

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.05.01

超音速条件下 K 型温度传感器恢复特性数值模拟

赵彬, 赵俭

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 航空航天领域中, 高速条件下气流温度的测量存在着动态误差和稳态误差。本次研究对超音速条件下 K 型温度传感器的恢复特性进行了数值模拟研究, 对影响恢复特性的关键影响量进行了分析, 确定了超音速条件下温度传感器恢复特性理论模型, 为温度传感器的实验和设计提供了理论基础。研究结果表明: 超音速条件下影响温度传感器恢复特性的关键影响量中, 单屏蔽式结构、总温和马赫数对于传感器恢复系数的提升帮助很大, 传感器外径尺寸、静压对于温度传感器的恢复系数影响很小。

关键词: 超音速; K 型温度传感器; 数值模拟; 恢复特性

中图分类号: TB942; TP212.11

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)05-0001-04

Numerical Simulation of Recovery Characteristics for K Type Temperature Sensors in Supersonic Condition

ZHAO Bin, ZHAO Jian

(Changcheng Institute of Measurement & Metrology, Beijing 100095, China)

Abstract: In the field of aerospace, the measurement of airflow temperature has the dynamic error and the steady state error at high speed. Numerical simulation research is used to investigate the recovery characteristics for K type temperature sensors in the supersonic condition. The key influential factors of recovery characteristics are analyzed. The recovery characteristic model for temperature sensors under the supersonic condition is established. It provides the theoretical basis for the experiment and design of the temperature sensors. The result shows that among those key influential factors, the single shielded temperature sensor, total temperature and Mach number are very helpful to improve the recovery coefficient, and the outside diameter of sensors and static pressure help to improve the recovery coefficient very small.

Key words: supersonic; K type temperature sensor; numerical simulation; recovery characteristic

0 引言

航空航天领域中, 气流温度的测量是人们所关注的重要参数之一。在气流的温度测量中, 不仅存在着动态误差, 还存在稳定误差(包括导热误差、辐射、误差、速度误差等)。在高速条件下, 速度误差不容忽视, 这使得在超音速条件下传感器的温度测量存在瓶颈。以往学者在温度传感器校准实验方面做了很多研究工作, 而温度传感器数值仿真方面的工作较少, 在特殊工况例如超音速下的研究更是鲜有提及。本次研究针对超音速工况对影响温度传感器恢复系数的关键影响量用数值模拟的方法进行甄别。通过构建具体的物理模型和数学模型, 研究了不同参数对温度传感器

恢复系数的影响, 与实验方法相互补充验证。

1 研究对象

本次计算采用 K 型温度传感器为研究对象, 喷管选用固定式喷管, 简化后温度传感器和风洞三维模型如图 1 所示。

2 数值模拟方法

2.1 湍流模型

现阶段超音速射流数值模拟所选用的湍流模型文献有限, 没有形成统一的结论。本次数值模拟研究湍流模型选取了在工程计算中应用较多的可实现性 Realizable $k-\varepsilon$ 模型^[1], 该模型被有效的应用于各种流动^[2-5], 包括旋转均匀剪切流、包含有射流和混合流的自由流动、管道内流动、边界层流动以及带有分离的流动等。Realizable $k-\varepsilon$ 模型中, k 和 ε 的输运模型如式(1)、式(2)。

收稿日期: 2016-07-01

基金项目: 国防科工局技术基础科研项目(JSJC2013205C208)

作者简介: 赵彬(1989-), 男, 工程师, 硕士, 从事动态温度校准技术研究工作。

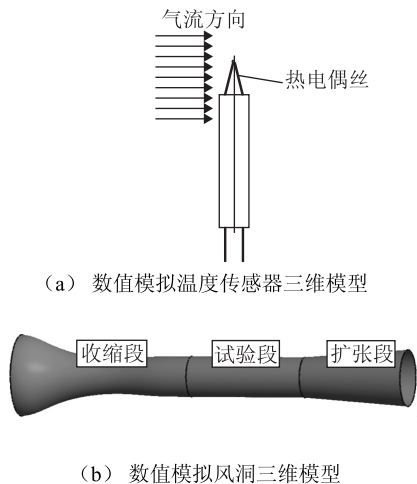


图1 简化温度传感器和风洞三维模型

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (2)$$

式中: t 为时间; μ_i , μ_j 和 x_i , x_j 分别为速度分量和坐标分量; ρ , μ 分别为密度和分子粘性系数; σ_k , σ_ε 分别为 k 和 ε 的湍流普朗特数, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能 k 产生项, $G_k = \mu_t \left[\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j}$; C_1 , C_2 , S 均为模型常数, $C_1 = \max(0.43, \frac{\eta}{\eta+5})$, $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$, $C_2 = 1.9$, $S = \sqrt{2S_{i,j}S_{i,j}}$,

$S_{i,j}$ 为时均应变率张量, $S_{i,j} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right]$; μ_t 为湍流粘度, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s + U^* \frac{k}{\varepsilon}}$, $A_0 = 4.0$, $A_s =$

$$\sqrt{6} \cos \left[\frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6} W) \right], W = \frac{S_{i,j} S_{j,k} S_{k,j}}{(S_{i,j} S_{i,j})^{3/2}}, U^* =$$

$$\sqrt{S_{i,j} S_{i,j} + \tilde{\Omega}_{i,j} \tilde{\Omega}_{i,j}}, \tilde{\Omega}_{i,j} = \bar{\Omega}_{i,j} - 3 \varepsilon_{i,j,k} \omega_k, \bar{\Omega}_{i,j} \text{ 为时均转动速率。}$$

2.2 辐射模型

目前,主要的辐射模型包括离散传播(DT)辐射模型、基于球形谐波法的 P-1 模型、罗斯兰德(Rosseland)辐射模型、表面(S2S)辐射模型和离散坐标(Do)辐射模型程^[6-7]。辐射问题一般都作一定的简化处理,本次数值模拟选用工程上适用性较强的离散

坐标(Do)辐射模型。Do模型通过对辐射强度的方向变化进行离散,求解出覆盖整个 4π 空间角的一套离散方向上的辐射输运方程。每个多面角都对应着一个矢量方向,并产生一个关于辐射强度的输运方程。

2.3 边界条件设置

边界条件设置如图2所示,进口给定总温总压,出口给定背温背压,风洞壁面给定温度,其他壁面由软件自动进行耦合传热求解。在求解过程选项中选择收敛速度较快和精度较高的SIMPLEC方法,压力、速度和湍动能的离散方法采用二阶迎风格式。为了加快收敛速度,可以先选择一阶迎风格式,再采用精度较高的二阶迎风格式。当连续方程、动量方程、能量方程和湍流方程的残差小于 10^{-5} 、辐射残差小于 10^{-6} 时,认为计算收敛。

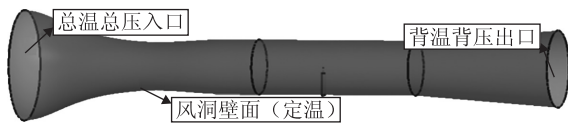


图2 边界条件设置

3 网格划分及网格无关性验证

划分网格时需要处理好网格密度与计算时间的矛盾,基本的遵循原则为兼顾光滑性、正交性、网格单元的正则性以及流动变化剧烈区域分布足够多的网格点等。在网格划分时,需要对靠近温度传感器壁面附近处的网格进行加密,并设置边界层。具体网格划分如图3所示,采用全部非结构化网格进行划分,网格总数为350万左右。

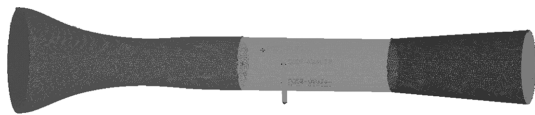


图3 试验段网格划分

网格无关性从焊球的结点温度进行分析。通过计算,网格数量与焊球的结点温度关系如图4所示。其

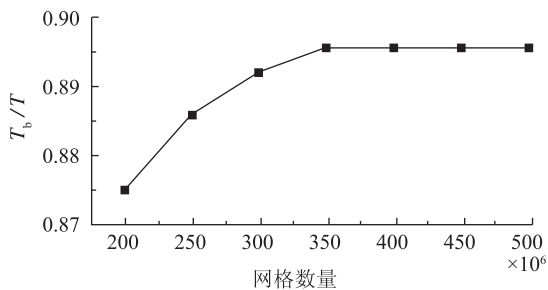


图4 网格无关性验证

中， T_b 为焊球的结点温度， T 为来流总温。可以看出，使用焊球结点温度作为评判标准时，网格数量在350万以上时，结点温度的变化已不大，所以本次研究所使用的网格数量大约在350万左右。

4 数值模拟结果及分析

4.1 数值模拟流场及传热分析

来流工况为静压0.2 MPa，马赫数1.6，总温为常温300 K。为了直观的观测到温度传感器附近流场结构以及在传感器前侧激波现象，沿着传感器轴向做出几个切面，分别为 $y=0\text{ mm}$ ； $y=-3.5\text{ mm}$ ； $y=-9.5\text{ mm}$ 处，如图5所示。

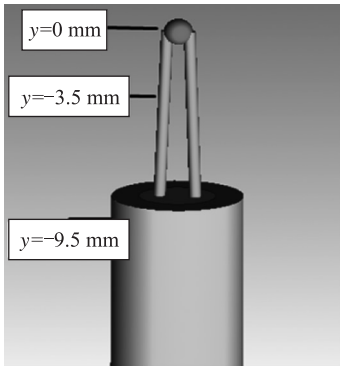
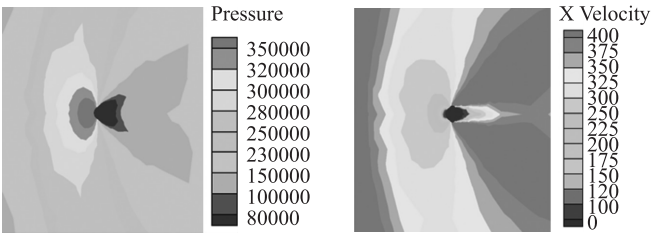


图5 沿传感器轴向不同切面示意图

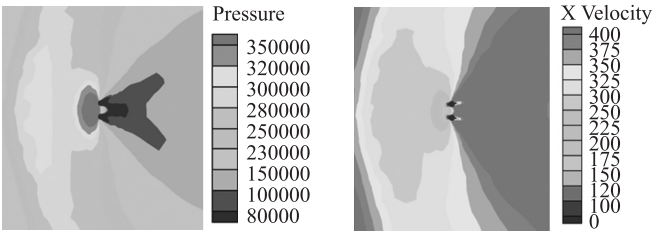
三个切面下的压力云图和速度云图如图6所示。从图中可以看出，压力分布基本符合圆柱绕流特性。在正对来流部分受到圆柱体的滞止作用，速度降低，压力瞬间升高；圆柱过渡区由于流体速度增大，使得压力下降，而后在尾迹区域有回流产生，此区域内流速较低、压力较高，而且此影响区域随着偶丝直径的增大而增大。另外，从给出的压力分布可以看出，压力损失主要发生在偶丝尾迹区域，并且尾迹区趋于非对称分布，这可能是由圆柱绕流的非定常性加强所致。通过观察速度云图，可以直观的观测到超音速条件下温度传感器前段的高温高压气动滞止效应。

为了更直观的观测到温度传感器附近的温度情况，作出沿来流方向温度传感器中心对称分布情况下的温度云图和 $y=-9.5\text{ mm}$ 切面的温度云图，如图7和图8所示。由于圆柱绕流特性的缘故，会在正对来流区域产生强烈的滞止效应，偶丝壁面会产生沿流向的阶梯分布，因此，附面层导热现象会对实际测温带来更大的测温误差。而处于金属外壳内部的偶丝，由于未受气流的影响，此时仅仅用于导热，所以，温度沿偶丝长度方向呈严格的阶梯分布。观察图6和图7，可以较

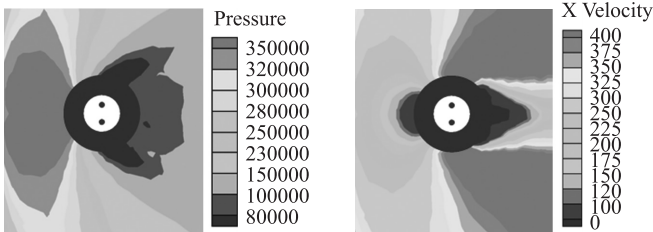
为清晰的反映激波在温度传感器表面产生的“碗型”激波结构^[8]以及在圆柱后形成的复杂波系结构。由于此次篇幅所限，对激波和固体传感器的相互作用从略。



(a) $y=0\text{ mm}$ 压力云图和速度云图



(b) $y=-3.5\text{ mm}$ 压力云图和速度云图



(c) $y=-9.5\text{ mm}$ 压力云图和速度云图

图6 沿传感器轴向不同切面总压云图和速度云图

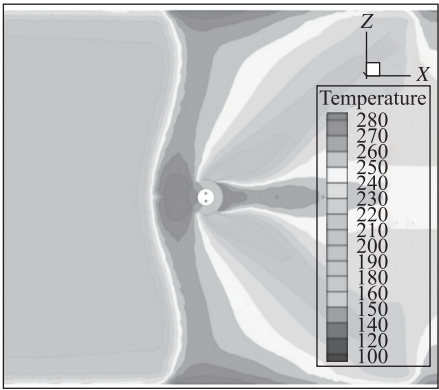


图7 $y=-9.5\text{ mm}$ 温度云图

4.2 恢复系数分析

工程上一般采用恢复系数来分析传感器恢复系数的大小，恢复系数 r 一般由式(1)定义。

$$r = \frac{T_g - T}{T_1 - T} \tag{3}$$

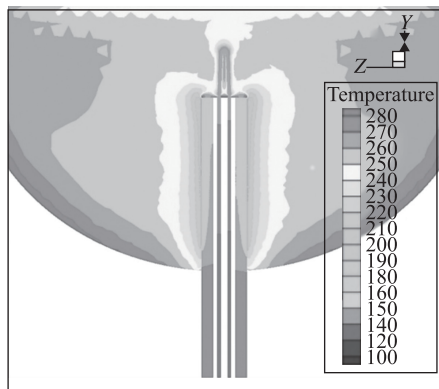


图8 沿来流方向温度传感器对称面温度云图

式中: T_g 为气流有效温度; T 为气流静温; T_1 为气流总温。

由于静温 T 不能直接测得, 恢复系数通常用式(4)计算。

$$r = 1 - \frac{T_0 - T_g}{T_0} \left[1 + \frac{2}{(k-1)M_a^2} \right] \quad (4)$$

式中: T_0 为气流总温; M_a 为气流马赫数; k 为绝热指数, 对于空气介质 $k=1.4$ 。

影响温度传感器恢复系数的关键量有传感器结构形式、不同外径以及气流温度、压力、速度等。为了对这些影响温度传感器恢复系数的关键量进行甄别, 数值模拟的方法是在固定其它条件下, 只对单一变量进行变化, 由此可以模拟出此变量对于恢复系数的影响。

为了研究不同结构形式的影响, 在静压 0.2 MPa, 马赫数 1.6, 总温为常温 300 K 的条件下, 对两种不同结构的 K 型温度传感器做了数值模拟研究, 分别为裸露式温度传感器和单屏蔽式温度传感器。两种温度传感器恢复系数对比如图 9 所示。从图中可以看出, 单屏蔽式温度传感器的恢复系数已达到 0.952, 相比于裸露式温度传感器的 0.779, 添加屏蔽罩后传感器恢复系数提升了 20% 左右, 其原因是由于屏蔽罩的存在改变了传感器内外部的流场、温场结构, 二次滞止作用也帮助焊球周围温场的提升。

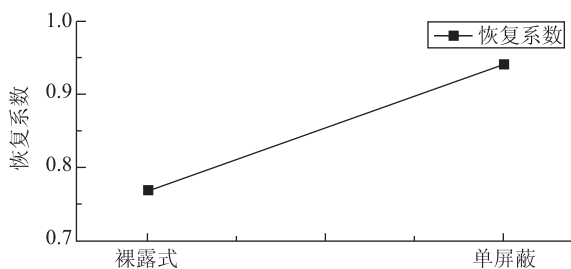


图9 两种不同结构温度传感器恢复系数对比

为了研究不同传感器外径尺寸的影响, 在静压 0.2 MPa, 马赫数 1.6, 总温为常温 300 K 的条件下, 对 5.5, 10, 15 mm 三种不同外径尺寸的 K 型温度传感器做了数值模拟研究, 三种温度传感器恢复系数对比如图 10 所示。可以直观的看到三种外径下传感器恢复系数虽然有增大的趋势, 但趋势很缓慢, 在 0.77~0.81 之间, 区别很小。这说明传感器的外径尺寸大小对于恢复系数的影响很小, 传感器的恢复系数对于外径尺寸的变化并不敏感。

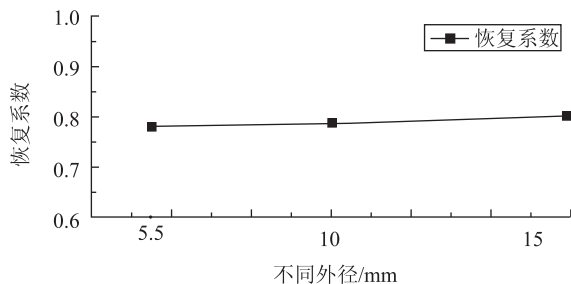


图10 三种不同外径温度传感器恢复系数对比

为了研究来流总温、静压以及速度对 K 型温度传感器恢复系数的影响, 设计了如下工况: 在静压为 0.2 MPa、马赫数为 1.6 的条件下, 来流总温分别为 300, 373, 773 K; 在总温为常温 300 K、马赫数为 1.6 的条件下, 来流静压分别为 0.08, 0.2, 0.5 MPa; 在静压为 0.2 MPa、总温为常温 300 K 条件下, 来流马赫数分别为 0.8, 1.6, 2.0。9 种工况下的温度传感器恢复系数对比见图 11。可以直观的观测到总温和马赫数的变化对于恢复系数的影响较大。在总压为 0.2 MPa、马赫数为 1.6 的条件下, 恢复系数由最初常温 300 K 下的 0.779 提升到了 773 K 下的 0.863, 提高了 10% 左右; 在总压为 0.2 MPa、总温为常温 300 K 条件下, 恢复系数由马赫数为 0.8 下的 0.760 提升到了 2.0 下的 0.799, 提高了 5% 左右; 相比于总温和马赫数, 静压的变化对于温度传感器恢复系数影响很小, 0.08, 0.2, 0.5 MPa 条件下的恢复系数都在 0.785

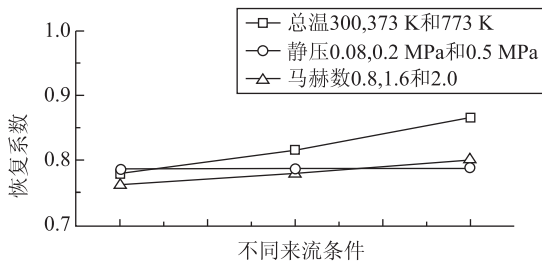


图11 不同来流条件下温度传感器恢复系数对比

(下转第8页)

用此温度补偿方法,在很大程度上降低了目标距离变化导致的测温误差。

4 结论

本文从理论上推导出红外热像仪测温精度与目标距离之间的关系式,如果不进行温度补偿,对于实验搭建的红外热像仪系统,无法满足测温精度要求。在理论分析的基础上,结合本系统提出了温度补偿方案。结果表明:对于提高红外热像仪测温精度有很大的作用,在650℃时测温精度控制在了0.5%以内。同时根据理论推导发现,在光学系统设计时,提高入瞳直径或者减小焦距,即减小F值,可以减小距离影响,实际设计中应与具体应用结合。

参 考 文 献

- [1] 张勇,王新赛,贺明.距离对红外热像仪测温精度的影响及误差修正[J].红外,2011,32(2):24-27.
- [2] 李云红,孙晓刚,原桂彬.红外热像仪精确测温技术[J].

光学精密工程,2007,15(9):1336-1341.

- [3] Christian. K. Infrared Thermal Imaging to Measure Local Temperature Rises Caused by Handhold Mobile Phones [J]. Science, 2005, 54(4): 1513-1519.
- [4] 苏佳伟,石俊生,汪炜稽.距离对红外热像仪测温精度影响及提高精度的实验研究[J].红外技术,2013,35(9):587-590.
- [5] 张健,杨立,刘慧开.环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J].红外技术,2005,27(5):419-422.
- [6] Jonathan T. C., Gregory B. R., Jay B., et al. Near - infrared Diode Laser Absorption Diagnostic for Temperature and Water Vapor in a Scramjet Combustor [J]. Applied Optics, 2005, 44(31): 6701-6711.
- [7] 郭帮辉,黄剑波,王志,等.目标距离和视场角变化对红外热像仪测温精度影响的理论分析[J].长春理工大学学报(自然科学版),2011,(34)1:16-20.
- [8] 杨风暴.红外物理与技术[M].1版.北京:电子工业出版社,2014:97-102.

(上接第4页)

左右,这说明改变静压的方式来提高恢复系数效果并不明显。

5 结论

本文通过建立三维定常流热耦合数值模拟模型,对K型温度传感器进行了超音速条件下的数值模拟研究,为传感器实验和设计提供了理论基础。在超音速条件下,对影响温度传感器恢复系数的几个关键影响量做了定量分析。研究结果表明:单屏蔽式结构、总温和马赫数对于传感器恢复系数的提升帮助很大;传感器外径尺寸、静压对于温度传感器的恢复系数影响很小。

参 考 文 献

- [1] Shih T H., Liou W W., Shabbir A., et al. A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [2] 任志安,郝点,谢红杰.几种湍流模型及其在FLUENT中

的应用[J].化工装备技术,2009,30(2):38-40.

- [3] 赵飞,张延玲,朱荣,等.超音速射流流场中湍流模型[J].北京科技大学学报,2014(3):366-372.
- [4] 赵静,魏英杰,张嘉钟,等.不同湍流模型对空化流动模拟结果影响的研究[J].工程力学,2009,26(8):233-238.
- [5] 周凌九,胡德义,王正伟.可实现性 $k-\epsilon$ 模型在水轮机流场计算中的应用[J].水动力学研究与进展,2003,18(1):68-72.
- [6] Habibi A., Merci B., Heynderickx G. J. Impact of radiation models in CFD simulations of steam cracking furnaces [J]. Computers & Chemical Engineering, 2007, 31(11): 1389-1406.
- [7] 李铁,李伟力,袁竹林.用不同辐射模型研究下降管内传热质特性[J].中国电机工程学报,2007,27(2):92-98.
- [8] 薛大文,陈志华,韩珺礼.三维圆柱和方柱的高超声速绕流特性比较研究[J].南京理工大学学报(自然科学版),2013,37(2):269-274.