

混合传热原理热流传感器的多系数标定方法

杨庆涛^{1,2}, 王 辉^{1,2}, 刘建华³, 陈沁楠⁴, 李岳胧⁴

(1 中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所 绵阳 621000;

2 飞行器流体物理全国重点实验室 绵阳 621000;

3 北京遥测技术研究所 北京 100076;

4 厦门大学萨本栋微纳科学技术研究院 厦门 361005)

摘要: 准确的热流数据对于了解飞行器所处热环境和设计优化飞行器热结构具有重要意义。热流测量技术发展的重要方面是热流的标定和标定数据的处理。基于混合传热原理的热流传感器在处理数据时, 需要利用储热项、温差项等不同来源的热流分项。这些分项的误差来源和影响大小存在区别, 特别是试验时间较长时, 部分误差因素会导致热流误差的变化, 使得常规的单系数标定方法存在局限。本文提出了将各热流分项分别进行系数修正, 利用试验标定中的温度数据和已知输入热流, 通过最小二乘法求解出标定系数矩阵的多系数标定方法。对标定试验数据的分析和处理结果表明: 利用多系数标定方法能够获得与试验标定输入热流一致性更好的热流处理结果, 在试验数据量足够大时, 在标定时间范围内, 标定偏差小于5%。

关键词: 热流传感器; 标定试验; 传热; 热流测量

中图分类号: V441; TP212

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2025)03-0105-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20250331001

CSTR: 32406.14.ycyk.20250331001

引用格式: 杨庆涛, 王辉, 刘建华, 等. 混合传热原理热流传感器的多系数标定方法[J]. 遥测遥控, 2025, 46(3): 105-111.

Multi-Coefficient Calibration Method of The Heat Flux Sensor Based on The Hybrid Heat Transfer Principle

YANG Qingtao^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, LIU Jianhua³, CHEN Qinnan⁴, LI Yuelong⁴

(1. Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. National Key Laboratory of Aerospace Physics in Fluids, Mianyang 621000, China;

3. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

4. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: It is of great significance to obtain accurate heat flux data for understanding the thermal environment and optimizing the thermal protection system of the flight vehicles. The important aspects of heat flux measurement technology development are heat flux calibration and heat flux data processing. The heat flux sensor based on the hybrid heat transfer principle needs to utilize heat flux terms from different sources, such as the heat storage term and the temperature difference term to achieve heat flux results during data processing. The error sources and the magnitudes of influence of these terms are different, resulting in limitations of the common single-coefficient calibration method. Especially when the testing time is longer, some error factors will cause changes in heat flux measurement error. This paper proposes a multi-coefficient calibration method that corrects each heat flux term using different coefficients separately. Based on the temperature data in the calibration test and the known input heat flux, the calibration coefficient matrix is solved using the least squares method. The analysis and processing results of the calibration testing data show that using the multi-coefficient calibration method, the heat flux results are in better agreement with the input heat flux than those using the single-coefficient method. With enough testing data, the calibration deviation is less than 5% within the calibration time.

Keywords: Heat flux sensor; Calibration test; Heat transfer; Heat flux measurement

Citation: YANG Qingtao, WANG Hui, LIU Jianhua, et al. Multi-Coefficient Calibration Method of The Heat Flux Sensor

Based on The Hybrid Heat Transfer Principle[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(3): 105–111.

0 引言

部分高速飞行器会由于气流与壁面的剧烈摩擦产生热效应, 对飞行器飞行安全产生影响。在与热效应有关的试验(如热环境试验、材料筛选试验、热结构考核试验、飞行试验等)中, 热流密度(简称热流)是一个重要表面参数。准确、可靠的热流数据是研究流动机理、飞行器热环境预测、热结构优化设计、设备模拟状态确定等的重要基础^[1]。为适应不同的应用场合, 人们研究了不同的热流测量原理, 发展了不同的热流传感器设计和制备工艺, 以及相应的数据处理方法^[2]。

热流传感器在热流处理中会用到某些基础数据, 如自身测试元件的热物性、尺寸等, 这些数据的误差在热流换算过程中会传递至热流结果, 导致热流结果的误差。另外, 热流数据处理方法由于其自身适用性的局限和数据处理的误差, 也会导致热流测试结果的误差。这两项误差, 原则上可以利用高精度热流标定系统, 对热流传感器进行标定, 评估其响应特性, 并进行适当修正。热流标定可以采用导热、对流和辐射热源^[3-7], 要求热源足够稳定, 且标准传感器所感应的热流数据足够准确。如果采用对比法标定, 标准热流传感器和待标定热流传感器所处换热条件应基本一致。文献[8]对风洞试验条件下的热流标定技术进行了比较全面的总结讨论, 对不同的标定设备、方法进行了系统的对比分析。

在标定条件下, 根据标准热流输入和热流传感器电输出之间的关系, 可以得到热流传感器数据处理的修正系数, 或者标定灵敏度系数。比如基于温差原理的热流传感器, 其输出电压与输入热流成正比, 标定后:

$$q_c = C \cdot f(E) = C \cdot \frac{E}{K} \quad (1)$$

其中, q_c 为标定输入热流, 单位为 W/m^2 ; E 为传感器的输出电压, 单位为 mV ; K 为标定前的理论灵敏度系数, 单位为 $\text{mV}/(\text{W}/\text{m}^2)$; C 为标定修正系数。

式(1)所示的标定热流处理方法隐含了一个前提, 即在标定的热流范围内, 热流传感器的电信号输出(电压)与换算的热流之间可以用一个变换系数(C)来修正。然而, 这种利用单一比例系

数的标定方式也隐含了一个前提, 即热流传感器的误差影响是整体线性成比例的。当然, 这个标定系数受温度变化等因素的影响^[9,10], 所以该变换系数通常表示成函数的形式, 如文献[10]中给出的标定修正公式将标定灵敏度系数表示为关于温度的二次多项式形式。为了减小热物性参数等的不准确测量对热流结果的影响, 文献[11]发展了用于薄膜热流传感器和同轴热电偶的热流标定方法, 通过求解新构建的包含标定数据的伏尔泰拉(Volterra)积分方程来求解表面热流数据。文献[12,13]则重点介绍了利用神经网络等机器学习方法, 对热流标定试验数据进行处理, 以获得表面标定热流的方法。

近年来出现了一些新的热流测量方法, 在数据处理中结合不同的来源项, 克服传统热流测量技术^[2]的不足, 提升传感器的性能。文献[14]中通过结合传感器温度的空间分布和时间变化, 提升了传感器的时间响应速度。文献[15,16]介绍一种三段式热流传感器, 测量材料界面上的温度响应, 在数据处理的同时考虑温差项和储热项, 可以同时获得传感器表面温度和热流。这种同时考虑温差项和储热项的数据处理方法还应用于高温半球驻点热流测量中^[17]。文献[18]则介绍了基于热容吸热和一维半无限体传热的混合传热模态的瞬态热流测试方法, 提升了传统零点量热计的性能。文献[19-21]则利用测点的温度及其随时间变化率, 通过多项式拟合方法获得传感器内部温度分布及其随时间的变化, 从而计算得到表面热流。这些热流测量方法的数据处理往往包含不同的部分, 其各自的误差来源及影响因素也有所不同。在这种情况下使用单一比例系数的方法来处理标定实验数据, 不一定有足够的适应性。

在视觉测量、导航、精密机械等领域的测量标定^[22-25]中, 经常面临多参数/系数标定问题, 通常将不同的参数赋予不同标定系数, 通过求解系数方程组的方式来实现标定。本文借鉴这一思想, 在包含不同测热分项的热流测量方法中分别利用不同的标定系数来修正, 克服利用单一修正系数的不足, 体现热流测量中不同分项对测量结果和误差的影响, 获得更可靠的测量结果。

1 方法描述

对一种典型的测量方法，即基于储热和温差的混合测热方法进行分析，热流处理公式为^[10,15]：

$$q_0 = k \frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1} + \frac{\rho C(x_2 - x_1)}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) + \rho C x_1 \frac{dT_1}{dt} \quad (2)$$

上式中，三个分项分别表示温差项、 $x_1 \sim x_2$ 和 $0 \sim x_1$ 的两段储热项对应热流。

在式(2)中，三个分项相对独立，温度测试($T_1 - T_2$)、($T_1 + T_2$)和 T_1 ，尺寸 $1/(x_2 - x_1)$ 、 $x_2 - x_1$ 和 x_1 ，热物性 k 和 ρC ，其相对测量误差均不尽相同，如果用式(1)所示的统一的标定修正系数，有可能难以得到理想的热流标定结果。因此对式(2)中的三个计算分项，分别设定独立的标定系数，标定的热流表示为：

$$P = \begin{bmatrix} \left(k \frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1} \right)_1 & \left(\frac{\rho C(x_2 - x_1)}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) \right)_1 & \left(\rho C x_1 \frac{dT_1}{dt} \right)_1 \\ \left(k \frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1} \right)_2 & \left(\frac{\rho C(x_2 - x_1)}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) \right)_2 & \left(\rho C x_1 \frac{dT_1}{dt} \right)_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \left(k \frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1} \right)_n & \left(\frac{\rho C(x_2 - x_1)}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) \right)_n & \left(\rho C x_1 \frac{dT_1}{dt} \right)_n \end{bmatrix}, A = [A_1 \ A_2 \ A_3]^T, \\ Q = [(q_c)_1 \ (q_c)_2 \ \dots \ (q_c)_n]^T$$

2 热流传感器和标定设备

本文设计了图1所示的柱塞热流传感器，采用无氧铜作为传感器本体材料，在距离表面 $x_1 = 2\text{ mm}$ 和 $x_2 = 7\text{ mm}$ 的位置，垂直于传感器轴线方向打直径为 0.2 mm 的热电偶安装孔，利用K型热电偶测量得到两个点的温度响应，利用式(2)计算得到表面热流。标定过程中，将柱塞热流传感器安装在标准标定工装中，感应面与工装表面平齐，表面喷涂已知吸收率的耐高温黑色涂层。图2所示为安装在标定工装上的柱塞式热

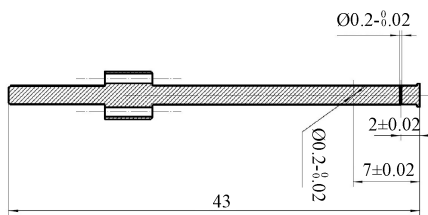


图1 柱塞式热流传感器传热本体

Fig. 1 Heat transfer body of the plug heat flux sensor

$$q_c = A_1 k \frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1} + A_2 \frac{\rho C(x_2 - x_1)}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) + A_3 \rho C x_1 \frac{dT_1}{dt} = \begin{bmatrix} k \frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1} & \frac{\rho C(x_2 - x_1)}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) & \rho C x_1 \frac{dT_1}{dt} \end{bmatrix} [A_1 \ A_2 \ A_3]^T \quad (3)$$

在标定过程中，输入标准热流 q_c 是已知值，传感器的热物性 k 、 ρ 和 C 、测点位置 x_1 和 x_2 、温度 T_1 、 T_2 及其随时间的变化均已知。为了求得标定系数矩阵 A ，需要不少于3个标定数据，设为 n ，利用最小二乘法求解：

$$A = (P^T P)^{-1} P^T Q \quad (4)$$

式中，

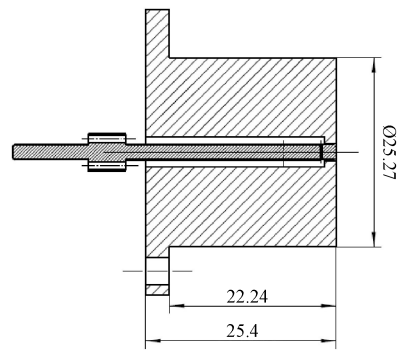


图2 柱塞热流传感器标定安装结构

Fig. 2 The calibration installation of the plug heat flux sensor

流传感器。

标定试验利用中国空气动力研究与发展中心的高精度可溯源标定系统，利用弧光灯作为加热热源，实现从 kW/m^2 到 MW/m^2 热流范围的稳态或者动态热流传感器标定，其整体标准不确定度小于3%。在标定过程中，辐射源功率保持不变，传感器表面的热流也保持基本不变。标准热流传感器采用戈登计，表面辐射吸收率已知，定期利用电标定辐

射计校准。调节弧光灯输出电流, 利用标准热流传感器测得的标准热流输入分别为 458.2 kW/m²、1 048.3 kW/m²、1 640.9 kW/m²、2 234.2 kW/m²和 2 826.8 kW/m²。待标定柱塞热流传感器的温度响应见图 3。

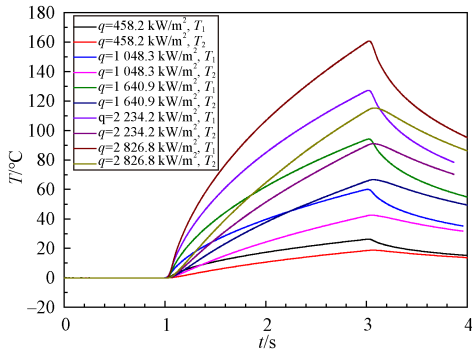


图 3 柱塞热流传感器温度响应

Fig. 3 Temperature responses of the plug heat flux sensor

3 结果与讨论

3.1 无标定情况下的热流计算结果

利用传感器设计的测点位置坐标和查表得到的随温度变化的热物性数据, 根据式(2)计算得到的归一化热流见图 4, 可见在标定试验条件下, 标定前的柱塞热流传感器所测热流要偏高 26%~64%, 并且随着时间变化热流偏差会不断增大。这个热流偏差除了上述温度、位置坐标和热物性误差以外, 还可能与传感器安装导致的侧向换热造成的影响有关。随着加热时间变长, 传感器传热本体的热物性会发生更大变化, 与所用查表的热物性数据偏差也可能增大, 传感器侧向换热也会由于周围壳体与传感器本体温差变化而变化。如果采用传统的单一标定修正系数, 则标定后热流仍然

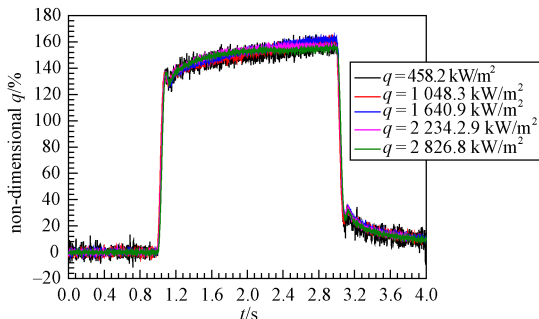


图 4 采用式(2)计算柱塞热流传感器所测热流

Fig. 4 Calculated heat flux of the plug heat flux sensor using Equation(2)

会体现相同的变化趋势, 这是与标定过程中恒定热流输入的设置是不一致的。

3.2 多系数标定方法处理结果分析

根据图 3, 在加热时间相近的情况下, 热流越高, 温升越大。为了能够在修正系数中涵盖温度变化范围的影响, 选择输入热流 2 826.8 kW/m² 条件下的柱塞测试温度, 根据式(4)进行最小二乘拟合得到标定系数矩阵 A , 根据图 3 的起始加热时间, 从第 1 100 组数据 (对应时间 1.1 s) 开始, 分别利用不同的数据组数 N 进行拟合 (采样频率为 1 kHz), 得到标定系数矩阵 A , 并将其应用于所有五个标定试验状态下的数据处理。

数据组数对标定系数矩阵的影响见图 5, 不同数据组数对标定结果的影响见图 6。可见, 标定系数矩阵中三个系数并不相同, 在一定程度上说明了单一标定系数的局限性。

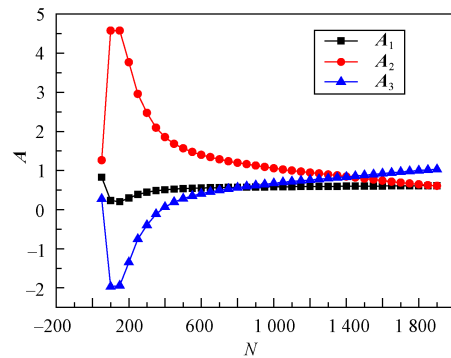


图 5 标定系数随标定数据组数的变化(三系数标定)

Fig. 5 Calibration coefficients vs. quantity of calibration data groups (three coefficients method)

图 6 中的无量纲热流是指用百分比表示的标定热流与输入标准热流的比值。计算相对偏差时, 为减少噪声数据的影响, 采用相邻 20 个点的移动平均处理。求解标定系数矩阵用的标定数据越多, 计算所得的热流误差越小。N=300, 修正后热流归一化偏差 <15%; N=500, 归一化偏差 <7%; N=1900, 归一化偏差 <4%。可见, 为获得足够准确的热流标定结果, 要求解标定系数矩阵一定数量的数据组, 以修正热流计算中温度测量误差、温度变化等因素对结果的影响。

在数据组数足够大的情况下 (如 $N \geq 500$), 热流处理结果可以控制在一定的误差范围内, 但是根据数据组数的不同, 所得的标定系数矩阵也有所不同。N=500 时, $A = [0.536 6 \ 1.565 9 \ 0.282 4]^T$;

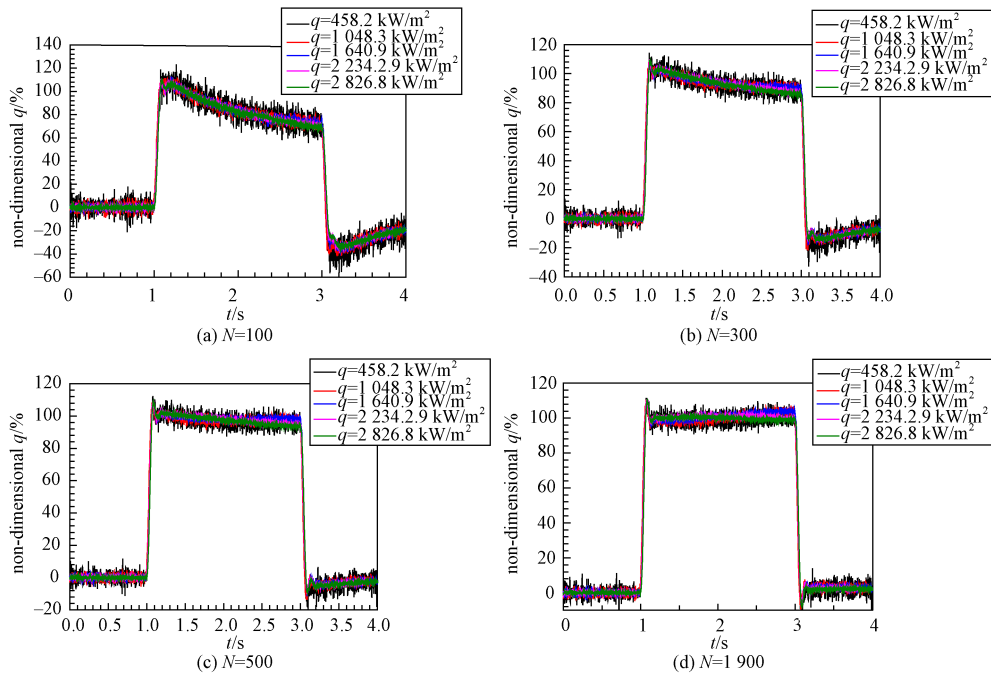


图6 不同标定数据组数的标定热流结果(三系数标定)

Fig.6 Heat flux results vs. different amount of calibration data group (three coefficients method)

$N=1000$ 时, $A=[0.5814 \ 1.0560 \ 0.6739]^T$; $N=1900$ 时, $A=[0.6131 \ 1.0608 \ 0.10297]^T$ 。这也说明,式(4)中各分项之间并非完全独立,三个修正系数之间也因此相互关联。在这种情况下,在一定误差范围内,可以求解得到不唯一的多组标定系数。从本标定试验的结果看,可以通过拟合将三个标定系数表示为某一个中间变量的多项式函数,或者将另外两个标定系数表示为另一个标定系数的多项式函数。之所以利用多标定系数进行修正,主

要是希望反映出式(2)中不同的热流分项对热流结果和测量偏差的不同影响。

3.3 计算分项选择/划分的影响

对于在数据处理中需要进行多系数标定的情况,可对处理公式进行变换,得到不同的分项划分,以及相应的标定系数矩阵。

对式(3)进行变换,将温度 T_1 、 T_2 、 dT_1/dt 和 dT_2/dt 分别作为需要独立修正的分项来处理,此时标定系数矩阵 A 包含四个分量:

$$q_c = A_1 k \frac{T_1}{x_2 - x_1} + A_2 k \frac{T_2}{x_2 - x_1} + A_3 \frac{\rho C(x_2 - x_1)}{4} \frac{dT_2}{dt} + A_4 \rho C \left(x_1 + \frac{(x_2 - x_1)}{4} \right) \frac{dT_1}{dt} = \left[k \frac{T_1}{x_2 - x_1} \quad k \frac{T_2}{x_2 - x_1} \quad \frac{\rho C(x_2 - x_1)}{4} \frac{dT_2}{dt} \quad \rho C \left[x_1 + \frac{(x_2 - x_1)}{4} \right] \frac{dT_1}{dt} \right] [A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4]^T \quad (5)$$

相应地,式(4)中的矩阵 P 变为:

$$P = \begin{bmatrix} \left(k \frac{T_1}{x_2 - x_1} \right)_1 & \left(k \frac{T_2}{x_2 - x_1} \right)_1 & \left(\frac{\rho C(x_2 - x_1)}{4} \frac{dT_2}{dt} \right)_1 & \left(\rho C \left(x_1 + \frac{(x_2 - x_1)}{4} \right) \frac{dT_1}{dt} \right)_1 \\ \left(k \frac{T_1}{x_2 - x_1} \right)_2 & \left(k \frac{T_2}{x_2 - x_1} \right)_2 & \left(\frac{\rho C(x_2 - x_1)}{4} \frac{dT_2}{dt} \right)_2 & \left(\rho C \left(x_1 + \frac{(x_2 - x_1)}{4} \right) \frac{dT_1}{dt} \right)_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left(k \frac{T_1}{x_2 - x_1} \right)_n & \left(k \frac{T_2}{x_2 - x_1} \right)_n & \left(\frac{\rho C(x_2 - x_1)}{4} \frac{dT_2}{dt} \right)_n & \left(\rho C \left(x_1 + \frac{(x_2 - x_1)}{4} \right) \frac{dT_1}{dt} \right)_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

利用式(5)中的分项表示方法,根据前述相同的试验标定数据,采用随温度变化的热物性条件,标定系数矩阵 A 随 N 的变化见图7。可见随着 N 的

增加,各标定系数均趋向某一固定值。尽管式(5)中的 A_1 和 A_2 由式(3)的第一项直接分解得到,但是两者的值并非由式(3)推导得到的符号相反、大小

相等的值, 在 $N=1\ 900$ 时, 两者分别为 0.508 8 和 -0.472 5。

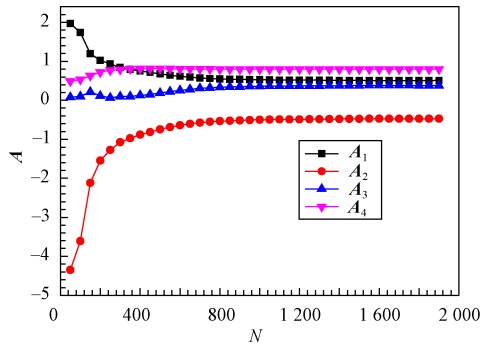


图 7 标定系数随标定数据组数的变化(四参数标定)

Fig. 7 Calibration coefficients vs. quantity of calibration data groups (four coefficients method)

利用上一节相同方法计算得到不同标定数据组数 N 下的无量纲热流, 如图 8 所示。可见要获得相同偏差要求的热流结果需要更多的标定试验数据。 $N=500$, 归一化偏差 $<15\%$; 只在 $N>600$ 的情况下, 才可以将热流计算偏差控制在 10% 以内。在 $N=1\ 900$ 时, 无量纲热流的偏差 $<5\%$, 与式(3)结果相近。之所以需要更多的标定试验数据, 有可能是因为式(5)中将两个测点的温度分别处理, 两个测温点各自的温度测量误差影响在标定系数中

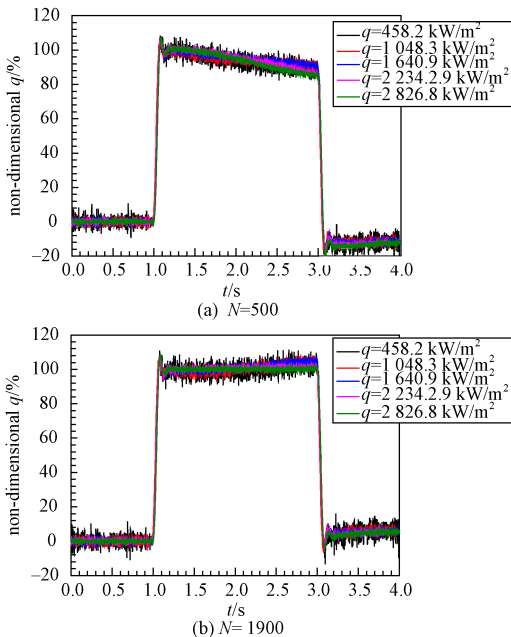


图 8 不同标定数据组数的标定热流结果(四系数标定)

Fig. 8 Heat flux results vs. different amount of calibration data groups (four coefficients method)

得以体现, 而式(3)在计算中直接处理温差项, 有助于减小对热流结果的影响。这一点也体现了在测量中使用反向串联测温电路的好处^[3,17]。

4 结论

本文所涉及的多系数热流标定数据处理方法是对不同影响因素分别进行系数修正的初步研究, 验证了方法的可行性和优势, 可以得到如下结论:

① 基于储热和温差的混合数据处理方法, 利用单一标定参数进行修正, 由于不同分项的误差影响不同, 利用单一标定系数修正, 无法体现热流误差随加热时间的变化。

② 利用多系数标定方法, 可以得到储热和温差数据处理公式的各分项修正系数, 可以较好地体现各分项中误差影响因素的差别, 获得更优的热流标定结果。

③ 对于所标定的传感器, 选择不同的分项划分方法, 得到的标定系数存在差别, 对标定数据组的数量要求也有差别。

④ 为得到较可靠的热流修正结果, 计算标定系数矩阵的数据量需要足够大。

今后, 将对本方法进一步研究, 包括是否存在最优的分项划分方法, 各修正系数和热流结果影响因素之间的分析和验证, 方法的适用性和局限, 方法的扩展等。

参考文献

[1] BOUDREAU A H, SMITH V K III, MATTHEWS R K, et al. Methodology of hypersonic testing[R]. Rhode-Saint-Genève: Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1993.

[2] 刘初平. 气动热与热防护试验热流测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.

[3] 胡芑, 陈则韶. 量热技术和热物性测定[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.

[4] EWING J A. Development of a direct-measurement thin-film heat flux array[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.

[5] FILTZ J R, VALIN T, HAMEURY J, et al. New vacuum blackbody cavity for heat flux meter calibration[J]. International Journal of Thermophysics, 2009, 30: 236-248.

[6] MURTHY A V, FRASER G T, DEWITT D P, et al. Experimental in-cavity radiative calibration of high-heat-flux meters[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2006, 20(2): 327-335.

[7] YANG I, KIM D, LEE S, et al. Construction and calibration of a large-area heat flow meter apparatus[J]. Energy & Buildings, 2019, 194: 109445.

- [8] 杨凯, 王辉, 杨庆涛, 等. 超高速气动热风洞试验相关的热流标定技术[J]. 气动研究与试验, 2025, 3(1): 53-66.
YANG K, WANG H, YANG Q T, et al. Heat-flux calibration techniques in hypervelocity wind-tunnel tests[J]. Aerodynamic Research & Experiment, 2025, 3(1): 53-66.
- [9] YANG K, YANG Q T, ZHU X X, et al. A molecular dynamics simulation on the static calibration test of a revised thin-film thermopile heat-flux sensor[J]. Measurement, 2020, 150: 107039.
- [10] 杨凯, 杨庆涛, 朱新新, 等. 一种薄膜热电堆热流传感器灵敏度系数的实验研究[J]. 宇航计测技术, 2018, 38(5): 67-72.
YANG K, YANG Q T, ZHU X X, et al. Calibration tests on a new thin-film thermopile heat-flux sensor[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2018, 38(5): 67-72.
- [11] FRANKEL J I, KEYHANI M. Theoretical development of a new surface heat flux calibration method for thin-film resistive temperature gauges and co-axial thermocouples[J]. Shock Waves, 2013, 23: 177-188.
- [12] WANG H, YANG Q T, ZHU X X, et al. Inverse estimation of heat flux using linear artificial neural networks[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 132: 478-485.
- [13] WANG H, CHEN D J, YANG Q T, et al. Adaptive spectral band identification method in noncontact temperature measurement based on dynamic programming[J]. Measurement, 2016, 90: 52-58.
- [14] HUBBLE F O, DILLER T E. A hybrid method for measuring heat flux[J]. Journal of Heat Transfer, 2010, 132(3): 031602.
- [15] 杨庆涛, 白菡尘, 张涛, 等. 快速响应热流/温度传感器设计与特性分析[J]. 兵工学报, 2014, 35(6): 927-934.
YANG Q T, BAI H C, ZHANG T, et al. Design and response characteristics analysis of a fast-response sensor for temperature and heat flux measurement[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(6): 927-934.
- [16] 杨庆涛, 朱新新, 王辉, 等. 快速响应热流/温度传感器制备与试验研究[J]. 遥测遥控, 2020, 41(2): 60-67.
YANG Q T, ZHU X X, WANG H, et al. Fabrication and tests of the fast-responding sensor for temperature and heat flux measurement[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(2): 60-67.
- [17] 杨庆涛, 陈沁楠, 张涛, 等. 基于高温薄膜测温的半球驻点模型气动加热测量方法[J]. 气动研究与试验, 2025, 3(1): 84-93.
YANG Q T, CHEN Q N, ZHANG T, et al. Aerodynamic heating measurement method of hemisphere stagnation article based on internal thin-film high-temperature measurement[J]. Aerodynamic Research & Experiment, 2025, 3(1): 84-93.
- [18] 王辉, 吴东, 朱新新, 等. 基于混合传热模态的瞬态热流测试方法研究[J]. 实验流体力学, 2021, 35(4): 92-97.
WANG H, WU D, ZHU X X, et al. The study on transient heat flux measurement based on hybrid heat transfer modes[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2021, 35(4): 92-97.
- [19] COY E B. Measurement of transient heat flux and surface temperature using embedded temperature sensors[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2010, 24(1): 77-84.
- [20] COY E B, BERGKÖETTER M, DANCZYK S A, et al. An efficient approach for multidimensional inverse heat conduction[C]//50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 9-12, 2012, Nashville, Tennessee, USA. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012: 1-16.
- [21] 杨庆涛, 王辉, 朱新新, 等. 无水冷条件下温度与热流复合传感器设计与试验[J]. 兵工学报, 2016, 37(2): 193-202.
YANG Q T, WANG H, ZHU X X, et al. Design and test of a hybrid sensor for temperature and heat flux measurement without water-cooling[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(2): 193-202.
- [22] 李清嘉. 双目交汇测量中的多参数标定方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2014.
- [23] 秦伟, 徐斌, 陈友. IMU位姿测量中MEMS陀螺在线多参数标定方法研究[J]. 机电工程技术, 2024, 53(12): 111-114.
QIN W, XU B, CHEN Y. Research on online multiparameter calibration method for MEMS gyroscope in IMU pose measurement[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(12): 111-114.
- [24] 章家岩, 许治顺, 王胜, 等. 基于混合优化算法的关节臂式测量机参数标定[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(8): 146-155.
ZHANG J Y, XU Z S, WANG S, et al. Parameter calibration for articulated arm measuring machine based on hybrid optimization algorithm[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(8): 146-155.
- [25] 张贵阳, 霍炬, 杨明, 等. 基于双更新策略加权差分进化粒子群的双目相机标定[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(4): 20200280.
ZHANG G Y, HUO J, YANG M, et al. Binocular camera calibration based on dual update strategy weighted differential evolution particle swarm optimization[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(4): 20200280.

[作者简介]

- 杨庆涛 1975年生, 硕士, 副研究员。
王辉 1972年生, 博士, 研究员。
刘建华 1983年生, 硕士, 高级工程师。
陈沁楠 1988年生, 博士, 副教授。
李岳陇 1998年生, 博士研究生。

(本文编辑: 傅杰)