

文章编号:1000-8055(2012)03-0707-08

航空发动机温度传感器动态特性改善方法

李 杰, 樊 丁, 纪仓囤, 卜振鹏

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 在某次某型航空发动机的地面台架试车中, 该航空发动机发生了喘振. 为查证导致发动机喘振的原因, 构建了该型航空发动机高压压气机可调静子叶片转角控制系统的数学模型, 完成了联合仿真. 理论分析及仿真研究证明了: 温度传感器动态响应特性滞后是导致发动机喘振的主要原因. 为解决喘振问题, 设计了该传感器的动态性能校正系统. 验证仿真表明: 所采用的校正方案可在不影响系统正常工作的前提下, 明显改善该高压压气机可调静子叶片角度的动态响应特性, 并有效地防止发动机喘振. 该温度传感器校正算法具有适应性良好, 抗干扰能力强等突出优点, 可为解决试车过程中暴露的发动机喘振问题提供重要参考.

关 键 词: 发动机喘振; 动态响应性能; 温度传感器; 航空发动机; 校正系统

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Dynamic response capability improvement method for aero-engine temperature sensor

LI Jie, FAN Ding, JI Cang-dun, BU Zhen-peng

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A problem of engine surge occurred in the process of one aero engine bed test. In order to find out the reason of the engine surge, a mathematical model of the variable stator vanes angle control system of the aero engine high pressure compressor (AHPC) was established, and then joint-simulations were done. Theory analysis and simulation results show that dynamic response delay of a temperature sensor induces the engine surge. Then a dynamic calibration system of this temperature sensor was designed to solve the engine surge problem. The validation simulation results show that the calibration system presented can obviously improve the dynamic response of AHPC's variable stator vanes, and it can effectively prevent the engine surge without affecting the working of the aero engine. The temperature sensor calibration algorithm presented has a good adaptability and a strong anti-interference capability, and it can provide an important reference to solve the engine surge problem exposed in the aero engine bed test.

Key words: engine surge; dynamic response capability; temperature sensor; aero-engine; calibration system

为了保证航空发动机高压压气机所需的喘振裕度, 需要对高压压气机可调静子叶片转动角度进行控制. 在某型航空发动机控制系统中, 高压压气机可调静子叶片转角控制子系统采用了具有全

功能机械液压备份控制器的数字电子控制系统.

该型航空发动机的某次台架试车过程中, 高压压气机可调静子叶片转角响应出现滞后, 导致发动机发生喘振. 经理论分析及试验验证后认为,

收稿日期: 2011-06-27; 修订日期: 2011-09-02

作者简介: 李杰(1984—), 男, 陕西宝鸡人, 博士生, 主要从事航空发动机控制研究.

该角度响应滞后的问题主要是由高压压气机进口温度(T_{25})传感器动态响应特性滞后所导致的. 因此, 需要对 T_{25} 温度传感器动态响应特性滞后导致航空发动机喘振的观点进行分析与研究, 给出处理意见并提出解决发动机喘振问题的技术方案.

本文采用了实物试验与仿真研究相结合的方法, 对相关问题进行了深入研究; 在全面分析与研究可能导致发动机喘振的原因的基础上, 提出了具体的解决方案, 并检验了所提出的解决方案的有效性.

1 高压压气机可调静子叶片转角控制系统工作原理简介

无论发动机处于数字电子控制工作状态还是机械液压备份控制工作状态, 其机械液压备份控制器均参与对高压压气机可调静子叶片角度 α_2 的控制. 若系统处于数控状态下, 数字电子控制器和备份控制器相互配合共同完成对 α_2 的控制. 若

数字电子控制器出现故障, 则其退出工作, 由备份控制器单独完成对 α_2 的控制. 该高压压气机可调静子叶片角度控制系统结构如图 1 所示.

数字电子控制器的控制回路如图 2 所示. 图中, α_{2dem} 表示经数字电子控制器控制计算得到的叶片转角控制希望值, α_2 表示实际测得的叶片转角. 数字电子控制器按照控制规律 $\alpha_{2dem} = f_1(\bar{n}_{hc25}, T_1)$ 经数字电子控制器计算得到 α_{2dem} , 并进一步计算得到并发出控制作用信号, 驱动 α_2 控制电磁阀, 调整 α_2 控制活门衬套位置, 从而改变 α_2 作动筒左右腔油压, 驱动高压压气机可调静子叶片转动 (α_2 作动筒固定在发动机机匣上, 驱动高压压气机可调静子叶片转动机构), 并通过角位移传感器形成数控闭环控制回路, 最终使实际 α_2 和控制希望值保持一致.

机械液压备份控制器由 α_2 控制活门、 α_2 作动筒、 α_2 反馈凸轮等装置组成. 机械液压备份控制器的控制规律为 $\alpha_{2dem} = f_2(\bar{n}_{hc}, T_1)$, 其依据 $\bar{n}_{hc}$

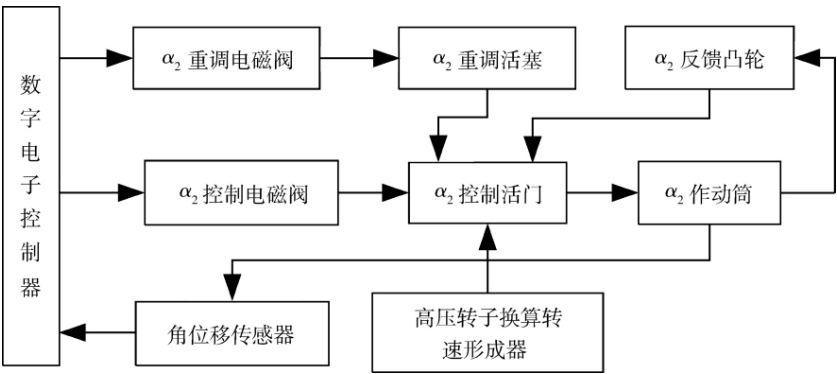


图 1 系统结构简图

Fig. 1 Simplified diagram of the system

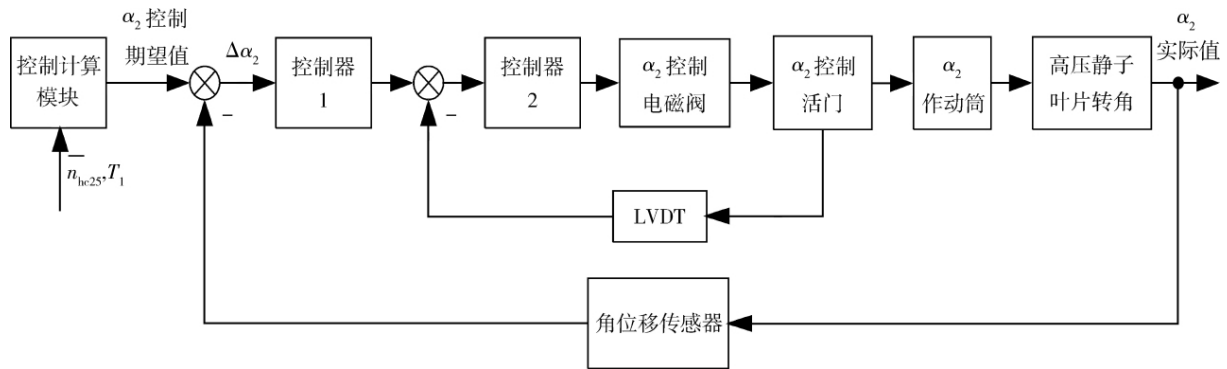


图 2 α_2 控制回路简图

Fig. 2 Simplified diagram of the α_2 control loop

和 T_1 信号,调节 α_2 控制活门阀芯位置,从而改变 α_2 作动筒左右腔油压,驱动导流叶片转动,并通过 α_2 反馈凸轮形成闭环控制回路。

当系统处于数控工作状态时, α_2 重调电磁阀通电,在 α_2 重调电磁阀和 α_2 重调活塞的作用下,使机械液压备份控制器在不干扰数字电子控制器工作的同时,配合数字电子控制器共同完成对 α_2 的精确控制。最终,使 α_2 实际角度值与数字电子控制器期望值保持一致。若数字电子控制器退出工作,则系统处于机械液压备份控制状态下,此时, α_2 重调电磁阀断电, α_2 重调活塞停止对机械液压备份控制器的作用,由机械液压备份控制器独立完成对 α_2 的控制,使 α_2 实际角度值与机械液压备份控制器期望值保持一致。也即,当系统处于数控工作状态时,系统按照 $\alpha_{2\text{dem}} = f_1(\bar{n}_{\text{hc}25}, T_1)$ 完成对 α_2 的控制,而当系统处于备份控制工作状态时,系统按照 $\alpha_{2\text{dem}} = f_2(\bar{n}_{\text{hc}}, T_1)$ 完成对 α_2 的控制。

2 发动机喘振故障原因分析

在该型航空发动机的某次台架试车实验中,高压压气机可调静子叶片转角响应出现滞后,导致发动机发生喘振。试验记录曲线如图3所示。

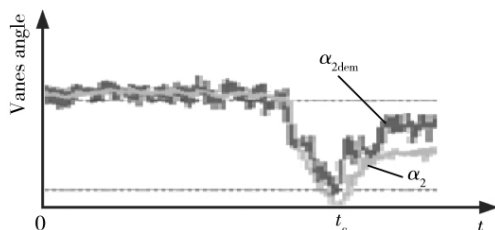


图3 试验结果

Fig. 3 Experiment result

试车时,在 t_c 时刻附近,发动机发生了喘振。从图3中可以看出, α_2 值在时间 t_c 时刻附近出现了突变,而 α_2 的突变就导致了发动机的喘振。因为在实际系统中, α_2 跟随 $\alpha_{2\text{dem}}$ 变化,故 α_2 出现异常是由 $\alpha_{2\text{dem}}$ 值的突变引起。因此, $\alpha_{2\text{dem}}$ 突变是导致喘振的主要原因。

依据控制规律 $\alpha_{2\text{dem}} = f_1(\bar{n}_{\text{hc}25}, T_1) / \bar{n}_{\text{hc}25}$ 由发动机风扇出口温度 T_{25} 和发动机高压转子转速 n_2 经计算得出)可知, $\alpha_{2\text{dem}}$ 由 T_1 , T_{25} 和 n_2 计算得出。进一步的专项试验表明, n_2 信号和发动机进口温度 T_1 信号正常,而 T_{25} 温度传感器存在明显的动态响应滞后的特性。由上述专项试验可做出

如下分析:由于 T_{25} 温度传感器存在动态特性滞后问题,进而导致 T_{25} 信号不能及时反映发动机的状态变化,导致经数字电子控制器计算发出的 $\alpha_{2\text{dem}}$ 值动态严重滞后,最终导致实际的导叶角度不能及时与发动机状态变化相适应,引起发动机喘振。

为了证明上述分析的正确性,对该航空发动机所使用的 T_{25} 温度传感器进行了专项动态时间常数测试试验。试验结果表明:该型发动机使用的 T_{25} 温度传感器的时间常数处于 6.0~7.3 s 之间。

3 温度传感器动态响应特性改善方法

目前,缩短温度传感器的动态响应时间,提高其动态性能的方法主要有^[1-4]:改进传感器材料与结构、采用硬件电路或软件对传感器输出信号进行处理等^[5-12]。采用新材料、新结构、新工艺等方法研制新型传感器,是比较直接而基础的方法。但其创新难度大,研发周期长,需要花费大量人力物力。采用硬件电路补偿方法也比较有效,但相关电路比较复杂,且调整性能比较麻烦。基于软件的方法因成本较低,设计灵活,易于修改和实现等特点,成为目前提高传感器动态性能的研究热点。综合考虑上述三种方法后,本文选取了基于软件,实现改善某航空发动机温度传感器动态性能的方法。

3.1 温度传感器数学模型

温度传感器自身的温度变化在时间上总是滞后于被测介质的温度变化,这种现象称为热惯性。热惯性的存在可引起温度传感器产生动态滞后误差,降低了温度传感器测量动态温度的精度,从而使控制系统的动态性能变差。

假设有一温度随时间变化的介质,将某温度传感器放置于其中,介质通过热对流的形式将热量传输到温度传感器上,并且温度传感器可吸收所有热量。则在各个时刻,介质传送到温度传感器的热量与温度传感器的储热量相等^[2-4]。即

$$\alpha A (T_m - T_s) = c \rho V \frac{dT_s}{dt} = cm \frac{dT_s}{dt} \quad (1)$$

式中 A 为温度传感器对流换热有效面积; c 为比热容; α 为表面传热系数; T_m 为被测介质温度; T_s 为传感器输出的与温度对应的电信号值(即传感器测量到的温度值); V 为传感器体积; ρ 为其密度; m 为温度传感器的有效质量; τ 为温度传感器的时间常数。由上式可得

$$\frac{cm}{\alpha A} \frac{dT_s}{dt} + T_s = T_m \quad (2)$$

令 $\tau = \frac{c\rho V}{\alpha A}$, 则

$$\tau \frac{dT_s}{dt} + T_s = T_m \quad (3)$$

由式(3)可知, 温度传感器的数学模型可以近似为一阶惯性环节. 因此, 温度传感器的阶跃响应为^[1-3]

$$T_s = T_m - (T_m - T_0)e^{-t/\tau} \quad (4)$$

式中 t 为响应时间; T_0 为温度传感器的初始温度.

实际的 α_2 控制系统中采用的是无套管铂电阻温度传感器, 该传感器的数学模型可以简化为一阶惯性环节. 此惯性环节的时间常数是反映热电阻传热特性的一个重要参数, 动态误差的大小与该时间常数密切相关. 对于某一个温度传感器, 其感温材料的构造、热电阻的几何尺寸等物理特性已经确定, 但由时间常数的计算公式 $\tau = c\rho V/\alpha A$ 可知, τ 值的大小还与比热容有关. 在不同温度下, 温度传感器的比热容 c 不同, 故温度传感器的时间常数将随温度变化而发生变化. 因此, 若要实时利用相关算法计算出被测温度值, 必须能实时计算出温度传感器的时间常数.

3.2 温度传感器动态特性校正方法

由式(4)可求出 T_s 对时间的变化率, 即温度传感器输出的温度响应曲线的斜率^[2-3]

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{(T_m - T_0)e^{-t/\tau}}{\tau} \quad (5)$$

由式(3)可知

$$T_m = T_s + \tau \frac{dT_s}{dt} \quad (6)$$

因此, 要得到介质的实际温度 T_m , 必须得到 T_s , dT_s/dt 和 τ . 这三个参数中, 温度传感器的输出信号 T_s 本身为已知信号, 利用计算机使用差分方法可求出 dT_s/dt , 故要得到 T_m 的关键在于如何实时求出 τ 的大小.

设 $k(t)$ 为 t 时刻温度传感器输出的温度响应曲线的斜率. 则有

$$k(t) = \frac{dT_s}{dt} = \frac{(T_m - T_0)e^{-t/\tau}}{\tau} \quad (7)$$

设计计算机处理过程中, 采样周期为 t_s , 则在计算机第 i 次采样时, 温度传感器输出曲线的斜率 $k(i)$ 为

$$k(i) = \frac{T_m - T_0}{\tau} e^{-i \cdot t_s/\tau} \quad (8)$$

同理, $k(i-1)$ 为

$$k(i-1) = \frac{T_m - T_0}{\tau} e^{-(i-1) \cdot t_s/\tau} \quad (9)$$

则

$$\frac{k(i)}{k(i-1)} = \frac{e^{-i \cdot t_s/\tau}}{e^{-(i-1) \cdot t_s/\tau}} = e^{-t_s/\tau} \quad (10)$$

$$\tau = t_s / \ln \frac{k(i-1)}{k(i)} \quad (11)$$

若采样周期已确定, 可使用差分方法求出各个采样点上对应的温度响应曲线的斜率, 则可求出 τ 的大小. 然后, 通过式(6)就能得到介质的实际温度 T_m .

由式(11)可知, τ 与 $k(i)$ 的变化有关. 定义斜率比 $R_i = k(i-1)/k(i)$, 对式(11)求微分可得

$$d\tau = \frac{-t_s \cdot dR_i}{R_i \cdot (\ln R_i)^2} = \frac{-\tau^2}{R_i \cdot t_s} dR_i = B dR_i \quad (12)$$

式中

$$B = \frac{-\tau^2}{R_i \cdot t_s} \quad (13)$$

在实时计算 τ 的过程中, 若将 t_s 设置为 0.02 s, 则采样间隔 $\Delta t \ll \tau$, 则由式(13)可知: $|B| \gg 1$. 因此, 由式(12)可知, 时间常数 τ 对斜率比的变化 (dR_i) 很敏感, 故应降低噪声信号对斜率比计算的影响, 以保证所设计的算法具有良好的抗干扰性能. 为增强校正系统的抗干扰性能. 在设计动态性能校正系统时, 可对利用校正算法计算出的部分数据进行限幅和滤波处理, 以获得良好的校正效果. 如本文在设计校正系统时, 增加了对计算出的时间常数 τ 进行限制的模块和滤波模块, 同时亦可对输入校正算法的信号及校正算法输出的信号进行滤波处理.

本文所设计的校正方法不用改变温度传感器的结构, 并且当温度传感器的时间常数为非定常值时, 通过此算法, 测温系统也能快速准确地得到动态性能较理想的温度信号. 因此, 此校正方法具有较好的可行性.

4 校正系统仿真

4.1 温度传感器校正系统仿真

本文所设计的校正系统数学模型示意图如图 4 所示. 校正系统数学模型由 T_{25} 温度传感器模型、滤波器模块、校正算法模块及限幅模块组成. 其中, T_{25} 温度传感器模型为时间常数可变的惯性环节, 校正算法模块是依据前述的校正原理建立的. 此外, 在校正算法前后加入了滤波模块和限幅模块, 其目的是为了消除高频扰动, 起到滤除高频干扰的作用. 其中, 限幅模块可以限制校正模型

计算出的 τ 的大小,防止由于噪声信号的干扰,所计算出的 τ 值发生畸变。

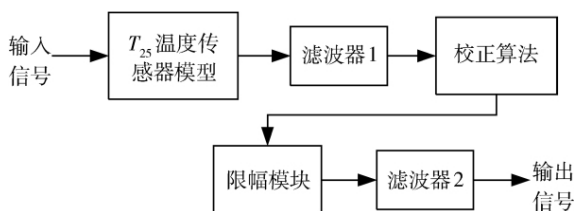


图4 校正系统数学模型示意图

Fig. 4 Simplified diagram of the calibration system mathematical mode

校正系统数学模型的输入信号是实际的 T_{25} 温度场信号和 T_{25} 温度传感器模型的时间常数,输出信号是经校正后的 T_{25} 温度信号。

利用所设计的 T_{25} 温度传感器校正系统模型仿真得到的曲线如图5~图8所示。图5仿真的情况为: T_{25} 由333K阶跃变化到443K;图6仿真的情况为: T_{25} 由423K阶跃变化到313K。图5和

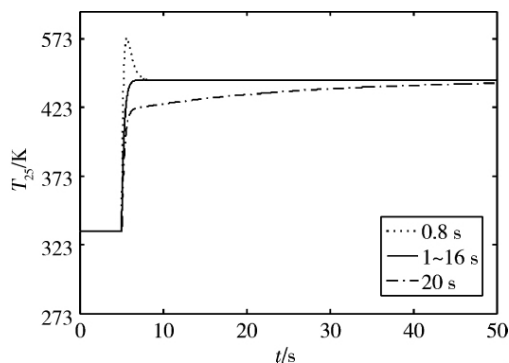


图5 仿真曲线1

Fig. 5 Curve 1 of the simulation results

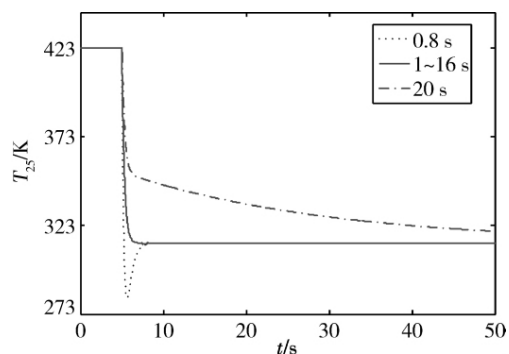


图6 仿真曲线2

Fig. 6 Curve 2 of the simulation results

图6中给出了 τ 为0.8, 1~16s和20s时,经本文设计的校正系统校正后的 T_{25} 变化曲线。图7仿真的情况为: T_{25} 实际温度由423K经5s线性下降到313K,温度传感器的时间常数 $\tau = 8$ s。图8仿真的情况为: T_{25} 实际温度由333K经5s线性上升到443K,温度传感器的时间常数 $\tau = 8$ s。图7和图8中曲线1表示 T_{25} 实际温度变化曲线,曲线2表示经传感器测量得到的 T_{25} 温度曲线,曲线3表示本文所设计的校正系统输出的 T_{25} 变化曲线。

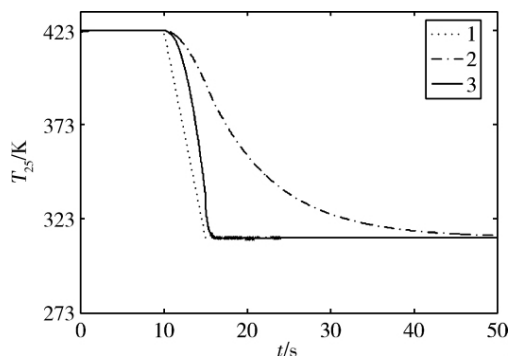


图7 仿真曲线3

Fig. 7 Curve 3 of the simulation results

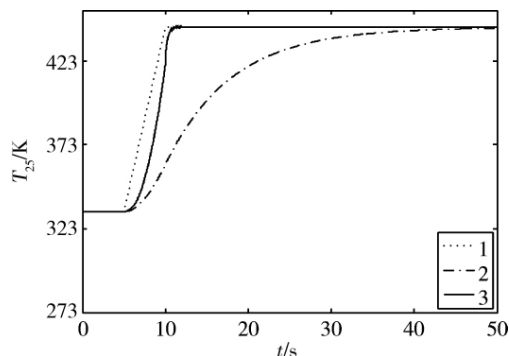


图8 仿真曲线4

Fig. 8 Curve 4 of the simulation results

由仿真结果可知,当 T_{25} 温度传感器的时间常数在1~16s范围内, T_{25} 呈阶跃信号及斜坡变化时,所设计的 T_{25} 温度传感器校正效果较好。

经过仿真研究可知,当改变校正系统数学模型中的限幅模块的上下限制值时,就能改变校正系统的有效校正范围。当增加上限值并减小下限值时,对于更大范围内的时间常数 τ ,所设计的校正系统均将有效。但通过仿真计算可知,若过度增加校正系统的有效校正范围时,将大幅度降低系统的抗干扰性能,故限幅模块的参数应结合实

际情况合理设置. 本文在此参数的实际设置过程中, 参考了某型 T_{25} 温度传感器的动态试验结果——实际试验表明: 在该试验条件下, 发动机使用的 T_{25} 温度传感器的时间常数处于 $6.0 \sim 7.3$ s 之间. 因而, 本文所设计的校正系统完全可满足此时间常数范围内的温度传感器的校正需求, 并具有一定的抗干扰裕度.

4.2 联合仿真

为检验所设计的校正系统的有效性, 将所设计的 T_{25} 温度传感器校正系统与高压压气机可调节子叶片转角控制系统数学模型(该数学模型已经经过动静态验证, 具有较高的置信度)联合, 进行了仿真试验.

为了能较全面地验证本文所设计的校正方法的性能, 分别进行了 4 组仿真试验. 第 1, 2 组仿真研究均针对 T_{25} 温度传感器的时间常数为 1.8 s 和 15 s 的情况. 第 1 组仿真的情况为: n_2, T_1 和 T_{25} 分别由 79.85% , 288 K 和 313 K 阶跃变化到 98.96% , 333 K 和 443 K, 对应的数字电子控制器 α_2 控制希望值由 16.9° 阶跃变化到 7.0° . 第 1 组仿真得到的结果如图 9~图 11 所示, 其分别对应 $\tau=1.8$ s 和 15 s 的情形, 图中的曲线 1, 2 分别表示加入校正系统和未加入校正系统时, α_2 的变化曲线.

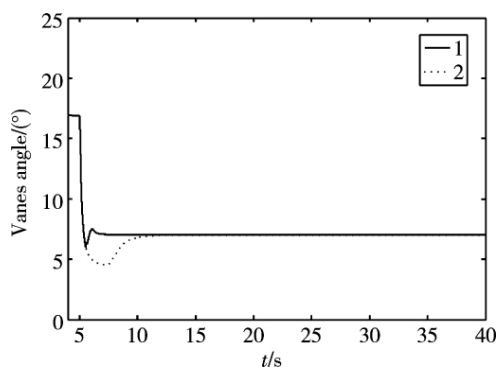


图 9 $\tau=1$ s 时的仿真曲线

Fig. 9 Curve of $\tau=1$ s

第 2 组仿真的情况为: n_2, T_1 和 T_{25} 分别由 97.25% , 333 K 和 423 K 阶跃变化到 79.85% , 288 K 和 313 K, 对应的数字电子控制器 α_2 控制希望值由 5.7° 阶跃变化到 16.9° . 第 2 组仿真得到的结果如图 12~图 14, 其也分别针对 $\tau=1.8$ s 和 $\tau=15$ s 的情形. 各个图中曲线 1, 2 的含义与第一组相同.

第 3, 4 组仿真研究均针对 T_{25} 温度传感器的

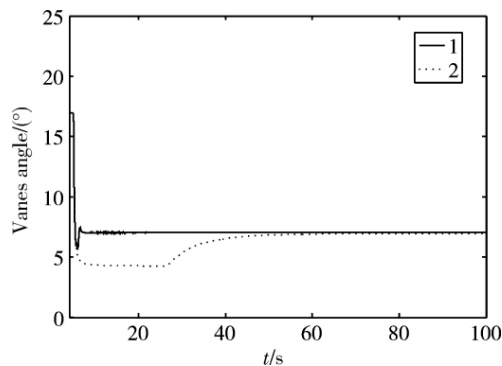


图 10 $\tau=8$ s 时的仿真曲线

Fig. 10 Curve of $\tau=8$ s

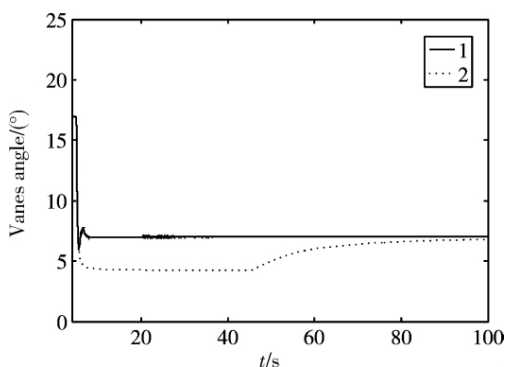


图 11 $\tau=15$ s 时的仿真曲线

Fig. 11 Curve of $\tau=15$ s

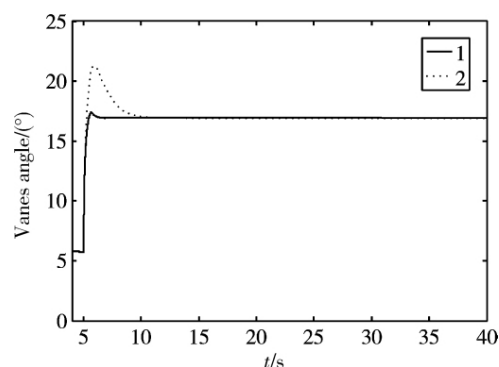


图 12 $\tau=1$ s 时的仿真曲线

Fig. 12 Curve of $\tau=1$ s

时间常数 τ 为 8 s 的情况. 第 3 组仿真的情况为: 实际 n_2, T_1 和 T_{25} 均为斜坡信号, 均分别经 5 s 由 79.85% , 288 K 和 313 K 匀速变化到 98.96% , 333 K 和 443 K; 其仿真结果如图 15 所示. 第 4 组仿真的情况为: 实际 n_2, T_1 和 T_{25} 均为斜坡信号, 均分别经 5 s 由 97.25% , 333 K 和 423 K 匀速变化到 79.85% , 288 K 和 313 K, 仿真结果如图 16 所

示.图15和图16中,曲线1表示忽略 T_{25} 温度传感器的热惯性时,数字电子控制器输出的 α_2 变化曲线(也即,在所设定的条件下,理想的 α_2 变化曲线),曲线2,3分别表示未加入校正系统和加入校正系统时, α_2 的变化曲线.

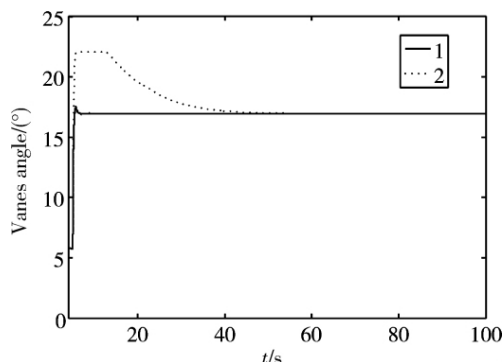


图13 $\tau=8\text{ s}$ 时的仿真曲线

Fig. 13 Curve of $\tau=8\text{ s}$

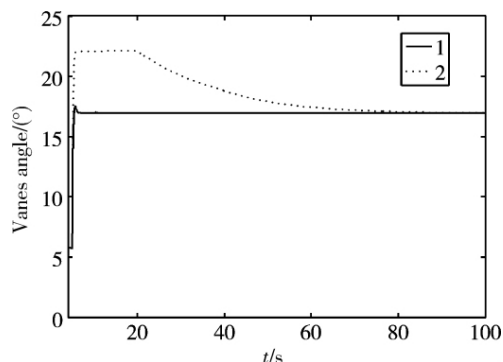


图14 $\tau=15\text{ s}$ 时的仿真曲线

Fig. 14 Curve of $\tau=15\text{ s}$

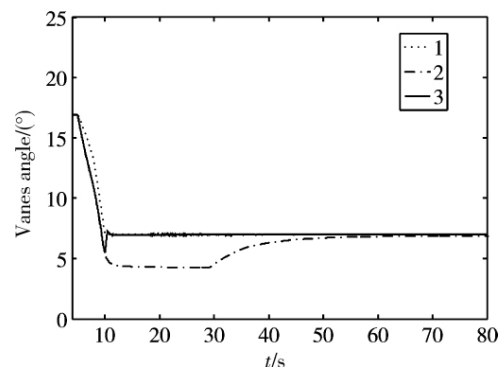


图15 $\tau=8\text{ s}$ 时的仿真曲线1

Fig. 15 Curve 1 of $\tau=8\text{ s}$

在上述四组仿真结果中, α_2 出现了如图3所

示的“突变”的情况.也即,当 τ 较大时, α_2 将偏离理想值,且 τ 越大,偏离现象持续时间越长.这也进一步证实了压气机导流叶片角度响应滞后的问题的确是由于 T_{25} 温度传感器动态响应特性滞后所导致的.

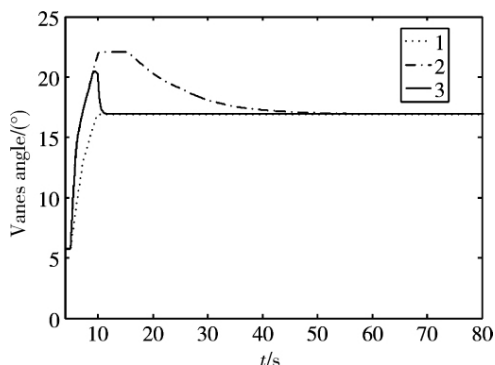


图16 $\tau=8\text{ s}$ 时的仿真曲线2

Fig. 16 Curve 2 of $\tau=8\text{ s}$

由以上仿真研究可知:当 T_{25} 温度传感器的时间常数为 $1\sim 16\text{ s}$,且实际 T_{25} 发生阶跃变化时,若 T_{25} 温度传感器输出的 T_{25} 温度信号经过校正系统校正后, T_{25} 温度的上升时间将小于 1 s ,超调量小且持续时间短.经过校正系统校正后的 T_{25} 温度信号动态性能完全符合发动机控制要求;当实际 T_{25} 发生斜坡式变化时,该校正系统也能大幅改善温度传感器动态性能,消除因 T_{25} 温度动态响应特性差而导致的 α_2 “尖峰”现象.虽然在部分点,可能出现 α_2 超调稍偏大的情况(例如图16所示的情况),但依据仿真研究结果,在绝大部分情况下,所设计的校正系统都能够满足发动机控制要求.

故所采用的校正方案可在不影响系统正常工作的前提下,很好地改善 α_2 的动态响应特性.加入所设计的校正系统后,能够有效地防止发动机喘振.

5 结 论

为解决高压压气机可调静子叶片转角响应滞后导致发动机发生喘振的问题,本文在温度传感器建模技术研究成果的基础上,结合 T_{25} 温度传感器试验数据及相关资料,建立了 T_{25} 温度传感器数学模型并设计了合适的传感器校正方案.通过大量的实物试验及仿真试验,可以证明,本文所采用的校正方案可在不影响系统正常工作的前提下,很好地改善 α_2 的动态响应特性,能够有效地

防止发动机喘振. 所提出的温度传感器校正算法具有适应性良好, 抗干扰能力强等突出优点, 具有较高的工程实用价值, 可望投入实际应用, 解决实际工程问题.

参考文献:

- [1] 徐静, 曾志新, 刘桂雄. 提高传感器动态性能方法分析[J]. 机电工程技术, 2001, 31(5): 25-27.
XU Jing, ZENG Zhixin, LIU Guixiong. Study on the methods of improving sensor dynamic performance[J]. M&E Engineering Technology, 2001, 31(5): 25-27. (in Chinese)
- [2] 涂一新, 万泓, 余新春. 基于实时时间常数的热电偶动态误差校正[J]. 传感器技术, 2001, 20(5): 31-33.
TU Yixin, WAN Hong, YU Xinchun. Study the correction method for dynamic error of thermocouple base on real-time time-constant[J]. Journal of Transducer Technology, 2001, 20(5): 31-33. (in Chinese)
- [3] 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. Disposal method of temperature sensor time constant testing data[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2001, 21(2): 36-40. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] Pertijs M A P, Aita A L, Makinwa K A A, et al. Voltage calibration of smart temperature sensors[R]. Lecce: Proc. IEEE Sensors, 1930-0395, 2008: 756-759.
- [6] 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.
- [7] Pertijs M A P, Huijsing J H. Bit stream trimming of a smart temperature sensor[R]. Vienna: Proc. IEEE Sensors, 0-7803-8693-0, 2004: 904-907.
- [8] Michiel A P P, André L A, Kofi A A M. Senior member low-cost calibration techniques for smart temperature sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(6): 1095-1105.
- [9] LANG Qingyang, ZHANG Yuanliang, XIU Wei. Dynamic compensation of Pt100 temperature sensor in petroleum products testing based on a third order model[R]. Wuhan: Intelligent Systems and Applications, 2009.
- [10] MA Guoming, LI Chengrong, QUA Jiangtao, et al. Calibration of VFTO bushing sensor based on convolution model[R]. Singapore: Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009.
- [11] Alempijevic A, Kodagoda S, Underwood J, et al. Mutual information based sensor registration and calibration[R]. Beijing: International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006.
- [12] Feng J, Qu G, Potkonjak M. Actuator-based infield sensor calibration[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(6): 1571-1579.