出各辐射强度 R 所对应的灰度值 G :

$$r = \frac{R_{max} - R_{min}}{256} \quad (16)$$

$$G = \frac{R - R_{min}}{r} \quad (17)$$

5 实验结果与分析

图 1 所示为在 Visual C++6.0 环境中基于 OpenGL 构建的动态飞行场景。通过设置红外参数和大气参数, 并根据各部分模型的红外辐射特性可计算出模型面元的红外辐射强度和平均大气透过率。在得到探测器所接收到的红外辐射强度并量化出对应的灰度等级之后, 利用 OpenGL 的渲染技术可得到实时动态的飞行场景红外仿真系统。图 2 ~ 图 6 为选择 1976 年美国标准大气模式时基于红外场景仿真的导弹仿真结果的部分截图。

图 2、图 3、图 4 所示分别为不考虑大气衰减时同一波段、不同飞行速度的零视距红外场景。可以明显看出, 飞行速度的增大会影响蒙皮的气动加热效应; 随着蒙皮温度的上升, 辐射亮度增加, 符合飞行目标蒙皮模型的红外辐射特性。图 5 ~ 图 8 分别为飞行速度为 1.5 马赫、波

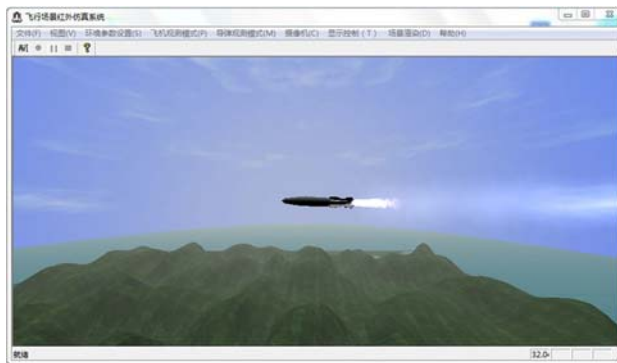


图 1 可见光场景

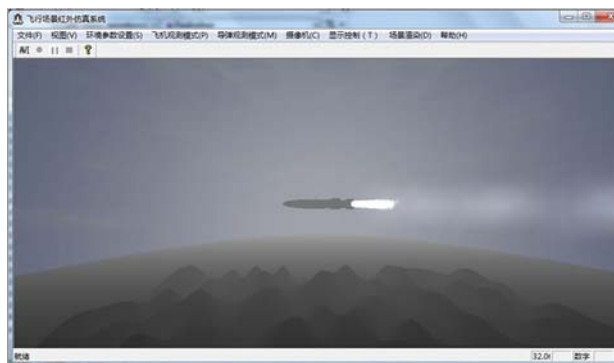


图 2 零视距红外场景 (0.5 ~ 3 μm, 0.75 马赫)

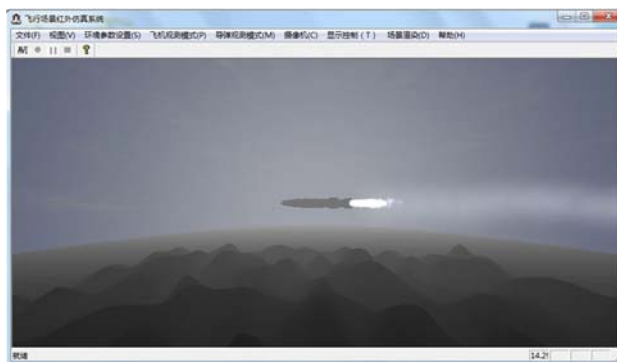


图 3 零视距红外场景 (0.5 ~ 3 μm, 1.5 马赫)

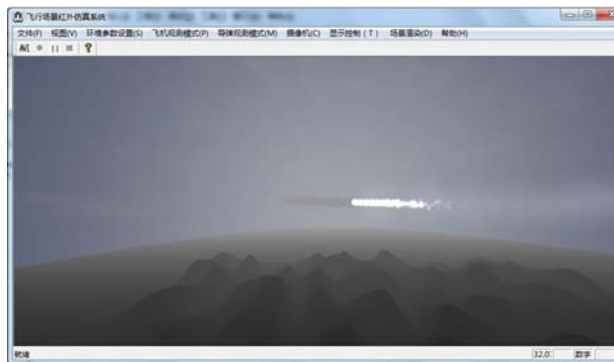


图 4 零视距红外场景 (0.5 ~ 3 μm, 3 马赫)

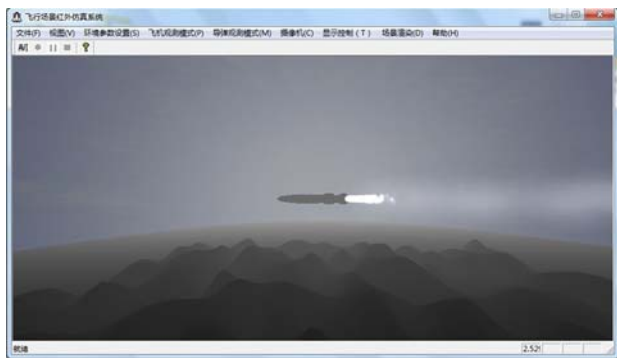


图 5 无云雨红外场景 (0.5 ~ 3 μm, 1.5 马赫)



图 6 75 mm/h 暴雨红外场景 (0.5 ~ 3 μm, 1.5 马赫)



图 7 无云雨红外场景 (3 ~ 5 μm, 1.5 马赫)



图 8 无云雨红外场景 (8 ~ 12 μm, 1.5 马赫)

段及气象条件不同(考虑大气衰减)时的红外仿真图像。通过对比图3可以看出,经过大气衰减后,探测器所接收到的目标的红外辐射强度降低,相应灰度值减小;图5和图6考虑了气象条件对大气衰减的影响,即降雨强度越大,大气衰减越强,大气透过率也越小。

通过对比图5和图7可以看出,在 $0.5 \sim 3 \mu\text{m}$ 和 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段,相对于蒙皮而言,尾焰为主要辐射源,因此在实际应用中可将其作为主要的红外探测目标。由于尾焰主要来源于 $2.4 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \sim 4.55 \mu\text{m}$ 的 CO_2 红外辐射带,所以在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段,尾焰没有产生辐射,由蒙皮气动加热产生的辐射也达到了较高强度。此时蒙皮为主要辐射源,这一分析也得到了图8的证实。上述实验结果表明,该仿真系统能够实时生成飞行目标在不同状态及不同大气环境影响下的红外图像。

6 结束语

本文在使用VC++6.0和OpenGL构建的可见光飞行场景的基础上,根据红外辐射相关理论,重点分析并建立了飞行场景中目标和背景的红外辐射模型,然后考虑了背景辐射对目标红外成像的影响。另外,本文还利用LOWTRAN7软件计算了不同气象条件下的大气透过率,使得该仿真系统更加具有实际意义。仿真测试结果表明,该系统能够实时生成飞行场景在不同状态及不同大气环境影响下的红外图像,其仿

真速度快,便于工程实现。鉴于研究对象存在诸多变化因子和不可准确测量参数等因素,本文仿真结果的精确度仍有进一步提高的空间。

参考文献

- [1] Geoffrey Y G, Jay M, Julius K, et al. A Digital Scene Model for Simulation of Visual and Inflated Imagery [C]. SPIE, 1987, 781: 81-86.
- [2] Conda T J, Jones J C, Gertrart G R, et al. PRISM Based Thermal Signature Modeling Simulation [C]. Houghton: Symposium on Ground Vehicle Signature, 1987.
- [3] Sean A J, Rusty O B, Barry E M. Accelerating Missile Threat Simulations Using Personal Computer Graphics Cards [J]. Simulation, 2006, 82(8): 549-558.
- [4] 李彦志, 孙波, 王大辉. 飞机红外辐射建模与仿真 [J]. 红外技术, 2008, 30(5): 252-255.
- [5] 卢建, 辛玉林, 陈曾平. 飞机目标红外成像建模与仿真 [J]. 电子测量技术, 2010, 33(7): 65-68.
- [6] 王敬美. 飞行场景和海洋场景的红外成像仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [7] 王学伟, 张卫国. 飞机目标动态红外图像的计算机生成 [J]. 红外与激光工程, 1999, 28(2): 21-24.
- [8] 江照意. 典型目标场景的红外成像仿真研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [9] 任海刚, 陈汉平, 刘玉峰, 等. 红外仿真中的海面发射率模型 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 36-39.
- [10] 刘林华, 董士奎, 余其铮, 等. 红外 $1 \sim 14 \mu\text{m}$ 波长间隔 $0.1 \mu\text{m}$ 上大气平均透过率(II): 水蒸气的透过率 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(6): 75-78.
- [11] 刘林华, 董士奎, 余其铮, 等. 红外 $1 \sim 14 \mu\text{m}$ 波长间隔 $0.1 \mu\text{m}$ 上大气平均透过率(I): 二氧化碳的透过率 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(5): 9-13.

新闻动态 News

美国西北大学演示高工作温度中波红外成像技术

据www.mccormick.northwestern.edu网站报道,美国西北大学的研究人员已经研制出一种可在高工作温度下进行高分辨率中波红外成像的InAs/GaSb II类超晶格。由于无需使用液氮进行制冷,工作温度较高的红外探测器通常具有体积更小、成本更低、便携性更强等特点。

他们表示,这项新技术在获取人体的红外图像方面卓有成效,其器件采用基于pMp结构的 320×256 元单极型焦平面阵列,并在 $81 \sim 150 \text{ K}$ 温度范围内具有优秀的红外成像能力(可操作性约为98%)。

当工作温度为 150 K 、偏压为 -50 mV 时, $27 \mu\text{m}$ 像元的暗电流密度为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$,50%截止波长为 $4.9 \mu\text{m}$,峰值响应率处($4.6 \mu\text{m}$)的量子效率为67%,比探测率为 $1.2 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

□ 岳桢千