科学通报 2009 年 第 54 卷 第 4 期: 414 ~ 419
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

柔性基底瞬态热流率测量传感器的研制及其应用

徐多, 谷笳华*, 吴松

中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京 100190
* 联系人, E-mail: gu_jh@imech.ac.cn

2008-08-07 收稿, 2008-10-24 接受

摘要 介绍了一种适用于高超声速激波风洞瞬态热流率测量的柔性基底传感器, 简述了该传感器的工作原理、结构和制作工艺, 并且对其绝热基底厚度和动态响应参数进行了理论计算. 在爆轰驱动的激波风洞中, 使用该传感器进行的平板表面瞬态热流率测量的实验表明, 结果是可靠的, 它可以作为模型表面瞬态热流率测量的一种有效工具.

关键词
热流率
传感器
柔性基底
高超声速激波风洞

高超声速飞行器在大气中飞行时, 其所在流场的气体动力学、传热学和激波运动等研究一直是国内流体力学领域研究的热点问题[1~5], 同时也是载人飞船、导弹和火箭等工程实践的基础.

高超声速飞行器在大气中飞行时其头部会形成强激波, 在激波的作用下, 飞行器周围的空气会在短时间内被加热到几千度, 甚至上万度, 这就是神州飞船在返回地球飞行时看起来像是一个火球的原因. 在如此高温的流场中, 热传导和热辐射等作用会使得飞行器表面的温度骤然升高, 甚至可能会对飞行器产生致命的损坏. 因此, 在高超声速飞行器模型的地面模拟实验中, 其表面瞬态热流率测量是一项重要的工作.

目前国内测量瞬态热流率常用的测量方法是薄膜电阻温度传感器. 它是基于传感器的电阻阻值和被测温度之间的线性关系, 通过测量阻值的变化, 即可测量到温度的变化. 薄膜电阻温度传感器是利用真空镀膜技术在玻璃或陶瓷基底上镀上亚微米量级厚度的 Pt 薄膜作为敏感元件, 它使得传感器具有微秒量级的响应时间, 可以适用于实验时间为毫秒量级的高超声速激波风洞实验. 将其安装在模型表面测量位置, 使其测量端面与模型表面重合, 成为模型表面的一部分, 来测量来流气体对模型表面的气动传热过程.

随着航天技术的发展, 飞行器的速度越来越快, 其外形和结构越来越复杂. 在测量复杂形面区域的表面热流率时, 受限于传感器的尺寸无法使得测点间距更小, 并且由于薄膜电阻温度传感器的基底材料为玻璃和陶瓷等固体材料, 传感器的测量端面与模型表面重合得相对不好, 这样会对热流率测量实验造成一定影响.

如果传感器具有柔性基底, 在一定程度上可以解决复杂形面模型表面热流率测量的问题, 不仅可以使传感器的安装更加方便, 测量端面和模型表面重合更好, 而且还可以增加测点的密度, 更加清楚地获得模型表面关键区域的热流分布情况.

随着微加工技术的不断发展, 一些研究人员, 如Lee等人[6]和Mehregany等人[7]应用柔性材料制作了测量剪切力和温度的传感器, 但其适用的流场温度和速度均相对较低. 由于激波风洞的实验马赫数高, 来流压力高、总温高, 对传感器的耐冲刷性和稳定性都提出很高的要求. 研制适用于高总温、大热流、较高焓值工况下的柔性基底瞬态热流测量传感器有很大的难度. 从目前掌握的文献来看, 国内外同类研究机构, 如CALSPAN和NASA[8]没有发表柔性基底传感器的研制情况报告和风洞测量数据.

1 传感器的原理和制作工艺

1.1 测量原理和理论模型

此传感器的测量原理是基于金属的电阻阻值和

温度之间的线性关系$\Delta R=\alpha_R \Delta T R_1$，其中$\alpha_R$为传感器的电阻温度系数，$R_1$为实验前传感器的阻值，$\Delta R$为传感器的阻值变化，$T$为温度[4,5].

在传感器两端加载恒定的电流，则在其两端可获得与电阻成线性关系的电压$U=IR_1$，当温度发生变化时，传感器的阻值会随之变化，使其两端电压发生变化$\Delta U=U_2-U_1=I\Delta R$，通过测量电压变化来测量阻值的变化，从而得到被测流场的温度$\Delta T=\Delta U/I\alpha_R R_1=\Delta U/\alpha_R U_1$，式中$U_1$表示温度变化前传感器两端的电压，$U_2$表示温度变化后传感器两端的电压.

此传感器的理论传热模型可以近似简化为一维半无限体热传导模型. 此传热模型需要满足如下假设：金属薄膜厚度很薄，与基底厚度相比可以忽略，其吸收的热量可以忽略不计，其温度可以认为就是传感器表面的温度；在实验时间内，热量传入基底厚度很浅，基底的厚度可以被认为是半无限体；沿传感器表面方向的温度梯度远小于垂直于表面方向的温度梯度，热传导可以近似看作为一维.

满足上述假设条件，传感器的传热可以看成是基于一维半无限体热传导理论，通过下式[8,9]利用测量得到的电压值可以计算出瞬态热流值：

$$q(t)=\frac{\sqrt{k\rho c}}{2\sqrt{\pi}\alpha_R E_0}\left[\frac{2E(t)}{\sqrt{t}}+\int_0^t \frac{E(t)-E(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}}\mathrm{d}\tau\right], \quad (1)$$

式中$q(t)$为热流，E_0为传感器两端的初始电压，$E(t)$为t时刻传感器两端的电压，α_R为传感器的电阻温度系数，$\sqrt{\rho ck}$为传感器基底材料的综合热特性参数.

基于电阻温度线形关系的温度传感器在使用之前要通过标定得到传感器的电阻温度系数，此传感器也不例外[10].

1.2 基底材料概述

基底材料是柔性基底热流率传感器的基础，不仅需要具有一定的弯曲性能和材料强度，而且需要具有良好的绝热性能.

聚酰亚胺因其在性能和合成方面的突出特点，已广泛应用在航空、航天、微电子、纳米、液晶、分离膜和激光等领域. 聚酰亚胺在−269~600℃的温度范围内性能稳定，同时具有非常好的绝热性能，其热传导系数仅为2.87×10^{-4} cal/(cm·s·℃)(1 cal=4.19 J)；另外其还具有优良的机械性能，未填充的塑料的抗张强度都在100 MPa以上，均苯型聚酰亚胺的薄膜为170 MPa以上，而联苯型聚酰亚胺则可以达到400 MPa；其弹性量通常为3~4 GPa，纤维则可以达到200 GPa；一些聚酰亚胺品种不溶于有机溶剂，可以防止化学腐蚀.

1.3 计算基底材料厚度

如上所述，此传感器的传热理论模型为一维半无限体传热模型，为了满足假设的要求，基底在一维传热方向要求是半无限体，但事实上基底的厚度不可能为半无限体. 如果在实验时间内，热量在基底内的热传导深度很小，满足一定条件的限制，则可认为基底的厚度在一维传热方向为半无限体，因此对传感器基底的厚度有一定的要求[9,11].

在图1中，介质1为金属薄膜层，厚度为δ；介质2为半无限体绝热基底层. ρ, c和k为材料的密度、比热和导热系数；α表示与ρ, c和k有关的热扩散系数，被定义为$\alpha=k/\rho c$；x为一维传热方向的传热深度. 图1中下标1表示金属材料的参数，下标2表示基底材料的参数. 根据图1描述的传热模型有

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}=\frac{1}{\alpha_1}\frac{\partial T_1}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}=\frac{1}{\alpha_2}\frac{\partial T_2}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\text{在 } x=0 \text{ 处}, \quad -k_1\frac{\partial T_1}{\partial x}=q_s, \quad (4)$$

$$\text{在 } x=\delta \text{ 处}, \quad k_1\frac{\partial T_1}{\partial x}=k_2\frac{\partial T_2}{\partial x} \text{ 和 } T_1=T_2, \quad (5)$$

$$\text{在 } x=\infty \text{ 处}, \ T_2=0. \quad (6)$$

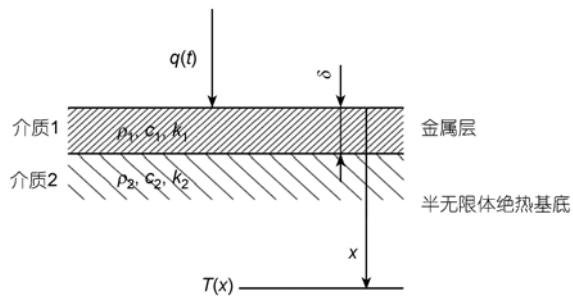


图1 一维半无限体传热示意图

基于上述的传热模型假设和(2)~(6)式，可以推导出

$$T_x/T_s=\mathrm{e}^{-\left(\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right)^2}-\sqrt{\pi}\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\mathrm{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right), \quad (7)$$

$$q_x/q_s = \mathrm{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right). \tag{8}$$

当在一维传热深度 x 处的温度 T_x 和热流 q_x 是表面温度 T_s 和热流 q_s 的 1%时(如图 2), 求解(7)和(8)式可以得到

$$x_T = 3.16\sqrt{\alpha t}, \tag{9}$$

$$x_q = 3.74\sqrt{\alpha t}. \tag{10}$$

当基底厚度超过 x_T 和 x_q, 即可认为传感器的传热模型满足一维半无限体热传导假设. 几种常见材料满足一维半无限体热传导假设的理论计算参见图 3, 计算中假设材料的传热参数为常数.

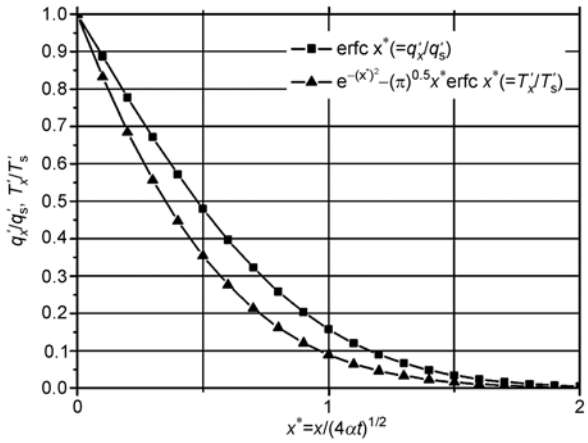


图 2 在热阶跃信号作用下的基底材料中的热传导

根据上述分析, 计算此传感器满足一维半无限体热传导模型时基底材料的厚度要求. 聚酰亚胺薄膜的传热参数为

热传导系数: k=2.87×10^{-4} cal/(cm·s·℃),

密度: ρ = 1.42 g/cm^3,

比热系数: c=0.261 cal/(g·℃),

热扩散系数: α=k/ρc=7.74378×10^{-4} cm^2/s.

根据(9)和(10)式, 计算实验时间为 20 ms 情况下满足一维半无限体传热模型要求的基底材料的厚度:

$$x_T = 3.16\sqrt{\alpha t} = 3.16\sqrt{7.74378e-4\ \mathrm{cm^2/s}\times 20\ \mathrm{ms}} = 0.124\ \mathrm{mm}, \tag{11}$$

$$x_q = 3.74\sqrt{\alpha t} = 3.74\sqrt{7.74378e-4\ \mathrm{cm^2/s}\times 20\ \mathrm{ms}} = 0.147\ \mathrm{mm}. \tag{12}$$

计算结果表明, 选用 0.18 mm 厚的聚酰亚胺薄膜可以满足 0.18 mm>x_T, 0.18 mm>x_q 的关系式, 即在 20 ms 准定常的实验时间内, 传感器的传热情况满足一维半无限体传热的理论模型. 计算中使用的材料的参数属于参考值, 部分厂商的产品性能参数会优于参考值.

1.4 传感器的制作工艺

柔性基底测热传感器的工艺过程是在柔性基底材料上镀一金属层作为传感器的敏感元件. 考虑到传感器测点的尺寸很小、金属层厚度很薄, 一般的镀膜工艺无法满足要求, 所以需要通过细微加工技术

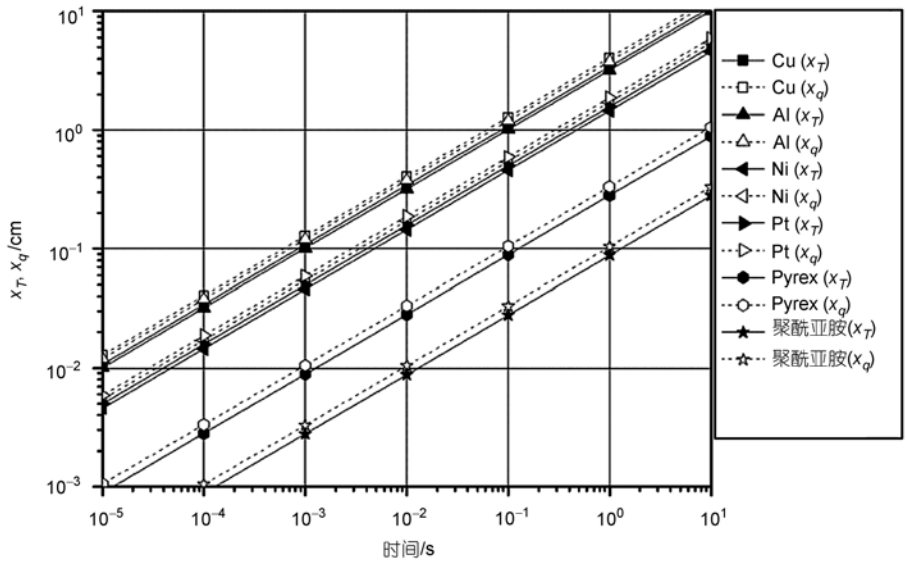


图 3 基底中温度和热流为表面处温度和热流的 1%时的传热深度 x

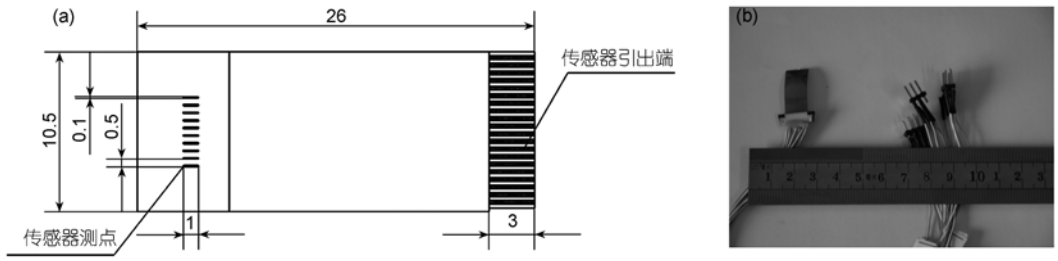


图 4　单片传感器尺寸图(a)和实物图(b)

来实现制作工艺[12,13].

传感器每个测点的尺寸为 0.1 mm×1 mm, 测点间距为 0.5 mm, 10.5 mm×26 mm 的面积上有 10 个测点(如图 4). 除感温部件和引脚部件外, 在其余部件表面通过光刻技术镀上聚酰亚胺, 起到保护和绝热作用, 避免除敏感部位外其他部件受温度的影响.

1.5　传感器动态响应参数计算

由于激波风洞具有毫秒量级的准定常实验时间, 因此要求传感器具有非常短的响应时间, 所以柔性基底测热传感器的动态响应参数是十分重要的. 如下为对传感器在阶跃输入下的动态响应时间和上升时间的理论计算[14]:

动态上升时间

$$t_{\mathrm{r}}=0.5\delta^{2}/\alpha_{1}=(0.5\times1\ \mu\mathrm{m}^{2})/0.25\ \mathrm{cm}^{2}\cdot\mathrm{s}^{-1}=0.01\ \mu\mathrm{s},\quad(13)$$

动态响应时间

$$t_{\mathrm{s}}=3\tau=3t_{\mathrm{r}}/2.25=3\times0.01\ \mu\mathrm{s}/2.25=0.013\ \mu\mathrm{s}.\quad(14)$$

计算结果证明此类传感器具有快速的响应时间, 可以应用在实验时间为毫秒量级的激波风洞实验中. 目前未进行实验标定, 根据经验, 实验标定值通常比理论计算值近似大一个量级左右.

2　平板表面瞬态热流率测量实验

为了验证传感器的实际工作情况, 需要进行典型模型的风洞实验, 通过实验检验其动态响应情况和耐冲刷情况.

采用双向爆轰驱动[15]的方式产生马赫数 6.2, 总压 20 bar(1 bar=10^5 Pa), 总温 3200 K, 实验时间 17 ms的流场. 实验模型为平板, 实验的目的是验证传感器在此工况下的工作情况, 并且与工艺成熟的薄膜电阻温度传感器的实验数据进行对比. 图 5 为平板测热实验模型及传感器安装位置, 图中箭头指出了传感器的安装位置.

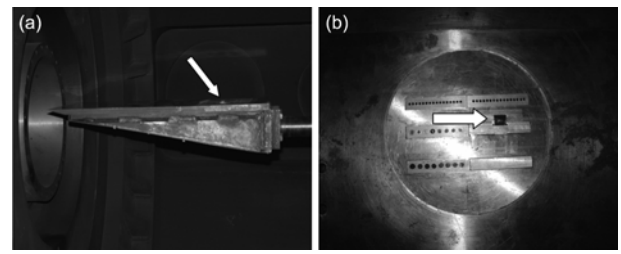


图 5　平板测热实验模型及传感器安装位置

(a) 侧视图; (b) 俯视图

图 6 和 7 为平板模型表面热流率测量实验中柔性基底传感器和玻璃基底薄膜电阻温度传感器的实验曲线, 可以看出柔性基底传感器具有较好的实验曲线, 并且与工艺成熟的玻璃基底薄膜电阻温度传感器的实验曲线有较好的重合性.

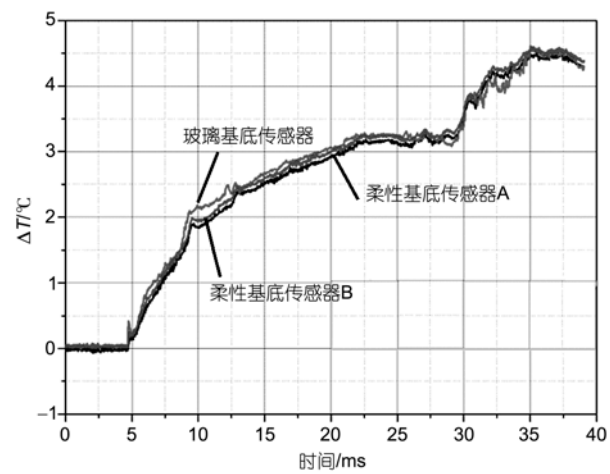


图 6　柔性基底测热传感器和薄膜电阻温度传感器的温度曲线

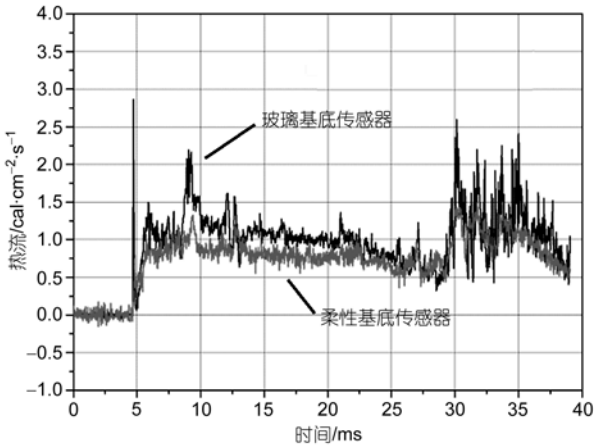


图 7 柔性基底测热传感器和薄膜电阻温度传感器的热流曲线

相关性计算可以更加清楚地说明这一点. 图 8 为柔性基底测热传感器和玻璃基底测热传感器实验数据的相关性曲线. 随着时间的变化在来流气体对平板表面的气动加热过程中, 柔性基底测热传感器和玻璃基底测热传感器感受到温度的升高, 如果 2 个传感器的响应完全一致, 那么在图 8 中将会是一条沿对角线的直线. 从图 8 可以看出, 柔性基底测热传感器和玻璃基底测热传感器的一致性很好, 由下式计算得到相关性系数为 0.997185, 也说明两个传感器的响应一致性很好.

$$\gamma=\frac{\sum\left(x-\bar{x}\right)\left(y-\bar{y}\right)}{\sqrt{\sum\left(x-\bar{x}\right)^2\cdot\sum\left(y-\bar{y}\right)^2}}=0.997185. \qquad (15)$$

图 9 为两个柔性基底测热传感器实验数据的相关性曲线. 从图 9 和相关性计算结果可以看出, 两个柔性基底测热传感器的响应一致性很好.

$$\gamma=\frac{\sum\left(x-\bar{x}\right)\left(y-\bar{y}\right)}{\sqrt{\sum\left(x-\bar{x}\right)^2\cdot\sum\left(y-\bar{y}\right)^2}}=0.999892. \qquad (16)$$

3 结论

探索研制了柔性基底材料的热流测量传感器, 并通过平板表面瞬态热流率测量的风洞实验证明了此种传感器工作情况良好, 可以满足激波风洞中模型表面瞬态热流率的测量实验要求. 由于该传感器基于柔性材料, 具有一定弯曲性能, 传感器测量表面与模型表面重合性较好, 可以应用于复杂形面的模型表面瞬态热流率的测量; 由于传感器测点小, 只有 0.1 mm×1 mm, 间距小, 只有 0.5 mm, 可以应用于热流率变化剧烈区域的多点测量, 而且还可以应用于大面积热流率测量实验中. 此传感器的研制处于探索阶段, 还有一些问题需要解决, 制作工艺还需要进一步改进, 以更好地满足风洞实验的要求.

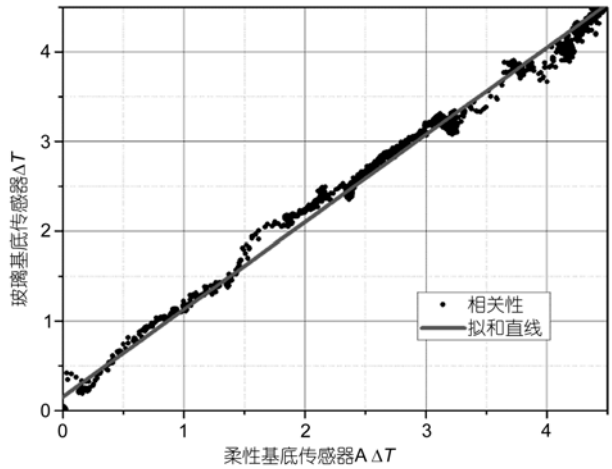


图 8 柔性基底测热传感器和玻璃基底测热传感器的温度曲线的相关性

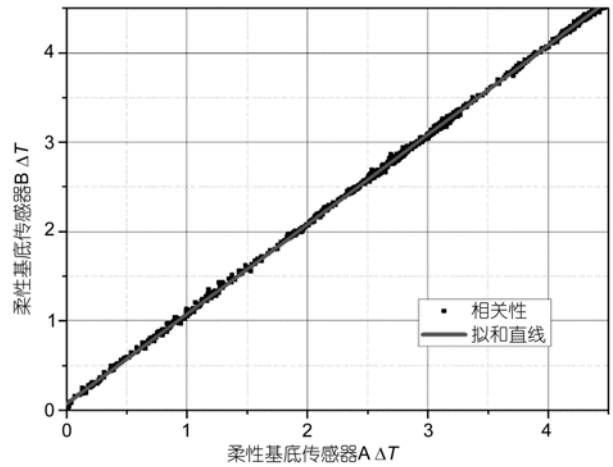


图 9 两个柔性基底测热传感器测点的温度曲线的相关性

致谢 本工作得到了中国科学院电子技术研究所传感器技术联合国家重点实验室的帮助, 也得到了中国科学院力学研究所王世芬研究员的帮助, 在此一并表示感谢.

参考文献

1 赵玉新, 易仕和, 何霖, 等. 激波与湍流相互作用的实验研究. 科学通报, 2007, 52(2): 140—143
2 滕宏辉, 姜宗林. 环形激波和爆轰波会聚过程的气体动力学特性. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2006, 36(2): 189—198
3 曹伟, 周恒. 二维高超音速边界层扰动演化的数值研究及小激波的存在对流场结构的影响. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2004, 34(2): 203—212
4 韩肇元, 王震球, 尹协振, 等. 一种在双驱动激波管和激波风洞中实现运动激波与头激波斜相互作用的新方法. 中国科学 A 辑: 数学, 1987, 30(1): 74—81
5 韩肇元, 尹协振. 运动气流的二维激波动力学方程组. 中国科学 A 辑: 数学, 1989, 32(4): 369—378
6 Lee G B, Huang FC, Lee C Y, et al. A new fabrication process for a flexible skin with temperature sensor array and its applications. Acta Mech Sin, 2004, 20(2): 140—145[DOI]
7 Mehregany M, DeAnna G R, Reshotko E. Microelectromechanical systems for aerodynamics applications. NASA Technical Report, ARL-TR-1113
8 Holden M S. A database of aerothermal measurements in hypersonic flow in building block experiments for CFD validation. AIAA, 2003—1137
9 Schultz D L, Jones T V. Heat-transfer measurements in short-duration hypersonic facilities. AGARD-AG-165
10 徐多, 谷茄华. 薄膜电阻温度计电阻温度系数标定系统. 第七届全国实验流体力学学术会议论文集, 2007
11 Vidal R J. Model instrumentation techniques for heat transfer and force measurements in a hypersonic shock tunnel. Report No. AD-917-A-1, Cornell Aeronautical Laboratory, 1956
12 Senturia D S. Microsystem Design. New York: Springer Publishing Corporation, 2000
13 Fraden Jacob. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications. 3rd ed. New York: Springer Publishing Corporation, 2003
14 樊尚春. 传感器技术及应用. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004
15 陈宏, 冯珩, 俞鸿儒. 用于激波管/风洞的双爆轰驱动段. 中国科学 G 辑: 物理 力学 天文学, 2004, 34(2): 183—191

·书 讯·

《粒子群算法及应用》

著者: 纪震 廖惠连 吴青华
书号: **978-7-03-023284-3**
出版: 科学出版社 **2009** 年 **1** 月
定价: **48** 元



粒子群算法是一种新的模仿鸟类群体行为的智能优化算法, 现已成为进化算法的一个新的重要分支. 全书共分八章, 分别论述了基本粒子群算法和改进粒子群算法的原理, 并详细介绍了粒子群算法在函数优化、图像压缩和基因聚类中的应用, 最后给出了粒子群算法的应用综述和相关程序代码.

该书可以作为计算机科学与技术、控制科学与工程等信息类学科的研究生教材, 也可供有关科研人员和工程技术人员参考.