

·光电系统与·设计·

分离变量法的瞬态高温实验研究

贾晓雯, 姜三平, 郝晓剑, 周汉昌

(中北大学电子测试技术国家级重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要:分析了蓝宝石光纤温度传感器测试系统组成及工作原理, 由于黑体腔膜层内外表面存在较大温差, 使得该系统测出的被测物温度存在一定误差. 为了解决这一问题, 运用分离变量法从黑体腔内表面温度外推出黑体腔外表面温度, 降低了测试对传感器的性能要求, 实验验证了该方法的可行性, 提高了蓝宝石光纤黑体腔温度传感器的测温精度.

关键词:黑体腔; 外推法; 分离变量法

中图分类号: TN206

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)04-0009-03

Separation of Variables Method in Application of Transient High-temperature Measurement

JIA Xiao-wen, JIANG San-ping, HAO Xiao-jian, ZHOU Han-chang

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The composition and the working principle of the test system for the sapphire optical fiber temperature sensor were analyzed. As there is a big temperature difference between the inner and outside surface of black body cavity, so the error of temperature of the measured object is presented. To solve this problem, a process of separating variables was used to derive the outer surface temperature of black body cavity from the inner surface temperature of the blackbody cavity, which further improved the performance of the sensor required by test. The experiment tested the feasibility of this method, and the measurement accuracy of the sapphire optical fiber blackbody cavity temperature sensor was improved.

Key words: blackbody cavity; extrapolation; separation of variables

分离变量法属于外推法理论, 所谓外推法, 就是已知被测物一个表面的温度, 运用传热学原理推导出被测物另一个面的温度. 外推法的研究和应用早在 20 世纪 40 年代就开始了. 当时, 联邦德国国防军试验基地在测试武器身管温度分布时, 就是用图解法外推出膛壁温度^[1]. 此后, 在 20 世纪 50 年代、60 年代仍在继续研究. 到 20 世纪 70 年代由于电子计算机的发展和广泛应用, 使外推技术有了进一步的发展, 采取了有限差分法和分析法外推. 于此时期, 美国的 Hurray Imber 和 Jamal Kuan 等人发表多篇论文, 阐述了分析外推方法及影响其精度的一些

因素^[2]. 美国的 Ching Jen Chen 和 Darrel Mthom-sent 发表了由壁内温度变化规律推算出圆筒内表面瞬时热流密度的文章, 同样是对分析外推方法的研究. 文中根据黑体腔内表面温度, 利用分离变量法外推出黑体腔外表面温度, 也即被测物温度, 在实验条件下对分离变量法进行了可行性验证.

1 光纤温度传感器测试系统组成及工作原理

蓝宝石光纤温度传感器测试系统主要由蓝宝

收稿日期: 2010-06-11

基金项目: 国家部委基础科研项目资助; 电子测试技术国家级重点实验室资助项目(9140C1204040705); 中北大学校基金资助项目

作者简介: 贾晓雯(1985-), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 主要研究方向为测试计量技术及仪器.

石光纤黑体腔、锥形光纤、耦合模块、传输光纤、窄带低噪声光电探测器、数据处理模块等组成,装置示意图如图 1 所示.

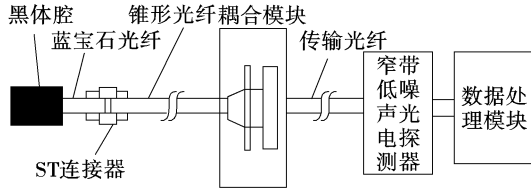


图 1 蓝宝石光纤温度传感器测试系统装置

在实际测温时,将黑体腔置于被测物测温点上,黑体腔发出波长为 λ 的辐射信号,辐射信号通过锥形光纤传导至耦合模块,耦合模块可以使辐射信号减少衰减,使光信号最大限度地远距离传输.辐射信号经传输光纤进入窄带低噪声光电探测器,将光信号转换为电信号,再通过数据处理模块的相关测温软件绘制出温度时间曲线^[4].这里所得出的温度时间曲线是黑体腔内表面的温度时间曲线,黑体腔外表面的温度时间曲线将由分离变量法外推得出.

2 分离变量法外推原理

如图 2 所示,在蓝宝石端部覆盖高温陶瓷材料构成黑体腔.高温材料能够承受 2 000℃ 以上的高温,当黑体腔外表面温度达到高温 T_g 时,由于温度作用时间很短,黑体腔没有达到热平衡,黑体腔内表面温度为 T_p ($T_p < T_g$),没有达到蓝宝石光纤的熔点.根据光纤输出端测得的电压信号,可以确定输出温度-时间曲线.此时温度为黑体腔内表面温度 $T_p(t)$.选择黑体腔内表面为等温面 X_p 层,高温陶瓷材料导热系数为 α ,膜层厚度为 δ_f ,将以上数值代入传热学基本方程中,利用分离变量法推导出黑体腔外表面温度 $T_g(t)$.

根据传热学原理,黑体腔数学模型基本方程建立如下

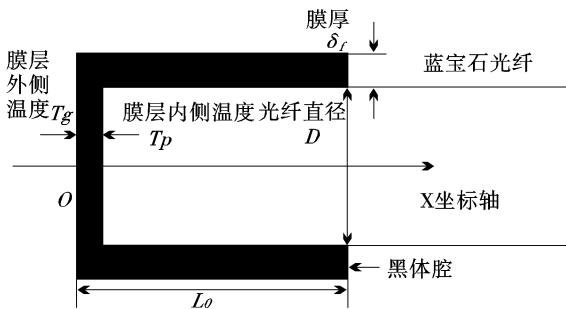


图 2 黑体腔物理模型

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \\ T(X, 0) = T_0 \\ T(L_0, \tau) = T_0 \\ T(X_p, \tau) = T_p(\tau) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: T 为待测温度, α 为陶瓷材料的导温系数, L_0 为黑体腔膜层厚度, T_0 为初始温度, $T_p(t)$ 为 X_p 处等温面上的实测温度随时间 τ 的变化.

式(1)边界条件非齐次化,首先对其边界条件齐次化.并引入辅助函数 $w(x, \tau) = \frac{x}{l} [T_0 - T_p(\tau)] + T_p(\tau)$,令 $T(x, \tau) = u(x, \tau) + w(x, \tau)$,再由叠加原理将 $u(x, \tau)$ 分解为 $u_1(x_1, \tau)$ 和 $u_2(x_1, \tau)$,即 $u(x, \tau) = u_1(x, \tau) + u_2(x, \tau)$,最后对 $u_1(x_1, \tau)$ 和 $u_2(x_1, \tau)$ 进行拉普拉斯变换,得到黑体腔膜层温度表达式(2).

$$T(x, \tau) = \sum_{n=1}^N f(x, \tau) + g(x, \tau) \quad (2)$$

其中

$$f(x, \tau) = \frac{2}{n\pi} \sin\left(n\pi \frac{x - X_p}{L_0 - X_p}\right)$$

$$\left[T_0 e^{-(\frac{n\pi}{L_0 - X_p})^2 \frac{a}{2} \tau} - T_p(\tau) + \frac{(n\pi)^2 a}{2(L_0 - X_p)^2} \int_0^\tau T_p(\xi) e^{-(\frac{n\pi}{L_0 - X_p})^2 \frac{a}{2} (\tau - \xi)} d\xi \right] \quad (3)$$

$$g(x, \tau) = \frac{x - X_p}{L_0 - X_p} [T_0 - T_p(\tau)] + T_p(\tau) \quad (4)$$

当 $x = 0$ 时,

$$T(0, \tau) = \sum_{n=1}^N f(0, \tau) + g(0, \tau) \quad (5)$$

即为黑体腔外表面温度表达式.经论证, N 取 278 以上时, $\sum_{n=1}^N f(x, \tau)$ 的值的范围为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 即 $N = 278$.

3 实验验证

实验验证示意图如图 3 所示,瞬态高温的产生和模拟可以通过激光器加热光纤黑体腔探头实现,黑体外表面的真实温度用红外测温仪探测.这样就可以得到两方面的温度变化情况,即黑体腔外表面的瞬态温度 T_0 和由传感器系统测得的黑体腔内表面的温度 T_1 .

T_1 可以作为传热方程的边界条件来进行外推.

图 3 实验验证方案

如果外推温度 T_0' (曲线 2) 与红外测温仪得到的温度-时间曲线 T_0 (曲线 3) 在不确定度范围内是一致的,说明外推模型是合理正确的.

由于实验条件限制,采用温度值在 1 200 °C 左右进行验证.实验中用 CO₂ 激光器给传感头施加瞬态高温,黑体腔发热产生电磁辐射,辐射信号通过光纤传导至窄带低噪声光电探测器,将光信号转换成电信号,由数字存储示波器记录所输出的电信号.电压时间波形如图 4 所示.

将电压转换成温度,由式(6)计算

$$V = KR(T) \tag{6}$$

其中, K 为光电探测器灵敏度系数, K 的具体值需要静态标定,实验标定结果为 $K = 18.5357 \text{ V/W}$.

图 4 传感器输出的电压时间波形

其中

$$R(T) = \int_{\lambda_0 + \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \psi(\lambda, T) d\lambda$$

$$\psi(\lambda, T) = \frac{ac_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]}$$

其中, a 为黑体腔出口进入光纤的面积, λ 为辐射光波长, T 是绝对温度, $c_1 = 3.74183 \times 10^{-16} (\text{W} \cdot \text{m}^2)$ 为第一辐射常数, $c_2 = 1.43879 \times 10^2 (\text{m} \cdot \text{K})$ 为第二辐射常数, λ_0 为干涉滤光片中心波长, $\Delta\lambda$ 为带宽.

根据图 4 和式(6)可计算出黑体腔内表面温度值 T_p , 如表 1、表 2 所示.

根据表 1、表 2, 用 Matlab 拟合黑体腔内表面温度值, 拟合结果如图 5 所示. 黑体腔内表面温度最高

表 1 传感器输出电压温度换算表

τ/ms	3	12	16	20	24	32	40	47
V/mV	0.851	4.846	5.023	6.724	8.136	9.520	10.063	10.500
$T_p/^\circ\text{C}$	136	404	482	577	682	801	908	945

表 2 传感器输出电压温度换算表

τ/ms	58	63	72	76	79	85	91	97
V/mV	10.728	10.962	9.832	8.964	8.413	7.536	4.972	2.135
$T_p/^\circ\text{C}$	956	963	840	780	710	600	450	280

值出现在 53.5 ms 处, 大小为 964 °C.

$$\text{当 } x=0 \text{ 时, } T(0, \tau) = \sum_{n=1}^N f(0, \tau) + g(0, \tau),$$

$T(0, \tau)$ 即为所求的黑体腔外表面温度. N 取 278, 黑体腔长度 $L_0 = 8 \text{ mm}$, 黑体腔膜层厚度 $X_p = 50 \mu\text{m}$, 黑体腔材料导热系数 $\alpha = 3.144 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. 在上述条件下可求出黑体腔外表面温度值 T_g 的各样点值, 如表 3、表 4.

根据表 3、表 4, 用 Matlab 拟合黑体腔外表面温度值, 拟合结果如图 6 所示. 图 6 中带 * 的曲线表示黑体腔内表面温度, 不带 * 的曲线表示黑体腔外表

面温度. 黑体腔外表面温度最高值出现在 49.7 ms 处, 大小为 1 127 °C.

表 3 黑体腔内外表面温度值

τ/ms	3	12	16	20	24	32	40	47
$T_p/^\circ\text{C}$	136	404	482	577	682	801	908	945
$T_g/^\circ\text{C}$	198	532	653	757	849	991	1 081	1 183

表 4 黑体腔内外表面温度值

τ/ms	58	63	72	76	79	85	91	97
$T_p/^\circ\text{C}$	956	963	840	780	710	600	450	280
$T_g/^\circ\text{C}$	1 095	1 054	846	836	766	602	376	176

(下转第 41 页)

室条件下模拟舰船尾流气泡非常好的手段,空压泵压力的调节可获取不同尺寸、密度、运动速度的气泡源;

(4)利用片光源照明成像的手段初步确定了水下气泡群参数和阀压的关系,为实验室的模拟尾流实验提供了一定的参考标准。

参考文献

- [1] 石晟玮,蒋兴舟,石敏,等.舰船尾流气泡运动特性研究[J].武汉理工大学学报,2007,31(5):764-767.
[2] 张建生,吕青,孙传东,等.高速摄影技术对水中气泡运动规律的研究[J].光子学报,2000,29(10):952-955.

- [3] 纪延俊,何俊华,陈良益.气泡的散射光与气泡尺寸分布[J].激光技术,2004,28(4):414-416.
[4] 刘慧开.舰船尾流气泡的运动及其激光散射特性研究[D].武汉:海军工程大学,2003.
[5] 宁辉,杨●,唐远河,等.基于PIV技术的水中气泡的拍摄与用光技巧[J].纺织高校基础科学学报,2005,18(4):356-358.
[6] 马治国.水下气泡幕光散射特性研究[D].武汉:海军工程大学,2008.
[7] 石晟玮.后向散射式激光尾流探测技术研究[D].武汉:海军工程大学,2008.
[8] 王庆有.CCD应用技术[M].天津:天津大学出版社,2002.

(上接第11页)

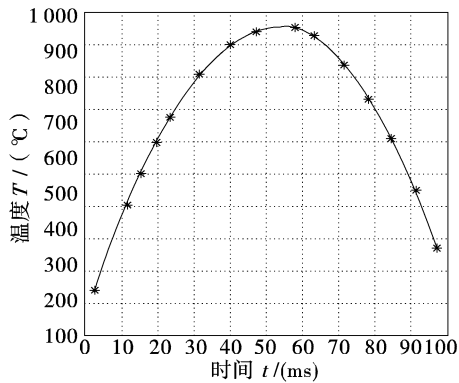


图5 传感器输出的温度时间曲线

度(出现在 53.5 ms 处,大小为 964℃)与 Modline5-5R 红外测温仪测得的黑体腔外表面温度最高值相差 210℃,可见,外推以后的结果更为合理。

4 误差分析

建模过程中引入了误差。一方面,在建模过程中假设黑体腔导热程是一个半无限大物体导热,但现实中并不存在这样的半无限大物体;另一方面,只考虑了垂直于黑体腔表面方向的传热,而忽略了平行于黑体腔表面的传热(也即黑体腔轴向传热),这给传热分析带来了一定误差。

5 结论

在传热学和黑体辐射定律的基础上,将蓝宝石光纤黑体腔传感器与外推方法相结合,拓展了蓝宝石光纤黑体腔温度传感器的测温上限,在温度测试中降低了对传感器的性能要求,可以将该方法推广到更高的温度测试当中,具有一定的实用意义。

参考文献

- [1] Rumsey C B. Techniques and Instrumentation Associated with Rocket Model Heat - Transfer Investigation. Report AGARD[R],1997,8.
[2] F Kreith, M S Bohn. Principles of Heat Transfer[M]. 4th Ed. Harper & Row,1986:136-137.
[3] 王瑞.蓝宝石光纤黑体腔传感器外推测试技术研究[D].太原:中北大学,2009:30-34.
[4] 郝晓剑,孙伟,周汉昌,等.蓝宝石光纤黑体腔高温计(EI收录)[J].应用基础与工程科学学报,2004,12(2):218-223.

图6 分离变量法外推曲线

在此实验条件下,采用红外测温仪测得的黑体腔外表面温度最高值出现在 49.7 ms,为 1 174℃.把外推结果(表3、表4中的 T_g 和图6中不带*的曲线)和红外测温仪测得的黑体腔外表面温度值对比可得出:在最高温度相差 47℃,而黑体腔内表面的最高温