

文章编号: 1000-8055(2007)09-1423-07

# 用 FTIR 光谱仪测量排气系统中红外光谱辐射强度的方法

罗明东, 吉洪湖, 黄 伟, 蔡 旭, 高 潮  
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

**摘 要:** 通过理论分析及实验研究讨论了傅立叶变换红外 (FTIR) 光谱仪测量排气系统中红外光谱辐射强度过程中误差产生的原因, 设计了一套简易有效的测量方法. 用此方法测量了黑体和热喷流的光谱辐射强度. 结果表明: 该测量方法能够有效地获得排气系统的中红外光谱辐射强度, 具有工程实用价值.

**关 键 词:** 航空、航天推进系统; 傅立叶变换红外光 (FTIR) 谱仪; 排气系统; 光谱辐射强度

**中图分类号:** V231. 1

**文献标识码:** A

## Research on measurement method of mid-IR spectral radiant intensity of exhaust system with FTIR spectrometer

LUO Ming-dong, JI Hong-hu, HUANG Wei, CAI Xu, GAO Chao

(College of Energy and Power Engineering,

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

**Abstract:** The reasons of error occurred in measuring Mid-IR spectral radiant intensity of exhaust system with Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer was discussed through theoretical analysis and experimental research. A simple and efficient measurement method was also planned to measure the spectral radiant intensity of a blackbody and a hot plume. The results show that Mid-IR spectral radiant intensity of exhaust system could be measured effectively by this method, thus offering a high value of engineering practicability.

**Key words:** aerospace propulsion system; Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer; exhaust system; spectral radiant intensity

飞机排气系统的热部件和热喷流的红外辐射是红外制导导弹在中红外波段的主要搜索和跟踪对象. 在发展红外隐身飞机和高性能对空红外制导武器时都需要对飞机排气系统的红外辐射特征有详细的了解. 最常用的反映排气系统红外辐射特征的物理量是光谱辐射强度, 它的获得主要是通过实验测量和数值模拟, 其中由实验测量得到的数据还可以为数值模拟提供校核依据, 完善数值模拟的方法和程序<sup>[1]</sup>. 为此, 发展一套高精度的排气系统中红外光谱辐射强度测量方法具有重大的实际意义.

傅立叶变换红外 (FTIR) 光谱仪是一种可用于测量排气系统红外辐射强度的仪器, 它的测量原理建立在对双光束干涉度量的基础上, 并应用傅立叶变换实现光谱测量, 相对于其它依据光的折射和衍射而设计的光谱仪具有多通道同时测量、高通量、高信噪比等优点, 并且对于高精度的红外光谱测量而言, 它几乎是目前唯一的选择. 但与其它测量仪器一样, 用 FTIR 光谱仪测量目标光谱辐射强度的时候也不可避免地存在着误差. 为了减小测量误差、提高测量精度, 人们作了大量

收稿日期: 2006-09-07; 修订日期: 2006-12-04

作者简介: 罗明东 (1977-), 男, 四川双流人, 博士, 主要从事飞行器排气系统红外隐身技术的研究.

的工作,如 Kroutil 等<sup>[2]</sup>和 George 等<sup>[3]</sup>研究了仪器的响应对测量精度的影响,张天舒等<sup>[4]</sup>、朱军等<sup>[5]</sup>、张黎明等<sup>[6]</sup>和吴航行等<sup>[7]</sup>分别从不同的侧面研究了通过改变标定方法提高测量精度的有关问题.

本文作者在用 BOMEM 公司生产的 MR100 型 FTIR 光谱仪测量排气系统的中红外辐射强度时,发现光谱仪存在着很明显的由标定漂移引起的误差,同时背景辐射的变化对实验结果也有明显的影响.本文的研究从测量原理和标定原理展开,分析了实验中误差产生的原因、讨论了误差的修正方法,设计了一套简易有效的排气系统中红外光谱辐射强度测量方法.运用本文设计的方法测量了黑体和热喷流的光谱辐射强度,结果表明该方法能够准确地测量排气系统的中红外光谱辐射强度,具有实用价值.

# 1 傅立叶变换红外光谱仪的测量、标定原理

## 1.1 测量原理

光谱辐射强度是描述点目标辐射源特性的物理量.所谓点目标,就是目标的物理尺寸可以忽略不计,将其抽象为一个点源,否则就是扩展源.在实际情况中真正的点目标是不存在的,能否把目标看成是点目标,首要问题不是目标的真实物理尺寸,而是它相对探测器所张的立体角的大小.一般来讲,探测距离比目标的最大尺寸大 30 倍就可把它视为一个点目标,它的光谱辐射强度是指它在单位时间、单位波长、单位立体角内所发出的辐射能量,单位是  $W/(sr \cdot \mu m)$ .根据定义,不考虑大气吸收时目标光谱辐射强度的理论值可以通过公式(1)来计算.

$$I_{\lambda, target}^0 = \overline{L_{\lambda, target}^0} A_{\theta} \tag{1}$$

公式(1)中  $A_{\theta}$  表示目标在探测方向的投影面积,单位为  $cm^2$ ;  $\overline{L_{\lambda, target}^0}$  表示目标表面在该方向发出的平均光谱辐射亮度.光谱辐射亮度是指单位面积在单位时间、单位波长、单位立体角内发射或通过的辐射能量,单位为  $W/(sr \cdot cm^2 \cdot \mu m)$ .

假设厚度为  $R$ (单位为  $cm$ ) 的空气的光谱透过率为  $\tau_{\lambda}$ ,那么目标在距离  $R$  处的光谱辐射强度  $I_{\lambda, target}^R$  与  $I_{\lambda, target}^0$  之间的关系为

$$I_{\lambda, target}^R = \tau_{\lambda}^0 I_{\lambda, target}^0 \tag{2}$$

图 1 给出了用 FTIR 光谱仪测量时探测器与目标的几何关系示意图.在探测器的前方设置了一个光阑孔,由探测器表面和光阑孔形成的空间

锥域为探测器的视场,只有视场内的物体的辐射才能投射到探测器上.用 FTIR 光谱仪测量点目标在距离  $R$  处的光谱辐射强度  $I_{\lambda}^R$  的实质是平均入射光谱辐射亮度的测量,包括目标与背景组合的平均入射光谱辐射亮度  $\overline{L_{\lambda, source}^R}$  的测量,背景的平均入射光谱辐射亮度  $\overline{L_{\lambda, background}^R}$  的测量.将两者相减得到目标的平均入射光谱辐射亮度  $\overline{L_{\lambda, target}^R}$ ,如公式(3).

$$\overline{L_{\lambda, target}^R} = \overline{L_{\lambda, source}^R} - \overline{L_{\lambda, background}^R} \tag{3}$$

公式中  $\overline{L_{\lambda, target}^R}$  表示探测距离为  $R$  时,目标 A 在视场立体角为  $\Omega$  的光谱仪的探测器表面形成的光谱辐射亮度,也可以理解为视场在  $R$  处的圆截面  $S$  的平均发射光谱辐射亮度和空气光谱透过率  $\tau_{\lambda}$  的乘积,但是圆截面上目标 A 以外的阴影部分不发射能量.  $I_{\lambda, target}^R$  和  $\overline{L_{\lambda, target}^R}$  的关系如公式(4)所示.

$$I_{\lambda, target}^R = \overline{L_{\lambda, target}^R} S \tag{4}$$

根据立体角的定义

$$S = \Omega R^2 \tag{5}$$

将公式(5)代入公式(4)得到

$$I_{\lambda, target}^R = \overline{L_{\lambda, target}^R} \Omega R^2 \tag{6}$$

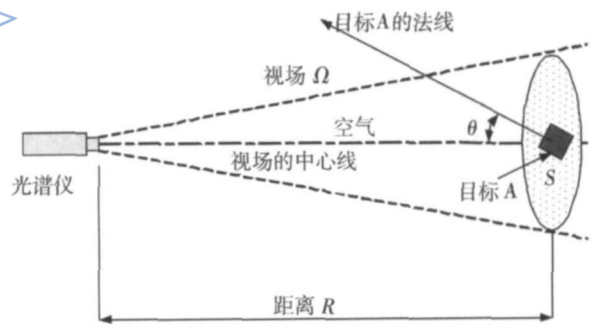


图 1 测量过程中光谱仪与点目标的位置关系

Fig. 1 Placement of spectrometer and point target while measuring

## 1.2 标定原理<sup>[8-9]</sup>

理想的 FTIR 光谱仪是线性仪器,即测量得到的光谱辐射亮度正比于落到探测器上的辐射线的光谱辐射亮度.落到探测器上的光谱辐射功率由两部分组成,景物的辐射和仪器内部的辐射.

图 2 给出了光谱仪测量得到的景物的光谱辐射亮度  $L_{\lambda}^0$  和景物自身的光谱辐射亮度  $L_{\lambda, source}$  之间的线性关系,从图中可以看出,一个没有标定的测量可以表示为

$$L_{\lambda}^0 = K_{\lambda}(L_{\lambda, source} + L_{\lambda}^{stray}) \tag{7}$$

公式(7)中  $K\lambda$  是光谱仪的光谱响应函数,  $L_{\lambda}^{stray}$  是光谱仪内部杂乱的光谱辐射亮度. 将公式(7)进行变换得到

$$L_{\lambda, source} = K\lambda^{-1} L_{\lambda}^m - L_{\lambda}^{stray} \tag{8}$$

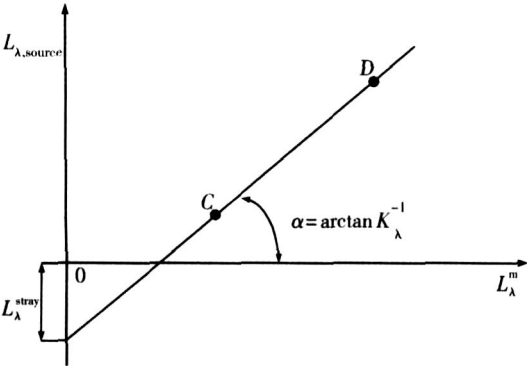


图 2  $L_{\lambda}^m$  和  $L_{\lambda, source}$  之间的线性关系  
Fig. 2 Linear relation between  $L_{\lambda}^m$  and  $L_{\lambda, source}$

从公式(8)可以看出如果要确定  $L_{\lambda, source}$  就必须确定参数  $K\lambda^{-1}$  和  $L_{\lambda}^{stray}$ , 这两个参数是通过对光谱仪进行标定确定的. 在标定过程中利用黑体作为已知辐射源, 为了确定这两个参数, 在标定过程中至少需要测量两个或者两个以上不同温度的黑体光谱辐射亮度. 考虑到空气吸收的影响, 标定过程中都是将黑体近距、视场充满的情况下放置在探测器前方, 如图 3 所示.

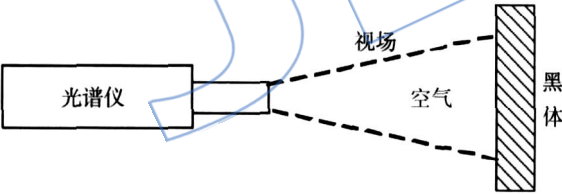


图 3 标定过程中光谱仪和黑体的位置关系  
Fig. 3 Placement of the spectrometer and blackbody while calibrating

将已知参数代入公式(8), 可以看出标定过程的实质就是求解如公式(9)所示的方程组

$$\begin{aligned} L_{\lambda, T_1} &= K\lambda^{-1} L_{\lambda, T_1}^m - L_{\lambda}^{stray} \\ L_{\lambda, T_2} &= K\lambda^{-1} L_{\lambda, T_2}^m - L_{\lambda}^{stray} \end{aligned} \tag{9}$$

公式(9)中  $L_{\lambda, T_1}^m$  和  $L_{\lambda, T_2}^m$  是没有标定的情况下光谱仪在两次测量中输出的原始光谱辐射亮度,  $L_{\lambda, T_1}$  和  $L_{\lambda, T_2}$  分别是温度为  $T_1$  和  $T_2$  的黑体的光谱辐射亮度, 可以根据普朗克定律来计算.

将  $L_{\lambda, T_1}^m, L_{\lambda, T_2}^m, L_{\lambda, T_1}$  和  $L_{\lambda, T_2}$  代入公式(9)可以得到  $K\lambda^{-1}$  和  $L_{\lambda}^{stray}$ , 实现对光谱仪的标定.

2 测量误差的分析及修正

排气系统红外辐射强度测量过程中的误差主要有两个来源: (1) 光谱仪工作状态变化引起的误差; (2) 背景辐射的变化引起的误差.

2.1 光谱仪工作状态变化引起的误差

在作者使用 MR100 型 FTIR 光谱仪对同一个稳定目标进行长时间的红外光谱辐射特性的测量时发现光谱仪存在着随着时间延长而不断增加的误差.

在正确标定的情况下引起 FTIR 光谱仪这种误差的主要原因有两个: (1) 标定漂移引起的误差. 这是指光谱仪在标定后的使用过程中标定曲线的斜率误差, 即  $K\lambda^{-1}$  发生变化而引起的误差, 能引起这个误差的因素包括在标定测量和实际测量之间能使光谱仪的内部响应和增益改变的所有事物, 如探测器所处环境温度、电子增益的稳定性、探测器响应度的稳定性和光学结构的稳定性等; (2) 光谱仪内部热辐射变化引起的误差. 这是指光谱仪工作过程中  $L_{\lambda}^{stray}$  变化引起的误差, 影响它的主要因素是光谱仪内部温度的变化.

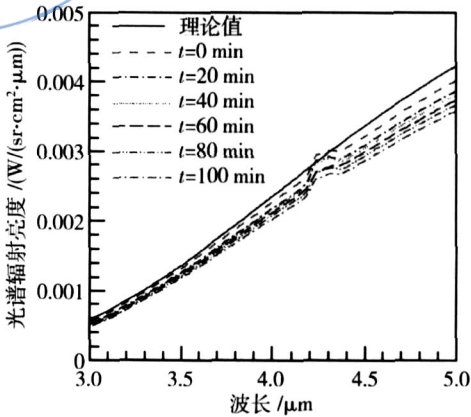


图 4 不同时刻测得的黑体光谱辐射亮度  
Fig. 4 Spectral radiance of the blackbody measured on different time

为了更好地分析这两种误差对测量结果的影响, 并且对修正方法进行探讨, 本文对近距离、视场充满的恒温黑体进行了较长时间的重复测量, 测量结果如图 4 所示. 图中,  $t = 0$  时刻的误差主要是由于采集完标定信号以后, 除了必须通过计算生成标定曲线以外, 还必须把黑体放置在光谱仪前方, 并且要等到它的温度完全稳定才能进行测量, 因此该测量时间与标定光谱采集的时间还是有一定的间隔. 由于随着时间增加, 图 4 所示测

量结果在各波段的变化规律基本一致,就有可能对其进行修正。

现对其修正方法做如下讨论,(1)将测得的黑体在  $3.75\text{ }\mu\text{m}$  处光谱辐射亮度与理论值进行比较得到衰减系数  $\beta(t)$ ,如图5所示,从图中可以看出  $\beta(t)$  随着时间的延长而降低。选择  $3.75\text{ }\mu\text{m}$  的数值为比较点的原因是在该处空气的透过率接近或等于  $1^{[10]}$ ;(2)在整个波段内用  $\beta^{-1}(t)$  乘以测量得到的黑体的光谱辐射亮度得到修正后的黑体光谱辐射亮度,图6所示为各个时刻测量得到的光谱辐射亮度在修正后和理论值的比较。从图中可以看出经过线性修正以后测量光谱辐射亮度和理论值在  $3.0\sim 4.2\text{ }\mu\text{m}$  波段几乎完全重合,误差在  $1\%$  以内;在  $4.2\sim 4.4\text{ }\mu\text{m}$  波段差异比较大;在  $4.5\sim 5.0\text{ }\mu\text{m}$  存在一定的差异,误差在  $3\%$  以内。

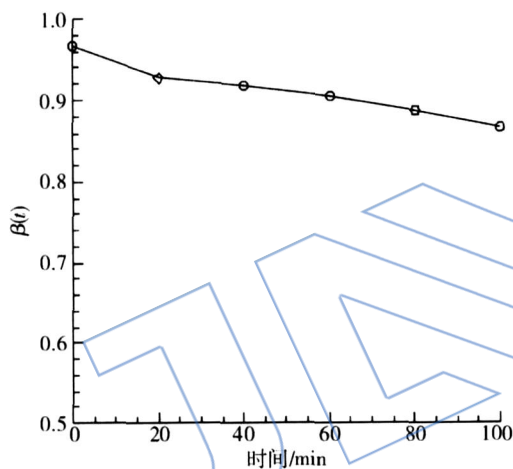


图5  $\beta(t)$  随着时间的变化

Fig. 5 Relation of  $\beta(t)$  and time

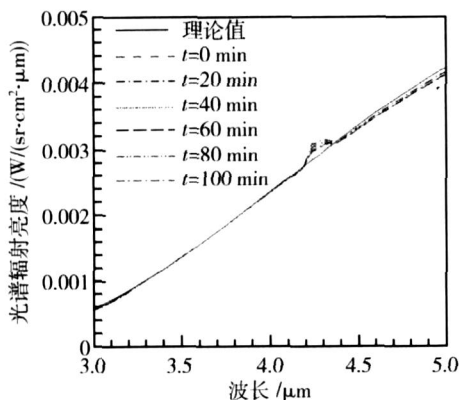


图6 修正后的黑体光谱辐射亮度

Fig. 6 Spectral radiance of the blackbody after revised

在  $4.2\sim 4.4\text{ }\mu\text{m}$  波段的较大差异是由于探测器和黑体之间的空气受热,内含的  $\text{CO}_2$  的热辐射产生的。

综合图4~图6可以看出:(1)误差主要由标定漂移产生,随着时间的增加导致测量结果降低,并且漂移产生的误差可以通过  $\beta^{-1}(t)$  来修正,同时在  $\text{CO}_2$  吸收-发射带以外  $\beta^{-1}(t)$  与波长无关;(2)随着时间的延长在  $3.0\text{ }\mu\text{m}$  附近误差的逐渐出现说明  $L_{\lambda}^{\text{stray}}$  是随时间变化的,并且它对测量结果的影响逐渐增加,从误差出现的波段和数值大小基本可以断定误差是因为光谱仪内部空气的温度升高导致  $L_{\lambda}^{\text{stray}}$  发生变化。

## 2.2 背景辐射变化引起的误差

对排气系统光谱辐射强度测量过程中,不可能出现图3所示的目标充满视场的情况,实际情况如图1或图7所示。在这种情况下喷管外壁面和环境就成了背景,其中喷管外壁面的温度随发动机工作状态的变化而变化,这导致公式(3)中  $L_{\lambda, \text{background}}^R$  的数值较大,并且随时间变化特别明显。

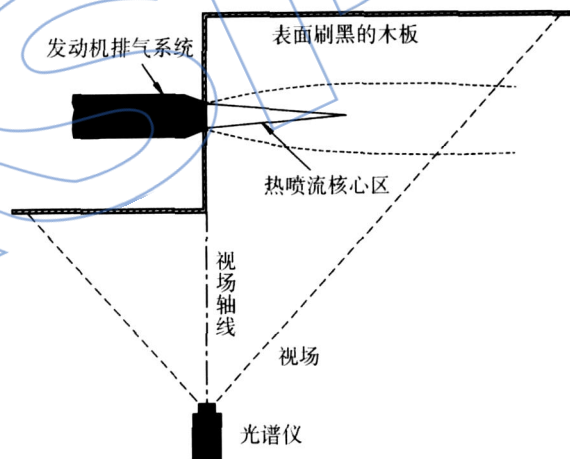


图7 实验系统的示意图

Fig. 7 Sketch map of the experiment system

对排气系统红外辐射强度的测量必须尽量避免环境红外辐射很强或者极不稳定(比如阳光很强或闪烁的灯光等)的情况。为了提高实验的精确性,最好能够布置背景屏蔽装置,如图7所示,利用该装置屏蔽该装置后方的杂光以及喷管壁面的热辐射。同时为了减少该装置对入射辐射的反射、减少其自身热辐射变化对测量结果的影响,必须选用表面黑度较高、温度稳定的材料,图7中选用的材料是表面被亚光漆刷黑的木板。

## 3 排气系统光谱辐射强度测量方法的设计

为了实现对排气系统红外光谱辐射强度的准

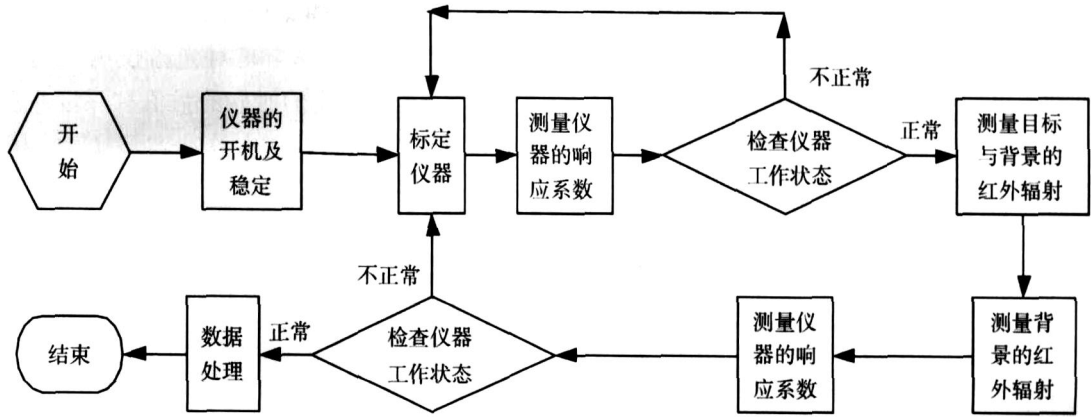


图 8 基本测量步骤

Fig.8 Main step of the measuring method

确测量,本文设计了如图 8 所示的测量方法.其中仪器的开机及稳定这个步骤除了接通电源和监控以外,主要就是利用液氮给探测器制冷,并且其效果需要用标定后对仪器工作状态的检查来说明,仪器的标定、仪器的衰减系数的测量分别按第 1.2 节和第 2.1 介绍的方法进行,因此本节主要介绍检查仪器工作状态以及数据处理两部分.

### 3.1 检查仪器工作状态

检查光谱仪工作状态是在测量得到仪器的衰减系数  $\beta(t)$  的基础上进行的,该部分工作的主要内容是将  $\beta^{-1}(t)$  与测量得到的黑体的光谱辐射亮度相乘得到修正后的黑体光谱辐射亮度,并将它和理论值进行比较,如果它没有出现杂波情况,并且和理论值符合较好,两者在  $4.2 \sim 4.4 \mu\text{m}$  波段外的误差小于 10%,则可以认为光谱仪的工作状态正常,仪器的测量误差主要由可修正的标定漂移产生,而且其内部热辐射和标定的时候相比没有明显变化;否则仪器工作状态和标定的情况相比已经有很大的变化,并且其内部热辐射引起的误差已经逐渐明显,必须重新进行标定.

### 3.2 数据处理

在完成测量工作以后,需要对测量结果进行数据处理得到排气系统的光谱辐射强度,具体过程如下:

(1) 求得修正系数  $\beta^{-1}(t_m)$ , 如公式(10)

$$\beta^{-1}(t_m) = \frac{|t_2 - t_m|}{|t_1 - t_2|} \beta^{-1}(t_1) + \frac{|t_1 - t_m|}{|t_1 - t_2|} \beta^{-1}(t_2) \quad (10)$$

公式(10)中  $t_1$  和  $t_2$  分别是测量充满视场黑体光谱辐射亮度的时刻,  $t_m$  是对排气系统和背景的红外辐射进行测量的时刻.

(2) 对光谱仪输出的光谱辐射亮度进行修正,如公式(11)和(12)

$$L_{\lambda, \text{source}}^{R, m} = \beta^{-1}(t_m) L_{\lambda, \text{source}}^{R, m} \quad (11)$$

$$L_{\lambda, \text{background}}^{R, m} = \beta^{-1}(t_m) L_{\lambda, \text{background}}^{R, m} \quad (12)$$

公式中  $L_{\lambda, \text{source}}^{R, m}$ ,  $L_{\lambda, \text{background}}^{R, m}$  是光谱仪输出的光谱辐射亮度.

(3) 计算排气系统的光谱辐射强度,如公式(3)和(6).

## 4 测量方法的验证

为了验证本文设计的测量方法在排气系统光谱辐射强度测量上应用的可靠性,测量了远距离黑体的光谱辐射强度,测量了非加力涡扇发动机排气系统缩比模型的热喷流的光谱辐射强度.

### 4.1 黑体光谱辐射强度的测量

在实验中采用被亚光漆刷黑的木板作为背景屏蔽装置,待测黑体的有效辐射面直径为 50 mm、表面温度为  $280^\circ\text{C}$ ,它与光谱仪的距离为 10 m,远大于有效辐射面的直径,因此在后面的论述中简称该黑体为远距黑体.

实验中通过测量和光谱仪位置关系如图 3 的近距黑体的光谱辐射亮度来确定  $\beta^{-1}(t_m)$ ,并检查光谱仪工作状态,该黑体的表面温度等于  $150^\circ\text{C}$  因为测量过程较快,实验前后测量得到的  $\beta^{-1}(t_1)$  和  $\beta^{-1}(t_2)$  的数值都约等于 1.11. 图 9 是近距光谱视场的黑体的光谱辐射亮度,图中实线是理论曲线,虚线是原始测量结果,点划线是修正后的结果.可见修正后的结果没有出现杂波,并且和理论值符合较好,两者在  $4.2 \sim 4.4 \mu\text{m}$  波段外的误差小于 5%,可以认为光谱仪的工作状态正常.

图 10 是用本文方法测得的远距黑体的光谱

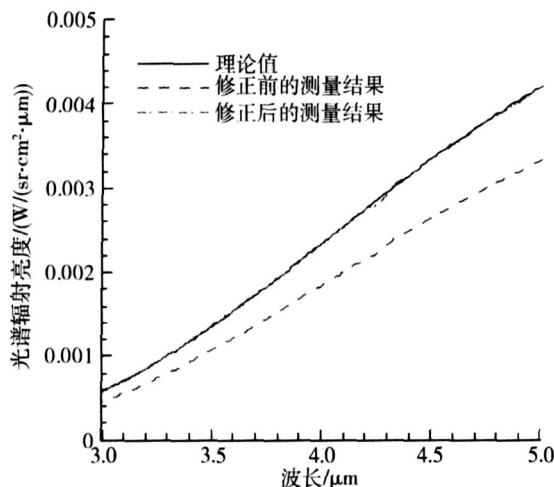


图9 近距黑体的光谱辐射亮度

Fig. 9 Spectral radiance of the blackbody near the spectrometer

辐射强度,图中实线是不考虑大气吸收的理论值  $I_{\lambda, \text{target}}^0$ , 虚线是测得的黑体的光谱辐射强度  $I_{\lambda, \text{target}}^{R, m}$ . 因为空气在  $4.26 \mu\text{m}$  附近透过率接近或等于零, 光谱仪实际接收到的目标辐射能量很微弱, 本文不讨论通过测量  $I_{\lambda, \text{target}}^{R, m}$  得到目标辐射强度  $I_{\lambda, \text{target}}^0$  的问题. 从图中可以看出,  $I_{\lambda, \text{target}}^{R, m}$  除了在  $4.2 \sim 4.4 \mu\text{m}$  波段出现明显波谷外, 随波长变化的规律总体上和  $I_{\lambda, \text{target}}^0$  一致, 并且其数值略小于  $I_{\lambda, \text{target}}^0$ .

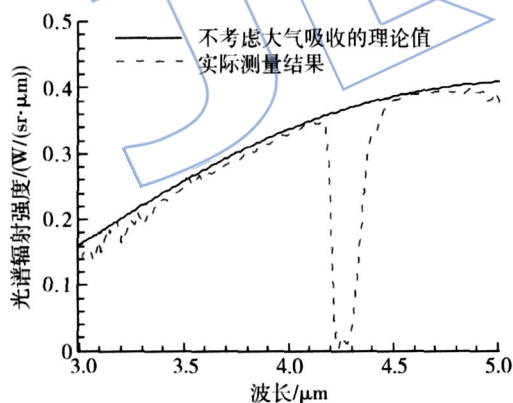


图10 远距黑体的光谱辐射强度

Fig. 10 Spectral radiant intensity of the blackbody far from the spectrometer

$I_{\lambda, \text{target}}^{R, m}$  在  $4.2 \sim 4.4 \mu\text{m}$  波段出现明显波谷是由于空气中  $\text{CO}_2$  的吸收产生; 在  $3.0 \sim 3.5 \mu\text{m}$ ,  $4.2 \sim 4.4 \mu\text{m}$  和  $4.75 \sim 5.0 \mu\text{m}$  波段  $I_{\lambda, \text{target}}^{R, m}$  明显小于  $I_{\lambda, \text{target}}^0$  的现象是由于空气中  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}$  的吸收造成的.

在  $3.5 \sim 4.2 \mu\text{m}$ ,  $4.4 \sim 4.75 \mu\text{m}$  波段, 空气的透过率在距离小于  $100 \text{ m}$  时接近或等于  $1^{[10]}$ ,

$I_{\lambda, \text{target}}^{R, m}$  与  $I_{\lambda, \text{target}}^0$  在这些波段的差别主要是因为黑体的辐射面没有完全正对光谱仪的光阑孔、仪器内部  $I_{\lambda, \text{stray}}$  与标定的时候的数值有一定差别产生, 同时从图中可以看出在这些波段  $I_{\lambda, \text{target}}^{R, m}$  和  $I_{\lambda, \text{target}}^0$  的最大差别在  $5\%$  左右.

#### 4.2 热喷流光谱辐射强度的测量

测量非加力涡扇发动机排气系统缩比模型的热喷流的光谱辐射强度的时候, 实验系统的设计如图7所示, 光谱仪的探测方向与发动机的轴线垂直. 这样的布置使得光谱仪不能“看”到喷管固壁, 并且热喷流的高温核心区完全位于光谱仪的视场内. 实验在晴天、无风的傍晚进行, 并且测量距离为  $15 \text{ m}$ , 同时喷管出口的直径为  $0.16 \text{ m}$ , 热喷流核心区的温度在  $600^\circ\text{C}$  左右.

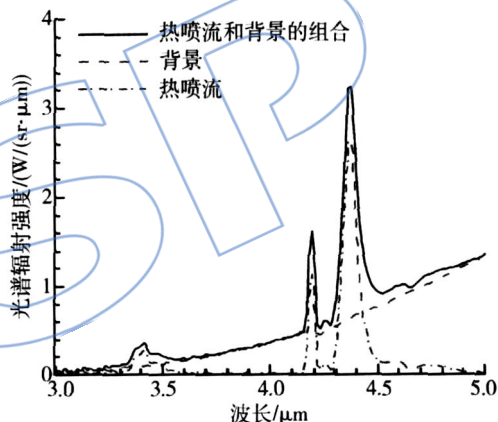


图11 热喷流的光谱辐射强度

Fig. 11 Spectral radiant intensity of the hot plume

图11是按前文方法测量与处理得到的结果, 其中的实线是测得的热喷流与背景的组合辐射强度, 可以看出没有高温喷管壁面的辐射贡献, 峰值是由于热喷流中不同气体成分的热辐射产生; 虚线是完成对组合辐射强度测量, 并且完全停止喷流以后对背景光谱辐射强度的测量结果, 可以看出其线型很光滑; 点划线是最终处理得到的热喷流的光谱辐射强度, 它只表现出了气体的辐射特征, 而没有明显的固体辐射, 这证明合理进行背景屏蔽装置的设计可以消除背景辐射变化对测量结果的影响, 获得热喷流的光谱辐射强度.

## 5 结 论

(1) 傅立叶变换红外光谱仪测量排气系统中红外光谱辐射强度的误差主要包括光谱仪工作状态变化引起的误差和背景辐射变化引起的误差.

(2) 光谱仪工作状态变化引起的误差包括标定漂移引起的误差和光谱仪热辐射变化引起的误

差,其中标定漂移引起的误差可以通过对近距、充满视场的黑体的测量结果来修正,而光谱仪热辐射变化引起的误差无法通过简单修正来降低或消除,只有在严重影响测量结果的时候通过重新标定来解决。

(3) 消除或降低背景辐射的变化引起的误差除了需要选择适当的实验环境外,还必须合理设计背景屏蔽装置。

(4) 本文的测量方法操作上简单易行、数据处理简单,并且能够准确测量黑体或热喷流在经过空气传输以后的中红外光谱辐射强度,因此可以用来测量发动机排气系统的中红外光谱辐射强度,具有实用价值。

## 参考文献:

- [1] Varney G E. Infrared signature measurement techniques and simulation methods for aircraft survivability [R]. AIAA-79-1186.
- [2] Kroutil R T, Combs R J, Knapp R B. Radiometric linearity in passive FTIR spectrometry [J]. SPIE, 1999, 3856: 34-43.
- [3] George M R, Bill P. Uncertainties in FTIR data due to a nonlinear response [J]. SPIE, 1998, 3534: 176-186.
- [4] 张天舒, 刘文清, 高闽光, 等. 傅里叶变换红外光谱仪复数光谱误差分析及辐射定标方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(3): 430-433.  
ZHANG Tianshu, LIU Wenqing, GAO Minguang, et al. Error analysis and calibration method of complex spectrum of fourier transform infrared spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(3): 430-433.
- [5] 朱军, 刘文清, 陆亦怀, 等. 基于 FTIR 光谱辐射测量分析空气透过率 [J]. 光学技术, 2005, 31(4): 627-629.  
ZHU Jun, LIU Wenqing, LU Yihuai, et al. Analysis of atmospheric transmittance based on FTIR spectra measurements [J]. Optical Technique, 2005, 31(4): 627-629.
- [6] 张黎明, 张琳, 李燕, 等. 被动式遥感 FTIR 测量时的仪器响应函数校正 [J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(1): 45-46.  
ZHANG Liming, ZHANG Lin, LI Yan, et al. The calibration of instrument response function during passive FTIR measurement [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(1): 45-46.
- [7] 吴航行, 王模昌. 傅立叶变换光谱仪信号调制度下降的分析 [J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(5): 337-344.  
WU Hangxing, WANG Mochang. Analysis of the decrease of signal modulation in fourier transform spectrometer [J]. J. Infrared Millim Waves, 2004, 23(5): 337-344.
- [8] ABB Bomen Inc. MR series FT-spectro radiometer design overview and theory (Version 3.0) [M]. Quebec, Canada: ABB Bomen Inc, 1999.
- [9] ABB Bomen Inc. MR series FT-spectro radiometer research acquire radiometric software manual (Version 3.0) [M]. Quebec, Canada: ABB Bomen Inc, 1999.
- [10] 徐南荣, 卞恩华. 红外辐射与制导 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.