

航空机载镍电阻温度传感器仿真及优化设计

张磊¹, 彭艳¹, 王曦²
(1. 中国航空工业集团有限公司 苏州长风航空电子有限公司, 江苏 苏州 215151;
2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为满足某型航空发动机对配套镍电阻温度传感器动态热响应的技术要求,构建传感器动态热响应分析数学模型,完成 6 组设计方案的仿真分析,通过样件试制和试验验证,确定最优设计方案。研究表明:采用热扩散系数较高的铜制感温元件骨架材料、填充非金属导热硅脂、骨架结构为螺旋状的传感器动态热响应最快,时间常数仿真结果为 17.3 s,样件测试结果为 16.58 s,满足动态热响应技术要求。
关 键 词: 镍电阻温度传感器; 动态热响应; 数学建模; 仿真分析; 优化设计
中图分类号: V233.7 **文献标志码:** A

Simulation and optimization design of aviation nickel resistance temperature sensor

ZHANG Lei¹, PENG Yan¹, WANG Xi²
(1. Suzhou Changfeng Avionics Company Limited,
Aviation Industry Corporation of China Limited, Suzhou Jiangsu 215151, China;
2. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to meet the dynamic thermal response requirements of a aviation nickel resistance temperature sensor, the mathematical model was constructed, and the simulation analysis of six groups of design schemes was completed. The optimal design was determined through trial productions and verification tests. The sensor of a helical skeleton, which was composed of copper and filled with thermal conductive silicon grease, had the fastest dynamic thermal response. The simulation result of time constant was 17.3 s, and the test result was 16.58 s. This design of the sensor can meet the technical requirements.
Key words: nickel resistance temperature sensor; dynamic thermal response; mathematical mode; simulation analysis; optimization design

航空发动机参数测试技术及机载传感器设计与应用技术已成为提高我国航空发动机研制水平的关键技术之一^[1]。作为表征航空发动机工作状态的重要参数,压气机进口温度、燃滑油温度等中低温参数直接参与发动机控制^[2],需使用热电阻温度传感器进行准确测量。目前,广泛使用的热电阻温度传感器包括铂电阻温度传感器和镍电阻温度传感器,两者使用环境及适用温度范围有所

不同^[2]。铂电阻测温精度高,化学稳定性好,测温范围广(23~913 K)^[3],但其材料价格昂贵。而镍电阻的测温元件材料成本仅为铂电阻的 0.1%^[3],产品经济性高。在 423 K 以下镍电阻具有较高的电阻-温度系数^[4],测温灵敏度高,机械加工性能好,因此航空发动机在 423 K 以下多采用镍电阻作为测温敏感元件。

国内现有的航空机载镍电阻温度传感器基本采用镍丝单层绕制在片状云母骨架上的传统结构,缺点为体积大、质量高、动态响应慢、结构可靠性低,无法满足新一代航空发动机对机载产品提出的小型化、高精度、快速响应的要求。国外先进的航空发动机,如黑鹰直升机配装的 T700 及其改进型发动机,使用小型化镍电阻温度传感器,以金属骨架线绕式结构取代云母骨架结构,大大减轻了传感器的质量,提高了动态响应速度。本文讨论的传感器基于这种小型化结构,开展性能提升研究并进行优化设计。

作为温度传感器的重要技术指标,动态热响应反映的是传感器感受随时间变化的瞬态温度的快慢程度,用时间常数 $\tau_{0.632}$ 来表征^[5-7],含义为测得的温度变化至阶跃温度的 63.2% 时所需的时间。时间常数的影响因素众多,不仅与传感器的结构、尺寸、材质有关,还与被测介质表面传热系数、比热容等有关。王魁汉等^[4]统计并实测了几种热电阻温度传感器的时间常数,外套管直径为 10 mm 的云母骨架结构传感器时间常数为 36 s,高爱民等^[8]研究了不同外径尺寸的传感器动态热响应特性,时间常数均超过 25 s。国外镍电阻温度传感器在马赫数 Ma 为 0.1 的气流中时间常数为 13~14 s,性能优于国内现有产品。

提高动态热响应的方法主要有^[9]:①改进传感器自身的材料与结构;②利用后续硬件电路或软件进行温度信号滞后性补偿处理等^[10-12]。目前国内研究主要集中在基于软件方法对传感器输出的温度信号进行补偿,王立国等^[13]采用最小误差原则对时间常数进行修正,写入补偿环节,使用 2 次指数平滑法对补偿曲线进行修正。鹿晓力等^[14]设计了一种温度传感器动态特性完全补偿电路。程建华等^[15]设计的软件补偿和滤波方法能够定期为测温回路进行测定补偿。上述利用软件进行补偿的方法虽然设计灵活、易于修改和实现,但应用范围局限性较大,未从根本上改善温度测量的动态性能。而通过采用新材料、新结构、新工艺等方法改进传感器自身结构,能够直接且显

著的提高动态热响应速度^[9,16],但创新难度大,研发周期长,国内鲜有这方面的研究报道。

本文针对航空机载温度传感器动态热响应技术要求,基于小型化结构,研究动态热响应性能并进行结构改进。通过建立分析数学模型,确定影响因素,利用仿真方法分析不同设计参数的影响规律,得出最优设计方案,根据计算结果进行样件试制和试验验证,为提高该型镍电阻温度传感器的动态热响应提供理论依据。

1 动态热响应技术要求

镍电阻温度传感器利用金属镍的电阻值随温度变化的特性来实现温度测量^[17-19]。小型化的传感器基本结构如图 1 所示,主要由感温元件、外壳、接插件、内部非金属填充材料以及测量引线等零部件^[20]组成。其中,感温元件为测温核心部件,由镍电阻丝绕制在骨架表面制成,如图 2 所示。

航空发动机控制系统对温度传感器动态热响应提出的技术要求为:在气流马赫数 Ma 为 0.1、温度阶跃为 100 K 的条件下传感器的时间常数 $\tau_{0.632}$ 不大于 18 s,即气流温度由 293.15 K 阶跃至 393.15 K 时,输出温度信号上升至 356.35 K 所需的时间不大于 18 s。

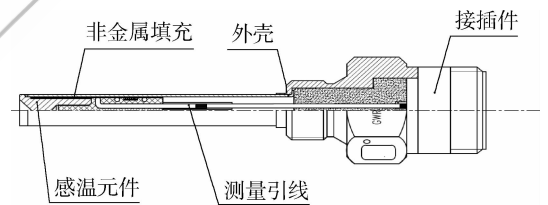


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sensor

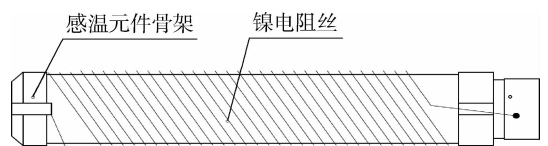


图 2 感温元件结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the temperature sensing component

2 动态热响应分析数学模型

对传感器所处的流场进行流固耦合瞬态温度场分析,进行如下假设:①忽略与外部环境之间的辐射换热;②在传感器外表面流动的介质热流密

度恒定,忽略接触热阻;③忽略通过测量引线等零部件的导热热损;④镍电阻丝截面积仅为 0.02 mm^2 ,对热传导影响较少,省略对镍电阻丝的详细建模,近似认为感温元件骨架表面温度即为测温镍电阻丝感受到的温度。

据此得到动态热响应分析二维模型,如图3所示,图中 T_∞ 为气流温度, Ma 为气流马赫数, λ 、 ρ 、 c_p 依次为材料热导率、密度、比定压热容,其下标 1、2、3 用于区分感温元件、非金属填充材料及壳体材料的参数。流场中传热经历两个过程:①热对流过程,一定温度 T_∞ 和马赫数 Ma 的气流在传感器外壁流动,热量通过壳体表面传递到传感器内部。②热传导过程,热量在传感器内部各零件之间传递,由缠绕在感温元件骨架表面的镍电阻丝感受温度的变化并输出电阻信号。

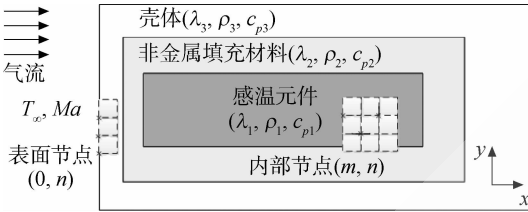


图3 二维导热分析模型示意

Fig. 3 Schematic diagram of two-dimensional heat conductive model

利用有限差分法推导流场的瞬态温度分布,将模型划分为有限个离散网格,如图4所示。 m 、 n 分别为 x 轴向和 y 轴向的网格节点编号, Δx 、 Δy 为两轴向的网格间距。其中, $m=0$ 列网格节点 $(0, n)$ 为流固边界处的传感器壳体表面节点,

$m=1$ 列网格节点 $(1, n)$ 为与表面节点相邻的内部节点。对于瞬态分析,还需将时间 t 离散化,引入整数 p , p 与 $p+1$ 时刻的时间间隔为 Δt 。后续讨论中温度 $T_{m,n}^p$ 为节点 (m, n) 在 $p\Delta t$ 时刻的温度,下标表示网格节点位置,上标表示时间。

1) 对流换热分析

高温气流在传感器壳体表面流动,假定所有热流能量都进入固体内部,则能量平衡通用方程为^[21]

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g = \dot{E}_{st} \quad (1)$$

式中 $\dot{E}_{in}$ 为能量传入固体速率, $\dot{E}_g$ 为能量产生速率, $\dot{E}_{st}$ 为固体内部贮存能量的增加速率。将式(1)中各项展开得^[22]

$$hA(T_\infty - T_{0,n}^p) + \frac{\lambda A}{\Delta x}(T_{1,n}^p - T_{0,n}^p) = \rho c_p A \frac{\Delta x}{2} \times \frac{T_{0,n}^{p+1} - T_{0,n}^p}{\Delta t} \quad (2)$$

式中 h 为对表面传热系数,与固体表面粗糙度、气流马赫数、流体与固体间的温度梯度等有关, A 为对流换热表面积, T_∞ 为气流温度, λ 为热导率, ρ 为密度, c_p 为比定压热容。其中 λ 、 ρ 、 c_p 为材料的热物性,其比值为材料的热扩散系数 α ,表达式为

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),化简整理后得到表面节点 $(0, n)$ 温度的有限差分方程为

$$T_{0,n}^{p+1} = \frac{2h\Delta t}{\rho c \Delta x}(T_\infty - T_{0,n}^p) + \frac{2\alpha\Delta t}{\Delta x^2}(T_{1,n}^p - T_{0,n}^p) + T_{0,n}^p \quad (4)$$

式(4)中下一时刻表面节点的温度 $T_{0,n}^{p+1}$ 需根据上一时刻该节点温度 $T_{0,n}^p$ 及相邻的内部节点温度 $T_{1,n}^p$ 求得,下面对内部节点温度进行推导。

2) 热传导分析

热量进入传感器表面网格后,在内部网格节点间进行传导。对于无内热源的二维瞬态热传导过程,导热微分方程为^[21]

$$\frac{1}{\alpha} \times \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (5)$$

利用有限差分法,将温场中的温度梯度表示为内部节点 (m, n) 温度的函数,式(6)为空间导数的中心差分近似^[21]

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{m,n} \approx \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \\ \left. \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right|_{m,n} \approx \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} \end{cases} \quad (6)$$

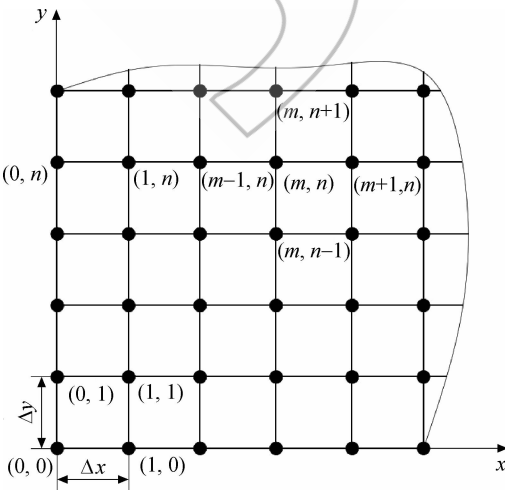


图4 离散网格示意图

Fig. 4 Schematic diagram of discrete grid

温度对时间的导数表示式为

$$\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{m,n} \approx \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \quad (7)$$

将式(6)和式(7)代入式(5),得到内部节点 (m,n) 温度的有限差分方程

$$\frac{1}{\alpha} \times \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} = \frac{T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta y)^2} \quad (8)$$

联立式(4)和式(8),获得传感器表面及内部节点瞬态温度分布的完整解析方程。根据给定的初始条件,已知 $t=0\text{s}(p=0)$ 时各节点温度,当 $t=\Delta t(p=1)$ 时,先利用式(4)求解表面节点的温度 $T_{0,n}^1$,再根据式(8)对内部各节点应用有限差分方程,确定其温度 $T_{m,n}^1$,同时这一步求得的与表面节点相邻节点温度 $T_{1,n}^1$ 用于求解 $t=2\Delta t(p=2)$ 时刻表面节点温度 $T_{0,n}^2$ 。以此类推,逐步迭代可得间隔为 Δt 的各时刻下传感器全部节点的温度分布。提取各时刻下传感器内部感温元件骨架表面位置(即镍电阻丝所在部位)各节点的温度,取平均值后拟合成温度 T 随时间 t 变化曲线,在曲线上求得温度阶跃为 63.2% 时所需的时间,即为传感器时间常数计算结果。

由式(4)可知,表面节点温度变化速率随表面传热系数和材料热扩散系数的增加而加快。由式(8)可知,内部节点温度变化速率随材料的热扩散系数增加而加快、随该节点与表面节点的距离增加而减慢。综上可知,通过采用热扩散系数较高的零件材料、填充导热材料、改进零件结构以减小热传导距离等方法,可提高传感器的动态热响应,达到优化设计的目的。

上述解析法适用于简单几何形状的二维传热问题,对于几何形状和边界条件较为复杂的三维情况,需增加一个空间维度,导致求解瞬态温度分布的计算量倍增。因此需借助仿真分析软件,建立三维瞬态对流传热仿真模型,计算各时刻下的温场分布情况,提取测温元件所在位置温度随时间变化曲线,求得传感器动态热响应结果。

3 动态热响应仿真分析及优化

本节利用热流体仿真软件 FloEFD 对传感器进行建模和仿真分析,研究骨架材料、非金属填充材料和骨架结构形式对动态热响应的影响,找出

提升热响应性能的方法,为传感器的优化设计提供依据。

3.1 动态热响应仿真分析

3.1.1 仿真模型建立

根据小型化镍电阻温度传感器初步设计方案建立仿真模型,对不影响动态热响应性能的接插件、外壳刻字等特征进行简化,省略测量引线等零部件。仿真模型如图 5 所示。

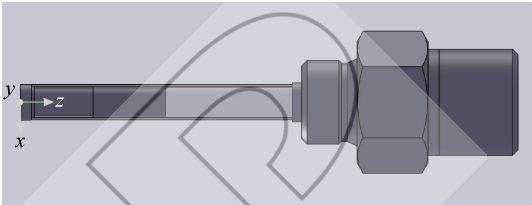


图 5 传感器仿真模型

Fig. 5 Simulation model of the sensor

对传感器三维模型进行网格划分,网格类型采用六面体网格。介于传感器外壳与感温元件骨架之间区域是影响动态热响应性能最重要的部位,温度梯度较大,需对该区域进行网格细分,以得到更为精确的计算结果。如图 6 所示为网格划分情况。

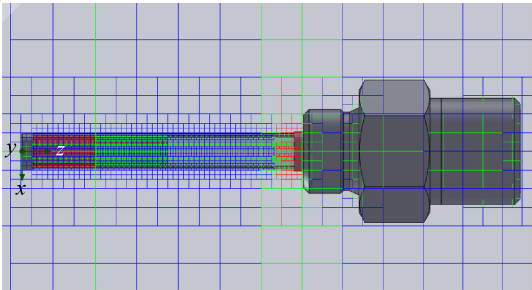


图 6 网格划分示意图

Fig. 6 Schematic diagram of grid

3.1.2 材料参数设定

设置流场流体及传感器各零部件的材料热物性,包括密度、比定压热容和热导率。流体为干燥空气,压强为 101325Pa ,外壳、接插件壳体材料为不锈钢,感温元件骨架材料分别设置为铜、铝和聚酰亚胺材料,感温元件骨架与外壳间填充导热硅脂。具体材料参数^[23]见表 1。

3.1.3 边界条件设定

设置动态热响应仿真分析边界条件,分析类型为外部流动。初始固体温度(即传感器全部节

表 1 材料热物性参数

Table 1 Material thermo-physical parameters			
材料	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$c_p/(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	$\lambda/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$
不锈钢	7900	502	16.3
铜	8960	384	401
铝	2688.9	902	237
聚酰亚胺	200	669.768	0.04019
导热硅脂	970	603	1.5
空气	1.205	1005	259

点在 0 s 时刻温度 $T_{m,n}^0$) 为 293.15 K, 壁面表面粗糙度为 $3.2\mu\text{m}$ 。流体入口设置为速度入口, 流体温度 $T_\infty=393.15\text{ K}$, 气流马赫数 $Ma=0.1$ 。环境条件设置为环境温度 393.15 K、环境空气压力为 101325 Pa、环境空气流速为 0 m/s。

求解设置中将求解类型设置为与时间相关的瞬态分析, 动态监控各时间步目标表面的温升情况。为保证计算结果的收敛性和平滑性, 计算子步的时间间隔 Δt 设置为 0.005 s, 每隔 0.1 s 保存一次结果。

3.1.4 仿真后处理

完成仿真分析前处理后进行计算求解, 求解结束后通过后处理模块查看各时刻下温度分布云图、流场流体速度分布云图等结果。将每隔 0.1 s 记录的感温元件骨架表面各节点温度, 取平均值后拟合成温度 $\bar{T}$ 随时间 t 变化曲线, 求得温度上升至阶跃温度的 63.2% 时所用的时间, 该时间即为传感器的时间常数 $\tau_{0.632}$ 。

3.2 仿真结果分析

按文中第 3.1 节的方法, 设计 6 组分析方案, 研究不同骨架材料、非金属填充材料和骨架结构形式对动态热响应的影响, 具体方案如表 2 所示。

表 2 动态热响应仿真分析方案

Table 2 Simulation schemes of dynamic thermal response			
方案	骨架材料	骨架结构	非金属填充材料热导率/ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
A	铜	圆形	1
B	铝	圆形	1
C	聚酰亚胺	圆形	1
D	铜	圆形	5
E	铜	圆形	无填充
F	铜	螺旋骨架	1

3.2.1 骨架材料的影响

为研究骨架材料对动态热响应的影响, 进行方案 A、B、C 三组分析, 骨架均为圆形结构, 直径为 4.8 mm, 骨架与外壳间填充热导率为 $1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的导热硅脂, 骨架材料依次设置为铜、铝和聚酰亚胺。

方案 A 传感器动态热响应仿真结果为: 感温元件测温表面平均温度 $\bar{T}$ 随时间 t 变化规律如图 7 所示, 将图 7 曲线拟合为感温元件测温表面平均温升公式如式 (9), 其中 $\bar{T}$ 为测温表面平均温度, t 为时间, 拟合度 $R^2=0.9999$ 。根据式 (9) 可计算得测温表面平均温度升至 356.35 K 时, 所需的时间为 21 s, 即方案 A 传感器时间常数 $\tau_{0.632}$ 为 21 s。

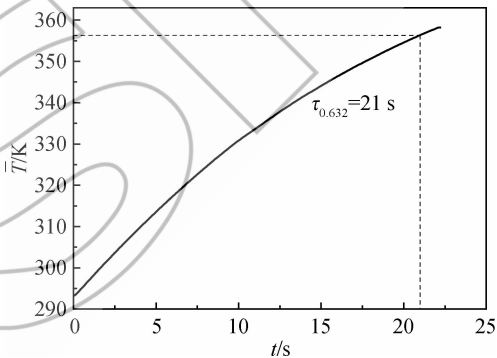


图 7 测温表面平均温升曲线(方案 A)

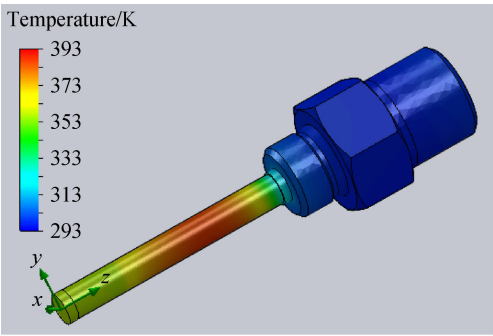
Fig. 7 Average temperature rise curve of temperature measuring surface (scheme A)

$$\bar{T}=0.0002t^3-0.0739t^2+4.4596t+293.15$$

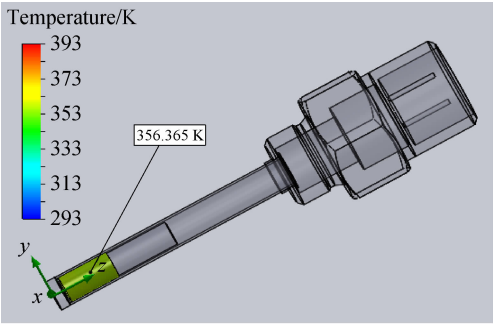
(9)

图 8 所示为方案 A 传感器整体及测温表面温度分布云图(仿真时间为 21 s)。当试验进行到 21 s 时, 传感器整体外表面存在较大的温度梯度(如图 8(a)所示), 内部测温表面温度分布较为均匀, 平均温度已达 356.35 K(如图 8(b)所示), 即感温元件感受到的温度已达时间常数阶跃温度点, 21 s 为方案 A 时间常数分析结果。图 9 所示为流场内流体迹线示意图, 流经传感器外壳的高温气流有明显的降速绕流过程。

利用上述方法, 计算方案 B 和方案 C 传感器的时间常数。图 10 所示为传感器测温表面平均温度 $\bar{T}$ 随时间 t 变化曲线。式 (10) 为根据图 10 中方案 B 曲线拟合出的测温表面平均温升公式(拟合度 $R^2=0.9996$), 由式 (10) 可知方案 B 传感器时间常数 $\tau_{0.632}$ 为 23.1 s。



(a) 仿真时间为21 s时整体温度分布云图



(b) 仿真时间为21 s时测温表面温度分布云图

图 8 仿真时间为 21 s 时温度分布云图(方案 A)
Fig. 8 Temperature distribution diagram at simulation time of 21 s (scheme A)

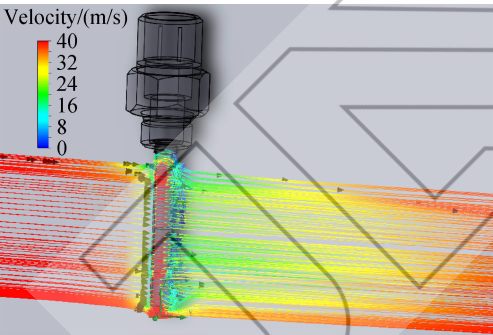


图 9 传感器测温端气体流线图(方案 A)
Fig. 9 Airflow streamline of temperature measuring end of sensor (scheme A)

同理,拟合出方案 C 传感器测温表面平均温升公式,如式(11)所示(拟合度 $R^2=0.9996$),则方案 C 传感器的时间常数 $\tau_{0.632}$ 为 26.3 s。

$$\bar{T} = -0.0008t^3 - 0.029t^2 + 3.823t + 293.15 \quad (10)$$

$$\bar{T} = -0.0001t^3 - 0.034t^2 + 3.358t + 293.15 \quad (11)$$

比较方案 A、B、C 三组仿真结果可知:当结构完全一致时,骨架材料为铜的传感器动态热响应最快,时间常数为 21 s;骨架材料为铝的传感器时间常数为 23.1 s;骨架材料为聚酰亚胺的传感器

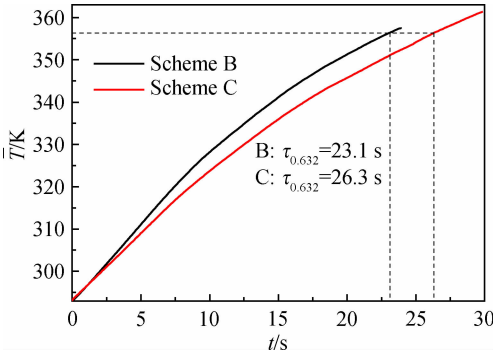


图 10 测温表面平均温升曲线(方案 B、方案 C)
Fig. 10 Average temperature rise curves of temperature measuring surface (scheme B, scheme C)

动态热响应最慢,时间常数为 26.3 s。三组方案时间常数的差异主要与骨架材料的热扩散系数 α 有关,热扩散系数越高,动态热响应越快。由于铜制骨架的传感器动态热响应最快,后续方案均采用铜制骨架材料。

3.2.2 非金属填充材料的影响

比较方案 A、D、E 三组仿真结果可得不同非金属填充材料对传感器动态热响应的影响。这三组方案的传感器骨架均为铜制圆形结构,骨架与外壳之间分别填充热导率为 $1.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的导热硅脂或无填充。

计算方案 D 和方案 E 传感器的时间常数。图 11 所示为 D、E 方案传感器测温表面平均温度 T 随时间 t 变化曲线。式(12)为根据图 11 中方案 D 曲线拟合出的测温表面平均温升公式(拟合度 $R^2=1$),由式(12)可得方案 D 传感器时间常数 $\tau_{0.632}$ 为 21.2 s。

同理,拟合出方案 E 传感器测温表面平均温升公式,如式(13)所示(拟合度 $R^2=0.9996$),则方案 E 传感器的时间常数 $\tau_{0.632}$ 为 30.5 s。

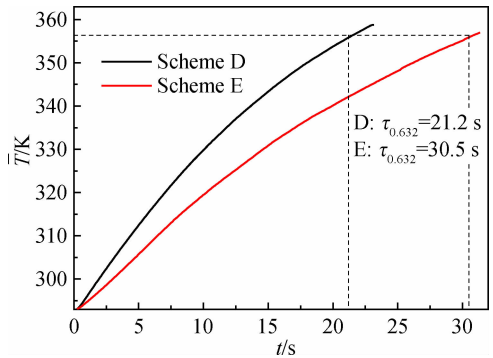


图 11 测温表面平均温升曲线(方案 D、方案 E)
Fig. 11 Average temperature rise curves of temperature measuring surface (scheme D, scheme E)

$$\bar{T}=0.0002t^3-0.074t^2+4.466t+293.15$$

(12)

$$\bar{T}=-0.0001t^3-0.0254t^2+2.937t+293.15$$

(13)

比较方案 A、D、E 三组仿真结果可知:感温元件骨架与外壳之间填充热导率分别为 1 W/(m·K)和 5 W/(m·K)的导热硅脂时,传感器时间常数为 21 s 和 21.2 s,导热硅脂的热导率对传感器动态热响应影响不显著。但不填充导热硅脂时,时间常数仿真结果急剧增加至 30.5 s,严重降低了动态热响应速度。因此,在传感器感温元件骨架与外壳之间填充导热硅脂能够有效提高动态热响应速度。

3.2.3 骨架结构形式的影响

根据方案 A~方案 E 仿真结果可知,采用圆形铜制骨架,填充导热硅脂的方案 A 传感器动态热响应最快,时间常数为 21 s,但仍未满足小于 18 s 的技术要求,需继续改进骨架结构,提高热响应速度。图 12 所示为改进的骨架结构示意,骨架表面设计为螺旋状凹槽,用于测温的镍电阻丝绕制成弹簧状嵌入骨架凹槽内,骨架外表面紧贴外壳内壁以减小导热温度梯度,螺旋骨架结构测温端装配示意如图 13 所示。

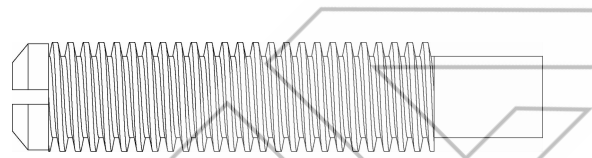


图 12 螺旋骨架结构示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the spiral skeleton

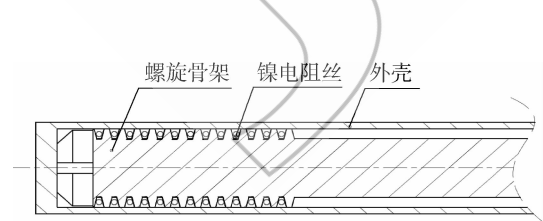


图 13 螺旋骨架结构测温端装配示意图

Fig. 13 Assembly diagram of the temperature probe with spiral skeleton

计算采用螺旋骨架结构的方案 F 传感器的动态热响应,监控镍电阻丝所在的骨架凹槽底面温度变化情况,可得时间常数仿真结果。图 14 所示为方案 F 传感器感温元件骨架凹槽底面平均温度 $\bar{T}$ 随时间 t 变化曲线,利用该曲线拟合出温升公式(式(14))(拟合度 $R^2=0.9998$),得到方案

F 传感器的时间常数 $\tau_{0.632}$ 为 17.3 s。

图 15 为方案 F 传感器在 17.3 s 时刻整体及感温元件骨架表面的温度分布云图,整体外表面存在较大的温度梯度(如图 15(a)所示),内部感温元件骨架表面温度分布较为均匀,凹槽底面处平均温度已达 356.35 K(如图 15(b)所示),已达时间常数阶跃温度点,17.3 s 为方案 F 传感器时

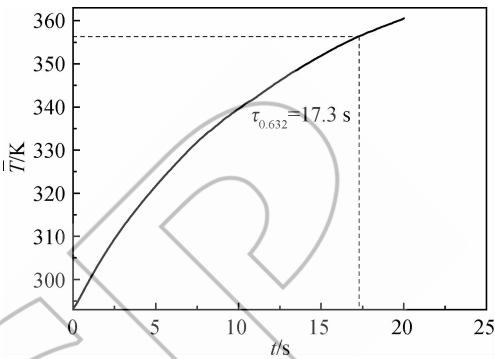
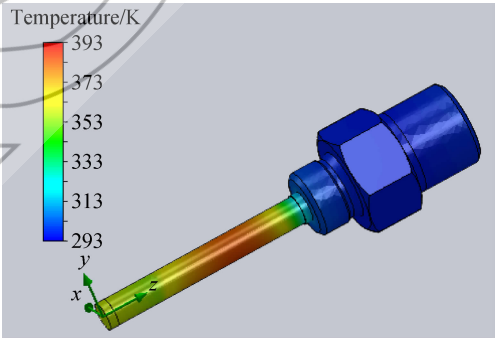
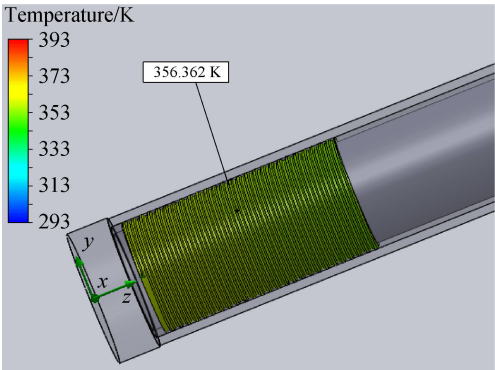


图 14 测温表面平均温升曲线(方案 F)

Fig. 14 Average temperature rise curve of temperature measuring surface (scheme F)



(a) 仿真时间为17.3 s时传感器整体温度分布云图



(b) 仿真时间为17.3 s时测温表面温度分布云图

图 15 仿真时间为 17.3 s 时传感器整体及测温表面温度分布云图(方案 F)

Fig. 15 Temperature distribution diagram of sensor and temperature measuring surface at simulation time of 17.3 s (scheme F)

间常数分析结果。

$$\bar{T} = 0.0054t^3 - 0.287t^2 + 7.004t + 293.15$$

(14)

比较方案 A 和方案 F 仿真结果可知:将感温元件骨架结构由圆形改进为螺旋结构后,时间常数由 21 s 缩短为 17.3 s,大大提高了传感器动态热响应速度,满足了传感器动态热响应技术要求。这一方面是由于采用圆形骨架结构时测温镍电阻丝绕制在骨架外侧,骨架与传感器壳体内壁需保持一定的间隙才能完成装配,而螺旋骨架结构外径紧贴壳体内壁,镍电阻丝绕制在螺旋槽内,能够尽可能使测温位置靠近传感器壳体,减少热量传导的距离。另一方面,螺旋骨架结构镍电阻丝间隙处由金属铜进行热传导,其热扩散系数远高于圆形骨架结构间隙处填充的非金属导热硅脂,因此采用螺旋骨架结构的传感器具有较快的动态热响应速度。

4 动态热响应试验验证

为验证动态热响应仿真分析的准确性,按表 2 中方案 A 和方案 F 试制两件传感器试验件,利用校准风洞进行动态热响应测试,测试装置示意图如图 16 所示。试验中将被测传感器安装在试验段,通过压力传感器和大气压力计读取气流总压和静压,计算出气流马赫数,调节气阀控制气流流速,将气流马赫数 Ma 调整至 0.1。利用弹射机构引入 393.15 K 的高温气流,产生 100 K 的温度阶跃,利用示波器记录被测传感器温度响应曲线,取温度阶跃至 63.2% 对应的时间作为时间常数测试结果。

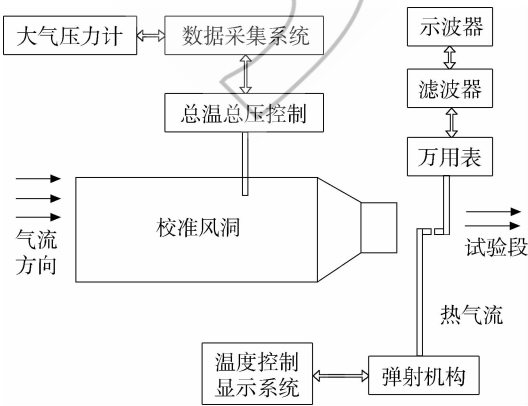


图 16 动态热响应测试装置示意图

Fig. 16 Schematic diagram of the testing device of dynamic thermal response

传感器动态热响应测试结果如表 3 所示,采用圆形骨架结构的方案 A 时间常数测试结果为 20.16 s,采用螺旋骨架结构的方案 F 时间常数测试结果为 16.58 s,将测试结果与文中第 4 节中仿真结果进行对比,相对误差均小于 5%,测试结果与仿真分析结果较为吻合,验证了仿真建模和分析的准确性,进一步确认了方案 F 为满足传感器动态热响应技术要求的最优方案。

表 3 动态热响应仿真及测试结果

Table 3 Simulation and testing results of dynamic thermal response

试验方案	骨架结构	仿真时间常数/s	测试时间常数/s	相对误差/%
A	圆形结构	21	20.16	4.17
F	螺旋结构	17.3	16.58	4.34

5 结 论

本文基于小型化航空机载镍电阻温度传感器动态热响应的技术要求,建立了动态热响应分析数学模型,设计了 6 组工程可行的初步方案,通过大量的仿真试验得到不同设计参数的影响规律,根据样件试制和试验验证结果,确定最优设计方案为采用铜制螺旋骨架的感温元件方案,时间常数仿真结果为 17.3 s,样件测试结果为 16.58 s,动态热响应性能优于国内同类传感器,并接近于国际先进水平(13~14 s)。本研究成果具有较高的工程实用价值,已完成科研小批试制,有望应用于国内多种航空发动机的温度测控系统。

参考文献:

[1] 姜彩虹,孙志岩,王曦.航空发动机预测健康管理系统设计的关键技术[J].航空动力学报,2009,24(11):2589-2594. JIANG Caihong,SUN Zhiyan,WANG Xi. Critical technologies for aero engine prognostics and health management systems development [J]. Journal of Aerospace Power, 2009,24(11):2589-2594. (in Chinese)

[2] 卢利平,唐龙,岳恩,等.镍电阻丝的制备及电阻温度特性[J].四川兵工学报,2013,34(12):113-115. LU Liping,TANG Long,YUE En,et al. Preparation and resistance-temperature characteristic of nickel resistance wire[J]. Journal of Sichuan Ordnance,2013,34(12):113-115. (in Chinese)

[3] 周金芳,梁素珍.关于镍薄膜热电阻研制的几个问题[J].浙江大学学报(工学版),2002,36(1):66-68. ZHOU Jinfang,LIANG Suzhen. Aspects on developing nickle-film thermal resistance[J]. Journal of Zhejiang Uni-

- versity (Engineering Science), 2002, 36(1): 66-68. (in Chinese)
- [4] 王魁汉. 温度测量实用技术[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [5] 朱杰, 郭涛. 一种 Pt100 温度传感器的动态热响应模型[J]. 传感技术学报, 2013, 26(1): 73-77.
ZHU Jie, GUO Tao. The dynamic thermal response model of Pt100 temperature sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(1): 73-77. (in Chinese)
- [6] 何道清, 张禾, 谌海云. 传感器与传感器技术[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2019.
- [7] TAGAWA M, KATO K, KANADA K, et al. Response compensation of temperature sensor[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 2003, 69(678): 414-421.
- [8] 高爱民, 爰建军, 于国强, 等. PT100 热电阻动态特性试验研究与分析[J]. 传感技术学报, 2016, 29(9): 1395-1399.
GAO Aiming, SHU Jianjun, YU Guoqiang, et al. The dynamic characteristics study and numerical simulation of the PT100 thermocouple[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(9): 1395-1399.
- [9] 李杰, 樊丁, 纪仓囤, 等. 航空发动机温度传感器动态特性改善方法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(3): 707-714.
LI Jie, FAN Ding, JI Cangdun, et al. Dynamic response capability improvement method for aero-engine temperature sensor[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(3): 707-714. (in Chinese)
- [10] 蒋亚东, 谢光忠. 敏感材料与传感器[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2008.
- [11] MEIJER G C M, WANG G, FRUETT F. Temperature sensors and voltage references implemented in CMOS technology[J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(3): 225-234.
- [12] 李秀芬, 张存芳. 温度传感器时间常数测试数据的处理方法[J]. 宇航计测技术, 2001, 21(2): 36-40.
LI Xiufen, ZHANG Cunfang. Test data processing method of the temperature sensor time constant[J]. Journal of Astronautical Metrology and Measurement, 2001, 21(2): 36-40. (in Chinese)
- [13] 王立国, 邓罗泉, 刘卓崴, 等. 某型航空发动机的温度传感器惯性补偿研究[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(3): 66-73.
WANG Liguang, DENG Luoquan, LIU Zhuowei, et al. Inertial compensation study of temperature sensor in aero-engine[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(3): 66-73. (in Chinese)
- [14] 鹿晓力, 路立平, 李奎, 等. 温度传感器动态特性完全补偿方法研究与补偿电路设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(3): 65-70.
LU Xiaoli, LU Liping, LI Kui, et al. Research on complete compensation to dynamic characteristic of temperature sensor and design of compensating circuit[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science) 2012, 33(3): 65-70. (in Chinese)
- [15] 程建华, 罗立成, 王鑫哲. 高精度测温系统的测温补偿算法研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(11): 36-39.
CHENG Jianhua, LUO Licheng, WANG Xinzhe. Research on temperature compensation algorithm of high-precision temperature measurement system[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(11): 36-39. (in Chinese)
- [16] 王增刚, 梁宏伟. 热电阻的动态响应特性[J]. 河北科技大学学报, 2004, 25(3): 51-55.
WANG Zenggang, LIANG Hongwei. Dynamic response characteristic of thermal resistances[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2004, 25(3): 51-55. (in Chinese)
- [17] 张洪润. 传感器技术大全[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [18] 徐蓓娜. 镍热电阻及其应用[J]. 功能测量, 1993, 24(3): 286-288.
XU Beina. Nickel thermal resistance and its application[J]. Functional Materials, 1993, 24(3): 286-288. (in Chinese)
- [19] 吴建平. 传感器原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [20] 赵鹏, 张磊, 徐琪, 等. 一种绕丝式镍电阻敏感元件及制作方法: ZL 201611123371.4[P]. 2018-08-24.
- [21] INCIOPERA P F. 传热和传质基本原理[M]. 葛新石, 叶宏, 译. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [22] 张曙光, 魏志远, 夏双枝. 面向适航的航空发动机非线性气动热力建模方法综述[J]. 航空动力学报, 2018, 33(12): 2885-2899.
ZHANG Shuguang, WEI Zhiyuan, XIA Shuangzhi. Review on methods of aircraft engine nonlinear aerothermal-dynamic modeling for airworthiness requirement[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2885-2899. (in Chinese)
- [23] 刘成柱. ANSYS Workbench 17.0 热力学分析实例演练[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.

(编辑: 李岩梅、王碧珺)