

文章编号: 1001-0920(2001)06-0922-04

# 基于两点测温的发汗冷却自校正控制

孙 冀<sup>1</sup>, 罗学波<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学 控制科学与工程系, 江苏 南京 210042; 2. 西北工业大学 应用数学研究所, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 针对一维固定边界发汗冷却系统的自校正控制问题, 给出一种基于实际观测的自校正控制算法, 采用两点测温并根据热平衡关系确定气动加热面边界热流密度, 由热平衡方程和热阻滞函数特性给出了自校正控制律。数据试验表明该方法可以取得良好的控制效果。

**关键词:** 发汗冷却控制系统; 分布参数控制系统; 自校正控制

中图分类号: TP 272

文献标识码: A

## Self-tuning Control of Transpiration Cooling System Based on Two Points Observation

SUN Ji<sup>1</sup>, LUO Xue-bo<sup>2</sup>

(1. Department of Control Science, Nanjin Normal University, Nanjing 210042, China;

2. Institute of Applied Mathematics, Northwest Polytechnical University, Xi an 710072, China)

**Abstract:** A self-tuning control scheme for transpiration cooling system is presented. The boundary heat flux is estimated by two points observation and heat equilibrium. The self-tuning control input is obtained by heat equilibrium equation and the characteristic of heat blockage function. A simulation result shows that the approach is feasible and effective.

**Key words:** transpiration cooling control system; distribution parameter control system; self-tuning control

## 1 引 言

针对高速飞行器表面的热防护, 文献[1]提出了发汗冷却控制模型。在高温环境下, 发汗冷却控制是保护部件正常工作的有效手段, 在航空航天领域有着广阔的应用前景<sup>[2,3]</sup>。

文献[4]讨论了水发汗冷却控制系统解的存在唯一性; 文献[5]讨论了水发汗冷却系统的反馈控制问题, 给出了气化面不随时间变化的级数反馈控制律, 但反馈系数依赖于大量的数据试验, 数值上采

用“假想节点”的方法, 实现了数值求解。

从安全和热效率方面考虑, 一般以氦作为冷却剂, 但氦的成本很高。而液体(如水)具有成本低, 经济效益显著的特点。液体发汗的特点是: 1) 冷却剂在控制过程中发生气化, 吸收大量的热, 可提高冷却效率; 2) 气化面通常随时间变化, 本质上是一个非线性问题。为研究方便, 本文对问题进行了适当简化, 假设气化过程瞬间完成且只发生在气化面上。

本文重点讨论包括液体发汗剂的固定区域冷却系统的控制问题, 建立统一的分布参数模型, 采用两

收稿日期: 2000-06-20; 修回日期: 2000-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(69774013)

作者简介: 孙冀(1963—), 男, 河南宜阳人, 副教授, 博士, 从事分布参数控制系统理论及应用研究; 罗学波(1939—), 男, 湖南湘潭人, 教授, 博士生导师, 从事偏微分方程理论与应用研究。

点测温并根据热平衡关系确定控制输入, 由时变的热流和未知的热阻滞函数得到了自校正控制律。

## 2 模型及热平衡方程

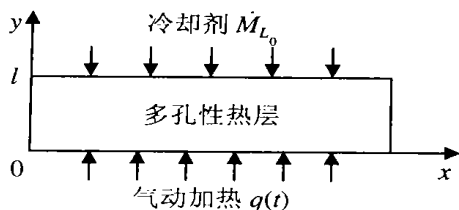


图 1 热层示意图

考虑厚为  $l$  的多孔介质(如图 1 所示)。设  $T(y, t)$  为多孔介质的温度分布;  $T_c$  为初始温度,  $c, \rho$  和  $k$  分别为多孔介质的比热、密度和导热系数,  $\dot{M}_L(t)$  为冷却剂秒流量(在本问题中为控制量),  $T_m$  为液体发汗剂的气化温度,  $L$  为气化热,  $c_{PL}$  为冷却剂比热, 且

$$c_{PL}(T) = \begin{cases} c_{PL1}, & T > T_m \\ c_{PL2}, & T \leq T_m \end{cases}$$

当受控部件受热面不发生烧蚀时, 此问题为一固定区域热传导问题。若以液体作为发汗剂, 液体在气化温度  $T_m$  上发生气化, 忽视 Marshy 区域的存在, 并假设在气化点完全气化, 则在  $[t_1, t_2]$  时段气化点上的吸热总量为

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{M}_L(t) L dt \int_0^l \delta(T(y, t) - T_m) dy$$

参照文献[1]发汗冷却模型的推导, 得到一维发汗冷却控制系统为

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} =$$

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \dot{M}_L(t) c_{PL}(T(y, t)) \frac{\partial T}{\partial y} -$$

$$\delta(T(y, t) - T_m) L \dot{M}_L(t) \quad (1)$$

$$T|_{t=0} = T_c \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=l} = \dot{M}_L(t) c_{PL}(T - T_c) \quad (3)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \Psi(\dot{M}_L(t)) q_0(t) \quad (4)$$

其中,  $\Psi(\dot{M}_L(t))$  为热阻滞函数  $q_0(t)$  为理论热流密度,  $\delta(\cdot)$  为 Dirac-Delta 函数。

注 1 热阻滞函数  $\Psi(\gamma)$  是有界的非线性单调递减函数, 即满足  $0 < \Psi(\gamma) < 1$  且  $\Psi(\gamma) < 0$ 。热阻随着发汗量的增加而增大。不加入发汗剂时不存在热阻,  $\Psi = 1$ ; 当发汗量达到某值形成完全热阻时,  $\Psi = 0$ 。在工程中有时用如下经验公式来表述, 即

$$\Psi(\gamma) = 1 - \alpha \frac{h_e \gamma}{q_0} + \beta \left[ \frac{h_e \gamma}{q_0} \right]^2$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  为热物性参数,  $h_e$  为边界层外边界热焓。

以气体(如氢气)作为发汗冷却剂时,  $L = 0$ 。无论是气体还是液体发汗剂, 系统(1)~(4)都可对固定边界的发汗冷却系统进行统一描述。

工程实际中, 通常只要求加热面上的温度  $T(0, t)$  达到目标温度  $T_T$ , 而对其内部结构温度则没有限制。

热平衡方程 外部热流通常很高, 用于升温的受控介质所耗热量相对很小, 外部热流主要由冷却剂吸收。假设加热面理想控制温度为  $T_T$ , 则有如下热平衡方程

$$\Psi(\dot{M}_L(t)) q_0(t) = \dot{M}_L(t) [ (T_T - T_m) c_{PL1} + (T_m - T_c) c_{PL2} + L ] \quad (5)$$

由此得到临界发汗量

$$\dot{M}_L(t) = \frac{\Psi(\dot{M}_L(t)) q_0(t)}{(T_T - T_m) c_{PL1} + (T_m - T_c) c_{PL2} + L} \quad (6)$$

可以看出, 如果能得到界面实际热流, 便可得到临界发汗量。

## 3 加热面热流密度的确定方法

根据内部观测, 文献[6]讨论了时变边界热流的辨识方法, 但由于液体发汗控制问题的非线性性, 采用辨识的方法存在一定的困难。为此, 本文采用两点测温并根据热平衡关系直接获得边界热流。

由于受技术条件限制, 加热面上的温度不易直接观测获得。为获得加热面边界热流密度, 可采用如下观测方法: 如图 2 所示, 在介质内部靠近加热面的位置放置两个热电偶  $y_1$  和  $y_2$ , 假设这两点的观测温度为  $T_{y_1}$  及  $T_{y_2}$ 。由于外部热流很大, 介质对温度变化所产生的吸放热相对很小, 特别是经过开始阶段, 温度相对稳定。过  $y_1$  点的瞬时热流量近似为

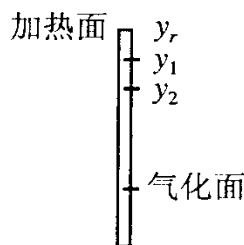


图 2 观测方法示意

$Q_{y_1}$

$$[(T_{y_1} - T_m)_{CPL1} + (T_m - T_c)_{CPL2} + L] \dot{M}_L(t)$$

而界面热流(即过  $y_r$  点的热流量)为  $y_1$  到界面  $y_r$  所耗热量与过  $y_1$  点的热流量之和,即

$$Q_{y_r} = Q_{y_1} + (T_{y_r} - T_{y_1})_{CPL1} \dot{M}_L(t)$$

由于界面  $y_r$  点的温度  $T_{y_r}$  未知,所以可根据  $y_2$  点的温度来近似界面实际热流密度,即

$$Q_{y_r} = Q_{y_1} + (T_{y_1} - T_{y_2})_{CPL1} \dot{M}_L(t) \frac{y_r - y_1}{y_1 - y_2} \quad (7)$$

## 4 控制方法

由热平衡方程和观测得到的边界热流,对离散时间  $\{t_1, t_2, \dots, t_n, \dots\}$  采用如下控制方法:

1) 在离散时间  $t_n$  时刻,根据观测点  $y_1$  和  $y_2$  的测试温度,由式(7)确定  $t_n$  时刻边界实际热流  $\Psi(\dot{M}_L(t_n))q_0(t_n)$ ;

2) 由热平衡关系(即临界发汗量式(6)确定下一个时刻  $t_{n+1}$  的控制输入

$$\dot{M}_L(t_{n+1}) = \frac{\Psi(\dot{M}_L(t_n))q_0(t_n)}{(T_r - T_m)_{CPL1} + (T_m - T_c)_{CPL2} + L} \quad (8)$$

对于慢时变过程,下述定理可保证在该控制过程中,界面温度趋于理想的控制温度  $T_r$ 。

**定理 1** 设  $\Psi(s)$  满足如下条件: 1)  $0 < \Psi(s)$

1; 2)  $\Psi(s)$  在所定义区间上严格单调递减。则对任意常数  $C > 0$ , 有迭代关系  $s_{n+1} = C\Psi(s_n)$  极限存在,且  $\lim_n s_n = p$ ,  $p$  是方程  $s = C\Psi(s)$  的解。

**证明** 记  $\mathcal{Q}(s) = C\Psi(s)$ , 令  $F(s) = \mathcal{Q}(\mathcal{Q}(s)) = C\Psi(C\Psi(s))$ , 则  $F(s)$  严格单调增加。易知  $s_{2k} = F(s_{2(k-1)})$ , 故  $\{s_{2k}\}$  为单调有界序列(当  $s_2 = F(s_0) > s_0$  时单调增加,当  $s_2 = F(s_0) < s_0$  时单调减小),故存在极限  $b$ , 且满足  $b = F(b)$ 。

同理,  $s_{2k+1} = F(s_{2(k-1)+1})$ , 存在极限  $d$ , 满足  $d = F(d)$ 。由  $s_{2k+1} = \mathcal{Q}(s_{2k})$  和  $s_{2k} = \mathcal{Q}(s_{2k-1})$ , 可得  $d = \mathcal{Q}(b)$ ,  $b = \mathcal{Q}(d)$ 。

由于函数  $\mathcal{Q}(s) = C\Psi(s)$  严格单降,且过最大值点  $(0, C)$  及最小值点  $(\xi, 0)$ , 因此方程  $s = \mathcal{Q}(s)$  存在唯一解  $r = \mathcal{Q}(r)$ , 并有  $F(r) = r$ 。若  $r, b$  和  $d$  互不相等,则意味着方程  $s = F(s)$  有 3 个解,这是不可能的,因为一条单增曲线与直线的交点最多只能有两个。若  $r = b$ , 则  $d = \mathcal{Q}(b) = \mathcal{Q}(r) = r$ , 即  $r = b = d$ 。(证毕)

过程(实际过程中影响热流的主要因素——飞行器速度、大气密度、飞行器表面粗糙度变化不是很快),只要采样间隔比较小,就能保证控制输入逼近热平衡点。由于实际过程中可进行连续测温,故该控制过程是完全可行的。

## 5 控制方程的数值解法

做无量纲变换

$$\xi = \frac{l-y}{l}, \quad \tau = \frac{k}{c\rho l^2} t$$

$$u(\xi, \tau) = \frac{T(y, t) - T_c}{T_r - T_c}$$

$$\lambda(\tau) = \frac{\dot{M}_L(\tau)l}{k}$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} - \lambda(\tau)_{CPL}(u) \frac{\partial u}{\partial \xi} -$$

$$\lambda(\tau) L_1 \delta(u - u_m)$$

$$\xi \in (0, 1), \quad \tau \in (0, \infty) \quad (9)$$

$$u(\xi, 0) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} = c_{PL}(u) \lambda(\tau) u, \quad \xi = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} = \Psi(\lambda(\tau)) \frac{lq_0(\tau)}{k(T_r - T_c)} = \Psi(\lambda) Q_0(\tau), \quad \xi = 1 \quad (12)$$

其中

$$u_m = \frac{T_m - T_c}{T_r - T_c}, \quad L_1 = \frac{lL}{T_r - T_c}$$

$$c_{PL}(u) = \begin{cases} c_{PL1}, & u \geq u_m \\ c_{PL2}, & u < u_m \end{cases}$$

$$Q_0(\tau) = \frac{lq_0(\tau)}{k(T_r - T_c)}$$

此时的临界发汗量为

$$\lambda(\tau) = \frac{\Psi(\lambda(\tau)) Q_0(\tau)}{(u_r - u_m)_{CPL1} + u_m c_{PL2} + L_1} \quad (13)$$

采用隐式差分计算格式可保证差分方程的稳定性。设无量纲时间步长为  $\Delta\tau$ , 空间步长为  $\Delta\xi$ , 节点坐标为  $(n\Delta\xi, j\Delta\tau)$ , 则差分方程为

$$u_n^j - u_n^{j-1} =$$

$$\alpha(u_{n+1}^j - 2u_n^j + u_{n-1}^j) +$$

$$c_{PL}(u_n^{j-1}) \beta(u_n^j - u_{n-1}^j) -$$

$$\gamma \lambda(j\Delta\tau) \delta_1(u_n^{j-1} - u_m)$$

$$n = 1, 2, \dots, N-1$$

其中,  $\alpha = \Delta\tau/\Delta\xi^2$ ,  $\beta = \Delta\tau/\Delta\xi$ ,  $\gamma = L_1\Delta\tau$ 。可采用追赶法求解离散解。

为  $\delta_i(\bullet)$ , 其取值方法如下:

1) 若  $u_n^{j-1} < u_m$ , 对任意的  $n = 1, 2, \dots, N - 1$ , 则取  $\delta_i(u_n^{j-1} - u_m) = 0$ ;

2) 当  $n = 1, 2, \dots, K$  时  $u_n^{j-1} < u_m$ , 而当  $n = K + 1, K + 2, \dots, N - 1$  时  $u_n^{j-1} > u_m$ , 则取

$$\begin{aligned} \delta_i(u_{K+1}^{j-1} - u_m) &= 1/\Delta\xi \\ \delta_i(u_n^{j-1} - u_m) &= 0, \quad n = K + 1 \end{aligned}$$

## 6 仿真试验

对无量纲发汗冷却系统(9) ~ (12) 进行数据试验。取无量纲气化温度  $u_m = 0.4$ , 界面控制温度  $T_T = 1, L_1 = 0.4, c_{PL1} = 0.5, c_{PL2} = 1; Q_0(\tau) = 2 + 0.3\sin\tau, \psi(\lambda(\tau)) = 1 - 0.3\lambda(\tau) + 0.05(\lambda(\tau))^2$ , 观测点  $\xi_1 = 0.95, \xi_2 = 0.90$ 。

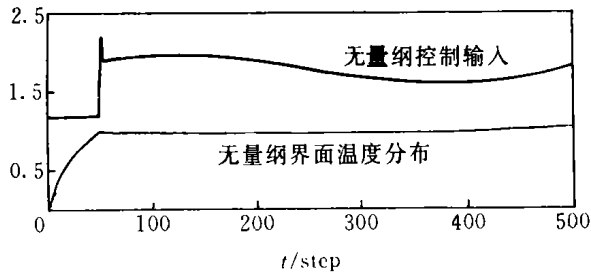


图 3 气体发汗自校正控制结果

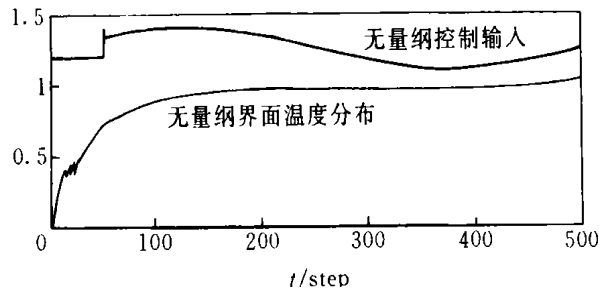


图 4 液体发汗自校正控制结果

计算中时间步长  $\Delta\tau = 0.0125$ , 空间步长  $\Delta\xi = 0.05$ 。在前 50 个时间段控制输入  $\lambda(\tau) = 1.2$ 。在同样的条件下, 对气体(此时  $L_1 = 0$ ) 和液体发汗剂两种情况进行数据试验, 得到自校正控制结果和控制输入分别如图 3 及图 4 所示。

数据试验显示, 控制输入可以很快地逼近理想输入, 只在控制开始时段产生短时振荡。对于液体发汗的情况, 温度在气化温度点附近产生短时波动, 这是由于计算中假设气化过程在气化点完全气化造成的(实际的气化面应构成一 Marshy 区, 温度不会产生波动), 其波动振幅随时间步长的减小而减小。

## 7 结 论

本文对固定边界发汗冷却控制的自校正问题进行讨论, 给出了基于两点测温的自校正控制方法。应用该方法不需具体给出热阻滞函数, 对时变的热流可以取得很好的控制效果。该控制方法简单, 在工程上易于实现。

### 参考文献:

- [1] 杨学实. 热防护发汗冷却控制[J]. 自动化学报, 1985, 11(4): 345-350.
- [2] 杨学实, 于景元, 朱广田. 活动边界分布参数系统控制研究的新进展[J]. 控制与决策, 1993, 8(5): 321-327.
- [3] 杨学实, 于景元, 朱广田, 等. 发汗冷却控制研究注记[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 18(4): 1-11.
- [4] 于景元, 武津刚, 李学志, 等. 水发汗控制问题的解[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 18(4): 39-47.
- [5] 杨学实. 水发汗温度场控制[J]. 自动化学报, 1991, 17(4): 269-279.
- [6] 孙冀, 罗学波. 发汗冷却控制模型边界热流密度的辨识方法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(4): 7-10.