

# 基于自适应优化方法的响应时间数据分析

刘鹏寅\* 徐忠平

(上海飞机制造有限公司, 上海 201324)

## 摘要:

温度传感器的响应时间是其重要的特性参数,反应了其动态测试性能。在实际测试中,对于响应时间测试数据采用人工读取的方法得到结果,存在人为因素较多,响应时间结果多次读取不一致,精度难以统一的问题。因此提出采用基于 Kriging 代理模型的自适应序贯优化方法对测试数据进行寻优拟合计算。通过理论阶跃响应曲线的拟合结果,并加入适当修正,最终得到温度传感器的响应时间计算结果。计算结果表明,该方法可以自动精确计算得到温度传感器的响应时间结果,同时可以对同一温度传感器的多次测试数据进行对比量化判断。与传统人工读取方法相比,该方法具有计算精度统一,自动高效,人为因素较少等优势。

**关键词:** 温度传感器;响应时间;序贯优化算法;Kriging 代理模型

**中图分类号:** V245.3

**文献标识码:** A



## 0 引言

温度传感器被应用于飞机的多个区域(如压气机出口、制冷包、机翼前缘表面等),为相关系统的控制部件提供相应的温度信息,其性能特性对飞机相关系统的正常运行具有重要意义。温度传感器的响应时间反映了温度传感器的动态测试性能指标,检测温度传感器的响应时间对于温度传感器的性能特性具有重要意义。响应时间的大小与温度传感器的物性参数、几何参数以及测温环境等物理因素有关<sup>[1]</sup>。由于测温环境对温度传感器的响应时间影响显著,因此很难用简单的理论模型进行准确求取,故在实际检测中通常采用实验的方法得到温度传感器的响应时间<sup>[2]</sup>。常用的试验方法为投入实验法,这种方法简单实用,适用于较小的温度阶跃<sup>[3]</sup>。本文所讨论的温度传感器响应时间数据即是采用投入实验法,将温度传感器投入恒温油槽中,通过示波器记录温度传感器输出电压的测试数据,最后对测试数据进行处理得到所需的响应时间。

采用传统中温度传感器响应时间的测试数据由人工进行读取与计算处理,不仅在精度上难以保证统一,同时会引入较大的人为因素引起的误差,对响应时间的准确检测存在负面影响。因此采用计算机编程处理测试数据获取响应时间的方法被大量提出,这些方法虽然可以保证精度的统一,但是往往涉及到一些经验常数的设置,影响了这类方法的适用性<sup>[4-5]</sup>。本文基于温度传感器响应时间的理论公式,采用拟合的方法对测试数据进行计算处理,从而得到所需的响应时间结果,避免了经验常数的设置从而增强了该处理方法的适用性范围,同时具备了自动高效的特点。

## 1 响应时间测试原理

对温度传感器进行响应时间测试时,可以将测试系统视为一阶线性系统<sup>[2]</sup>,则其响应状态可用如下微分方程进行描述:

$$\tau \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = T \quad (1)$$

\* 通信作者。E-mail: pengyinliu@163.com

**引用格式:** 刘鹏寅,徐忠平. 基于自适应优化方法的响应时间数据分析[J]. 民用飞机设计与研究,2019(3):71-75. LIU P Y, XU Z P. Data Analysis of Response Time Based on Adaptive Sequential Optimization Method[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2019(3):71-75 (in Chinese).

式中:  $\tau$  为响应时间;  $T$  为温度随时间变化的函数;  $T(t)$  为测试记录的结果。

对于阶跃响应, 则上述微分方程有如下解:

$$T - T_0 = (T_e - T_0)(1 - e^{-\frac{t-t_s}{\tau}}) \quad (2)$$

式中:  $T_0$  为温度传感器的初始温度;  $T_e$  为阶跃后温度传感器的最终温度;  $t_s$  为温度阶跃开始时刻, 即本文测试响应时间所采用的投入实验法中, 温度传感器投入恒温油槽的时刻。

当  $t - t_s = \tau$ , 则上式变为

$$\begin{aligned} T - T_0 &= (T_e - T_0)(1 - e^{-1}) \\ &\approx 0.632(T_e - T_0) \end{aligned} \quad (3)$$

根据上式, 通过计算温度传感器实测温度  $T$  与初始温度  $T_0$  之差达到温度阶跃  $(T_e - T_0)$  的 63.2% 处所需时间就可以得到温度传感器的响应时间<sup>[6]</sup>。

## 2 响应时间计算算法研究

### 2.1 寻优拟合方案

本文计算温度响应时间的方法是利用实际测试数据拟合得到理论公式中的响应时间, 具体方法如下所述。

首先, 通过对响应时间的理论分析, 可以得到实际测试数据的理论函数如下所示:

$$V(t) = \begin{cases} V_0 & t < t_s \\ (V_e - V_0)(1 - e^{-\frac{t-t_s}{\tau}}) & t \geq t_s \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $V$  为温度传感器输出电压;  $V_0$  为温度传感器在初始温度时对应的输出电压;  $V_e$  为阶跃后温度传感器在最终温度时对应的输出电压; 则需要拟合的参数向量为:

$$X = (V_0, V_e, t_s, \tau)^T \quad (5)$$

其次, 将理论函数与实际测试数据结果的差值平方和定义为目标函数:

$$Y = \sum_{i=1}^N (V(t_i) - V_{\text{exp}}(t_i))^2 \quad (6)$$

式中:  $V_{\text{exp}}(t_i)$  为  $t_i$  时刻的实际测试数据,  $N$  为测试采样总数。

最终温度响应时间的拟合计算问题可以转化为寻优问题, 从而得到需拟合参数向量中的温度响应时间  $\tau$ , 即

$$Y_{\text{opt}}(X) = \min_{X \in \Omega} Y(X) \quad (7)$$

式中:  $Y_{\text{opt}}(X)$  为  $Y(X)$  的最优值,  $\Omega$  为  $X$  的定义域。

### 2.2 基于 Kriging 模型的自适应序贯优化方法

本文在寻优过程中采用基于 Kriging 模型的自适应序贯优化方法进行, 该方法在多自变量的工程优化领域中, 能够避免局部收敛现象, 同时具有较好的收敛速度和精度<sup>[7]</sup>。

#### 2.2.1 Kriging 代理模型

代理模型在工程优化问题中被大量应用以提高相应优化问题计算的效率, 而本文所采用的 Kriging 模型相较于其他代理模型具有训练样本点处无偏估计、良好的高度非线性近似能力等特点<sup>[7]</sup>。

Kriging 模型假设样本点集  $X = [x^1, x^2, \dots, x^n]^T$  (其中  $x^i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) 为  $m$  维的向量,  $m$  为设计变量的个数,  $n$  为样本点的个数), 响应值  $Y = [y^1, y^2, \dots, y^n]^T$ , 样本与响应值的关系如下:

$$y(x) = f(x) + z(x) \quad (8)$$

式中:  $f(x)$  是确定性部分, 表示对设计空间的全局近似。  $z(x)$  为一随机函数, 表示对设计空间的背离情况, 其统计特性如下:

$$E[z(x)] = 0 \quad (9)$$

$$\text{Var}[z(x)] = \sigma^2 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[z(x^i), z(x^j)] &= \sigma^2 R[R(x^i, x^j, \theta)] \\ (1 \leq i, j \leq n) \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $R$  为相关函数矩阵,  $R(x^i, x^j, \theta)$  为点  $x^i, x^j$  之间的相关函数。选择高斯函数作为相关函数, 其形式为:

$$R(x^i, x^j, \theta) = \exp\left(\sum_{k=1}^m \theta_k \|x_k^i - x_k^j\|^2\right) \quad (12)$$

未知点处的预测值和预测标准差为:

$$\hat{y}(x_0) = \hat{\beta} + r^T R^{-1}(Y - f\hat{\beta}) \quad (13)$$

$$\hat{s}^2(x_0) = \hat{\sigma}^2 \left( r^T R^{-1} r + \frac{(1 - fR^{-1}r)^2}{f^T R^{-1} f} \right) \quad (14)$$

式中:  $\hat{\beta} = (f^T R^{-1} f)^{-1} f^T R^{-1} Y$ ,  $\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{m} (Y - f\hat{\beta})^T R^{-1} (Y - f\hat{\beta})$ 。当  $f(x)$  取常数时,  $f$  为一个长度为  $n$  的单位列向量。  $r$  为未知点与样本点之间的相关函数向量, 定义如下:

$$\begin{aligned} r(x_0)^T &= R[R(x_0, x^j, \theta)]^T = \\ &[R(x_0, x^1, \theta), R(x_0, x^2, \theta), \dots, R(x_0, x^m, \theta)]^T \end{aligned} \quad (15)$$

相关矩阵  $R$  以及  $\hat{\beta}, \hat{\sigma}^2$  都依赖于相关参数向量  $\theta$ , 通常由最大似然估计方法给出其最优值用以构建最好的 Kriging 模型, 即在  $\theta > 0$  的情况下使下式最小:

$$\det(R(\theta))^{\frac{1}{n}} \cdot (\hat{\sigma}^2(\theta))^2 \quad (16)$$

在优化计算过程中需要确定校正点,本文采用EI(Expected improvement)函数来解决最小化问题,其定义为:

$$E[I(x)] = (y_{\min} - \hat{y})\Phi\left(\frac{y_{\min} - \hat{y}}{s}\right) + \hat{s}\Psi\left(\frac{y_{\min} - \hat{y}}{s}\right) \quad (17)$$

式中: $\Phi$ 为标准正态分布函数, $\Psi$ 为标准正态分布概率密度函数, $y_{\min}$ 为可行域中最小的目标函数值。整个优化问题的最终收敛条件为:

$$\frac{E[I(x)]_{\max}}{|y_{\max} - y_{\min}|} < \varepsilon \quad (18)$$

### 2.2.2 自适应序贯优化方法

图1给出了基于自适应Kriging代理模型的温度响应时间计算流程。该计算通过试验设计获得需拟合参数向量的样本集,之后计算得到相应的响应样本(目标函数)集,进而采用Kriging代理模型构造需拟合参数向量和目标函数的近似模型,并完成校正点的寻找和评估。若计算未收敛,则将校正点和相应的响应值加入样本集,直至计算收敛,得到该问题的最优解,从而最终获得需要的温度响应时间 $\tau$ 。

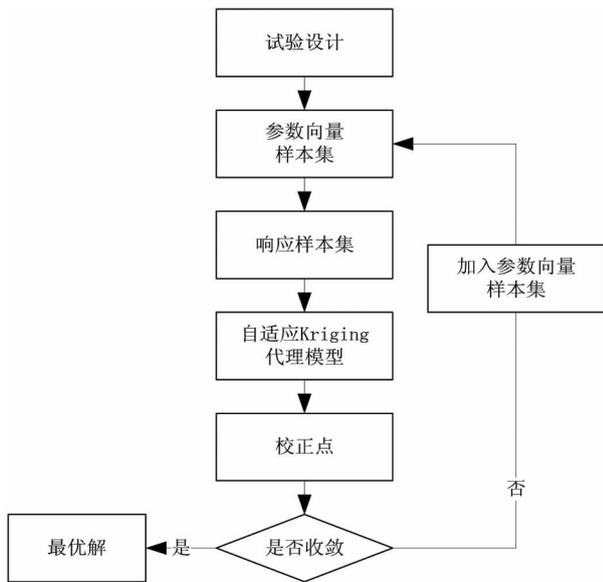


图1 基于自适应Kriging代理模型的响应时间计算流程

## 3 结果分析

### 3.1 响应时间数据结果与拟合结果对比

图2给出了某型飞机温度传感器某次的响应时

间测试数据与拟合数据对比图。如前文所述,该测试数据是由示波器记录的温度传感器输出电压的时间序列。如图所示,该温度传感器的响应时间测试曲线与拟合后的理论曲线基本一致。但是由于背景噪声等实际影响,测试数据在全时域上存在波动现象,见图2中局部放大图。对于初始温度和最终温度时温度传感器输出的电压数据,由于实际测试数据的波动,使得人工读取的方法会引入较大的人为因素引起的误差。这会导致对同一测试数据,同一人员多次读取的结果、不同人员读取的结果均会出现不同的现象。因此,采用传统人工读取的方法会导致温度传感器响应时间结果的误差较大。而采用本文所应用的拟合优化方法,可以使得同一数据每次计算得到的响应时间结果保持一致,从而避免了处理响应时间测试数据时人为因素的引入。

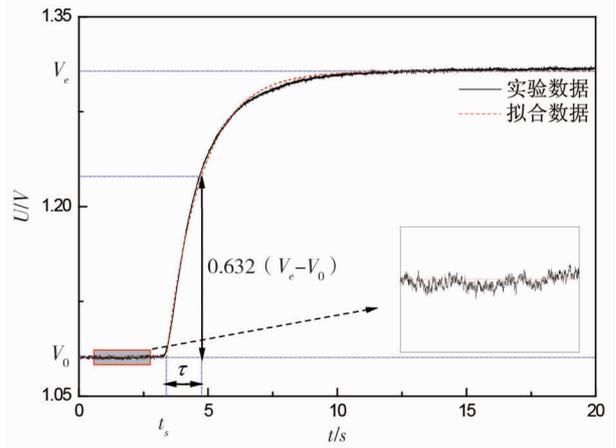


图2 响应时间测试数据与拟合数据对比图

为了进一步分析拟合寻优方法计算响应时间的特性,图3给出了图2中部分时间区域内的测试曲

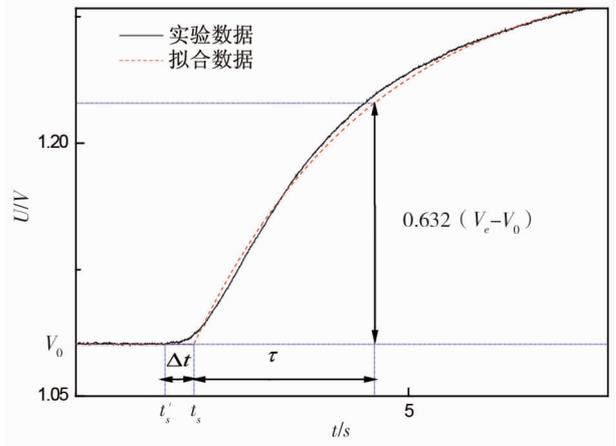


图3 响应时间测试数据与拟合数据局部对比图

线与拟合计算得到的理论曲线对比图。从图 3 中可以发现,实际温度传感器的阶跃开始时间与拟合得到的理论结果有明显差异,同时在阶跃上升阶段测试数据和理论结果也存在一定的偏差。这一现象主要受两个因素的影响:一是温度传感器本身的实际阶跃响应特性与理论存在差异;另一个是由于所采用的投入实验法的结果受制于温度传感器投入恒温油槽的速度,如果温度传感器投入恒温油槽的速度过慢则不符合温度阶跃的假设,从而导致实际响应曲线与理论解存在一定的差距。

### 3.2 阶跃开始时刻修正

投入实验法中阶跃开始时刻的定义是温度传感器投入恒温油槽的时刻,对应于响应时间曲线应是数据开始高于初始温度所对应常值的时刻  $t'_s$ 。由于实际测试中,初始温度阶段的响应曲线是波动的,故本文中实际阶跃开始时刻定义为实际响应时间数据中最后一个低于拟合得到的初始温度所对应常值的时刻。考虑到实际响应时间曲线在阶跃开始阶段与理论解的不同,定义响应时间的修正结果如下:

$$\tau^* = \tau + \Delta t \quad (19)$$

式中: $\tau$  为拟合计算得到的理论响应时间, $\Delta t$  为拟合的理论阶跃开始时刻  $t_s$  与实际阶跃开始时刻  $t'_s$  之间的差值。

表 1 响应时间数据计算结果

序列	$\bar{\tau}/s$	$\tau^*/s$	$\tau/s$	$\Delta t$ 占比/%	目标函数
1	1.28	1.57	1.36	14	0.034 5
2	1.24	1.57	1.32	16	0.034 1
3	1.22	1.59	1.34	16	0.053 1
4	1.24	1.58	1.31	17	0.030 3
5	1.66	1.95	2.22	-14	0.345 6

表 1 给出了同一温度传感器五次测试结果对比,采样总数均为 10 000,其中序列 1 数据结果即是上文图中分析的测试数据。从多次对比结果可以看出, $\Delta t$  在响应时间中的占比均达到 14% 以上,因此在计算响应时间过程中不应忽略这一因素的影响。同时表中还给出了人工读取响应时间的结果  $\bar{\tau}$ ,为尽量消除人为因素的影响,这里给出的是同一人员三次读取的平均值。从结果对比可以发现,拟合寻优方法计算得到的响应时间数据结果与人工读取结果存在一个较为一致的偏差。这是由于采用人工读取方法,很难对初始温度、最终温度时相应数据结果

及阶跃开始时刻进行精确的估计,同一人员利用个人经验判断就会造成一个较为一致的偏差。这种由人为经验引起的偏差会对温度传感器响应时间特性的研究分析形成负面影响,采用拟合寻优的方法可以消除这种偏差影响。

### 3.3 阶跃开始时刻修正

表 1 中还给出了各次测试数据的目标函数的最优值结果,按目标函数的定义其反映的是实际数据与理论解的差异程度。可以发现序列 5 的测试数据结果的目标函数明显高于其他测试结果,同时人工读取与计算得到的响应时间也均明显高于其他测试结果。图 4 给出了序列 5 的响应时间测试数据与拟合数据对比图。对比图 1 情况,从图 4 中可以发现拟合数据与测试数据有明显区别,其目标函数过高是这一现象的量化体现。由于表 1 中五次测试数据均采用同一温度传感器,结合上文关于测试数据与拟合后的理论结果差异因素,可以判断是由于实际操作中的问题(如温度传感器投入恒温油槽的速度过慢)所引起的。因此序列 4 的测试数据并不能反映该温度传感器的真实阶跃响应特性。综上所述,对于同一温度传感器进行多次响应时间测试后,可以通过目标函数的数值判断是否存在操作问题,从而避免错误的测试数据影响响应时间的结果。

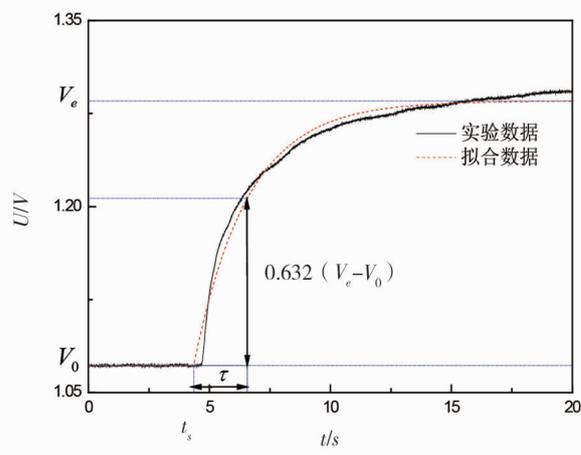


图 4 响应时间测试数据与拟合数据对比图

## 4 结论

在温度传感器响应时间测试中,采用人工读取方法存在对同一测试数据多次读取结果不一致的现象,从而导致响应时间结果难以精确统一。为此本文提出了寻优拟合计算响应时间的方法,其中所采

用的自适应序贯优化方法具有全局收敛特性,同时避免了经验参数的介入,具有更好的适用性。通过分析,可以发现该方法能够避免人工读取方法存在的问题,得到较为精确的响应时间结果。同时计算过程中所得到的目标函数,可以对同一温度传感器的多次测试数据进行对比量化判断,以剔除由于实际操作问题引起的测试数据对响应时间最终结果的影响。采用本文的寻优拟合计算方法,对于温度传感器的响应时间测试数据可以进行自动精确的处理,减少该过程中由人为因素所引起的误差对响应时间结果的影响。

#### 参考文献:

- [1] 吕鹏飞,裴东兴,沈大伟. 基于K型热电偶的瞬态测温技术的研究[J]. 传感技术学报, 2014, 27(6): 775-780.
- [2] 孙宏健,李文军,李佳琪,等. 一种热电偶时间常数测试系统[J]. 中国计量大学学报, 2017, 28(2):

146-152.

- [3] 刘浩,赵化业,王文革,等. 热电偶温度传感器响应时间测试及分析[J]. 宇航计测技术, 2017, 37(6): 48-52.
- [4] 董宇哲. 热电偶时间常数的测量[D]. 沈阳工业大学. 2012.
- [5] 张旭. RPS响应时间测试数据自动处理方法研究[J]. 自动化博览, 2017(5): 76-79.
- [6] 吴方,杨新圆,王莉. 表面温度传感器时间常数测量方法研究[J]. 计测技术, 2014, 34(4): 60-62.
- [7] 王红涛,竺晓程,杜朝辉. 基于Kriging代理模型的自适应序贯优化方法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(26): 193-195.

#### 作者简介

刘鹏寅 男,博士,工程师。主要研究方向:成品件测试技术。E-mail: pengyinliu@163.com

徐忠平 男,学士,助理工程师。主要研究方向:成品件测试技术。E-mail: xuzhongping@comac.cc

## Data Analysis of Response Time Based on Adaptive Sequential Optimization Method

LIU Pengyin\* XU Zhongping

(Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China)

**Abstract:** Response time of temperature sensor is one important parameter which describes the dynamic test performance of temperature sensor. If the response time results were obtained by manual method during response time test, there would exist some problems, such as human factors, different results obtained from same response time data and different precision. Hence, the adaptive sequential optimization algorithm based on Kriging surrogate method was pro-posed to optimization fit against response time data. Through the theory step response curve fit with proper correction, the response time of temperature sensor was calculated. The results show that the proposed method could not only calculate the response time results automatically and precisely but also have the ability to make a quantification comparison with different test data of one same temperature sensor. Compared with the traditional manual method, the pro-posed method has the advantage that it has unified calculate precision, higher efficiency, and less human factors.

**Keywords:** temperature sensor; response time; sequential optimization algorithm; Kriging surrogate method

\* Corresponding author. E-mail: pengyinliu@163.com