

文章编号:1671-6833(2012)03-0065-03

## 温度传感器动态特性完全补偿方法研究与补偿电路设计

鹿晓力<sup>1</sup>, 路立平<sup>1</sup>, 李奎<sup>2</sup>, 鹿晓阳<sup>3</sup>

(1. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 中油吉林化建工程股份有限公司, 吉林 吉林 132021; 3. 山东建筑大学 工程力学研究所, 山东 济南 250101)

**摘要:** 分析了温度传感器动态特性的一阶系统模型和二阶系统模型, 指出了其中的二阶系统是非欠阻尼系统、两个系统的阶跃响应有相似性和共同点, 进而提出可以将温度传感器动态模型统一简化为一阶系统模型。推导了能够将该一阶系统补偿成理想全通系统的补偿电路传递函数, 设计了能实现该传递函数的有源滤波电路, 给出了依温度传感器热时间常数设计电路元件参数的公式。指出信号转换电路输出电压与传感器体温度成线性比例关系, 补偿电路和信号转换电路有足够宽的通频带, 是用硬件实现温度传感器动态特性完全补偿的两个必要条件。

**关键词:** 温度传感器; 动态测量; 动态误差补偿; 电路设计

中图分类号: TH701

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.03.016

### 0 引言

接触式温度传感器(以下简称温度传感器)通过与被测环境介质交换热能来感知其温度, 并用电参数表示。由于能量交换无法在瞬间完成, 温度传感器的电参数变化总是滞后于被测温度的变化。在工程实践和科学研究中, 需要对温度传感器的这种热惰性进行某种方式的补偿, 以期实现温度实时或准实时测量。目前所采用的补偿方法有三类。

第一类方法是通过完善温度传感器工艺结构, 使温度传感器的热时间常数尽可能小, 从而改善温度传感器动态响应特性<sup>[1]</sup>, 但受温度传感器物理结构和使用条件的限制, 该方法作用效果有限。

第二类方法是用无源 RC 电路的微分作用对温度传感器的惯性滞后特性进行硬件补偿, 以期使测试系统总的动态特性接近理想全通<sup>[2]</sup>, 该方法从系统传递函数表达式出发设计频率特性补偿电路, 这实际上是将温度传感器和信号转换电路在整体上看成了线性比例系统。图 1 是运用硬件实现温度传感器动态特性补偿的系统框图。事实上, 虽然温度变量是系统的输入, 但这种输入变量

不存在数学意义上的零, 以摄氏温度来说, 零度只是一个特定的温度点, 并不具有“零输入”的含义, 所以说温度传感器信号转换电路的输出电压(或电流, 以下假设是电压)与温度变量的关系可以是线性的, 但不一定成比例, 文献[2]没有注意到这个特殊问题。另外, 用无源元件实现的硬件补偿也只是试图减小整个系统对温度变化的响应滞后量, 没有从根本上解决温度测量中的电信号滞后于实际温度变化这个问题。

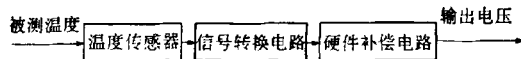


图1 硬件补偿法系统框图

Fig.1 The system chart of hardware compensation

第三类方法是利用遗传神经网络的快速逼近能力, 建立温度传感器的动态逆模型, 实现对温度传感器检测信号的补偿计算<sup>[3]</sup>, 经补偿计算后的输出能够较好反映实际的温度变化过程。但这种方法基于计算机运算, 温度测量输出是非实时的。

综上所述, 从理论到实践, 温度传感器动态特性补偿方法尚待进一步研究与完善。显然, 严格意义上的温度传感器动态特性完全、实时补偿只能

收稿日期:2011-11-08;修订日期:2012-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60873080)

作者简介:鹿晓力(1960-),女,吉林人,郑州轻工业学院副教授,主要从事电工理论与测试技术研究, E-mail:lxli@zzuli.edu.cn.

由硬件实现.要做到这一点,在理论上,需研究确定传感器及信号转换系统的动态模型函数,并约定好传感器的输入温度与信号转换电路输出电压间的线性比例关系;在硬件上,需针对待补偿的传感器及信号转换电路的动态模型函数,研究设计带有微分环节的完全补偿电路.笔者就有关问题进行研究.

## 1 温度传感器的动态模型

温度传感器的最简动态模型是一节惯性系统模型,即有

$$\tau \frac{d\theta_s(t)}{dt} + \theta_s(t) = \theta(t). \quad (1)$$

式中: $\theta(t)$ 是被测介质温度时间函数,相当于系统输入; $\theta_s(t)$ 是传感器体温度时间函数,相当于系统响应; $\tau$ 是传感器的热时间常数<sup>[4]</sup>.

如果考虑到温度传感器敏感体常常有保护套,则温度传感器的动态模型实际是二阶惯性系统模型,即有

$$\tau_1 \tau_2 \frac{d^2 \theta_s(t)}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{d\theta_s(t)}{dt} + \theta_s(t) = \theta(t). \quad (2)$$

式中: $\tau_1$ 和 $\tau_2$ 分别是温度传感器敏感体的热时间常数和敏感体保护套的热时间常数<sup>[5]</sup>.若令

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}}; \xi = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2\sqrt{\tau_1 \tau_2}},$$

则式(2)又可写为

$$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 \theta_s(t)}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_0} \frac{d\theta_s(t)}{dt} + \theta_s(t) = \theta(t). \quad (3)$$

由于 $\tau_1$ 和 $\tau_2$ 均为非零正实数,故 $\xi \geq 1$ ,进而可以断定温度传感器的二阶惯性系统是非欠阻尼系统.如果将一阶惯性系统和二阶非欠阻尼惯性系统的阶跃响应曲线以及两条曲线的数学解析式<sup>[5]</sup>放在一起进行分析对比的话,会发现两条曲线在几何上有相似的特征,进一步分析就可以得出这样的结论:无论把温度传感器的动态模型看成是一阶系统还是二阶系统,它的阶跃响应曲线都是单调上升并趋于相同的稳定值.这个结论对于从工程角度简化温度传感器的动态系统模型是非常有意义的.这里认为:无论温度传感器敏感体是否有保护套,都可以把温度传感器的动态模型简化为一阶惯性系统模型,这个一阶惯性系统的时间常数就是式(1)中的热时间常数.这个热时间常数可以依照式(1)用实验方法测量出来<sup>[6]</sup>.由式(1)两端取拉氏变换便得到传感器动态模型

的系统函数 $H_s(s)$ 为

$$H_s(s) = \frac{\Theta_s(s)}{\Theta(s)} = \frac{1}{1 + \tau s}. \quad (4)$$

式中: $\Theta_s(s)$ 和 $\Theta(s)$ 分别是 $\theta_s(t)$ 和 $\theta(t)$ 的拉氏变换像函数.

## 2 温度传感器与信号转换电路一体化的动态模型系统函数

事实上,传感器的温度/电压转换常常是非线性的,即使是线性的,也不一定是成比例的,这是温度变量的特殊性所决定的,而基于硬件电路的温度传感器动态特性补偿思想当然是建立在线性系统理论基础上的.这要求温度传感器自身的体温度 $\theta_s(t)$ 和信号转换电路的输出电压 $u_s(t)$ 间的关系,不仅是线性的,而且是成比例的,即

$$u_s(t) = k\theta_s(t), \quad (5)$$

式中: $k$ 是温度传感器温度/电压转换的静态灵敏度系数.如果温度以摄氏度为单位,则要求信号转换电路输出电压的零点要校准在温度的零摄氏度.至此,得到温度传感器与信号转换电路一体化的动态模型系统函数 $H_1(s)$ 为

$$H_1(s) = \frac{U_s(s)}{\Theta(s)} = H_s(s)k = \frac{k}{1 + \tau s}, \quad (6)$$

式中: $U_s(s)$ 是 $u_s(t)$ 的拉氏变换像函数.

## 3 温度传感器动态特性理想补偿系统传递函数

设:温度传感器动态特性补偿电路的输出电压及其拉氏变换像函数分别为 $u(t)$ 和 $U(s)$ ;补偿电路的传递函数为 $H_\Delta(s)$ ;补偿后的总的系统传递函数为 $H(s)$ ,则

$$H_\Delta(s) = \frac{U(s)}{U_s(s)}; \quad (7)$$

$$H(s) = \frac{U(s)}{\Theta(s)} = H_1(s)H_\Delta(s). \quad (8)$$

显然,温度传感器动态特性补偿的理想目标应当是使补偿后的总的系统传递函数为一个全通系统传递函数,即令 $H(s) = k$ ,则有

$$H_\Delta(s) = 1 + \tau s. \quad (9)$$

## 4 温度传感器动态特性完全补偿电路设计

硬件补偿电路设计应以实现式(9)为目标,由于无源电路无法实现加法模拟运算和微分模拟

运算,仅用无源电路元件组成的电路无法实现式(9)所示系统传递函数,进而无法对温度传感器动态特性进行完全补偿,以往动态特性硬件补偿方法研究的局限性就在于此。这里用模拟集成运算放大器来实现所需模拟运算,在理论上设计出具有完全补偿效果的硬件电路,如图2所示,其中的电容元件起着微分运算的作用。

按照设计目标,图2所示电路的传递函数就是  $H_A(s)$ ,即有

$$H_A(s) = \frac{U(s)}{U_s(s)} = \frac{R_3 R_6}{R_2 R_5} + \frac{R_1 R_6 C}{R_4} s. \quad (10)$$

联立(9)式和(10)式,得到电路参数设计公式:

$$R_3 R_6 = R_2 R_5; \quad (11)$$

$$\frac{R_1 R_6}{R_4} C = \tau. \quad (12)$$

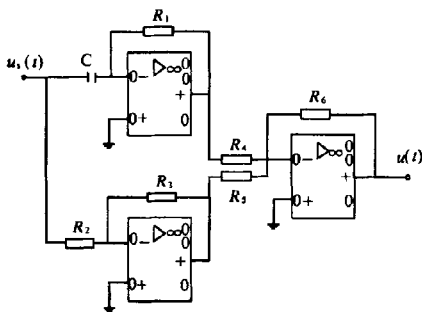


图2 温度传感器动态特性完全补偿电路

Fig. 2 The circuit for complete compensation to dynamic characteristic of temperature sensor

在理论上,  $H(s) = k$  就意味着补偿电路的输出电压  $u(t)$  与被测温度  $\theta(t)$  成线性比例关系,亦即图2所示电路实现了温度传感器动态特性的完全补偿。

## 5 动态特性完全补偿的可实现性

上述理论研究与电路设计是以两点假设为支撑:一是温度传感器的温度/电压转换关系是线性比例关系;二是所用的运算放大器是频带无限宽的理想运算放大器。通过正确设计温度/电压转换电路,第一点假设可以实现。实际的运算放大器的上限工作频率是有限值,温度/电压转换电路的上限工作频率也是有限值,所以严格地说,第二点假设无法实现。但在工程实际中,即使被测温度发生了真正的阶跃,被温度传感器惯性滞后以后,输入到补偿系统中微分电路输入端的温度/电压转换输出电压也不是阶跃的,而是连续的,而且对于电处理手段来说,实际的温度快速变化其实很慢,远

不是阶跃变化,转换成电信号后,变化更显缓慢,现有的集成运算放大器等模拟电子器件的频率带宽是完全可以适应的,因此从工程实际出发,第二点假设也是能做到的。

另外,所设计的补偿电路,结构简单,元件参数选择容易实现。(12)式表明,通过电阻元件的阻值配比,使得在  $\tau$  的较大取值范围(几十秒)内,都可以选无极性、高性能、小量值的电容器作为微分电容元件。当然,完善的电路设计还应考虑得更多,温度/电压转换电路的设计也有许多值得注意的地方,实际运用时需参考有关的电子设计手册和资料,加以具体研究,这里不再赘述。

## 6 结论

通过以上研究,得到了温度传感器在工程上的简化动态模型,即一阶惯性系统模型。针对这一模型,设计出了在理论上能够完全补偿温度传感器动态特性的硬件原理电路,电路元件和参数的选择现实可行。结合具体的温度传感器类型,正确完善地设计出信号转换电路和补偿电路,就可以实现传感器动态特性的完全补偿。

对温度传感器的动态模型进行合理简化,并运用运算放大器等有源器件构成完全意义上的补偿电路的研究思想,可以应用到其它类型传感器的同类问题研究中。这是因为非电量电测技术中,绝大多数的非电信号的变化速率,从电子测试的角度看都是缓慢的,只要能合理建立传感器的动态模型,正确设计线性比例模型的信号转换电路,那么在理论上设计出完全意义上的动态特性补偿电路是可行的。

## 参考文献:

- [1] 赵勇,伍先达.高精度温度快速测量系统设计[J].自动化与仪器仪表,2008(6):21-23.
- [2] 王跃科,叶湘滨,黄芝平,等.现代动态测试技术[M].北京:国防工业出版社,2003:254-257.
- [3] 刘清.克服温度传感器测量滞后误差的动态补偿算法[J].电气自动化,2004,26(6):159-161.
- [4] 路立平,冯建勤,鹿晓力.温度传感器的热时间常数及其测试方法[J].仪表技术与传感器,2005(7):17-18.
- [5] 王化祥.现代传感技术及应用[M].北京:化学工业出版社,2008:13-19.
- [6] 熊剑,于惠忠.温度传感器的响应延时[J].电子测量与仪器学报,2004,17(4):1-3.

(下转第71页)

- Rational Approximations[C]//American Control Conference, Bureall, st, Lonis, 2009.
- [6] TRICAUD C, YANG Quan-chen. Time Optimal Control of Fractional Dynamic Systems[C]//IEEE Conference on Decision and Control and Chinese Control Conference, Shanghai, 2009.

## Optimal Control of Fractional-Order System with Freedom End-Point or Function Constrained End-Point

ZENG Qing-shan, YANG Zeng-fang

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The method of solving the optimal control problem for integer-order systems is extended into fractional-order in this paper. The optimal control of the systems described by Caputo's fractional-order differential equation is investigated. The state equation, concomitant equation, control equation, transversality conditions and terminal constraint equations of optimal control for fractional-order system with fixed terminal time, free terminal state and fixed terminal time function constrained end-point is proposed and proved exactly in the paper.

**Key words:** fractional-order system; optimal control; performance index function

(上接第67页)

## Research on Complete Compensation to Dynamic Characteristic of Temperature Sensor and Design of Compensating Circuit

LU Xiao-li<sup>1</sup>, LU Li-ping<sup>1</sup>, LI Kui<sup>2</sup>, LU Xiao-yang<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 2. China Petroleum Jilin Chemical Engineering & Construction CO. Ltd., Jilin 132021, China; 3. Institute of Engineering Mechanics, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

**Abstract:** The first-order system model and second-order system model for dynamic characteristic of temperature sensor are analysed. The second-order system is not a underdamping system and that there are similarity and intercommunity between the step responses of the two systems are pointed out, and then that the dynamic models of temperature sensor can be unified simplified as the first-order system model is put forward. The transfer function of compensating circuit which can make a first-order system to be compensated as a perfect all-pass system is derived. The active filter circuit which can realize the transfer function is designed, and the design formulas for calculating the circuit element parameters by thermal time constant of temperature sensor are given out. That the output voltage of signal conversion circuit are linear and proportionate to the sensor's temperature, and that compensating circuit and signal conversion circuit have sufficiently wide pass band, are pointed out as the two necessary conditions realizing complete compensation to dynamic characteristic of temperature sensor using hardware.

**Key words:** temperature sensor; dynamic measurement; dynamic error compensation; circuit design