

文章编号: 1672-8785(2012)01-0027-06

金星热气球与环境红外透射特性的仿真研究

周敏璐² 关泽群^{1,2} 冯甜甜² 李爱霞²

(1. 同济大学遥感与空间信息技术研究中心, 上海 200092 ;

2. 同济大学土木工程学院测量与国土信息工程系, 上海 200092)

摘 要: 考虑到搭建用于模拟金星环境的实验室具有相当的困难并存在一定的危险, 首先通过计算机仿真模拟金星的大气环境, 然后在该环境下仿真热气球从脱离所有的平台到最终稳定在某一高度上进行探测的整个运动过程。通过比较不同参数下的热气球仿真结果, 可以更好地辅助热气球的设计。最后提出建立地球与金星等效水平路程关系的新思路, 用以仿真红外辐射在金星大气中的透射特性, 为红外载荷系统的设计提供参考信息, 也为后续金星热气球及其红外载荷系统的研究提供一个新的方向。

关键词: 金星; 热气球; 水蒸气; 红外; 仿真

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.01.004

Simulation Study of Venus Balloons and Infrared Transmittance Characteristics in Venus Environment

ZHOU Min-lu², GUAN Ze-qun^{1,2}, FENG Tian-tian² LI Ai-xia²

(1. Research Center of Remote Sensing and Spatial Information Technology,

Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Surveying and Geoinformatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Because it is difficult and somewhat dangerous to build a laboratory for simulating Venus environment, we firstly simulate the atmospheric environment of Venus by using computers. Then we simulate the whole process of a balloon moving from all platforms to a final stable height in the above environment. By comparing the simulation results of the balloon under different parameters, we can assist the design of the balloon for Venus detection better. Finally, we put forward a new idea of establishing the Earth and Venus equivalent horizontal distance relationship, so as to simulate the infrared transmittance characteristics in the Venus environment, provide reference information for the design of Venus infrared payload systems and also provide a new direction for the follow-up study of Venus balloons and their infrared payload systems.

Key words: venus; balloon; water vapor; infrared; simulation

0 引言

传统的金星高空远距离探测方法虽已成功获取众多信息, 但金星特殊的浓硫酸云层和 CO₂

占绝对主导地位的厚重大气严重限制了该方法对金星地表及近地表信息的获取。而随着新一代超轻传感器的问世以及可抗高温高压且适用于浓硫酸环境的新型材料的成功研制, 借助于热

收稿日期: 2011-12-14

作者简介: 周敏璐 (1987-), 女, 广西人, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感与图像处理。 E-mail: siator@163.com

气球平台的低空探测方法将会取代传统方法,从而成为今后金星探测研究的重要发展方向。目前,国外已有许多研究人员针对金星热气球的可行性进行了相关研究^[1-5]。

金星在历史上是否曾有海洋、活火山以及生命,一直是神秘金星的未解之谜。2005 年,欧空局“金星快车”带着人类强烈的求知欲望向金星发起全面探测。其携带的高分辨率傅里叶变换红外光谱仪用于寻找活火山的存在;紫外-红外光谱仪用于寻找大气层中水分子的痕迹;紫外-可见光-红外成像光谱仪用于跟踪低空大气云团,探寻微生物的存在。可见光红外系统在金星探测中具有举足轻重的作用,将会成为金星热气球平台中的重要载荷部分。

因此,本文先在计算机环境下模拟金星大气温度、压强和密度随高度的变化情况。然后在金星大气环境中仿真热气球从脱离所有的平台(包括运载飞行器和辅助降落伞等)到最终稳定在某一高度的整个运动过程,以说明金星热气球的可行性。另外,通过改变一些重要参数的取值并比较不同参数下的仿真结果,可以为金星热气球的設計提供参考信息。最后研究地球与金星环境的红外辐射特性,建立两者的等效水平路程关系式,并仿真红外辐射在金星大气中传输时的透射情况,从而更好地辅助热气球红外载荷系统的设计与分析。

1 金星大气环境仿真

在金星大气中,大量二氧化碳和浓硫酸云层使得温室效应在金星上大规模地存在,导致表面温度高达 480 ℃。金星的大气密度是地球的 100 倍,压强是地球的 90 倍。

由于大气环境如此“恶劣”,无论是在热气球还是在作为其载荷的红外系统的初步设计阶段,构造与实际环境类似的实验室具有较大难度。另外,“高温、高压、高密度”的大气环境对研究人员及其周围环境的安全都会构成威胁,因此搭建金星环境实验室几乎是不可能的。而计算机仿真正是解决这类实际上不可能或者具

有一定难度的问题的一种有效途径。因此,本文通过用计算机来模拟金星的大气环境,可在大幅降低实验成本、保证人员安全以及提高工作效率的同时,为后续实验提供基本的金星大气数据。

基于文献[6]给出的纬度小于 45° 时的金星大气数据,本文拟合了金星的大气温度、压强和密度随高度的变化关系,并利用 MATLAB GUI 进行了可视化设计,为数据的获取与比较提供了便利(见图 1)。

2 金星热气球的仿真与分析

本文基于热气球的传热速率方程和运动方程^[7],参考 Izutsu 等人^[5]设计的热气球(基本结构见图 2,其总质量为 10 kg,液态水的质量为 5 kg,气球半径为 0.17 m,气球长度为 16.5 m,起始高度为 45 km,起始速度为 -10 m/s)说明金星热气球的可行性。图 3 所示为热气球运动过程的仿真结果。

从热力学的角度来分析,热气球的表面积大小会影响热气球吸收热量的效率,这会直接反映在气球内部温度变化的快慢上。另外,热气球的截面设计会直接影响空气阻力的大小,从而使运动过程中节点出现的位置和时间发生变化。因此,对气球的底面半径 R 和长度 H 的设计是至关重要的。

从运动学的角度来分析,当气球达到最大膨胀体积后,经过一段时间的运动总会达到一个平衡点,使得气球不再运动。此时,空气阻力为零,浮力与重力是平衡的。而为了达到最终状态下的二力平衡即 $\rho_a g V = m_{tot} g$ (大气密度 ρ_a 是关于高度 z 的函数,最大体积 V 与底面半径 R 及气球长度 H 有关),关键是要设定底面半径 R 、气球长度 H 和气球总质量 m_{tot} 的取值,并观察最后的平衡点是否为想要达到的目标高度 z 。

因此,基于本文在 MATLAB GUI 下针对热气球运动仿真的程序,可以分别改变 m_{tot} 、 R 和 H 的取值,得到不同参数下的仿真结果(见图

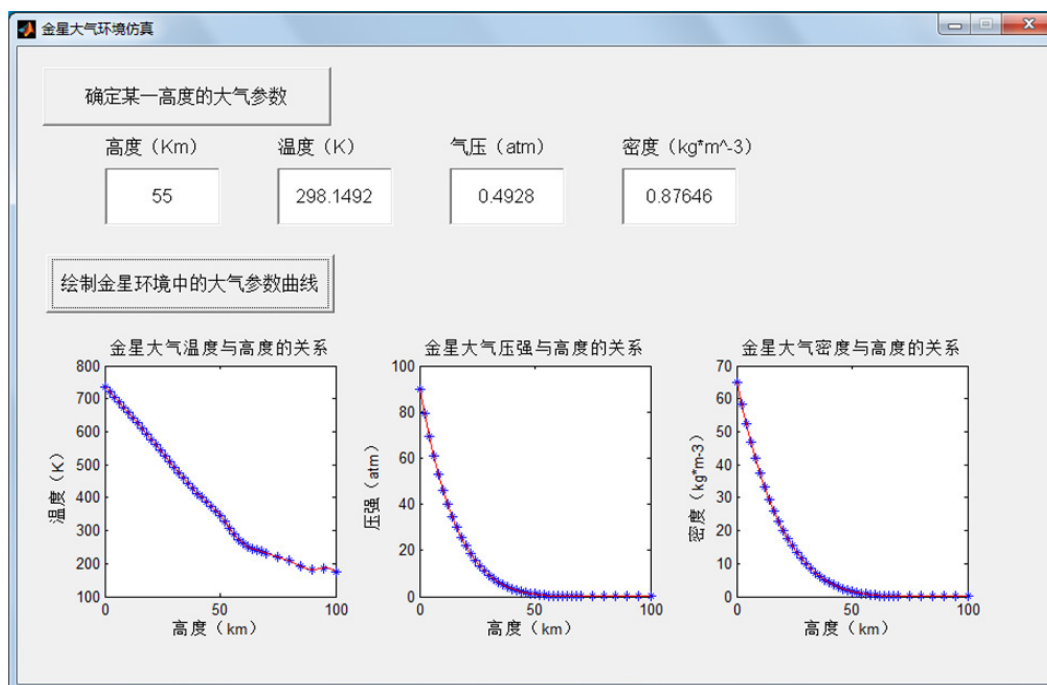


图 1 MATLAB GUI 下的金星大气环境仿真

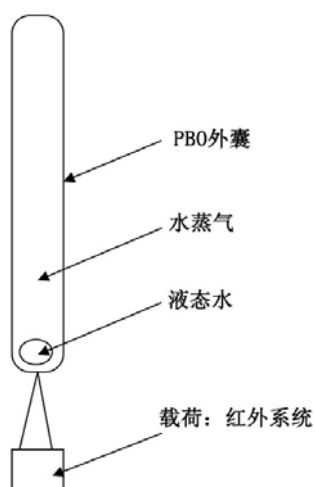


图 2 热气球的基本结构

4)。通过比较和分析不同参数下热气球的运动过程, 可以为热气球的基本设计提供更多的参考信息。

3 金星环境下的红外透射特性仿真

红外系统对于探索金星的三大未解之谜起着十分重要的作用。而该系统的作用距离是一个十分重要的性能指标, 需要在其可行性分析和设计阶段着重研究金星环境下红外辐射在大

气中的透射情况, 为近似估算红外系统的作用距离提供参考。

现有的红外辐射大气透射率研究^[10-13]都是针对地球环境的。它们以海平面水平路程上的光谱透射率数据为基础, 根据红外辐射所处的高度加以修正, 计算地球环境下的红外辐射大气透射率。但是金星大气中存在约占 97% 的高浓度 CO_2 和近地表的高温高压环境, 表明金星拥有与地球截然不同的大气条件, 导致不能将地球环境下的红外大气透射率数据及计算模型直接应用到金星上。因此, 能否建立地球与金星红外大气透射率的转换关系, 是本节研究的重点。

二氧化碳是金星大气层的主要成分 (大约占 97%), 也是决定大气红外辐射特性的重要因素, 因此本文着重考虑金星大气中二氧化碳对红外辐射的吸收作用。基于前面的金星大气环境仿真结果, 推导不同环境下二氧化碳对红外透射影响的关系。然后将地球环境下的红外大气透射率转换到金星环境中, 仿真金星环境下的 CO_2 红外大气透射率, 为辅助金星红外系统的设计提供参考。

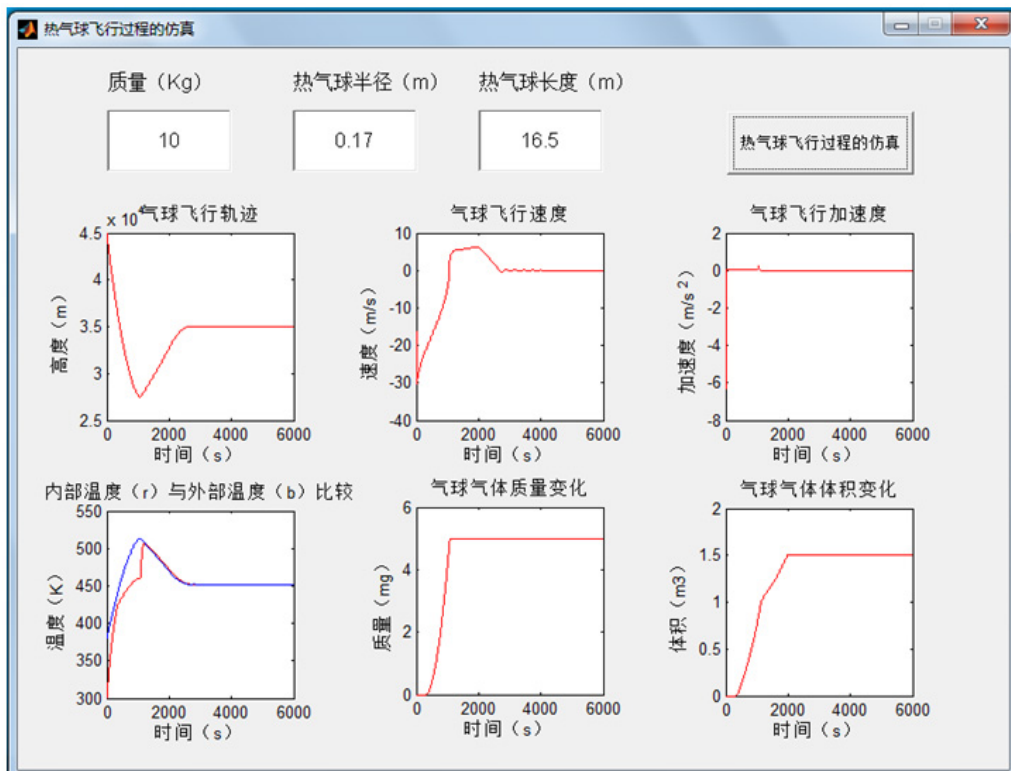
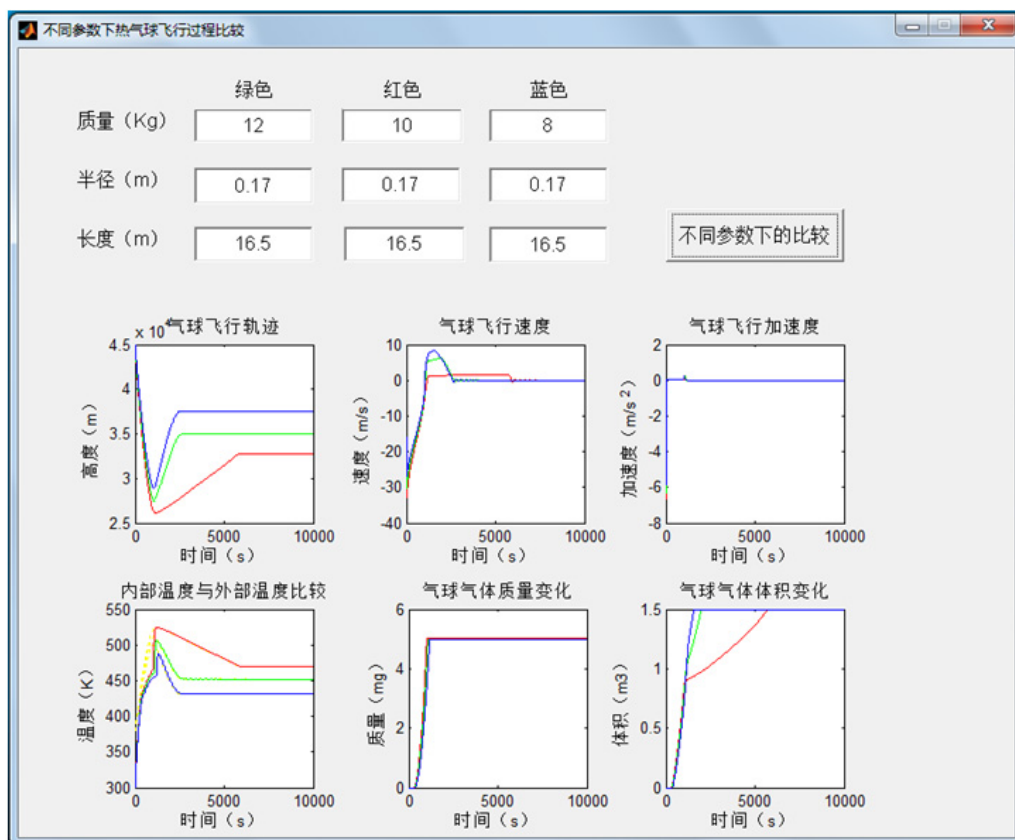


图 3 热气球运动过程的仿真结果

图 4 不同气球总质量下的仿真结果比较 (绿色表示 $m_{tot} = 12$ kg, 红色表示 $m_{tot} = 10$ kg, 蓝色表示 $m_{tot} = 8$ kg)

3.1 不同环境下二氧化碳对红外透射影响的水平 / 倾斜路程修正

文献 [8] 列出了地球环境下二氧化碳在波长为 $0.3 \sim 6.9 \mu\text{m}$ 、海平面水平路程为 $0.1 \sim 1000 \text{ km}$ 时和在波长为 $7.0 \sim 13.9 \mu\text{m}$ 、海平面水平路程为 $0.2 \sim 200 \text{ km}$ 时的光谱透射率数据。如果建成地球环境与金星环境下的等效水平路程关系, 便可以成功利用地球海平面数据, 计算金星环境下的二氧化碳红外透射率。

文献 [9] 将二氧化碳的大气厘米数看作大气环境中 CO_2 含量的指标:

$$L = n \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} X \quad (1)$$

式中, n 为二氧化碳在大气中的分压比, P 为当前路径上的大气压强, P_0 为标准状态下的大气压强, T 为当前路径上的大气绝对温度, T_0 为标准状态下的大气绝对温度, X 为红外辐射的传输距离。

因此, 在不同环境下由 CO_2 含量不同引起的水平路程被修正为

$$X_2 = \frac{n_1}{n_2} \frac{P_1}{P_2} \frac{T_2}{T_1} X_1 \quad (2)$$

式中, 下标 1、2 表示两种不同的环境状态, 各符号的意义如同式 (1)。此外, 考虑到大气密度的不同, 本文引入一个大气密度比例项加以改正, 因此式 (2) 被修正为

$$X_2 = \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{n_1}{n_2} \frac{P_1}{P_2} \frac{T_2}{T_1} X_1 \quad (3)$$

在不同环境下, 大气的温度和压强不同, CO_2 吸收红外辐射的本领也会不同, 相应的水平路程被修正为 [8]

$$X_2 = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1.5} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{0.25} X_1 \quad (4)$$

综合式 (3) 和式 (4) 可得, 在两种不同的大气环境下, 等效水平路程的对应关系为

$$X_2 = \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{n_1}{n_2} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{2.5} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1.25} X_1 \quad (5)$$

因此, 利用式 (5) 就可以将金星环境下的红外辐射水平路程转换为地球环境下的等效路程。通过参考文献 [8] 中的地球海平面水平路程上的 CO_2 光谱透射率数据, 可以计算得到金星环境下的近似红外透射率数据, 以辅助红外系统的初步设计。

对于倾斜路程, 通过将斜程细分成 n 段, 就可以认为每小段路程仍保持水平。然后按照式 (5) 计算每段等效水平路程, 最后由积分求和就可得到倾斜路程的等效水平长度。

3.2 金星环境下 CO_2 红外透射率的仿真结果

结合前面介绍的 CO_2 红外大气透射率的计算模型, 在 MATLAB GUI 中进行可视化设计, 如图 5 所示。对 $0 \sim 100 \text{ km}$ 金星大气环境和 $0.3 \sim 13.9 \mu\text{m}$ 光谱范围内, 水平或倾斜路程上 CO_2 的有效红外透射率进行仿真。其中, “有效”是指只计算在 $0 \sim 100 \text{ km}$ 大气范围内, 与地球海平面路程有对应关系的金星路程数据, 并拟合和绘制红外透射率曲线。

4 结论

在验证金星热气球的可行性与红外载荷系统的性能时, 需要构造同等大气环境下的模拟实验室。但是金星存在高温、高压、高密度的环境, 一方面对实验本身提出了较高的要求 (也有较大的难度), 另一方面以这样的“恶劣”条件会对人员安全及周边环境污染具有一定的影响。因此, 本文在无需构建具体实验室的前提下, 通过计算机仿真构造近似的金星大气环境, 并以此作为后续仿真的基础。

本文对金星热气球的运动过程进行仿真, 验证了金星环境下热气球的可行性。该方法可用于反馈热气球设计的合理与否, 辅助改进热气球的設計, 并可通过比较不同参数下的仿真结果来为热气球的設計提供参考信息。另外, 通过对作为热气球载荷的红外系统在金星大气中的红外透射特性进行仿真, 可以为系统作用距离的有效估算等提供参考依据。

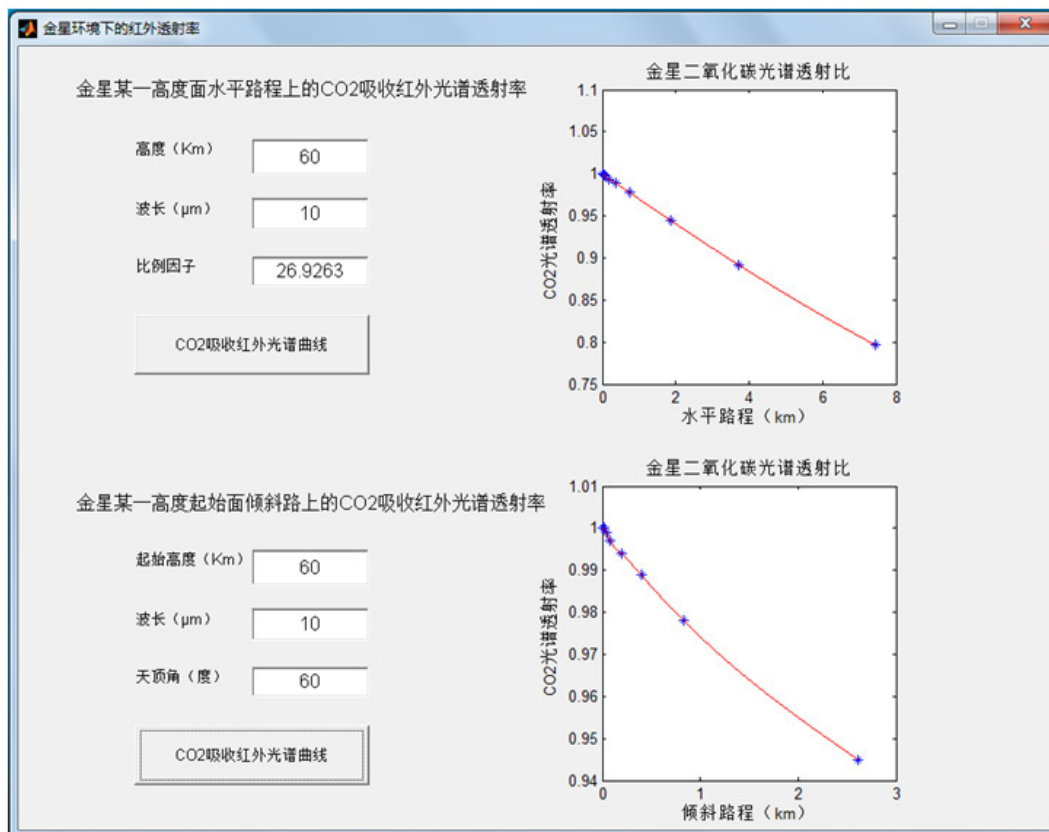


图 5 金星环境下的 CO_2 红外透射率仿真

参考文献

- [1] Nishimura J, Hinada M, Yajima N, et al. Venus Balloons at Low Altitudes [J]. *Adv Space Res*, 1994, 14(2): 61–71.
- [2] Izutsu N, Yajima N, Hatta H, et al. Venus Balloons at Low Altitudes by Double Capsule System [J]. *Adv Space Res*, 2000, 26(4): 1373–1376.
- [3] Bachelder A, Nock K T, Heun M, et al. Venus Geoscience Aerobot Study (VEGAS) [C]. *AIAA*, 1999, 99: 3856.
- [4] Cutts J A, Rodgers D H, Cameron J M, et al. Venus Surface Sample Return: Role of Balloon Technology [C]. *AIAA*, 1999, 99: 3855.
- [5] Izutsu N, Yajima N, Honda H, et al. Venus Balloons Using Water Vapor [J]. *Adv Space Res*, 2004, 33(2): 1831–1835.
- [6] Moroz V I. The atmosphere of Venus [J]. *Space Science Reviews*, 1981, 29(7): 3–127.
- [7] Furfaro R, Lunine J, Elfes A, et al. Wind-based Navigation of a Hot-air Balloon on Titan: a Feasibility Study [C]. *SPIE*, 2008, 4126: 45–49.
- [8] 张鸣平, 张敬贤, 李玉丹. 夜视系统 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [9] 刘景生. 红外物理 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [10] 唐嘉. 红外辐射大气透过率的工程计算 [J]. *飞行器测控学报*, 2007, 26(3): 25–29.
- [11] 吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究 [J]. *光学精密工程*, 1998, 6(4): 35–43.
- [12] 路远, 凌永顺. 红外辐射大气透射比的简易计算 [J]. *红外技术*, 2003, 25(5): 45–49.
- [13] 周国辉, 刘湘伟, 徐记伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型 [J]. *红外技术*, 2008, 30(6): 331–334.