

文章编号:1000-6893(2009)06-1103-06

加速度计组合件高精度两级鲁棒温度控制

余瑶, 钟宜生

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

High Precision Two-stage Robust Temperature Control for Accelerometer Unit

Yu Yao, Zhong Yisheng

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要: 将存在多个工作环境的加速度计组合件两级温度控制系统的受控对象描述为存在有界干扰和非线性不确定性(包括系统的建模误差和两个控制通道间的相互耦合)的两输入两输出非线性时变不确定系统,提出了一种基于信号补偿的鲁棒温度控制方法。该方法设计的控制器由标称控制器和鲁棒补偿器组成。此控制器为线性定常的,易于物理实现。证明了闭环系统的鲁棒控制特性,实验结果显示所设计的控制系统能够在多个工作环境下实现加速度计组合件内部和外部的精确鲁棒温度控制。

关键词: 控制理论与控制工程; 温度控制; 鲁棒控制; 加速度计; 多工作点

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Abstract: An accelerometer unit two-stage temperature control system with multi-operating conditions is described as a two-input two-output nonlinear time-varying uncertain system with bounded disturbance and nonlinear uncertainty. The nonlinear uncertainty comprises system modeling error and the coupling of two interacting control channels. A robust temperature control method based on signal compensation is proposed. A controller designed by this method consists of a nominal controller and a robust compensator. The controller is linear time-invariant and can be realized easily. Robust control property of the closed-loop system is proven and experimental results show that the designed control system can guarantee high precision robust control of both the interior and exterior temperature of the accelerometer unit under multi-operating conditions.

Key words: control theory and control engineering; temperature control; robust control; accelerometer; multi-operating points

加速度计组合件主要由加速度计表头和相应的信号变换电路等部件组成,是惯性导航系统中的关键部件之一,其精度和稳定性对保证惯性导航系统的性能是至关重要的。在影响加速度计组合件的精度和稳定性的诸多环境因素中,温度的影响是不容忽略的^[1-2]。加速度计表头内部工作温度的波动以及壳体周围的热梯度都会引起误差。材料的热胀冷缩会使仪表的结构零件变形,从而对加速度计表头造成干扰^[3]。加速度计表头的输出信号(如电流信号)转换为数字信号的电路的特性也随着环境温度的波动而变化。为了提高惯性导航系统的精度,减少温度对于加速度计组合件精度和稳定性的影响,必须对加速度计组合件中的核心部件进行高精度的温度控制^[4]。

随着惯性导航系统性能的不断提高,对加速

度计组合件的温度控制精度的要求也随着提高。由于惯导平台的温度波动较大,温度场不均,可对加速度计组合件进行两级温度控制,使加速度计组合件处于稳定的温度场中^[5]。为了在多种运行环境下实现期望的温度控制精度,温度控制系统必须具有足够的鲁棒性。

本文提出一种基于信号补偿两输入两输出的鲁棒温度控制方法,对所设计系统的闭环控制性能进行理论证明,并给出实际物理实验的结果。

1 温度控制系统构成与数学模型

在加速度计组合件中,3个加速度计表头分别安装在一个六面体的3个互相垂直的面上,三路电流-频率变换电路放置在3个表头周边,六面体周围加金属外罩。内外两级温度控制的加热器分别置于六面体内部和金属外罩外层,温度测量元件分别置于六面体中心和贴于金属外罩外层^[6]。六面体的材质是锰铬钢,金属外罩分为多

层,各层采用导电性和导磁性相异的金属材料。这些金属材料的导热性和热容量各有所异^[7]。

假设加速度计组合件有 N 种相异的运行条件。由于上述结构特点,受控对象的特性不能用一个线性定常的模型描述。因为金属导热性好且热容量大,受控对象的延迟相对于时间常数要小得多。测试结果表明,受控对象的两个控制通道可分别用一个一阶模型近似描述。因此,在第 k ($k=1,2,\dots,N$) 种运行条件下,考虑如下含非线性不确定性和有界干扰的两输入两输出模型所描述的受控对象^[8]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_1(t) &= -a_{1,k}y_1(t) + b_{1,k}u_1(t) + \\ &\quad \varphi_{1,k}(\mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t), d_{1,k}(t), t) \\ \dot{y}_2(t) &= -a_{2,k}y_2(t) + b_{2,k}u_2(t) + \\ &\quad \varphi_{2,k}(\mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t), d_{2,k}(t), t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{y}(t) = [y_1(t) \quad y_2(t)]^T$, $y_1(t)$ 为六面体中心温度测量值, $y_2(t)$ 为金属外罩外层表面温度测量值; $\mathbf{u}(t) = [u_1(t) \quad u_2(t)]^T$, $u_1(t)$ 为施加在六面体内部加热器件上的电压值, $u_2(t)$ 为施加在金属外罩外层加热器件上的电压值; $d_{1,k}(t)$, $d_{2,k}(t)$ 为有界干扰,表示运行条件和环境温度等影响; $a_{i,k}$ 和 $b_{i,k}$ ($i=1,2$) 为与工作点相关的常数和正常数,其值由运行条件给定; $\varphi_{i,k}(\mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t), d_{i,k}(t), t)$ ($i=1,2$) 为非线性不确定性,描述系统的建模误差和两输入两输出系统的两个控制通道间的相互耦合。由于温度控制系统两通道间是强耦合的,因此 $\varphi_{i,k}(\mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t), d_{i,k}(t), t)$ 对系统性能的影响不可忽略。

假设 1 受控对象式(1)具有如下特性:

(1) 在每个工作点, $a_{i,k}$ 和 $b_{i,k}$ ($i=1,2$) 分别为给定的常数和正常数。

(2) 非线性不确定性 $\varphi_{i,k}(\mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t), d_{i,k}(t), t)$ 满足如下的范数界:

$$\begin{aligned} |\varphi_{i,k}(\mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t), d_{i,k}(t), t)| &\leq \zeta_{xi,k} \|\mathbf{y}(t)\| + \\ &\zeta_{ui1,k} |u_1(t)| + \zeta_{ui2,k} |u_2(t)| + \zeta_{di,k} (\|d_{i,k}(t)\|_\infty) \\ &(i=1,2; k=1,2,\dots,N) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\zeta_{xi,k}$, $\zeta_{ui1,k}$ 和 $\zeta_{ui2,k}$ 为已知正常数; $\zeta_{di,k}(\cdot)$ 为已知正值函数且 $\zeta_{di,k}(0) = 0$; 范数 $\|\cdot\|$ 定义为 $\|\mathbf{j}(t)\| = \sqrt{\mathbf{j}^T(t)\mathbf{j}(t)}$; 范数 $\|\cdot\|_\infty$ 定义为 $\|\mathbf{j}(t)\|_\infty = \sup_{t_0 \leq \tau \leq t} \sqrt{\mathbf{j}^T(\tau)\mathbf{j}(\tau)}$ 。

(3) 存在向量 $\mathbf{b} = [b_1 \quad b_2]^T$, 其满足

$$\left[\begin{array}{cc} b_1 - (|b_{1,k} - b_1| + \zeta_{u11,k}) & \zeta_{u12,k} \\ \zeta_{u21,k} & b_2 - (|b_{2,k} - b_2| + \zeta_{u22,k}) \end{array} \right] >$$

$$\mathbf{0} \quad (k=1,2,\dots,N) \quad (3)$$

当两级温度控制不存在控制耦合时,即当 $\zeta_{u12,k} = 0, \zeta_{u21,k} = 0$ ($k=1,2,\dots,N$) 时,正定条件式(3)意味着 $b_i > 0$ ($i=1,2$), 且

$$\frac{|b_{i,k} - b_i| + \zeta_{uii,k}}{b_i} < 1$$

$$(i=1,2; k=1,2,\dots,N) \quad (4)$$

若将 b_i ($i=1,2$) 分别视为内外温度控制的标称控制增益,则式(4)意味着控制增益的相对摄动小于 1,其保证当存在不确定性时,控制增益不改变符号。显然这个假设是合理的、必要的。

2 鲁棒温度控制器的设计

为设计两级温度控制器,考虑如下受控对象(称之为标称受控对象)

$$\dot{y}_i(t) = -a_i y_i(t) + b_i u_i(t) \quad (i=1,2) \quad (5)$$

式中: a_i 为常数,其满足

$$a_i = \arg \min_{\sigma \in \mathbf{R}} \left\{ \max_{k=1,2,\dots,N} \{|\sigma - a_{i,k}|\} \right\} \quad (i=1,2)$$

为了进行控制器设计,可将受控对象描述式(1)改写为

$$\begin{aligned} \dot{y}_i(t) &= -a_i y_i(t) + b_i u_i(t) + q_{i,k}(t) \\ &(i=1,2; k=1,2,\dots,N) \end{aligned} \quad (6)$$

式中:

$$q_{i,k}(t) = -(a_{i,k} - a_i) y_i(t) + (b_{i,k} - b_i) u_i(t) + \varphi_{i,k}(\mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t), d_{i,k}(t), t) \quad (7)$$

为等价干扰,其包含不确定非线性特性和外加干扰等不确定性。

假设两级温度控制所期望的闭环特性分别由如下参考模型给定

$$\begin{aligned} \dot{y}_{mi}(t) &= -\alpha_{mi} y_{mi}(t) + \alpha_{mi} r_{i,k}(t) \\ &(i=1,2; k=1,2,\dots,N) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: α_{mi} 为正常数; $r_{i,k}(t)$ 为参考指令信号,指定在第 k 种运行条件下两级温度控制的稳态值。如果温度控制器仅能加温,降温是靠向环境散热,则环境温度要低于外温度控制的稳态值,外温度控制的稳态值要低于内温度控制的稳态值。在不同的工作点,可以设置不同的稳态值。

在基于信号补偿的鲁棒温度控制器设计过程中,首先忽略等价干扰的影响,针对标称受控对象设计标称控制器,使其与标称受控对象组成的标称闭环系统具有由参考模型所描述的输入输出特

性;然后设计鲁棒补偿器,使其产生的鲁棒补偿信号抑制等价干扰对闭环系统的影响,从而实现期望的鲁棒控制性能^[9-11]。

两级鲁棒温度控制器均分别由标称控制器 $u_{0i}(t)$ ($i=1,2$) 和鲁棒补偿器 $v_i(t)$ ($i=1,2$) 构成,即

$$u_i(t) = u_{0i}(t) + v_i(t) \quad (i = 1, 2) \quad (9)$$

标称控制器构成为

$$u_{0i}(t) = -b_i^{-1}[(\alpha_{mi} - a_i)y_i(t) - \alpha_{mi}r_{i,k}(t)] \quad (10)$$

由式(6)、式(9)和式(10),得

$$\dot{y}_i(t) = -\alpha_{mi}y_i(t) + \alpha_{mi}r_{i,k}(t) + b_iv_i(t) + q_{i,k}(t) \quad (i = 1, 2) \quad (11)$$

现设计鲁棒补偿器,抑制等价干扰 $q_{i,k}(t)$ 对闭环特性的影响。鲁棒补偿器的形式为

$$v_i = -b_i^{-1}F_i(s)q_{i,k} = -b_i^{-1}F_i(s)[(s+a_i)y_i - b_iu_i] \quad (12)$$

式中: $F_i(s)$ 为鲁棒滤波器,其形式为

$$F_i(s) = \frac{f_i}{s + f_i} \quad (13)$$

式中: f_i ($i=1,2$) 为待定正数。

由式(9)、式(10)和式(13),式(12)可变换为

$$v_i = -\frac{1}{b_i} \cdot \frac{f_i}{s + f_i} [(s + a_i)y_i - b_iu_i] = -\frac{f_i}{b_i}y_i - \frac{f_i\alpha_{mi}}{b_i} \cdot \frac{(y_i - r_{i,k})}{s} \quad (14)$$

由式(9)、式(10)和式(14)知,鲁棒温度控制器是线性定常的、物理可实现的。

依据上述鲁棒温度控制器的设计,基于信号补偿的鲁棒温度控制系统框图如图 1 所示。

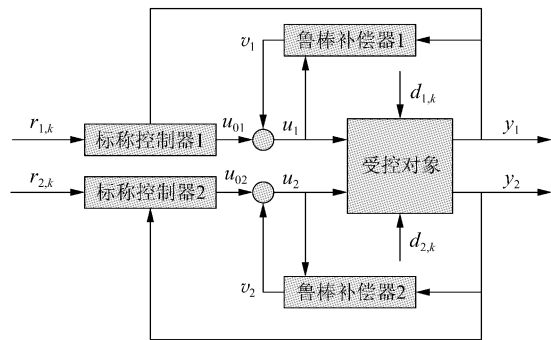


图 1 鲁棒温度控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of robust temperature control system

3 闭环系统鲁棒性及其证明

本节将给出并证明 2 节所设计闭环温度控制系统的鲁棒特性。

定理 1 对于满足假设 1 的受控对象式(1),由控制器式(9)、式(10)和式(14)构成的闭环控制系统具有鲁棒控制特性,即对于任意给定有界初始条件和任意给定正常数 ϵ_i ($i=1,2$),存在正常数 f_i^* ($i=1,2$) 和 T^* ,当 $f_i > f_i^*$ ($i=1,2$) 时,对于所有的工作点,闭环系统状态有界,且成立

$$|y_i(t) - y_{mi}(t)| \leq \epsilon_i \quad (t \geq T^*; i = 1, 2)$$

如果 $y(t)$ 和 $y_m(t)$ 的初始条件相同且鲁棒补偿器的初始条件为零,则成立

$$|y_i(t) - y_{mi}(t)| \leq \epsilon_i \quad (t \geq t_0; i = 1, 2)$$

其中: t_0 为开机时间。

证明 令 $e_i(t) = y_i(t) - y_{mi}(t)$ 。则由式(8)和式(11),有

$$\dot{e}_i(t) = \dot{y}_i(t) - \dot{y}_{mi}(t) = -\alpha_{mi}e_i(t) + b_iv_i(t) + q_{i,k}(t) \quad (15)$$

定义 $\mathbf{X}_i(t) = [e_i(t) \quad v_i(t)]^T$ 。由式(12)、式(13)和式(15),有

$$\dot{\mathbf{X}}_i(t) = \mathbf{A}_i\mathbf{X}_i(t) + \mathbf{B}_iq_{i,k}(t)$$

其中:

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} -\alpha_{mi} & b_i \\ 0 & -f_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 1 \\ -b_i^{-1}f_i \end{bmatrix}$$

可解得

$$e_i(t) = [1 \quad 0]e^{\mathbf{A}_i(t-t_0)}\mathbf{X}_i(t_0) + \int_{t_0}^t \left[\frac{\alpha_{mi}}{\alpha_{mi} - f_i} e^{-\alpha_{mi}(t-\tau)} + \frac{f_i}{f_i - \alpha_{mi}} e^{-f_i(t-\tau)} \right] q_{i,k}(\tau) d\tau$$

$$v_i(t) = e^{-f_i(t-t_0)}v_i(t_0) - \int_{t_0}^t b_i^{-1}f_i e^{-f_i(t-\tau)} q_{i,k}(\tau) d\tau$$

注意到,如果 $f_i \gg \alpha_{mi}$,则

$$\int_{t_0}^t \left| \frac{\alpha_{mi}}{\alpha_{mi} - f_i} e^{-\alpha_{mi}(t-\tau)} + \frac{f_i}{f_i - \alpha_{mi}} e^{-f_i(t-\tau)} \right| d\tau \leq \frac{\alpha_{mi}}{f_i - \alpha_{mi}} \int_{t_0}^t e^{-\alpha_{mi}(t-\tau)} d\tau + \frac{f_i}{f_i - \alpha_{mi}} \int_{t_0}^t e^{-f_i(t-\tau)} d\tau \leq \frac{\lambda_{Eqi}}{f_i}$$

其中: λ_{Eqi} 为与 f_i 无关的正常数。因此

$$|e_i(t)| \leq \|[1 \quad 0]e^{\mathbf{A}_i(t-t_0)}\mathbf{X}_i(t_0)\| + f_i^{-1}\lambda_{Eqi} \|q_{i,k}(t)\|_\infty \quad (16)$$

$$|v_i(t)| \leq e^{-f_i(t-t_0)} |v_i(t_0)| + b_i^{-1} \|q_{i,k}(t)\|_\infty \quad (17)$$

由式(16)知,存在与 f_i 无关的正常数 λ_A 和 λ_{Eq} ,使得

$$\|e(t)\|_\infty \leq \lambda_A \|X(t_0)\| + f_{11}^{-1} \lambda_{Eq} \|q_k(t)\|_\infty \leq \lambda_A \|X(t_0)\| + f_{11}^{-1} \lambda_{Eq} \|q_{1,k}(t)\|_\infty + f_{11}^{-1} \lambda_{Eq} \|q_{2,k}(t)\|_\infty \quad (18)$$

式中:

$$e(t) = [e_1(t) \quad e_2(t)]^T, q_k(t) = [q_{1,k}(t) \quad q_{2,k}(t)]^T$$

$$X(t) = [X_1^T(t) \quad X_2^T(t)]^T, f_{11} = \min\{f_i, i = 1, 2\}$$

由式(9)、式(10)和式(17),得

$$|u_i(t)| \leq |u_{oi}(t)| + |v_i(t)| \leq |b_i^{-1}(\alpha_{mi} - a_i)e_i(t)| + |b_i^{-1}(\alpha_{mi} - a_i)y_{mi}(t)| + |b_i^{-1}\alpha_{mi}r_{i,k}(t)| + e^{-f_i(t-t_0)} |v_i(t_0)| + b_i^{-1} \|q_{i,k}(t)\|_\infty \quad (19)$$

而由式(2)和式(7),得

$$|q_{i,k}(t)| \leq (a_{i,k} - a_i)y_i(t) + (b_{i,k} - b_i)u_i(t) + \zeta_{xi,k} \|y(t)\| + \zeta_{ui1,k} |u_1(t)| + \zeta_{ui2,k} |u_2(t)| + \zeta_{di,k} (\|d_{i,k}(t)\|_\infty) \leq (b_{i,k} - b_i)u_i(t) + \zeta_{ui1,k} |u_1(t)| + \zeta_{ui2,k} |u_2(t)| + (|a_{i,k} - a_i| + \zeta_{xi,k}) \|e(t)\| + \zeta_{di,k} (\|d_{i,k}(t)\|_\infty) + (|a_{i,k} - a_i| + \zeta_{xi,k}) \|y_m(t)\| \quad (20)$$

式中: $y_m(t) = [y_{m1}(t) \quad y_{m2}(t)]^T$ 。

进而由式(18)、式(19)和式(20),得

$$|q_{1,k}(t)| \leq (|b_{1,k} - b_1| + \zeta_{u11,k}) |u_1(t)| + \zeta_{u12,k} |u_2(t)| + (|a_{1,k} - a_1| + \zeta_{x1,k}) \|e(t)\| + \zeta_{d1,k} (\|d_{1,k}(t)\|_\infty) + (|a_{1,k} - a_1| + \zeta_{x1,k}) \|y_m(t)\| \leq [(|b_{1,k} - b_1| + \zeta_{u11,k})b_1^{-1} + \zeta_{e1,k} f_{11}^{-1} \lambda_{Eq}] \|q_{1,k}(t)\|_\infty + (\zeta_{u12,k} b_2^{-1} + \zeta_{e1,k} f_{11}^{-1} \lambda_{Eq}) \|q_{2,k}(t)\|_\infty + \|\psi_{1,k}(t)\|_\infty$$

其中:

$$\psi_{1,k}(t) = \zeta_{d1,k} (\|d_{1,k}(t)\|_\infty) + (|a_{1,k} - a_1| + \zeta_{x1,k}) \|y_m(t)\| + \zeta_{e1,k} \lambda_A \|X(t_0)\| + (|b_{1,k} - b_1| + \zeta_{u11,k}) [|b_1^{-1}(\alpha_{m1} - a_1)y_{m1}(t)| + |b_1^{-1}\alpha_{m1}r_{1,k}(t)| + |v_1(t_0)|] + \zeta_{u12,k} [|b_2^{-1}(\alpha_{m2} - a_2)y_{m2}(t)| + |b_2^{-1}\alpha_{m2}r_{2,k}(t)| + |v_2(t_0)|]$$

$$\zeta_{e1,k} = |a_{1,k} - a_1| + \zeta_{x1,k} + \{(|b_{1,k} - b_1| + \zeta_{u11,k})b_1^{-1} | \alpha_{m1} - a_1 | \quad \zeta_{u12,k} b_2^{-1} | \alpha_{m2} - a_2 |\}$$

同理,得

$$|q_{2,k}(t)| \leq [(|b_{2,k} - b_2| + \zeta_{u22,k})b_2^{-1} + \zeta_{e2,k} f_{11}^{-1} \lambda_{Eq}] \|q_{2,k}(t)\|_\infty + (\zeta_{u21,k} b_1^{-1} + \zeta_{e2,k} f_{11}^{-1} \lambda_{Eq}) \|q_{1,k}(t)\|_\infty + \|\psi_{2,k}(t)\|_\infty$$

其中:

$$\psi_{2,k}(t) = \zeta_{d2,k} (\|d_{2,k}(t)\|_\infty) + (|a_{2,k} - a_2| + \zeta_{x2,k}) \|y_m(t)\| + \zeta_{e2,k} \lambda_A \|X(t_0)\| + (|b_{2,k} - b_2| + \zeta_{u22,k}) [|b_2^{-1}(\alpha_{m2} - a_2)y_{m2}(t)| + |b_2^{-1}\alpha_{m2}r_{2,k}(t)| + |v_2(t_0)|] + \zeta_{u21,k} [|b_1^{-1}(\alpha_{m1} - a_1)y_{m1}(t)| + |b_1^{-1}\alpha_{m1}r_{1,k}(t)| + |v_1(t_0)|]$$

$$\zeta_{e2,k} = |a_{2,k} - a_2| + \zeta_{x2,k} + \{(|b_{2,k} - b_2| + \zeta_{u22,k})b_2^{-1} | \alpha_{m2} - a_2 | \quad \zeta_{u21,k} b_1^{-1} | \alpha_{m1} - a_1 |\}$$

注意,对于有界初始条件、有界外加干扰和有界参考指令信号, $\psi_{i,k}(t)$ ($i=1,2$)是有界函数,且存在与 f_i ($i=1,2$)无关的上界。

令

$$\lambda_1 = 1 - (|b_{1,k} - b_1| + \zeta_{u11,k})b_1^{-1} - f_{11}^{-1} \lambda_{Eq} \zeta_{e1,k}$$

$$\lambda_2 = 1 - (|b_{2,k} - b_2| + \zeta_{u22,k})b_2^{-1} - f_{11}^{-1} \lambda_{Eq} \zeta_{e2,k}$$

注意条件式(3)意味着,当 f_i 充分大时,即 f_{11} 充分大时, $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$,并且

$$[\lambda_1^{-1} (\zeta_{u12,k} b_2^{-1} + \zeta_{e1,k} f_{11}^{-1} \lambda_{Eq})] \cdot$$

$$[\lambda_2^{-1} (\zeta_{u21,k} b_1^{-1} + \zeta_{e2,k} f_{11}^{-1} \lambda_{Eq})] < 1 \quad (21)$$

此时,有

$$\|q_{1,k}(t)\|_\infty \leq \lambda_1^{-1} (\zeta_{u12,k} b_2^{-1} + \zeta_{e1,k} f_{11}^{-1} \lambda_{Eq}) \cdot$$

$$\|q_{2,k}(t)\|_\infty + \lambda_1^{-1} \|\psi_{1,k}(t)\|_\infty$$

$$\|q_{2,k}(t)\|_\infty \leq \lambda_2^{-1} (\zeta_{u21,k} b_1^{-1} + \zeta_{e2,k} f_{11}^{-1} \lambda_{Eq}) \cdot$$

$$\|q_{1,k}(t)\|_\infty + \lambda_2^{-1} \|\psi_{2,k}(t)\|_\infty \quad (22)$$

由式(21)和式(22)以及小增益定理知,当 f_i 充分大时, $q_{i,k}(t)$ 有界,且存在与 f_i 无关的正常数上界。由式(16)和式(17)知, $e(t)$ 和 $v(t) = [v_1(t) \quad v_2(t)]^T$ 是有界的,并且对于任意给定的有界初始条件和任意给定的正常数 ϵ_i ($i=1,2$),存在正常数 $f_{i,k}^*$ ($i=1,2; k=1,2,\dots,N$)和正常数 T^* ,使得在第 k 种运行环境下,当 $f_i \geq f_{i,k}^*$ 时,有 $|e_i(t)| \leq \epsilon_i, t \geq T^*$ ($i=1,2$)。如果初始条件为零(即 $e(t_0) = \mathbf{0}$)且设定 $v(t_0) = \mathbf{0}$,则有 $|e_i(t)| \leq \epsilon_i, t \geq t_0$ ($i=1,2$)。

令 $f_i^* = \max\{f_{i,1}^*, f_{i,2}^*, \dots, f_{i,N}^*\}$ ($i=1,2$)。

选取 f_i 为充分大正常数,保证 $f_i \geq f_i^*$,使得对于所有的工作点,上述证明中所有条件均成立,则定理1的结论成立。

注1 上述证明给出的鲁棒控制器参数 f_i ($i=1,2$)的下界值 f_i^* ($i=1,2$)显然是保守的,其给出的是充分条件。在实际应用中,选取 f_i 的值远小于理论的下界值 f_i^* ,也可能获得期望的鲁棒控制特性。

注 2 依据定理 1 的结论,可以容易地实施参数 f_i 的在线调整,即从较小的值开始逐渐增大 f_i 的取值,直到获得期望的控制特性为止。这种每个控制通道单个参数的单调在线调整是非常容易实施的,甚至比比例-积分-微分(PID)控制器的参数在线调整要简单得多。对于实际应用,这是本文方法的一个突出优势。但是应当注意,由于在实际系统中存在量测噪声, f_i 的值过大,可能导致噪声作用的放大,从而导致温度抖动,控制精度下降。

4 实验结果

由实验测试得知,研制的加速度计组合件温度控制系统的开环标称参数约为

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{36 \times 60}, & b_1 = \frac{1.5}{36 \times 60} \\ a_2 = \frac{1}{38 \times 60}, & b_2 = \frac{1.6}{38 \times 60} \end{cases}$$

系统有 3 种运行环境,即恒温标定环境、室温标定环境和平台环境。在不同的运行环境下,系统建模误差和参数的估计如下: $\zeta_{u12,k} < 0.8b_1$, $\zeta_{u21,k} < 0.8b_2$, $|b_{1,k} - b_1| + \zeta_{u11,k} < 0.1b_1$, $|b_{2,k} - b_2| + \zeta_{u22,k} < 0.1b_2$, $\zeta_{d1,k} (\|d_{1,k}(t)\|_\infty) < 0.1a_1$, $\zeta_{d2,k} (\|d_{2,k}(t)\|_\infty) < 6a_2$, $\zeta_{xi,k} < 0.1a_i$, $|a_{i,k} - a_i| < 0.1a_i (i=1,2; k=1,2,3)$ 。从参数 $\zeta_{u12,k}$ 和 $\zeta_{u21,k}$ 知,温度控制系统两个控制通道间是耦合的。由于温度控制系统为内外两级温度控制,因此内部受控对象的外加有界干扰明显小于外部受控对象的外加有界干扰。

选取参考模型的参数为 $\alpha_{m1} = \alpha_{m2} = \frac{1}{20 \times 60}$, 根据式(10)和式(14)设计鲁棒控制器,得

$$\begin{cases} u_{01}(t) = -0.5333y_1(t) + 1.2r_{1,k}(t) \\ u_{02}(t) = -0.5625y_2(t) + 1.1875r_{2,k}(t) \\ v_1(t) = -f_1 \left[1.440y_1(t) + 1.2 \frac{1}{s} (y_1(t) - r_{1,k}(t)) \right] \\ v_2(t) = -f_2 \left[1.425y_2(t) + 1.1875 \frac{1}{s} (y_2(t) - r_{2,k}(t)) \right] \end{cases}$$

实验中,温度控制系统只有加温部件而没有制冷部件,外部环境温度低于 29°C 。设置六面体中心温度的稳态值高于此温度 6°C ,即令 $r_{1,k}(t) \approx 35^\circ\text{C}$,而设置金属外罩外层表面温度的稳态值低于六面体中心温度的稳态值 2.4°C ,即令 $r_{2,k}(t) \approx$

32.6°C (对这些温度值的大小,并无严格要求,只要其构成合理的温度梯度,系统能将六面体中心温度和金属外罩外层表面温度稳定在这些温度附近即可)。

用高精度金属铂热电阻作为温度传感器,利用桥式测量电路将温度信号转化为电压信号,此电压信号经过运算放大器放大后,一方面作为输出反馈信号连接到温度控制器,产生温度控制指令,另一方面连接到 National Instruments 公司的 NI USB-6009 多功能数据采集卡,将电压信号转化为数字信号存储在计算机里。此采集卡在这套温度控制系统中起到监视系统工作状态和评价控制系统性能的作用,并不参与温度控制。温度测量和温度控制器均由模拟电路构成。我们使用的这款多功能数据采集卡的有效位数为 14 位,温度测量的范围大约为 10°C ,这样温度测量的分辨率为 $(10/2^{14})^\circ\text{C} = (6.1035 \times 10^{-4})^\circ\text{C}$ 。

选取 $\epsilon_1 = 0.01, \epsilon_2 = 0.1$ 。实验结果显示,选取 $f_1 = f_2 \approx 1/24$,即可保证在 3 种运行环境下满足期望的温度控制要求。

图 2 和图 3 分别是加速度计组合件的六面体中心温度和金属外罩外层表面温度的变化曲线。开始阶段温度控制系统置于恒温箱内,恒温箱的温度设为 28°C ,温度在 $(28 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 之间快速波动 ($1^\circ\text{C}/\text{min}$),温度控制系统趋于平衡以后,将温箱关掉,打开温箱门(大约在图中第 7 个小时的时候),使温度控制系统置于室温环境下,室温大约 26°C ,并在 $(26 \pm 1)^\circ\text{C}$ 之间波动。等温度控制系统再次趋于平衡以后,将温度控制系统置于平台环境下(大约在图中第 11 个小时的时候),平台环境约为 22°C ,并在 $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ 之间缓慢变化。实

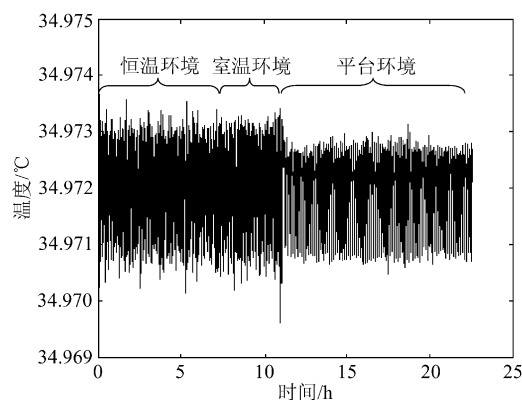


图 2 加速度计组合件六面体中心温度变化曲线
Fig. 2 Interior temperature curve of accelerometer unit hexahedron

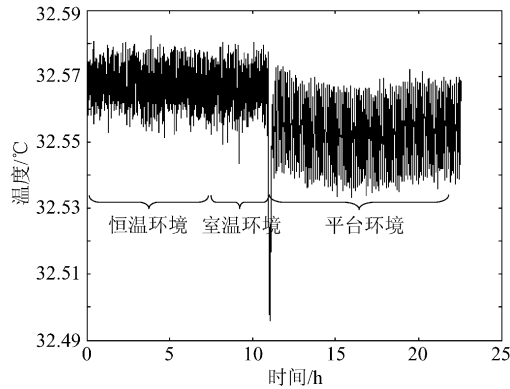


图3 加速度计组合件金属外罩外层表面温度变化曲线
Fig.3 Exterior temperature curve of accelerometer unit outside metal cover

验结果显示,温度控制系统内部的温度始终在平衡点 $\pm 0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间波动。由于运行环境的突然改变,温度控制系统外部的温度也有一个小幅度的突变,但能快速回到温度设定值且温度变化的峰值也能保持在 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内。通过内外两级温度控制,整个加速度计组合件处于稳定的温度场内。

5 结论

对于存在多工作环境的加速度计组合件的两级温度控制问题,提出了一种基于信号补偿的鲁棒温度控制方法。在理论上,证明了当环境干扰有界,非线性不确定性(包括系统的建模误差和两个控制通道间的相互耦合)满足一定的范数界和增益条件时,闭环系统具有鲁棒控制特性。在实际系统的应用中,实现了在多个工作环境下高精度的两级鲁棒温度控制。

参 考 文 献

- [1] 周余永,许江宁,高敬东.舰船导航系统[M].北京:国防工业出版社,2006:24-27.
Zhou Yuyong, Xu Jiangning, Gao Jingdong. Marine navigation system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006: 24-27. (in Chinese)
- [2] Chatfield A B. Fundamentals of high accuracy inertial navigation[M]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1997: 42-89.
- [3] 何铁春,周世勤.惯性导航加速度计[M].北京:国防工业出版社,1983:155-158.
He Tiejun, Zhou Shiqin. Inertial navigation accelerometer[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1983: 155-158. (in Chinese)

- [4] 余瑶,钟宜生.多工作点加速度计组合件高精度鲁棒温度控制[J].系统科学与数学,2007,27(3):378-386.
Yu Yao, Zhong Yisheng. High precision robust temperature control for an accelerometer unit with multi-operating conditions[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2007, 27(3): 378-386. (in Chinese)
- [5] 孙谦,谢玲,陈家斌,等.精密温控对惯性导航平台系统性能的影响[J].北京理工大学学报,2002,22(3):379-382.
Sun Qian, Xie Ling, Chen Jiabin, et al. On the influence of precision temperature control to the performance of an inertial platform system[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(3): 379-382. (in Chinese)
- [6] 姜忠良,陈秀云.温度的测量与控制[M].北京:清华大学出版社,2005:44-173.
Jiang Zhongliang, Chen Xiuyun. Measurement and control of temperature[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 44-173. (in Chinese)
- [7] 杨克俊.电磁兼容原理与设计技术[M].北京:人民邮电出版社,2005:41-70.
Yang Kejun. Theory and design technique of electromagnetic compatibility[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2005: 41-70. (in Chinese)
- [8] 杨世铭.传热学[M].北京:高等教育出版社,1980:1-83.
Yang Shiming. Heat transfer theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 1980: 1-83. (in Chinese)
- [9] Zhong Y S. Robust output tracking control of SISO plants with multiple operating points and with parametric and unstructured uncertainties[J]. Int J Control, 2002, 75(4): 219-241.
- [10] Zhong Y S. Robust stabilization and disturbance attenuation of a class of MIMO nonlinear systems with multi-operation points[C]//Proceeding of the 26th Chinese Control Conference. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2007, 3: 700-704.
- [11] 钟宜生.基于信号补偿的鲁棒控制方法[J].清华大学学报:自然科学版,2003,43(4):536-542.
Zhong Yisheng. Robust control based on signal compensation[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2003, 43(4): 536-542. (in Chinese)

作者简介:

余瑶(1982—)女,博士研究生。主要研究方向:严格反馈型系统的鲁棒反向递推控制。

Tel: 010-62790793

E-mail: yu-y04@mails. tsinghua. edu. cn

钟宜生(1958—)男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:鲁棒控制及复杂性问题研究。

Tel: 010-62790793

E-mail: zys-dau@mails. tsinghua. edu. cn

(责任编辑:张利平,孔琪颖)