

文章编号: 1000-8055(2008)02-0251-05

导弹蒙皮红外辐射特性的数值计算与分析

单 勇, 张靖周, 郭荣伟

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 采用逆向蒙特卡罗(RMC)计算方法, 在给定的飞行状态下分别计算出亚声速与超声速导弹蒙皮辐射源在不同方位角的 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段红外光谱辐射强度及强度场分布. 结果表明: 对亚声速导弹, 相对于 $8\sim 14\ \mu\text{m}$, 其 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 的辐射可忽略不计; 对超声速导弹, 相对于 $2\sim 5\ \mu\text{m}$, 其 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的辐射只有 50 % 左右, 但其绝对值较大而不可忽略不计. 导弹的红外辐射在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 探测位置内增加, 在 $90^\circ\sim 180^\circ$ 内减小. 大气对低空亚声速导弹辐射衰减作用强, 对高空超声速导弹辐射衰减作用弱. 超声速导弹的最大辐射强度是亚声速的 18 倍.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 蒙皮红外辐射; 数值计算; 逆向蒙特卡罗法

中图分类号: V231.95

文献标识码: A

Numerical computation and analysis of the infrared radiation characteristic of missile scarf skin

SHAN Yong, ZHANG Jing-zhou, GUO Rong-wei

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The reverse Monte Carlo method was used in the computer program. And the ideal of program design and the way of realization were introduced particularly. Computer processes and formulas were provided. At a given flight condition, the infrared radiation characteristics of missile scarf skin were obtained by calculation. Brief comparison and analysis of the computing results were conducted. For subsonic missile, the radiation at $2\sim 5\ \mu\text{m}$ can be ignored relative to the radiation at $8\sim 14\ \mu\text{m}$. For supersonic missile, the radiation at $2\sim 5\ \mu\text{m}$ is a half of the radiation at $8\sim 14\ \mu\text{m}$. The radiation increases at the detected position of $0^\circ\sim 90^\circ$ degree and decreases at the detected position of $90^\circ\sim 180^\circ$ degree. The atmosphere attenuation effect on subsonic missile is strong at low altitude and is weak on supersonic missile at high altitude. The max radiation of supersonic missile scarf skin is 18 times as that of ultrasonic missile scarf skin.

Key words: aerospace propulsion system; scarf skin infrared radiation; numerical computation; reverse Monte Carlo method

导弹作为一种精确打击武器, 在近十多年来的局部战争中扮演了重要角色, 发挥了重要作用, 已成为进行局部战争的杀手锏. 如何对敌方导弹进行有效抗击和提高我方导弹的生存能力, 是一

个非常重要的问题. 由于导弹飞行高度低, 雷达反射截面小, 从而使雷达对导弹探测的能力大大降低. 近年来, 由于红外探测器件在性能上的不断提高, 利用目标的红外辐射特性进行目标探测、跟

收稿日期: 2007-01-23; 修订日期: 2007-05-14

作者简介: 单勇(1978-), 男, 江苏扬州人, 讲师, 研究方向为: 传热与红外隐身技术.

踪,已经具备了很好的技术基础.研究目标的红外辐射特征,以及红外探测设备对目标的探测、跟踪,对有效抗击敌方导弹具有十分重要的现实意义.

导弹的红外辐射源主要来自蒙皮的气动加热、排气喷管和羽流等,由于导弹的飞行速度高,导弹蒙皮气动加热所形成的红外辐射在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的影响便显得十分重要.目前国内对导弹蒙皮红外辐射特征研究还比较缺乏^[1-3].由于模拟真实条件下的实验几乎是不可能的,最初的数值分析都是采用经验公式得到一定马赫数下导弹蒙皮的温度后采用普朗克定律得到红外辐射强度^[1],其计算结果不仅误差大,而且不能反映沿各方位角的辐射特性;张小英等人^[2]对飞行中段导弹壁面的温度分布进行了准三维计算,研究了光谱 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 内导弹红外辐射的空间分布,但是对导弹红外辐射源在不同频带上的目标特征演变规律缺乏认识.

本文尝试将导弹三维气动计算、采用逆向蒙特卡罗法的 FORTRAN 程序和大气衰减过程有机结合,对导弹蒙皮的红外辐射特性进行了数值计算,分析了在不同探测方向和距离上,导弹蒙皮在超声速和亚声速状态下气动加热所引起的红外辐射特性在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段上的变化规律,为开展导弹红外隐身技术研究提供可资借鉴的数值计算基础.

1 数值研究

1.1 流场计算模型

数值计算模型如图1所示,其尺寸与实物一致,考虑其表面复杂的外形特征,计算网格都采用非结构化,导弹外部流场区域确定为导弹尺寸6倍大小.亚声速弹体表面总共有164 347个面元.外流场网格数为125 272,蒙皮表面材料为氧化铝,其辐射率取为0.8;超声速弹体表面总共有149 552个面元,外部流场网格数为102 874,蒙皮表面材料为氧化钛,其辐射率大概为0.6.

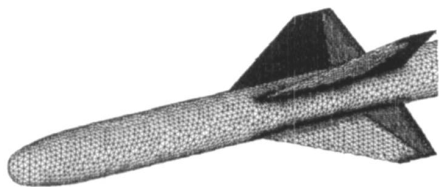


图1 亚声速导弹蒙皮表面网格示意

Fig. 1 Subsonic missile surface grids

1.2 边界条件及流场计算方法

外流场大气流动速度根据飞行马赫数、飞行高度(当地大气温度)确定,外流场出口压力即为当地大气压力.为得到导弹蒙皮壁面温度场,该壁面设定为流、固耦合面.

对于流场计算,本文采用标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型,外流场入口处的紊流动能和紊流动能耗散率按照经验关系选取^[4]

$$k_{in} = 0.03 u_{in}^2, \varepsilon_{in} = k_{in}^{1.5} / (0.005 D) \quad (1)$$

这里, D 为对应于外流场入口处的当量直径,近壁区采用标准壁面函数法进行处理.一些经验参数的选取为: $C_{\mu} = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $Pr_t = 0.85$.流动与传热的控制方程采用二阶迎风差分格式离散,压力与速度耦合采用SIMPLE算法.速度和 k, ε 的收敛精度都达到 10^{-4} ,温度收敛精度达到 10^{-5} .

1.3 红外辐射计算方法

对于红外辐射特性计算,本文采用逆向蒙特卡罗法(RMC)^[5-6].RMC的主要思路是从接收点(测点)向外发射和跟踪光束(如图2所示),当光束投射到表面而被吸收时,则认为沿该光束的路径上有一束能量能够反向到达接收点,经多次发射-跟踪-反向接收后,统计所得到的光束信息,获得所需要的结果.如果固体壁面有反射,则利用蒙特卡罗法的概率模型确定其反射方向,按照上面过程继续跟踪,直到它被吸收或逸出流场为止.

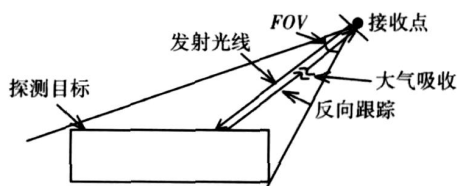


图2 计算过程示意

Fig. 2 Schematic of calculation procedures

在能量反向到达接收点的过程中,需要求解能量辐射运输方程.吸收、发射、散射性介质内辐射传递方程可以写为

$$\begin{aligned} \frac{dL_\sigma}{dt} &= kL_\sigma - kaL_{b,\sigma} - \frac{k_s}{4\pi} \cdot \\ &\int_{4\pi} L_\sigma(\theta', \phi') \phi(\theta, \phi, \theta', \phi') d\Omega \\ k &= ka + k_s \quad dt = -\rho ds \end{aligned} \quad (2)$$

式中 k 为总衰减率, ka 为吸收率, k_s 为散射率, ρ 为耗散分子密度, L_σ 为研究点处在辐射传输方向 s 的光谱辐射亮度, $L_{b,\sigma}$ 为由普朗克函数决定的黑

体光谱辐射亮度, Ω 为立体角, t 为光学深度, ϕ 为散射相函数, 在本文中不考虑大气的散射。

确定沿光束传递方向路径的平均大气吸收系数为 α 后, 就获得了在反向光束方向上, 到达测点的方向光谱辐射亮度

$$L_{\sigma}^n = \varepsilon \cdot L_{b,\sigma} \cdot \alpha \quad (3)$$

式中 L_{σ}^n 是沿光线传递反方向到达测点的光谱辐射亮度, $L_{b,\sigma}$ 是用波数表示的普朗克函数, ε 为固体壁面的发射率。

在跟踪了 N 束光线后, 可以获得在视场角 (FOV) 内的到达测点的辐射照度 H (W/cm^2)。如果将探测目标作为点源处理, 其辐射强度 I (W/sr) 可表示为 $I = H \cdot R^2$, R 为探测距离。

$$H = \frac{\int_{FOV} \sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{N_{abs}} L_{\sigma,i,j}^n \cdot \cos \theta_j \cdot \Delta \sigma_j \, d\Omega}{\int_{FOV} d\Omega} \quad (4)$$
$$= \frac{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{N_{abs}} L_{\sigma,i,j}^n \cdot \cos \theta_j \cdot \Delta \sigma_j}{N} \cdot FOV$$

式中 NB 为总波带数; N_{abs} 为对测点有贡献的光线总数; θ_j 是入射光线的天顶角; $\Delta \sigma_j$ 是第 j 个波带的宽度。FOV 是测点对目标表面所张的立体角。

导弹蒙皮辐射在大气中的传输过程中, 必须考虑大气中的水蒸气和二氧化碳的衰减作用。本文采用刘林华等^[7-8]提出的大气透过率数据库插值得到符合实际情况的二氧化碳和水蒸气的透过率 α 。该数据库仅适用于海平面的水平路程的透过率计算, 对于实际情况需要对传输路程进行必要的修正^[9], 经过修正后的等效路程小 x_0 即可用于数据库插值, 得到二氧化碳的大气透过率

$$x_0 = x \left(\frac{p}{p_0} \right)^k \quad (5)$$

式中 x 为实际传输路程, x_0 为等效路程, p 为当地大气压力, p_0 为海平面上的大气压, 指数 k 值对 H_2O 取为 0.5, 对 CO_2 取为 1.5。

决定传输路程中水蒸气透过率大小的指标是可降水量^[9], 通过该值在数据库中的插值, 可得到水蒸气透过率

$$W = \frac{\rho_{wv}}{\rho_w} x_0 \quad (6)$$

式中, W 为衰减路程内的可降水量, ρ_w 为水的密度, ρ_{wv} 为水汽的密度, x_0 为等效路程。

2 计算结果与分析

2.1 表面温度场分布

图 3、图 4 分别为亚声速和超声速导弹表面

蒙皮的温度场计算结果。对于亚声速飞行的导弹其蒙皮表面的温度大多处于飞行环境温度, 气动加热作用不明显; 然而超声速导弹蒙皮的温度最高值达到 739 K, 且大部分区域在 700 K 左右。因此, 两者的红外辐射强度和光谱辐射特征完全不同。

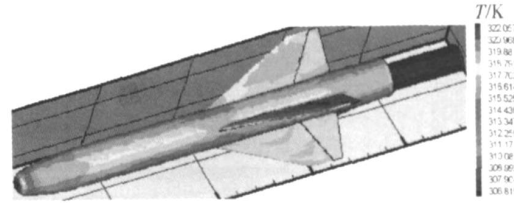


图 3 亚声速 ($Ma=0.8$) 导弹表面温度场

Fig. 3 Subsonic missile surface temperature contour

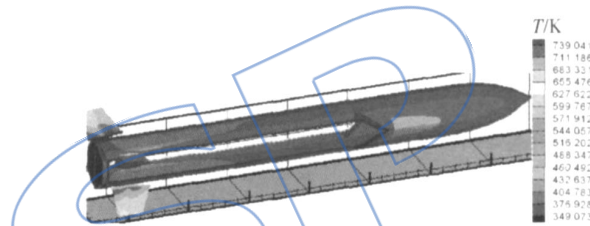


图 4 超声速 ($Ma=3.5$) 导弹表面温度场

Fig. 4 Supersonic missile surface temperature contour

2.2 辐射强度

辐射强度定义为: 目标在单位立体角内向外界发出的能量, 单位为 W/sr 。探测距离比较远时, 辐射源可以看成是点源辐射。从辐射源的角度来说, 其辐射强度是定值, 但是考虑到大气衰减的影响, 对于不同距离的探测位置, 所接受到的辐射强度是有所减弱的。以导弹中心为圆心, 2, 4, 6 km 为半径, 从导弹头部到尾部的 180° 范围内的半圆弧上, 设置了 12 个探测点作为计算的能量接受点。

由图 5 可以看出: 所有的曲线都在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 内增加, 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 内减小, 且沿 90° 向两侧比较对称, 也就是说, 正对与导弹头部和尾部所探测的辐射最小, 垂直导弹长度方向的辐射最大。亚声速导弹 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射占绝对地位, 是 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段红外辐射的 16 倍之多。6 km 内的大气对这两个波段内的红外辐射都有很强的吸收。

由图 6 可以看出: $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的辐射相对于 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的辐射只有一半左右, 但是绝对值也比较大所以不可忽略不计, 最高值达到 $700 \text{ W}/\text{sr}$ 。超声速导弹红外辐射强度沿方位角分布状况与亚声速导弹一致, 但是其辐射强度在各波段所占比例和数值不同, 超声速导弹蒙皮的最大辐

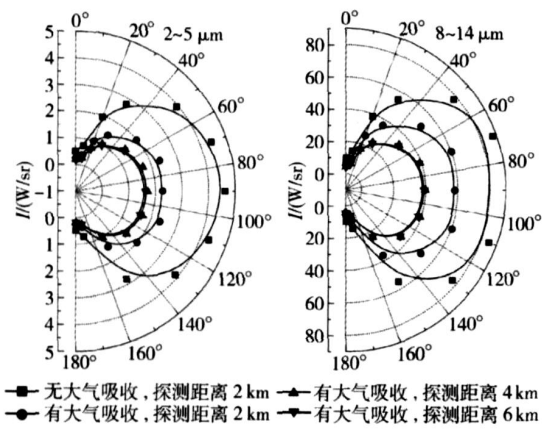


图 5 亚声速导弹辐射强度与探测距离 ($Ma = 0.8$)

Fig. 5 Subsonic missile infrared radiation intensity vs detect distance

射强度是亚声速导弹的 18 倍. 另外,图 5 和图 6 对比可以看出超声速导弹的大气衰减要比亚声速导弹的衰减小的多,这是由于超声速导弹的飞行高度在 16 000 km,亚声速导弹的飞行高度在 500 m,高空大气中的 CO_2 含量是低空大气中的 CO_2 含量的 4 %,高空大气中的水汽密度大约是低空大气中的水汽密度的万分之一.

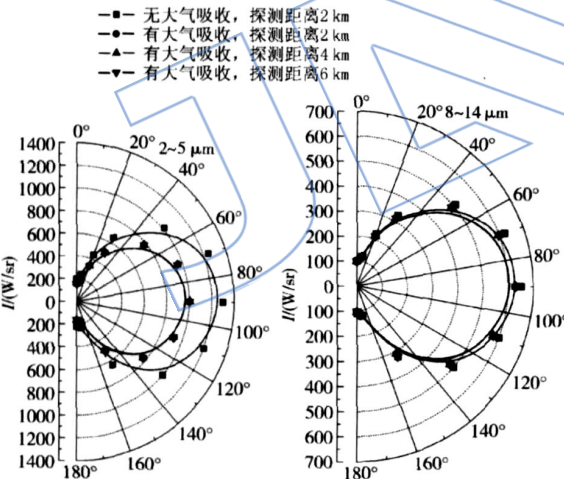


图 6 超声速导弹辐射强度与探测距离 ($Ma = 3.5$)

Fig. 6 Supersonic missile infrared radiation intensity vs detect distance

2.3 光谱辐射强度

光谱辐射强度定义为:目标在单位立体角、单位波长内向外界发出的能量,单位为 $\text{W}/(\text{sr} \cdot \mu\text{m})$.

从图 7,图 8 中可以看出:没有大气吸收的光谱红外辐射曲线是遵循普朗克定律的发展趋势,随着波长的增加,先上升后下降的光滑过渡.在考

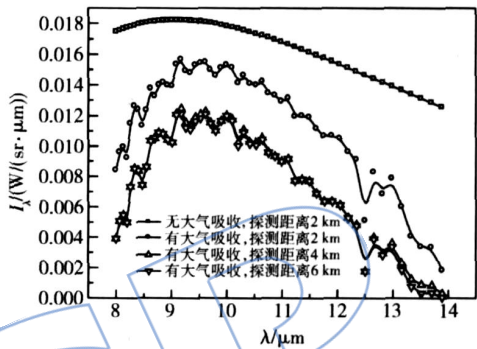
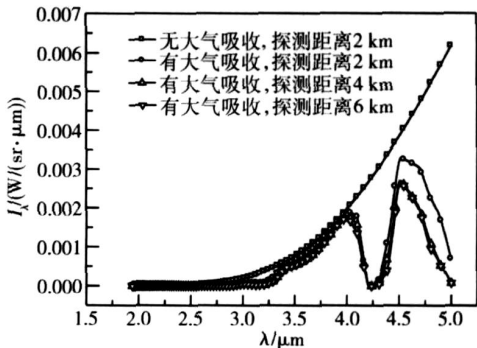


图 7 亚声速导弹光谱辐射强度 ($Ma = 0.8, 0^\circ$ 方向)

Fig. 7 Subsonic missile infrared spectrum radiation intensity vs detect distance

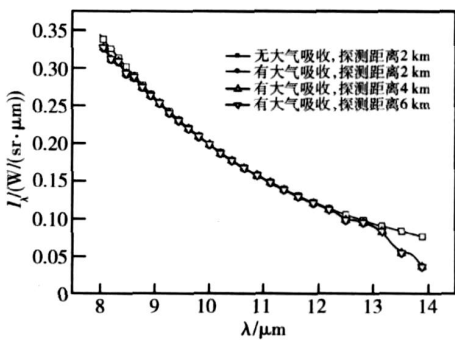
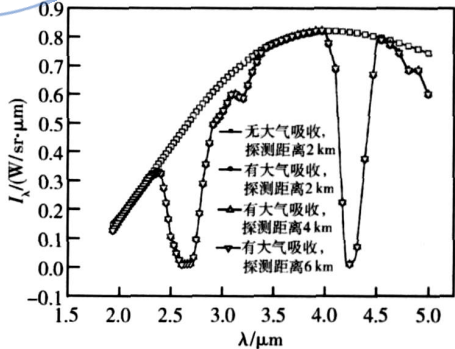


图 8 超声速导弹光谱辐射强度 ($Ma = 3.5, 0^\circ$ 方向)

Fig. 8 Supersonic missile infrared spectrum radiation intensity vs detect distance

虑大气吸收时,随着探测距离的增加,目标辐射被大气吸收的程度增加,到达探测位置时的辐射减小.在所考察的波段内,由于大气的吸收,某些波长的辐射甚至降为零,例如 $2.7, 4.3 \mu\text{m}$ 波长处. CO_2 在 $2.7, 4.3 \mu\text{m}$ 为中心的附近及 $11.4 \mu\text{m} \sim 20 \mu\text{m}$ 间的区域有强的吸收和 H_2O 气体在 $2.7, 6.27 \mu\text{m}$ 为中心的附近出现的强吸收带在图 7, 图 8 中都能一一体现^[10-11]. 对于其它探测方向,其光谱变化趋势是极其相似.

由图 7 和图 8 对比得到:超声速导弹蒙皮的最大光谱辐射要比亚声速导弹的高出两个数量级,且光谱辐射的峰值向短波方向移动,这与维恩位移定律是一致的.

3 结 论

与三维流场数值计算相结合的基于逆向蒙特卡罗法的红外辐射特性计算程序能够在数值上模拟计算出不同飞行状态下的导弹蒙皮在不同方位角的红外辐射特性,计算结果符合物理现象的本质,具体可得到以下几点:

(1) 对于亚声速导弹,蒙皮温度不高(例如本文算例的平均温度在 310 K),其 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 的辐射相对于 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的辐射可以忽略不计.

(2) 对于超声速导弹,蒙皮气动加热作用显著(例如本文算例的温度在 700 K 左右), $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的辐射相对于 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的辐射只有一半左右,但是绝对值也比较大,最高值达到 700 W/sr .

(3) 导弹蒙皮的红外辐射在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 探测位置内增加,在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 内减小,也就是说,正对与导弹头部和尾部所探测的辐射最小,垂直导弹长度方向的辐射最大.

(4) 超声速导弹蒙皮的最大光谱辐射要比亚声速导弹的高出两个数量级,且光谱辐射的峰值向短波方向移动,这与维恩位移定律是一致的.超声速导弹蒙皮的最大辐射强度是亚声速导弹的 18 倍.距离越远,大气吸收越强,探测器感受到的辐射强度越低.

(5) 大气对低空飞行的亚声速导弹辐射衰减作用强,对 $8 \sim 14 \mu\text{m}$, $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段都有较强吸收;对高空飞行的超声速导弹辐射衰减作用弱,对 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射几乎没有吸收.

参考文献:

- [1] 白渭雄, 吴法文. 巡航导弹的红外辐射特征研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2003, 4(6): 26-29.
BAI Weixiong, WU Fawen. The study of the infrared radiation characteristics of the cruise missile[J]. J of Air force Engineering University, 2003, 4(6): 26-29.
- [2] 张小英, 朱定强. 导弹壁温的准三维计算及红外辐射研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2006, (4): 42-47.
ZHANG Xiaoying, ZHU Dingqiang. Quasi-three dimensional calculation of missile wall temperature and infrared radiation of the missile[J]. Missile and Space Vehicle, 2006, (4): 42-47.
- [3] 张骏, 杨华. 弹道导弹中段弹头表面温度场分布理论分析[J]. 红外与激光工程, 2005, 24(5): 582-586.
ZHANG Jun, YANG Hua. Theoretical analysis of temperature field on the surface of ballistic missile warhead in midcourse[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 24(5): 582-586.
- [4] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1992.
- [5] Michael F. Modest backward monte carlo simulations in radiative heat transfer[J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(57): 57-62.
- [6] LU Xiaodong, Hsu Peifeng. Reverse Monte Carlo method for transient radiative transfer in participating media[R]. Washington, D. C: ASME International Mechanical Engineering Congress, 2003: 15-21.
- [7] 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): 8-12.
LIU Linhua, DONG Shikui, YU Qizheng, et al. Atmospheric mean transmittance in wavelength interval $0.1 \mu\text{m}$ from infrared 1 to $14 \mu\text{m}$, (I) Transmittance of carbon dioxide[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1998, 30(5): 8-12.
- [8] 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) 水蒸汽的透过率[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(6): 75-78.
LIU Linhua, DONG Shikui, YU Qizheng, et al. Atmospheric mean transmittance in wavelength interval $0.1 \mu\text{m}$ from infrared 1 to $14 \mu\text{m}$, (II) Transmittance of water vapor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(6): 25-78.
- [9] 徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导[M]. 北京:国防工业出版社, 1997.
- [10] 余其铮. 辐射换热原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2000.
- [11] Ludwig C B. Handbook of infrared radiation from combustion gases[R]. NASA SP-3080, 1973.