基于大气参数修正的时变大气透过率测试方法研究

张安琪[1]，邰会强[1]，高佳星[1]，张百灵[1]，赵会妮[2]
(1. 西安空天能源动力智能制造研究院有限公司，西安 710100；
2. 中国航发四川燃气涡轮研究院，四川 绵阳 621022)

摘　要：为了解决航空发动机开车时外场水平大气透过率无法测量的问题，提出一种基于实测大气参数修正的时变大气透过率测试方法。以标准黑体为测试对象，沿着大面源黑体中轴线布设在线式传感器，获得测试路径上的大气参数分布。将实测大气参数输入大气透过率模型，获得理论计算的大气透过率，并对实测大气透过率进行修正。测试结果表明：长波波段修正后的大气透过率与理论计算的平均相对误差为 2.81%，中波波段修正后的大气透过率与理论计算的平均相对误差为 5.77%，验证了该方法的可行性。

关键词：航空发动机；红外测试；外场水平大气透过率；大气参数；实变；红外光谱辐射计；黑体
中图分类号：TN219　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1672-2620 (2023) 02-0039-06

Time-varying atmospheric transmittance measurement method based on atmospheric parameter correction

ZHANG Anqi[1], TAI Huiqiang[1], GAO Jiaxing[1], ZHANG Bailing[1], ZHAO Huini[2]
(1. Xi'an Aero-space Engine&Smart Manufacturing Institute Co., Ltd., Xi'an 710100, China;
2. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621022, China)

Abstract: In order to solve the problem that the horizontal atmospheric transmittance cannot be measured when the aero-engine is running, a time-varying atmospheric transmittance test method based on the correction of measured atmospheric parameters was proposed. Taking the standard black body as the test object, the online sensor was arranged along the central axis of the large area source black body to obtain the distribution of atmospheric parameters on the test path, and the measured atmospheric parameters were input into the atmospheric transmittance model to obtain the theoretically calculated atmospheric transmittance, and correction of the measured atmospheric transmittance was carried out. The test results show that the average relative error between the corrected atmospheric transmittance in the long-wave band and the theoretical calculation is 2.81%; the average relative error between the corrected atmospheric transmittance in the medium-wave band and the theoretical calculation is 5.77%; thus the method is verified.

Key words: aero-engine; infrared test; horizontal atmospheric transmittance; atmospheric parameters; time-varying; spectroradiometer; black body

1 引言

飞机隐身技术能够极大地提高军用飞机的生存力和攻击力，是当今世界航空强国重点发展的军用技术。飞机隐身能力主要从雷达隐身和红外隐身两方面得以实现，其中红外隐身是隐身技术研究领域的一个重点[1]。在飞机整体系统中发动机的红外辐射强度最大，特别是当发动机处于加力状态时，其尾焰辐射就成为飞机最主要的辐射源[2-3]。因此，深入研究发动机红外辐射，进行发动机红外测试，进而对其红外辐射特征实施有效控制，是降低敌方

收稿日期：2022-10-14
作者简介：张安琪 (1995-)，女，甘肃武威人，工程师，硕士，从事飞行器红外特性方面研究。

红外制导武器威胁、提高飞机生存能力的关键。

红外辐射在大气中传输，会与大气组分互相作用，使得辐射能量被衰减，其衰减程度用大气透过率来衡量。因此，对于发动机的红外测试，大气透过率是一个绕不开的问题。目前，针对大气透过率的测量，国外大多使用MODTRAN、LOWTRAN软件计算大气光谱透过率和背景辐射[4]，但是这些只是针对自然大气环境，无法应用于航空发动机尾喷流近场的局域扰动大气环境。国内，台宏达等[5]提出了多点移动大气透过率测量方法，理论上降低了系统的硬件性能对大气透射仪测量精度的影响，提高了大气透过率的测量精度；孙国栋等[6]提出一种基于成像激光雷达的水平有限距离大气透过率的测量方法，使得有限距离内大气透过率实验结果的精度满足相对误差(ERR)在15%以内的要求；王智平等[7]借鉴垂直廓线理论建立了同层大气“水平温度廓线”模型，推导了水平方向计算大气透过率和热辐射的公式，并进行试验验证，其计算精度优于传统软件。但以上这些方法都是在开车前或开车后，用于测量自然状态下的大气透过率。

在发动机红外测试过程中，尾喷口向外喷射大量的多组分燃烧尾气，且随着时间的积累，尾喷流与周围自然大气不断对流掺混，形成包含不同种类的气体成分(如H_2O、CO_2等)的过渡区域，甚至包含CO、NO、SO_2等气体组分和大量的烟尘颗粒，而这些组分的浓度及温度在尾喷流近场存在明显梯度变化。因此，尾喷流近场大气参数显著不同于自然大气，现有大气透过率测试方法无法反映外场实际大气环境的影响。基于此，本文提出一种基于实测大气参数修正的外场水平大气透过率测试方法，可用于发动机开车状态下的大气透过率测量。

2 大气透过率测量原理

大气透过率是指目标发出红外辐射后，经大气衰减后的红外辐射与入射辐射能量的比值。通常，使用红外测量仪测量距离红外辐射目标l位置的红外辐射信号$V(l)$和“0”位置的红外辐射信号$V(l_0)$，然后将这两个测量值相比，即可得到测试距离下的大气透过率的实测值：

$$\tau_{实测}=\frac{V(l)}{V(l_0)} \tag{1}$$

图1示出了具体测试原理。当目标充满视场时，可直接用式(1)计算目标的光谱大气透过率。

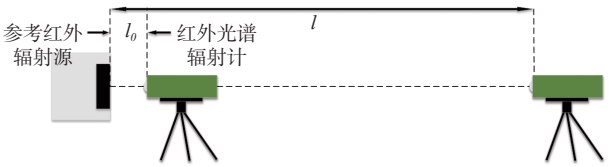

图1 试车时大气透过率测试原理

Fig.1 Test principle of atmospheric transmittance during test run

3 基于实测大气参数的大气透过率计算方法

3.1 通用大气透过率计算模型

大气透过率计算包括大气分子的吸收、分子连续吸收和散射、气溶胶的衰减(吸收和散射)三部分。

(1) 大气分子的吸收

在测试近场，发动机附近的大气中含有高浓度的H_2O和CO_2。为此，针对测试近场环境，分别对H_2O、CO_2两种主要的气体分子，用LBLRTM逐线积分法计算可见光红外波段单色的分子吸收光学厚度，平滑到1.0 cm^{-1}的光谱分辨率[8]：

$$\overline{T}(t,p,u)=\frac{\int_{v-v/2}^{v+v/2}\exp[-k_v(t,p)u]\mathrm{d}v}{\int_{v-v/2}^{v+v/2}\mathrm{d}v} \tag{2}$$

式中：$k_v(t,p)$为温度t(K)、气压p(hPa)时用LBLRTM计算得到的某种气体在波数v(cm^{-1})处的吸收截面，u(10^{-6})为吸收气体含量，v/2固定为0.5 cm^{-1}，平均透过率的光谱分辨率为1.0 cm^{-1}。

若在210~400 K宽温度范围内选择9个参考温度(参考温度个数可根据尾喷流近场大气温度的实际变化范围选取)，在气压600~1 300 hPa变化范围内选择9个参考气压值，对于每种分子，得到81种条件下的吸收谱线。大气吸收随吸收气体含量而变化，预先计算每种条件下40个吸收含量，提出了4阶非线性拟合算法来拟合大气吸收随吸收气体含量的关系，计算结果可得5个拟合系数：

$$T_v(t,p,u)=\exp\left\{-u\cdot\exp\left(\sum_{i=0}^{4}c_{i(t,p)}[\log(u)]^i\right)\right\} \tag{3}$$

式中：$T_v(t,p,u)$为给定波数、温度、气压和吸收气体含量下的透过率；$c_{i(t,p)}(i=0,4)$是给定波数、温度、气压下拟合得到的5个系数。

得到任意5个吸收系数后，给定传输路径上的吸收气体含量，可计算出传输路径上的分子吸收透过率：

$$T_v(U)=\exp\left\{-U\cdot\exp\left(\sum_{i=0}^{i=M}\tilde{C}_i[\log(U)]^i\right\}\right. \tag{4}$$

$$U=\int \mathrm{d}u(t,p) \tag{5}$$

与此类似，建立 H_2O 和 CO_2 这两种主要气体分子吸收的拟合系数数据库。测试近场大气传输时，只需要掌握每段路径的大气参数分布，根据非线性拟合公式 (2)，即可快速得到某种气体分子的光学厚度。实际分段路径大气透过率通常由上述 2 种分子的光学厚度之和构成，而路径总光学厚度由各分段的总光学厚度组成，不考虑波长依赖性条件下，辐射测量路径总光学厚度可表示为：

$$T_{\text{total}}=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}T_{i,j} \tag{6}$$

式中：N 表示实测路径分段数目，M 表示尾喷流近场中气体种类数目。

(2)　大气分子连续吸收和分子散射

采用目前国际上公认的最新的 MT_CKD 方法，可计算 H_2O 和 CO_2 这两种分子的连续吸收，分子散射则用瑞利散射公式进行计算。分子的连续吸收和分子散射透过率计做 T_{cont}[9]。

(3)　气溶胶衰减

实际的气溶胶尺度谱分布和气溶胶高度可分别由仪器 (如光学粒子计数器 OPC) 测得，并按下式拟合成 Junge 谱而提供实时的 Junge 指数 μ[10-11]：

$$\frac{\mathrm{d}K}{\mathrm{d}r}=K_0\cdot r^{(-\mu-1)} \tag{7}$$

式中：r 为粒子半径 (μm)；K 为单位体积的粒子数 ($m^{-3}mm^{-1}$)；K_0 是依赖于浓度的常数 ($m^{-3}mm^{-1}$)；指数 μ 决定了分布曲线的斜率。

给定气溶胶负折射率 m 随波长变化，用 Mie 程序计算气溶胶衰减效率因子 Q_e，得到地面上 (0 km) 归一到 0.55 μm 波长气溶胶的相对衰减系数 $\sigma_e^l(\lambda,0)$：

$$\sigma_e(\lambda,0)=\int_{r_1}^{r_2}\pi r^2 Q_e(\lambda,\mathrm{m})\frac{\mathrm{d}K}{\mathrm{d}r}\mathrm{d}r \tag{8}$$

$$\sigma_e^l(\lambda,0)=\frac{\sigma_e(\lambda,0)}{\sigma_e(0.55,0)} \tag{9}$$

给定地面能见度 vis，则其他波长上的绝对气溶胶衰减系数为：

$$\beta(\lambda,0)=\sigma_e^l(\lambda,0)\cdot(3.912/vis-\beta_E) \tag{10}$$

式中：β_E 表示近地面分子衰减，在海平面一般近似取 0.001 159 km^{-1}。

根据实测的气溶胶高度分布，如激光雷达测量的衰减系数轮廓，归一化到近地面的消光系数，得到雷达波长上、地面到雷达测量高度区间各个高度上的相对消光系数 $K(h)$。雷达测量高度以上至 30 km，直接用 MODTRAN 给出高度分布 $K(h)$；30 km 以上可以不考虑气溶胶的衰减。

任意波长和任意高度的消光系数，近似为地面消光系数 $\beta(\lambda,0)$ 乘以高度分布 $K(h)$，即：

$$\beta(\lambda,h)=\beta(\lambda,0)\cdot K(h) \tag{11}$$

地面到 H 高度上气溶胶的衰减为：

$$T_{\text{acr}}=\exp[-\int_0^H\beta(\lambda,h)\mathrm{d}h] \tag{12}$$

(4)　总透过率计算

大气总透过率为各部分透过率的乘积，即：

$$T=T_{\text{total}}\cdot T_{\text{cont}}\cdot T_{\text{acr}} \tag{13}$$

3.2　基于大气参数修正的大气透过率计算模型

由于目标红外辐射大气传输特性具有显著的光谱特征，要获取发动机的红外光谱辐射特性，必须考虑测量路径上大气光谱传输影响，对测量的发动机红外辐射进行大气标定。只有对发动机尾喷流近场大气环境特性有充分了解，才能根据实时测量的大气参数，采用大气辐射传输模型准确计算大气透过率，从测量的目标红外光谱辐射数据中定量扣除大气影响，较准确地得到发动机目标的本征辐射。

在对大气透过率测试时，将在线式多参数监测系统布设于测试路径上，对不同距离、不同方位角的大气参数进行实时监控，可得到温度、湿度、压力、CO_2 浓度、气溶胶浓度 5 种不同大气参数的实时数据。测量点分布如图 2 所示。将光谱测量路径长度划分为 n 段，采取在大气参数变化快的地方传感器布设密一些、在变化平缓的地方传感器布设稀疏一些的策略，对在线式多参数监测系统的测点位置 m_1，m_2，…，m_n 进行设计。

4　试验验证

4.1　试验装置

测试系统主要由红外光谱辐射计、标准黑体辐

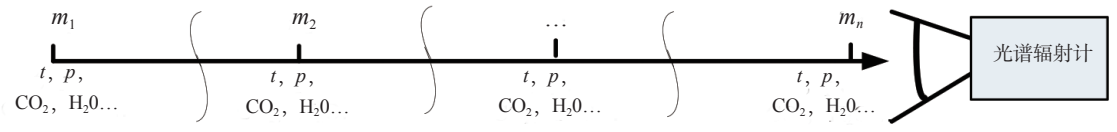

图 2　光谱辐射测量路径上大气参数测量点分布示意图

Fig.2　Distribution diagram of atmospheric parameter measurement points on spectral radiation measurement path

射源以及在线式多参数监测系统组成，试验装置布设如图3所示。

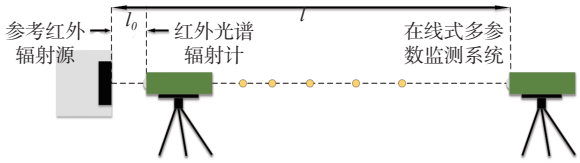

图3 基于大气参数仿真计算法测量装置

Fig.3 Measuring device based on atmospheric parameter simulation calculation method

红外光谱辐射计主要用于获取目标的红外光谱辐射信息。MR170光谱辐射计的主要参数见表1。

表1 MR170光谱辐射计主要参数

Table 1 Main parameters of MR170 spectroradiometer

技术参数	技术指标
分光方式	傅里叶变换干涉分光
镜头 /mrad	5，28，75
光谱范围 /μm	2~15
光谱分辨率 /cm^{-1}	1，2，4，8，16，32
探测器 /μm	2.0~5.5(InSb)；4.0~15.0(MCT)
制冷方式	液氮制冷
增益控制	1，2，4，8，16，32，64
控制方式	计算机100 Mbit/s以太网连接，FTSW500辐测量软件控制采集处理

黑体主要参数如表2所示。

表2 黑体主要参数

Table 2 Main parameters of black body

技术参数	技术指标
有效辐射口径 /m	1.0×1.0
有效发射率	0.95
温度分辨率 /℃	0.1
测温精度	≦ ±0.1% FS+0.2

在线式多参数监测系统型号为Multi pro 600A-M5E，可同时测量温度、湿度、压力、气溶胶浓度以及CO_2浓度5个参数，并且可以通过监测软件将实时数据传输至计算机端，其主要参数指标如表3所示。

4.2 试验方法

为确定所提出的大气透过率测试方法的可行性，以1.0 m×1.0 m标准大面源黑体为测试目标；光谱辐射计选用5 mrad镜头，为了保证充满视场，最远测试距离为200.0 m。测点位置分别10.0，30.0，60.0，68.0，70.0，80.0，90.0，125.0，150.0，170.0，200.0 m。具体试验步骤如下：

表3 在线式多参数监测系统主要参数

Table 3 Main parameters of online multi parameter monitoring system

技术参数	监测量程
温度 /℃	−40~100
相对湿度 /%	0~100
压力 /kPa	30~110
CO_2浓度 /10^{-6}	0~3 000
气溶胶浓度 /(mg/m^3)	0~1 000

(1) 打开黑体，温度设置为200 ℃，沿着垂直于大面源黑体的中轴线对各测点进行标记，并将光谱辐射计和在线式多参数监测系统放置在距离黑体0.5 m处；

(2) 待黑体温度稳定后，用光谱辐射计采集数据可得$V(l_0)$，同时记录在线式多参数监测系统所测量的大气参数；

(3) 数据记录后，将光谱辐射计和在线式多参数监测系统移至下一个测点；

(4) 用光谱辐射计采集数据$V(l)$，同时记录在线式多参数监测系统所测量的大气参数；

(5) 重复步骤(3)和步骤(4)，完成所有测点的数据采集；

(6) 根据公式(1)得到不同测点的大气透过率的实测值；

(7) 根据不同测点记录的大气参数，采用大气参数修正模型计算出大气透过率T；

(8) 重复步骤(1)~(7)，完成两次测试；

(9) 用第一次大气透过率实测值和模型计算值进行对比，计算出修正系数；

(10) 用第二次大气透过率实测值乘以修正系数，并与模型计算值进行对比，计算出相对误差，再根据相对误差判断该方法的可行性。

5 测试结果

5.1 大气透过率的实测结果

经过两次大气透过率测试后，根据公式(1)可以计算出波段为3~5 μm(中波波段)和8~14 μm(长波波段)的不同距离处的大气透过率，计算结果见表4和表5。

5.2 基于实测大气参数修正的大气透过率计算结果

根据实时大气参数测量结果，通过修正模型计算出大气透过率，计算结果如表6和表7所示。

表 4　第一次大气透过率实测结果
Table 4　Measured results of the first atmospheric transmittance

距离 /m	10.0	30.0	60.0	68.0	70.0	80.0	90.0	125.0	150.0	170.0	200.0
8~14 μm 波段大气透过率	0.890	0.787	0.803	0.800	0.800	0.795	0.791	0.792	0.794	0.791	0.779
3~5 μm 波段大气透过率	0.772	0.627	0.663	0.658	0.660	0.653	0.648	0.650	0.649	0.640	0.627

表 5　第二次大气透过率实测结果
Table 5　Measured results of the second atmospheric transmittance

距离 /m	10.0	30.0	60.0	68.0	70.0	80.0	90.0	125.0	150.0	170.0	200.0
8~14 μm 波段大气透过率	0.890	0.851	0.833	0.834	0.830	0.830	0.827	0.813	0.805	0.800	0.781
3~5 μm 波段大气透过率	0.798	0.737	0.714	0.712	0.705	0.708	0.704	0.685	0.673	0.667	0.640

表 6　第一次基于大气参数修正的测试方法计算结果
Table 6　Calculation results of the test method based on atmospheric parameter correction for the first time

距离 /m	10.0	30.0	60.0	68.0	70.0	80.0	90.0	125.0	150.0	170.0	200.0
温度 /℃	32.8	32.9	33.3	33.4	33.5	33.5	34	35.6	36.3	36.7	36.7
湿度 /%	31	30	30	29	27	28	27	25	21	21	18
压力 /kPa	93.8	93.8	93.8	93.8	93.7	93.7	93.7	93.7	93.7	93.7	93.4
CO_2 浓度 /10^{-6}	339	329	324	330	309	309	309	326	313	314	316
气溶胶浓度 /(mg/m^3)	44	43	43	42	43	43	43	44	43	43	51
8~14 μm 波段大气透过率	0.989	0.973	0.953	0.949	0.948	0.942	0.937	0.920	0.906	0.899	0.891
3~5 μm 波段大气透过率	0.910	0.870	0.836	0.829	0.828	0.819	0.812	0.789	0.773	0.764	0.753

表 7　第二次基于大气参数修正的测试方法计算结果
Table 7　Calculation results of the test method based on atmospheric parameter correction for the second time

距离 /m	10.0	30.0	60.0	68.0	70.0	80.0	90.0	125.0	150.0	170.0	200.0
温度 /℃	32.8	32.9	33.3	33 .4	33.5	33.5	34	35.6	36.3	36.7	36.7
湿度 /%	31	30	30	29	27	28	27	25	21	21	18
压力 /kPa	93.4	93.4	93.4	93.4	93.4	93.4	93.4	93.4	93.4	93.4	93.4
CO_2 浓度 /10^{-6}	318	339	335	318	338	319	325	327	332	328	343
气溶胶浓度 /(mg/m^3)	49	52	49	49	49	48	49	50	51	50	49
8~14 μm 波段大气透过率	0.990	0.976	0.958	0.955	0.956	0.950	0.946	0.931	0.928	0.920	0.919
3~5 μm 波段大气透过率	0.912	0.874	0.841	0.835	0.836	0.827	0.821	0.799	0.792	0.782	0.777

5.3　对比分析

根据第一次大气透过率实测结果和理论计算结果，可计算出修正系数，计算结果如表 8 所示。根据表 8 中的大气透过率修正系数可对第二次大气透过率实际测量值进行修正，并与理论计算值相比较，计算结果如表 9 所示。从表 9 可以看出，长波波段修正后的大气透过率和理论计算的大气透过率平均相对误差为 2.81%，中波波段修正后的大气透过率和理论计算的大气透过率平均相对误差为 5.77%。根据以上计算结果，可以表明该大气透过率修正方法可行。

6　结论

提出了一种基于实测大气参数修正的外场水平大气透过率测试方法，以标准大面源黑体为测试目标，进行了大气透过率测试。沿着大面源黑体中轴线布设在线式传感器，对不同距离处的气体进行实时采集，并与实测大气透过率相比，计算出大气修正系数，建立修正模型。研究获得了以下结果：

(1)　长波波段修正后的大气透过率与理论计算的大气透过率的平均相对误差为 2.81%。

(2)　中波波段修正后的大气透过率与理论计算

表8 第一次修正系数计算结果

Table 8 Calculation results of the correction factor for the first time

距离/m	10.0	30.0	60.0	68.0	70.0	80.0	90.0	125.0	150.0	170.0	200.0
8~14 μm波段修正系数	1.111	1.236	1.187	1.186	1.186	1.185	1.185	1.161	1.141	1.137	1.143
3~5 μm波段修正系数	1.179	1.387	1.261	1.260	1.253	1.255	1.253	1.213	1.192	1.194	1.201

表9 第二次修正结果与相对误差

Table 9 Calculation results of the correction factor for the second time

距离/m	10.0	30.0	60.0	68.0	70.0	80.0	90.0	125.0	150.0	170.0	200.0
8~14 μm波段修正结果	0.990	1.052	0.989	0.988	0.985	0.983	0.980	0.944	0.919	0.910	0.892
相对误差/%	0.04	7.76	3.24	3.48	2.99	3.44	3.60	1.42	1.00	1.11	2.87
3~5 μm波段修正结果	0.941	1.023	0.900	0.897	0.884	0.888	0.882	0.830	0.802	0.797	0.768
相对误差/%	3.16	17.03	7.02	7.35	5.72	7.35	7.52	3.97	1.27	1.93	1.14

的大气透过率的平均相对误差为5.77%。

(3) 提出的测试方法合理可行，可为后续发动机试车状态的大气透过率测试提供更多的测试手段。

参考文献：

[1] 刘 涛，丁 旭，张 琦. 航空发动机整机红外辐射特性台架试验方案研究 [J]. 现代机械，2020，(1)：41—45.

[2] 王毕艺，赵万利，李森森. 一种激光大气透过率测量方法的研究 [J]. 光电技术应用，2020，35(5)：77—80.

[3] 姚凯凯，王 浩，许 帆，等. 光谱仪在发动机红外隐身测评中的应用研究 [J]. 激光与红外，2020，50(8)：975—980.

[4] 王 充，汪卫华. 红外辐射大气透过率研究综述 [J]. 装备环境工程，2011，8(4)：4.

[5] 台宏达，庄子波，蒋立辉，等. 大气透过率的多点移动测量 [J]. 光学精密工程，2016，24(8)：1894—1901.

[6] 孙国栋，秦来安，侯再红. 有限距离大气透过率实验研究 [J]. 中国激光，2017，44(12)：9.

[7] 王智平，李 周. 水平方向上的大气透过率和热辐射计算模型研究 [J]. 红外，2019，40(12)：15—21.

[8] 戴聪明，魏合理，陈秀红. 通用大气辐射传输软件(CART)大气散射辐射计算精度验证 [J]. 红外与激光工程，2013，23(6)：7.

[9] 陈秀红，魏合理，吕炜煜，等. CART软件计算的红外大气透过率和实测值比较 [J]. 激光与红外，2009，39(4)：4.

[10] 陈秀红，魏合理，徐青山. 红外大气透过率的计算模式 [J]. 红外与激光工程，2011，40(5)：811—816.

[11] 杨建清，罗积军，徐 军，等. 基于CART的红外辐射大气透过率的计算 [J]. 激光与光电子学进展，2018，55(3)：030101.