

红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究

吴晗平

(华中光电技术研究所 武汉 430073)

摘要 基于目前大气透过率理论计算的现状,综合考虑高度修正、倾斜路程以及气象衰减等因素,建立完整的、并且便于工程应用的大气光谱透过率、平均透过率、积分透过率的理论模型与计算方法,为红外系统的设计与评价提供理论依据。

关键词 红外系统 红外辐射 大气光谱 透过率 平均透过率 积分透过率

1 引言

红外辐射的大气透过率对红外系统(跟踪系统、搜索系统、警戒系统、热成像系统等)的设计、性能、评价等具有重要影响。以往的计算方法大多有一定的片面性^[1-7],没有综合考虑高度修正、倾斜路程以及与气象衰减有关的因素,给系统设计和评价带来了一定的误差,为此建立完整且便于工程应用的大气光谱透过率、平均透过率、积分透过率的模型与计算方法是必要的。

2 大气中辐射衰减的物理基础

红外系统用于观测、搜索、跟踪远距离目标时,红外辐射在到达红外系统的光学系统之前必须通过大气,并被衰减。在衰减的同时,因大气梯度和湍流使辐射在结构上发生畸变,引起空气折射率不均。此外,大气是固有辐射源。所有这些现象使远距离目标的热图象质量变坏。大气对红外系统的影响基本表现在辐射衰减,红外辐射衰减与以下三种现象有关:

大气气体分子的吸收;

大气中分子、气溶胶、微粒的散射;

因气象条件(云、雾、雨、雪)的衰减。

这样,在分析红外系统工作时必须全面考虑上述三种现象。但同时值得一提的是,当因气象衰减与天气条件有关时,气体分子和微粒的红外辐射吸收与散射经常发生。

大气传输的特征是,光谱透过率 $\tau_a(\lambda)$ 和衰减系数(消光系统) $\mu(\lambda)$ 之间的关系可用布盖尔-朗伯定律表示,即:

$$\tau_a(\lambda) = \mathcal{Q}(\lambda, R) / \mathcal{Q}(\lambda, 0) = \exp(-\mu(\lambda)R) \quad (1)$$

式中, R 为目标与红外系统之间的距离; $\mathcal{Q}(\lambda, R)$ 为距离 R 处(或红外系统处)目标或背景辐射光能量的光谱密度; $\mathcal{Q}(\lambda, 0)$ 为 $R = 0$ 时 $\mathcal{Q}(\lambda, R)$ 的特例; λ 为波长。

平均透过率和平均衰减系数为

$$\bar{\tau}_a = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_a(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$\bar{\mu} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \mu(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

式中, $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为光谱范围。

积分透过率为:

$$\tau_a = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \mathcal{Q}_e(\lambda, 0) \tau_a(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \mathcal{Q}_e(\lambda, 0) d\lambda} \quad (4)$$

大气光谱透过率 $\tau_a(\lambda)$ 用下式确定:

$$\tau_a(\lambda) = \tau_1(\lambda) \cdot \tau_2(\lambda) \cdot \tau_3(\lambda) \quad (5)$$

式中, $\tau_1(\lambda)$ 、 $\tau_2(\lambda)$ 、 $\tau_3(\lambda)$ 分别为被吸收、散射和因气象衰减制约的大气光谱透过率。

3 大气的组成及吸收作用

大气由多种气体——氮(N_2)、氧(O_2)、水蒸汽、二氧化碳(CO_2)、甲烷、一氧化碳(CO)、臭氧(O_3)以及各种各样的悬浮粒子组成。大气的主要成分是氮(体积比为 78%)和氧(体积比为 20%)。水蒸汽占总量的 1% 左右,二氧化碳只占 0.03% ~ 0.05%。红外辐射的大气透过率取决于气象条件,因之随天气条件和高度而变。用理论方法只求出近似的大气衰减和透过率,而在一定的天气条件和高度下,可用已推导出的经验公式求出较精确的近似值。

吸收红外辐射的主要因素是水蒸汽,它主要集中在 2~ 3km 气层以下;虽然 CO_2 只占大气体积的 0.03% ~ 0.05%,但它是红外辐射衰减的另一重要原因,它在空气中的分布比水蒸汽均匀。大气中 O_3 含量很少,它主要位于 10~ 40km 空间范围中,特别是集中在 20~ 30km 高度上。而在 20km 以下的大气层中, O_3 对辐射的吸收影响是非常小的,只有在雷雨之后,大气中 O_3 的含量才突然增大。因此对用在 20km 以下的红外系统, O_3 的衰减作用可以忽略不计。另外,在下层大气中,氧化氮、CO 等气体的吸收,通常可以忽略。

4 海平面上大气气体的分子吸收

水汽(H_2O)、 CO_2 分子产生最强的选择性红外辐射吸收,因此,综合透过率结果为水汽透过率 $\tau_{H_2O}(\lambda)$ 和 CO_2 分子透过率 $\tau_{CO_2}(\lambda)$ 的乘积,即:

$$\tau_1(\lambda) = \tau_{H_2O}(\lambda) \cdot \tau_{CO_2}(\lambda) \quad (6)$$

$\tau_{H_2O}(\lambda)$ 的确定

引用“可降水分”的概念,可降水分 ω 是由底面 S_0 和长度等于红外系统到目标距离 R 的圆柱体内大气含水汽凝结的水层厚度来量度的。

$$\omega = \omega_b R \quad (7)$$

式中, ω_b 为一定温度下、空气相对湿度为 100% 时的每 km 大气中的可降水分(厘米数),可查表得到^[6]。

由已知空气温度 t_b , 查表得到 ω_b , 然后乘以实际空气相对湿度 H_r , 即得到此实际空气相对湿度下的 $\omega_b(H_r)$, 相应的可降水分:

$$\omega = \omega_b(H_r)R = \omega_b R \cdot H_r \quad (8)$$

由可降水分 ω 查海平面水平路程上水汽光谱透过率表^[6], 即可求得不同波长时所对应的 $\tau_{H_2O}(\lambda)$ 。如果从表中不能直接查到, 可通过外推法或内插法求得。

$\tau_{CO_2}(\lambda)$ 的确定

研究试验证明, 直到非常高的高空, CO_2 在大气中的浓度是常数, 因而它在大气中的分布随时间变化是很小的。因此, 由 CO_2 的吸收所造成的辐射衰减, 可以认为与气象条件无关, $\tau_{CO_2}(\lambda)$ 只与辐射通过的距离有关。参考文献[6]列出了 CO_2 在 $0.3 \sim 6.9 \mu m$ 、海平面水平路程 $0.1 \sim 1000 km$, 以及在 $7.0 \sim 13.9 \mu m$ 、海平面水平路程 $0.2 \sim 200 km$ 的光谱透过率。 $\tau_{CO_2}(\lambda)$ 可以通过查表得到。

5 不同高度时的分子吸收修正问题

5.1 吸收本领随高度而改变的修正

水汽对辐射的吸收会随气温和气压而变, 因此对于高空的情况需要进行修正。修正时, 只需用修正系数乘以该高度处的水平距离, 就得到等效海平面距离, 并以此等效海平面距离计算积水厚度(可降水分)。修正系数 β_{H_2O} 由下式确定:

$$\beta_{H_2O} = \left(\frac{P}{P_0}\right)^{1/2} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/4} \quad (9)$$

式中, P_0 、 T_0 为海平面上的气压和气温; P 、 T 为给定高度上的气压和气温。

由(9)式可知, 温度的影响很小(4%), 可以忽略不计, 因此, 一般取高度修正系数:

$$\beta_{H_2O} = (P/P_0)^{1/2} \quad (10)$$

假定用 ω 表示辐射传输路程中按吸收本领折算成大气近地层水汽的等效可降水分的等效厚度, 用 ω_t 表示 H 高度下可降水分的实际厚度, 则:

$$\omega = \omega_t \beta_{H_2O} \quad (11)$$

β_{H_2O} 可以通过查修正系数表得到^[7], 或者在实际应用中, 得到具有足够精度的近似值, 可由下式确定:

$$\beta_{H_2O} = e^{-0.0654H} \quad (12)$$

式中 H 以 km 为单位。

对于 CO_2 , 类似可得到下列关系式^[5]:

$$\beta_{CO_2} = (P/P_0)^{1.5} \doteq e^{-0.19H} \quad (13)$$

总厚度为:

$$\begin{aligned}\omega &= \omega_b H_r \frac{S_2}{S_2} e^{-0.515 \cos \gamma} \cdot dS \\ &= \omega_b H_r \frac{e^{-0.5154H_1} - e^{-0.5154H_2}}{0.5154 \cos \gamma}\end{aligned}\quad (23)$$

式中, $H_1 = S_1 \cos \gamma, H_2 = S_2 \cos \gamma$

如果 $H_1 = 0, H_2 = H$, 则有

$$\omega = \omega_b H_r \frac{1 - e^{-0.5154H}}{0.5154 \cos \gamma}\quad (24)$$

值得一提的是, 令 $\gamma = 0$, 就可以由(23)式求得垂直路程上大气中可降水的有效总厚度。

5.2.2 水平、倾斜路程中因空气和 CO_2 质量引起的修正

因为空气压强随高度的变化规律如下:

$$P_H = P_0 e^{-0.123H}\quad (25)$$

考虑到(25)式, 可按式把距地面(海平面)高度为 H 的水平路程折算成近地水平路程:

$$R_H = R_H e^{-0.123H}\quad (26)$$

式中, R_H 为高度 H 时的辐射传输距离, R_H 为等效近地水平路程。

在倾斜路程的情况下, 与(23)、(24)式类似, 可得到折算成近地层辐射路程的公式:

在 H_1 到 H_2 范围内

$$R_H = \frac{e^{-0.123H_1} - e^{-0.123H_2}}{0.123 \cos \gamma}\quad (27)$$

综合考虑 CO_2 的吸收本领和质量随高度的变化, 结合(14)式和(27)式, 得到折算成近地层的路程有效长度为:

$$R_e = R_H e^{-0.123H} \cdot e^{-0.19H} = R_H e^{-0.313H}\quad (28)$$

在倾斜路程的情况下, 由(28)式, 类似得到折算成近地层的路程有效长度为:

$$R_e = \frac{e^{-0.313H_1} - e^{-0.313H_2}}{0.313 \cos \gamma}\quad (29)$$

对于高度从0到 H 的情况下, 即 $H_1 = 0, H_2 = H$, 则有

$$R_e = \frac{1 - e^{-0.313H}}{0.313 \cos \gamma}\quad (30)$$

5.3 纯吸收时的透过率计算程序

仅考虑纯吸收的透过率可按下述程序计算:

对水蒸汽

a 根据温度, 查 $H_r = 100\%$ 时, 每 km 大气中的可降水厘米数表^[6], 得到 ω_b ;

b 根据高度进行辐射传输距离修正(吸收本领和大气本身密度随高度而减小所产生的影响);

c 求出全路程的可降水 ω , 即:

$\omega = \omega_b H_r \cdot$ (修正以后得到的近地层有效距离)

亦即, 根据不同的要求, 由(21)式或(23)式计算 ω 。

d 查海平面水平路程上水蒸汽的光谱透过率表, 得到仅考虑水蒸汽时的大气透过率 $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ 。

对 CO_2

a 同上, 根据高度进行路程距离修正, 亦即, 按不同的要求, 由(28)式或(29)式计算成近地层的路程有效长度 R_e ;

b 查海平面水平路程上的 CO_2 的光谱透过率表, 得到仅考虑 CO_2 时的大气透过率 τ_{CO_2} , 连乘得到纯吸收时的透过率 $\tau(\lambda)$, 即

$$\tau(\lambda) = \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda); \tau_{\text{CO}_2}(\lambda)$$

6 大气分子和微粒的散射

大气中传输的辐射通量, 同样经受空气分子散射(大气分子散射和微粒散射), 微粒散射即为仅存在于大气中的地球表面灰尘、烟雾、水滴、盐粒等不同粒子的散射。分子散射可以作较精确的计算, 而微粒散射与大气状态有关。

分子和微粒的散射可用米氏理论来解释。若分子或微粒的尺寸小于波长, 则是遵守 λ^{-4} 律的瑞利选择散射; 对于尺寸比波长大的微粒可看作非选择散射。因此, 采用依标准气象能见度 D_v 确定的试验数据来计算光谱透过率。

气象能见度 D_v 表征大气的模糊度, 并且是白天能看见天空背景下水平方向上角尺度大于30 模糊物体的最大距离。它代表了大气的透射性能在可见光区的指定波长 λ_0 处(通常取 $\lambda_0 = 0.555\mu\text{m}$ 或 $\lambda_0 = 0.61\mu\text{m}$), 目标和背景之间对比减弱的程度。在这些波长处, 大气的吸收为零, 因而影响透射的原因将只是散射这一种因素。

眼睛感知的最小对比度(阈值对比度)等于2%, 因此, 气象能见度 D_v 就是目标对比度为1时, 通过大气后感知的对比度为0.02的距离, 即

$$K_v(D_v) = K_v(0) \exp(-\alpha D_v) \quad (31)$$

式中, $K_v(0) = 1, K_v(D_v) = 0.02$ 。

由此得:

$$\alpha = -\frac{1}{D_v} \ln \frac{K_v(D_v)}{K_v(0)} = \frac{3.91}{D_v} \quad (32)$$

工中, D_v 的单位为 km, α 的单位为 km^{-1} 。

由实测结果确定, 衰减系数与散射 $\alpha_p \sim \lambda^{-q}$ 有关, 因此, 依赖大气分子微粒散射的光谱系数 $\alpha_p(\lambda)$ 可用下式得到:

$$\alpha_p(\lambda) = \alpha(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q = \frac{3.91}{D_v} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q \quad (33)$$

式中, λ_0 取 $0.555\mu\text{m}$ ($0.61\mu\text{m}$); λ 为红外辐射波长 (μm); 对能见度特别好(例如 $D_v > 50\text{km}$ 时), $q = 1.6$; 对于中等能见度 ($D_v = 10\text{km}$), $q = 1.3$; 如果大气中的霾很厚, 以致能见度很差 ($D_v < 6\text{km}$) 时, 可取 $q = 0.585D_v^{1/3}$; 对于 $0.3 \sim 14\mu\text{m}$ 区间, 一般可取 $q = 1.3$ 。

从而由(33)式求得纯粹由散射导致的透过率 $\tau(\lambda)$ 为:

$$\tau(\lambda) = \exp(-\alpha_p R) = \exp\left(-\frac{3.91}{D_v} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q \cdot R\right) \quad (34)$$

式中, R 为作用距离。

7 与气象条件有关的衰减

因为气象(雾、雨、雪)粒子尺寸通常比红外辐射波长大得多, 所以根据米氏理论, 这样的粒子产生非选择的辐射散射。

雾粒的尺寸各有不同。虽然在雾中有衰减, 但随波长的变化, 比在大气分子和粒子散射时要弱些, 而不比 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 透过窗口小, 通常它比可见光区小 $2 \sim 2.5$ 倍。

对于小粒状雾, 光谱衰减系数可按(33)式近似计算。

在可见光和红外光谱区, 雨和雪的辐射衰减与雾的衰减有别, 是非选择性的。因此, 对于决定与其强度相关的雨、雪的衰减系数可采用在 $10.6 \mu\text{m}$ 波长得到的经验公式:

$$\alpha_{\text{雨}} = 0.66J_{\text{雨}}^{0.66} \quad (\text{km}^{-1}) \quad (35)$$

$$\alpha_{\text{雪}} = 6.5J_{\text{雪}}^{0.7} \quad (\text{km}^{-1}) \quad (36)$$

式中, $J_{\text{雨}}$ 、 $J_{\text{雪}}$ 分别为与气象条件有关的降雨, 降雪强度, mm/h 。

可采用下面的降雨强度数值进行计算:

小雨—— $2.5 \text{mm}/\text{h}$;

中雨—— $12.5 \text{mm}/\text{h}$;

大雨—— $25 \text{mm}/\text{h}$ 。

由雨的衰减所导致的透过率为:

$$\tau_3(\lambda) = \exp(-\alpha_{\text{雨}} \cdot R) \quad (37)$$

由雪的衰减所导致的透过率为:

$$\tau_3(\lambda) = \exp(-\alpha_{\text{雪}} \cdot R) \quad (38)$$

式中, R 为作用距离。

8 平均透过率与积分透过率的计算方法

8.1 平均透过率的计算方法

如上所述, 首先求出 $\tau(\lambda)$ 、 $\tau_2(\lambda)$ 、 $\tau_3(\lambda)$, 由(5)式即可求出大气光谱透过率 $\tau_a(\lambda)$, 然后将平均透过率的积分形式变为求和形式, 即由(2)式变为下式:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_a &\doteq \frac{1}{\Delta\lambda} [\tau_a(\lambda_1) \times \frac{1}{2}d\lambda + \tau_a(\lambda_1 + d\lambda)d\lambda + \dots + \\ &\quad \tau_a(\lambda_1 + (n-1) \cdot d\lambda)d\lambda + \frac{1}{2}\tau_a(\lambda_2)d\lambda \\ &= \frac{d\lambda}{\Delta\lambda} \left[\frac{1}{2}(\tau_a(\lambda_1) + \tau_a(\lambda_2)) + \sum_{i=1}^{n-1} \tau_a(\lambda_1 + i \cdot d\lambda) \right] \end{aligned} \quad (39)$$

式中, $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为光谱范围; $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$; $d\lambda$ 为光谱间隔, 亦即求和间隔; $n = \Delta\lambda/d\lambda$, n 应为正整数, n 越大, $\bar{\tau}_a$ 的精确程度越高。

将有关数据代入(39)式, 可以求出平均透过率 $\bar{\tau}_a$ 。

8.2 积分透过率的计算方法

用(5)式求出波段内的大气光谱透过率 $\tau_a(\lambda)$ 。

把(4)式中的积分形式变为求和形式,即用下式确定大气积分透过率:

$$\tau_a = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \mathcal{Q}(\lambda_i + i \cdot d\lambda) \tau_a(\lambda_i + i \cdot d\lambda)}{\sum_{i=0}^{N-1} \mathcal{Q}(\lambda_i + i \cdot d\lambda)} \quad (40)$$

式中, $d\lambda$ 为求和间隔; $N = (\lambda_c - \lambda_0)/d\lambda$

目标辐射通量由下式确定(对朗伯灰体辐射源):

$$\mathcal{Q}(\lambda) = \epsilon M_e(\lambda, T) S_0 \quad (41)$$

式中, ϵ 为灰体辐射系数; $M_e(\lambda, T)$ 为绝对黑体的辐射出射度; S_0 为目标辐射的面积; T 为目标绝对温度, K;

将(41)式代入(40)式,得:

$$\tau_a = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} M_e(\lambda_i + i \cdot d\lambda) \tau_a(\lambda_i + i \cdot d\lambda)}{\sum_{i=0}^{N-1} M_e(\lambda_i + i \cdot d\lambda)} \quad (42)$$

$M_e(\lambda, T)$ 的计算

在红外系统中, $M_e(\lambda, T)$ 的常用形式为:

$$M_e(\lambda, T) = C_1 / [\lambda^5 \exp(C_2/(\lambda T)) - 1] \quad (43)$$

式中, $C_1 = 3.7415 \times 10^4 \text{ W cm}^{-2} \mu\text{m}^4$; $C_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m K}$; λ 为辐射波长, μm 。

由 $M_e(\lambda_i + i \cdot d\lambda)$ 和 $\tau_a(\lambda_i + i \cdot d\lambda)$, 代入(42)式而求得 τ_a 。

9 结 束 语

本文所述的计算方法,仅需要查阅有关的基本数据表,就可以顺利地进行在多种情况下透过率的较准确计算, (尤其是对于 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 大气窗口的透过率计算), 便于工程应用, 并且可以在计算机上编制软件进行计算, 为红外系统的优质设计奠定基础并提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 Richard D. Hudson, JR. Infrared system engineering John wiley & Sons, NC, 1969
- 2 张幼文 红外光学工程 上海: 上海科学技术出版社, 1992
- 3 (美) 迈克·劳埃德 热成像系统 红外激光技术编辑组, 1978
- 4 杨宜禾等, 红外系统 北京: 国防工业出版社, (第2版), 1995
- 5 陈玻若 红外系统 北京: 兵器工业出版社, 1995
- 6 张鸣平等 夜视系统 北京: 北京理工大学出版社, 1993
- 7 刘景生 红外物理 北京: 兵器工业出版社, 1992

- 8 吴晗平. 红外搜索系统的作用距离与综合性能评价. 应用光学, 1995(2): 23~ 29
- 9 刘贤德. 红外系统设计基础. 武汉: 华中工学院出版社, 1985

Research in to Theoretical Calculation Method on Engineering of Transmittance of Infrared Radiation Through Atmosphere

WU Han-Ping

(Huazhong Institute of Optics & Electronics, Wuhan 430073)

Abstract

Based on current status of calculating transmittance of atmosphere, this paper comprehensively considers height correction and oblique path, attenuation resulted from meteorology, and establishes complete models and calculation method of transmittance of atmosphere and average transmittance, integral transmittance which are easy to apply to engineering. It provides theoretical foundation for design and evaluation of infrared systems.

Key words: Infrared systems, Infrared radiation, Spectral transmittance of atmosphere, Average transmittance, Integral transmittance

吴晗平 男, 1964年10月出生, 1985年毕业于湘潭大学近代光学专业(理学士), 1991年毕业于海军航空工程学院信号与信息处理专业(工硕士)。工程师, 从事图像处理、成像跟踪、光电系统装备的研制及其可靠性工程研究等领域的工作。已在国家级专业刊物和国家正式出版刊物上发表论文二十多篇。