

一类半线性抛物型偏微分方程描述的 分布参数系统的边界控制

周延九[†], 崔宝同

(1. 江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122;
2. 江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 针对一类由半线性抛物型偏微分方程描述的分布参数系统, 考虑系统边界为 Robin 或混合边界条件的情况, 提出基于边界控制的控制策略, 并研究其镇定问题. 首先, 根据无穷维抽象发展方程理论和 Lumer-Phillips 理论证明闭环系统的适定性; 其次, 通过传感器对系统状态进行测量, 并将数据传递给控制器, 根据测量方式的不同, 分为平均域测量和边界值测量; 再次, 基于 Lyapunov 稳定性理论, 采用 Lyapunov 直接法, 并借助于线性矩阵不等式 (LMI) 方法, 设计满足系统稳定条件的有效控制器; 然后通过系统在边界处分别施加基于平均域测量和边界值测量的输出反馈控制作用, 使原本不稳定的开环分布参数系统状态在较短的时间内到达稳定状态; 最后, 通过仿真实验验证了所设计控制器的有效性.

关键词: 分布参数系统; Robin 边界条件; 混合边界条件; 边界控制; 线性矩阵不等式; 输出反馈控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Boundary control of the distributed parameter systems described by a class of semi-linear parabolic partial differential equations

ZHOU Yan-jiu[†], CUI Bao-tong

(1. Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry of Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The boundary control strategy of the distributed parameter systems described by a class of semi-linear parabolic partial differential equations with Robin or mixed boundary conditions is proposed, and the corresponding stabilization problem is also studied. According to the theory of the infinite dimensional abstract development equation and the theory of Lumer-Phillips, the well-posedness of closed loop system can be proved. By means of different measurement methods, the states of the system can be obtained by domain-averaged measurement and boundary-valued measurement respectively and then transmitted to the controllers. Employing the Lyapunov's direct method and the linear matrix inequality (LMI) technique, the effective controllers satisfying the conditions of stable systems can be designed according to the Lyapunov stability theory. By applying output feedback control at the boundary of systems with the domain-averaged measurement and boundary-valued measurement respectively, the distributed parameter systems can reach the steady states from the unstable states in a short time. Finally, the simulations verify the effectiveness of the designed controllers.

Keywords: distributed parameter systems; Robin boundary conditions; mixed boundary conditions; boundary control; linear matrix inequality; output feedback control

0 引言

自然界中大多数物理过程, 通常都是随时间和空间同时变化的. 比如说热量传递^[1], 污染扩散^[2], 化学反应^[3], 交通运输^[4]等. 这些与时间和空间均有关的变化过程可以称为分布参数系统, 描述这些过程的数学模型通常以偏微分方程、积分方程、偏微分-积

分方程的形式表示. 按照分布参数系统涉及的领域和描述的对象特性不同, 偏微分方程的类别以及系统边界条件类型不同^[5]. 一般考虑 Dirichlet 边界条件和 Neumann 边界条件, 而对于具有 Robin 或混合边界条件系统的研究相对少见. 系统方程又分线性和非线性, 而半线性介于两者之间, 是指在线性系统方程中

收稿日期: 2018-03-31; 修回日期: 2018-08-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61807016); 高等学校学科创新引智计划(B12018).

责任编委: 吴淮宁.

[†]通讯作者. E-mail: zhouyanjiu99@163.com.

加入非线性项,在一定程度上能够更加贴切地描述实际系统的性质.实际的物理过程中,比如高速航天飞机温度冷却翼的温度变化^[6-7],Rayleigh-Benard对流现象,重力场下的对流细胞情况,由Fisher方程、Fisher类方程、Newell-Whitehead-Segel方程描述的对流扩散现象^[8-9];再比如化学反应器中催化棒的自催化链式反应,等温单一物种管式反应器以及循环非等温管式反应器等都是具有半线性特征的过程^[10-11].对于偏微分方程的处理方法,主要集中在模型降阶^[12]、算子半群^[13]、反步法^[14]、线性矩阵不等式(LMI)^[15]等.

偏微分方程描述的系统通常包含无穷多个自由度,所以是无穷维系统.在对其进行控制时,设置无穷多个控制器是不现实的,实际采用有限数量的控制器对系统实施控制.为提升系统运行性能,可以通过合理放置控制器、优化其位置来改善控制效果^[16-18],以及设计移动传感执行网络提高控制效率,从而进一步提升系统运行性能^[19-20].此外,实际应用中,边界控制也是一个重要选择,能够减小控制器放置环境的限制,并且可以减少控制器的使用数量,从而在一定程度上降低因机械故障引发的事故概率以及节省材料资源.对于边界控制,其研究方法集中在滑模控制^[21]、反步法^[22]、线性矩阵不等式(LMI)^[23]、有界算子转换法和伽辽金近似法^[24]等.线性矩阵不等式(LMI)是其中较为简便直接的方法.

在诸多分布参数系统中,常见的扩散过程引起众多科研人员的关注^[25-27].近年来,国内外学者对于扩散过程的边界控制也进行了许多理论和工程应用方面的研究^[28-30].Krstic等^[31]提出Backstepping方法,并将其应用到扩散系统的边界控制中,解决了线性不稳定扩散系统的镇定问题,并且针对带有固定结构非线性项的半线性扩散系统镇定问题提出了解决方案.该方法的主要思想是利用积分变换的方法将在边界控制器作用下的待镇定系统转化为稳定的目标系统,积分变换的核函数存在即可说明反推所得的待镇定系统稳定.Smyshlyaev等^[32]利用Backstepping方法研究了非常数扩散率过程的边界控制问题.Ge等^[33]将Backstepping方法推广到具有记忆性和遗传性的分数阶线性扩散系统的边界控制问题.Chen等^[34]在Ge研究Neumann边界条件下的扩散系统边界控制问题的基础上,将其结论推广到Robin或混合边界条件下分数阶线性扩散系统的边界控制问题.但对于更为一般的半线性扩散系统边界控制问题,Backstepping方法未能很好地解决.而

文献[23]利用线性矩阵不等式(LMI)对Neumann边界条件下,带有满足Lipschitz条件非线性项的扩散系统求解有效控制器,使之稳定.本文研究了更为一般的边界条件,Robin或混合边界条件下带有非线性项的扩散系统的边界控制问题.

这里,混合边界条件是指始端为Neumann边界,末端为Robin边界.本文分别选择平均域测量和边界值测量两种方式用于反馈控制输入,控制器均放置在末端Robin边界 $x=l$ 处.本文的创新点在于运用线性矩阵不等式这种操作更加简单的方法,对于一类具有Robin或混合边界条件的半线性分布参数系统进行了有效控制,使原本不稳定的开环系统在较短的时间内到达稳定状态.从理论层面而言,本文的研究内容一定程度上丰富了分布参数系统的研究问题;从应用层面来说,本文的研究内容对解决实际工程应用问题具有一定的参考价值.

1 问题描述

本文使用的符号说明如下: \mathcal{R} 为所有实数的集合;令 $\mathcal{H} \triangleq L_2(0, l)$ 为Hilbert空间,则平方可积函数 $\omega(x)(x \in [0, l])$ 的范数为 $\|\omega(x)\|_{L_2} = \sqrt{\int_0^l \omega^2(x)dx}$; $\mathcal{S}^1(0, l)$ 为强制连续标量函数 $\omega(x)$ 的Sobolev空间,其中 $\omega(x) : [0, l] \rightarrow \mathcal{R}$,且 $d\omega/dx \in L_2(0, l)$; $\mathcal{S}^2(0, l)$ 为强制连续标量函数 $\omega(x)$ 的Sobolev空间,其中 $\omega(x) : [0, l] \rightarrow \mathcal{R}$,且 $d\omega/dx$ 强制连续, $d^2\omega/dx^2 \in L_2(0, l)$;上标“T”表示向量或者矩阵的转置,上标“*”表示定义域内的一个不同于这个点的另一个点.

考虑如下分布参数系统:

$$z_t(x, t) = z_{xx}(x, t) + f(z, x, t), \quad 0 < x < l, \quad t > 0.$$

初始条件

$$z(x, t)|_{t=0} = z_0(x), \quad 0 \leq x \leq l.$$

边界条件

$$z_x(x, t)|_{x=0} - pz(x, t)|_{x=0} = 0, \quad p \geq 0;$$

$$z_x(x, t)|_{x=l} + qz(x, t)|_{x=l} = u(t), \quad q > 0, \quad t > 0.$$

其中: $z(x, t)$ 为系统状态变量, $z_t(x, t) = \partial z(x, t)/\partial t$, $z_x(x, t) = \partial z(x, t)/\partial x$, $z_{xx}(x, t) = \partial^2 z(x, t)/\partial x^2$, $x \in [0, l]$ 为位置变量, $t \in [0, \infty)$ 为时间变量. $z(x, t)$ 表示不同位置 x ,不同时刻 t ,对应一个状态 z ,并且 $z(x, t) \in \mathcal{D}$, $\mathcal{D} \triangleq \{z(x, t) \in \mathcal{H} | -\eta_1 \leq z(x, t) \leq \eta_2\} \subset \mathcal{H}$,包含平衡剖面 $z(x, t) = 0$,其中实数 $\eta_1 > 0$, $\eta_2 > 0$ 为给定常数. $f(z, x, t)$ 是已知的非线性函数,对于任意 $t > 0$,且 $x \in (0, l)$,都有 $f(0, x, t) =$

0. $u(t)$ 是控制输入,这里是指在系统末端边界处施加的控制作用.

2 边界控制

对如下分布参数系统进行分析:

$$z_t(x, t) = z_{xx}(x, t) + f(z, x, t), \quad t > 0, x \in (0, l); \tag{1}$$

$$z(x, t)|_{t=0} = z_0(x), \quad x \in [0, l]; \tag{2}$$

$$z_x(x, t)|_{x=0} - pz(x, t)|_{x=0} = 0, \quad p > 0,$$

$$z_x(x, t)|_{x=l} + qz(x, t)|_{x=l} = u(t), \quad q > 0, t > 0; \tag{3}$$

$$u(t) = -ky(t). \tag{4}$$

假设1 式(1)中的非线性项 $f(z, x, t)$ 关于 z 在 $t > 0, 0 < x < l$ 时,是局部Lipschitz连续的,即

$$|f(z, x, t) - f(z^*, x, t)| \leq \gamma_0 |z - z^*|, \\ \forall t \in (0, \infty), \forall x \in (0, l),$$

其中 $\gamma_0 > 0$ 且 $\gamma_0 \in \mathcal{R}$.

注1 对假设1中不等号两边同时取平方,并且对 x 在 $(0, l)$ 上积分,可得

$$\int_0^l |f(z, x, t) - f(z^*, x, t)|^2 dx \leq \\ \gamma \int_0^l |z - z^*|^2 dx, \quad \forall t \in (0, \infty), \forall x \in (0, l),$$

其中 $\gamma > 0$ 且 $\gamma \in \mathcal{R}$.

引理1 ^[35](Wirtinger不等式) 如果 $z \in \mathcal{S}^1(0, l)$ 是一个标量函数,且有 $z(0) = 0$ 或者 $z(l) = 0$, 则

$$\int_0^l z^2(x) dx \leq \frac{4l^2}{\pi^2} \int_0^l \left[\frac{dz(x)}{dx} \right]^2 dx.$$

注2 由引理1中不等式可知,当没有 $z(0) = 0$ 或者 $z(l) = 0$ 的条件时,通过整体代换,将引理1中的 $z(x)$ 代换为 $z(x) - z(0)$, 由于 $z(x) - z(0)$ 满足 $z(0) - z(0) = 0$, 且 $d(z(x) - z(0))/dx = dz(x)/dx$, 则

$$\int_0^l [z(x) - z(0)]^2 dx \leq \frac{4l^2}{\pi^2} \int_0^l \left[\frac{dz(x)}{dx} \right]^2 dx,$$

同理可得

$$\int_0^l [z(x) - z(l)]^2 dx \leq \frac{4l^2}{\pi^2} \int_0^l \left[\frac{dz(x)}{dx} \right]^2 dx.$$

引理2 ^[21](Young不等式) 如果 $\lambda > 0$, 且 $\lambda \in \mathcal{R}$, 则下式成立:

$$2ab \leq \lambda a^2 + \lambda^{-1} b^2.$$

引理3 ^[36](Schur complement) 恰当维数的矩阵 Q, S, R , 若满足

$$\begin{bmatrix} Q & S^T \\ S & R \end{bmatrix} < 0, \text{ 且 } R < 0,$$

则不等式 $Q - S^T R^{-1} S < 0$ 成立;其逆命题也成立.

2.1 基于平均域测量的边界控制

假设系统状态处处可测^[37], 在平均域测量形式下,测量输出定义如下:

$$y(t) = \int_0^l z(x, t) dx. \tag{5}$$

状态空间描述的系统(1)~(3)可以由非线性抽象微分方程表示,即

$$\dot{z} = \mathcal{A}z(t) + F(z(t), t), \quad z(0) = z_0(\cdot). \tag{6}$$

其中: $z(t) \triangleq z(\cdot, t) = \{z(x, t), x \in [0, l]\}$ 为状态变量;定义 \mathcal{H} 空间中的空间微分算子 \mathcal{A} 为 $\mathcal{A}\bar{z}(x) \triangleq d^2\bar{z}(x)/dx^2$, 其定义域为

$$\mathcal{D}(\mathcal{A}) \triangleq \left\{ \bar{z} \in \mathcal{S}^1([0, l]; \mathcal{R}) : \frac{d\bar{z}(x)}{dx} \Big|_{x=0} - p\bar{z}(x)|_{x=0} = 0, \right. \\ \left. \frac{d\bar{z}(x)}{dx} \Big|_{x=l} + q\bar{z}(x)|_{x=l} = -k \int_0^l \bar{z}(x) dx, \right. \\ \left. p > 0, q > 0 \right\},$$

并且,非线性项 $F(z(t), t)$ 选为 $F(z(t), t) \triangleq f(z(\cdot, t), \cdot, t)$ 的形式.

定理1 考虑方程(1)~(5), 如果存在参数 $\lambda > 0, k > 0$, 满足如下线性矩阵不等式(LMI):

$$\begin{bmatrix} \lambda^{-1}\gamma - \frac{\pi^2}{2l^2} & -k + \frac{\pi^2}{2l^2} & 1 \\ -k + \frac{\pi^2}{2l^2} & \frac{-2q}{l} - \frac{\pi^2}{2l^2} & 0 \\ 1 & 0 & -\lambda^{-1} \end{bmatrix} < 0, \tag{7}$$

则: 1) 系统有适定解; 2) 在 L_2 范数意义下渐近稳定. 其中 γ 为假设1的注1中所提, l 为位置长度.

证明 1) 参考文献[23]的适定性分析方法和结论, 利用内积 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 的定义和分部积分, 对于任意 $\bar{z} \in \mathcal{D}(\mathcal{A})$, 有

$$\langle \bar{z}, \mathcal{A}\bar{z} \rangle = \int_0^l \bar{z}(x) \frac{d^2\bar{z}(x)}{dx^2} dx = \\ \bar{z}(x) \frac{d\bar{z}(x)}{dx} \Big|_{x=0}^{x=l} - \int_0^l \frac{d^2\bar{z}(x)}{dx^2} dx = \\ \bar{z}(l) \frac{d\bar{z}(x)}{dx} \Big|_{x=l} - \bar{z}(0) \frac{d\bar{z}(x)}{dx} \Big|_{x=0} - \\ \int_0^l \frac{d^2\bar{z}(x)}{dx^2} dx = \\ \bar{z}(l) \left[-k \int_0^l \bar{z}(x) dx - q\bar{z}(l) \right] - \\ p\bar{z}^2(0) - \int_0^l \frac{d^2\bar{z}(x)}{dx^2} dx \leq \\ -k \int_0^l \bar{z}(l)\bar{z}(x) dx - q\bar{z}^2(l) - \int_0^l \frac{d^2\bar{z}(x)}{dx^2} dx. \tag{8}$$

根据引理1及注2,容易得到

$$-\int_0^l \left[\frac{d\bar{z}(x)}{dx} \right]^2 dx \leq -\frac{\pi^2}{4l^2} \int_0^l [\bar{z}(x) - \bar{z}(l)]^2 dx. \quad (9)$$

将式(9)代入(8),可得

$$\begin{aligned} \langle \bar{z}, \mathcal{A}\bar{z} \rangle \leq & -k \int_0^l \bar{z}(l)\bar{z}(x)dx - q\bar{z}^2(l) - \\ & \frac{\pi^2}{4l^2} \int_0^l [\bar{z}(x) - \bar{z}(l)]^2 dx = \\ & -\frac{\pi^2}{4l^2} \int_0^l \bar{z}^2(x)dx + \left(\frac{\pi^2}{2l^2} - k \right) \int_0^l \bar{z}(x)\bar{z}(l)dx + \\ & \left(-\frac{q}{l} - \frac{\pi^2}{4l^2} \right) \int_0^l \bar{z}^2(l)dx = \\ & \int_0^l \bar{Z}^T(x)\Xi\bar{Z}(x)dx. \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{Z}(x) & \triangleq [\bar{z}(x), \bar{z}(l)]^T, \\ \Xi & \triangleq \begin{bmatrix} -\frac{\pi^2}{4l^2} & \frac{\pi^2}{4l^2} - \frac{k}{2} \\ \frac{\pi^2}{4l^2} - \frac{k}{2} & -\frac{q}{l} - \frac{\pi^2}{4l^2} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

如果控制增益 k 满足 LMI(7),则能够保证 $\Xi < 0$, 即

$$\langle \bar{z}, \mathcal{A}\bar{z} \rangle \leq \int_0^l \bar{Z}^T(x)\Xi\bar{Z}(x)dx \leq 0,$$

说明算子 \mathcal{A} 是耗散的.

另外,对于任意给定的常数 $\sigma > 0$, $\sigma\mathcal{I} - \mathcal{A}$ 的范围 $\text{Ran}(\sigma\mathcal{I} - \mathcal{A})$ 是 \mathcal{H} , 即 $\text{Ran}(\sigma\mathcal{I} - \mathcal{A}) = \mathcal{H}$ (参见附录A). 基于 Lumer-Phillips 理论,可知算子 \mathcal{A} 是 \mathcal{H} 上收缩映射为 $T(t)$ 的 C_0 半群的无穷小生成元. 根据文献 [38] 第6章定理 1.5 和假设 1, 当 $z(0) \in \mathcal{D}(\mathcal{A})$ 时, 易证抽象微分方程 (6) 的唯一经典解 $z(t)$ 在 $[0, T_f]$ 上的局部存在性 (T_f 是指有限时间). 也就是说, 如果控制增益 k 满足 LMI(7), 则在定义域 \mathcal{D} 中, 且 $z_0(\cdot) \in \mathcal{D}(\mathcal{A})$ 的条件下, 闭环系统 (1)~(5) 有一个唯一局部经典解 $z(\cdot, t)$.

2) 构造如下 Lyapunov 函数:

$$V(t) = \int_0^l z^2(x, t)dx. \quad (11)$$

下面计算式(11)中 $V(t)$ 沿系统(1)~(5)的轨迹对时间求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) & = 2 \int_0^l z(x, t)z_t(x, t)dx = \\ & 2 \int_0^l [z(x, t)z_{xx}(x, t) + z(x, t)f(z, x, t)]dx = \\ & 2 \int_0^l z(x, t)z_{xx}(x, t)dx + 2 \int_0^l z(x, t)f(z, x, t)dx. \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)中,等号右边有两项,第1项根据分部积分

和引理1及注2,可得

$$\begin{aligned} & 2 \int_0^l z(x, t)z_{xx}(x, t)dx = \\ & 2[z(x, t)z_x(x, t)]_0^l - 2 \int_0^l z_x(x, t)z_x(x, t)dx = \\ & 2z(l, t) \left[-k \int_0^l z(x, t)dx - qz(l, t) \right] - \\ & 2pz^2(0, t) - 2 \int_0^l z_x^2(x, t)dx \leq \\ & -2k \int_0^l z(l, t)z(x, t)dx - 2qz^2(l, t) - \\ & \frac{\pi^2}{2l^2} \int_0^l [z(x, t) - z(l, t)]^2 dx. \end{aligned} \quad (13)$$

式(12)中,等号右边第2项根据引理2和假设1及注1,可得

$$\begin{aligned} & 2 \int_0^l z(x, t)f(z, x, t)dx \leq \\ & \lambda \int_0^l z^2(x, t)dx + \lambda^{-1} \int_0^l f^2(z, x, t)dx \leq \\ & \lambda \int_0^l z^2(x, t)dx + \lambda^{-1} \int_0^l \gamma z^2(x, t)dx = \\ & (\lambda + \lambda^{-1}\gamma) \int_0^l z^2(x, t)dx. \end{aligned} \quad (14)$$

综合式(12)~(14),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & (\lambda + \lambda^{-1}\gamma - \frac{\pi^2}{2l^2}) \int_0^l z^2(x, t)dx + \\ & (-2k + \frac{\pi^2}{l^2}) \int_0^l z(x, t)z(l, t)dx + \\ & (-\frac{2q}{l} - \frac{\pi^2}{2l^2}) \int_0^l z^2(l, t)dx = \\ & \int_0^l W^T(x, t)\Omega W(x, t)dx. \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} W(x, t) & \triangleq [z(x, t), z(l, t)]^T, \\ \Omega & \triangleq \begin{bmatrix} \lambda + \lambda^{-1}\gamma - \frac{\pi^2}{2l^2} & -k + \frac{\pi^2}{2l^2} \\ -k + \frac{\pi^2}{2l^2} & -\frac{2q}{l} - \frac{\pi^2}{2l^2} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

由引理3可知,式(15)中非线性矩阵 Ω 可以通过 Schur complement 转化为定理1中式(7)的线性矩阵. 如果存在控制增益 k 满足线性矩阵不等式(7),则根据 Lyapunov 稳定性原理和 LaSalle 不变原理,系统(1)~(5)渐近稳定. \square

注3 事实上,该系统指数稳定也是可证明的. 存在一个适当的实数 $\epsilon > 0$ 使得

$$\Omega + \epsilon I \leq 0. \quad (16)$$

将式(16)代入(15),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & -\epsilon \int_0^l W^T(x, t)W(x, t)dx \leq \\ & -\epsilon \int_0^l z^2(x, t)dx. \end{aligned} \quad (17)$$

将式(11)代入(17),则式(17)可改写成

$$\dot{V}(t) \leq -\epsilon V(t). \quad (18)$$

由式(18)可得 $\|z(x, t)\|_{L_2} \leq \|z_0(x)\|_{L_2} e^{-\frac{1}{2}\epsilon t}$, 则系统指数稳定.

2.2 基于边界值测量的边界控制

不同于系统(5)表示的基于平均域测量的边界控制方式,这里采用基于边界值测量的边界控制方式. 测量输出和控制输入如下:

$$y_1(t) = z(l, t), \quad u_1(t) = -k_1 y_1(t). \quad (19)$$

定理2 考虑方程(1)~(3)和(19),如果存在参数 $\lambda_1 > 0, k_1 > 0$, 满足如下线性矩阵不等式(LMI):

$$\begin{bmatrix} \lambda_1^{-1}\gamma - \frac{\pi^2}{2l^2} & \frac{\pi^2}{2l^2} & 1 \\ \frac{\pi^2}{2l^2} & -\frac{2k_1 + 2q}{l} - \frac{\pi^2}{2l^2} & 0 \\ 1 & 0 & -\lambda_1^{-1} \end{bmatrix} < 0, \quad (20)$$

则:1) 系统有适定解;2) 在 L_2 范数意义下渐近稳定. 其中 γ 为假设1的注1中所提, l 为位置长度.

证明 1) 与平均域测量方式的证明类似,详细内容可参见附录A.

2) 构造如下 Lyapunov 函数:

$$V_1(t) = \int_0^l z^2(x, t) dx. \quad (21)$$

下面计算式(21)中 $V_1(t)$ 沿系统(1)~(3), (19)的轨迹对时间求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &= 2 \int_0^l z(x, t) z_t(x, t) dx = \\ &2 \int_0^l [z(x, t) z_{xx}(x, t) + z(x, t) f(z, x, t)] dx = \\ &2 \int_0^l z(x, t) z_{xx}(x, t) dx + 2 \int_0^l z(x, t) f(z, x, t) dx. \end{aligned} \quad (22)$$

式(22)中,等号右边有两项,第1项根据分部积分和引理1及注2,可得

$$\begin{aligned} &2 \int_0^l z(x, t) z_{xx}(x, t) dx = \\ &2[z(x, t) z_x(x, t)]_0^l - 2 \int_0^l z_x(x, t) z_x(x, t) dx = \\ &2z(l, t)[-k_1 z(l, t) - qz(l, t)] - \\ &2pz^2(0, t) - 2 \int_0^l z_x^2(x, t) dx \leq \\ &-2(k_1 + q)z^2(l, t) - \frac{\pi^2}{2l^2} \int_0^l [z(x, t) - z(l, t)]^2 dx. \end{aligned} \quad (23)$$

式(22)中,等号右边第2项根据引理2和假设1及注1,可得

$$\begin{aligned} &2 \int_0^l z(x, t) f(z, x, t) dx \leq \\ &\lambda_1 \int_0^l z^2(x, t) dx + \lambda_1^{-1} \int_0^l f^2(z, x, t) dx \leq \\ &\lambda_1 \int_0^l z^2(x, t) dx + \lambda_1^{-1} \int_0^l \gamma z^2(x, t) dx = \\ &(\lambda_1 + \lambda_1^{-1}\gamma) \int_0^l z^2(x, t) dx. \end{aligned} \quad (24)$$

综合式(22)~(24),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &\leq \left(\lambda_1 + \lambda_1^{-1}\gamma - \frac{\pi^2}{2l^2}\right) \int_0^l z^2(x, t) dx + \\ &\frac{\pi^2}{l^2} \int_0^l z(x, t) z(l, t) dx + \\ &\left[-\frac{2(k_1 + q)}{l} - \frac{\pi^2}{2l^2}\right] \int_0^l z^2(l, t) dx = \\ &\int_0^l M^T(x, t) \Upsilon M(x, t) dx. \end{aligned} \quad (25)$$

其中

$$\begin{aligned} M(x, t) &\triangleq [z(x, t), z(l, t)]^T, \\ \Upsilon &\triangleq \begin{bmatrix} \lambda_1 + \lambda_1^{-1}\gamma - \frac{\pi^2}{2l^2} & \frac{\pi^2}{2l^2} \\ \frac{\pi^2}{2l^2} & -\frac{2k_1 + 2q}{l} - \frac{\pi^2}{2l^2} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

由引理3可知,式(25)中非线性矩阵 Υ 可以通过 Schur complement 转化为定理2中式(20)的线性矩阵. 如果存在控制增益 k_1 满足线性矩阵不等式(20), 则根据 Lyapunov 稳定性原理和 LaSalle 不变原理, 系统(1)~(3)和(19)渐近稳定. \square

注4 事实上,该系统指数稳定也是可证明的. 存在一个适当的实数 $\epsilon_1 > 0$, 使得

$$\Upsilon + \epsilon_1 I \leq 0. \quad (26)$$

将式(26)代入(25),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &\leq -\epsilon_1 \int_0^l M^T(x, t) M(x, t) dx \leq \\ &-\epsilon_1 \int_0^l z^2(x, t) dx. \end{aligned} \quad (27)$$

将式(21)代入(27),则式(27)可改写成

$$\dot{V}_1(t) \leq -\epsilon_1 V_1(t). \quad (28)$$

由式(28)可得 $\|z(x, t)\|_{L_2} \leq \|z_0(x)\|_{L_2} e^{-\frac{1}{2}\epsilon_1 t}$, 则系统指数稳定.

注5 当分布参数系统的边界条件(3)中 $p = 0$ 时,该系统边界条件为混合边界,即始端(非控制端)为 Neumann 边界,末端(控制端)为 Robin 边界. 这里的混合边界情况相当于上面讨论的 Robin 边界情况的特例,定理证明类似于 Robin 边界条件下的分布参数系统边界控制.

3 数值算例

本章节为了说明上述控制器的有效性,考虑如下 Fisher 方程^[8-9]的边界反馈控制问题:

$$z_t(x, t) = z_{xx}(x, t) + \beta z(x, t)(1 - z(x, t)). \quad (29)$$

初始条件

$$z(x, 0) = z_0(x); \tag{30}$$

边界条件

$$\begin{aligned} z_x(x, t)|_{x=0} - pz(x, t)|_{x=0} &= 0, \\ z_x(x, t)|_{x=l} + qz(x, t)|_{x=l} &= u(t). \end{aligned} \tag{31}$$

其中: $z(x, t)$ 是状态变量, $\beta > 0$ 是已知的过程参数; $z_0(x)$ 是该系统状态的初始值. 式(29)来源于热量传递和质量转移、燃烧学、生物学以及生态学. 比如说, 两种组分介质中的质量转移和拟一阶化学反应. 其中, 动力学函数模型 $\beta z(x, t)(1 - z(x, t))$ 可以用来描述燃烧理论中自催化链式反应.

上述系统中过程参数的值选为 $\beta = 7$, 并根据假设1, 设定 $\gamma = 1.75$. 位置变量上限设为 $l = 1$, 状态变量下限和上限参数分别设为 $\eta_1 = \pi, \eta_2 = \pi$. 初始条件(30)为 $z_0(x) = 0.2$. 末端边界条件(31)中 $p = 2, q = 1.5$, 不施加控制时控制端边界条件为 $z_x(1, t) + 1.5z(1, t) = 0$; 加入控制信号时, 右端分别为定理1中基于平均域测量的控制输入 $u(t)$ 和定理2中基于边界值测量的控制输入 $u_1(t)$.

1) 本文的数值仿真, 针对定理1, 控制增益 k 通过 Matlab 中 LMI 工具箱直接算出可行解 $k = 5.0383$. 基于平均域测量的边界控制信号 $u(t)$ 如图1所示. 不加控制和施加边界控制两种情况下系统状态的 L_2 范数对比如图2所示. 由图2清晰可见: 不加控制, 即系统开环时, 系统不稳定; 施加边界控制后, 系统能够在4秒内到达稳定状态.

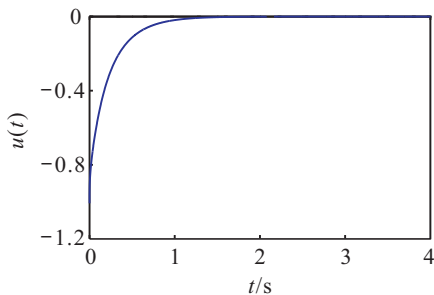


图1 控制输入 $u(t)$

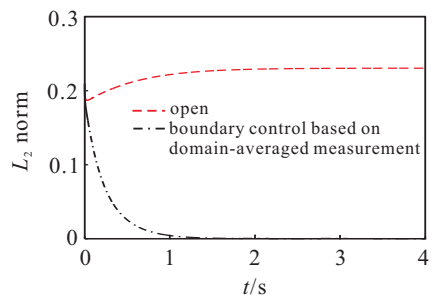


图2 系统开环和施加边界控制时状态的 L_2 范数(I)

2) 本文的数值仿真, 针对定理2, 控制增益 k_1 通过 Matlab 中 LMI 工具箱直接算出可行解 $k_1 = 6.3565$. 基于边界值测量的边界控制信号 $u_1(t)$ 如图3所示.

不加控制和施加边界控制两种情况下系统状态的 L_2 范数对比如图4所示. 同样, 由图4清晰可见: 不加控制, 即系统开环时, 系统不稳定; 施加边界控制后, 系统能够在4 s内到达稳定状态.

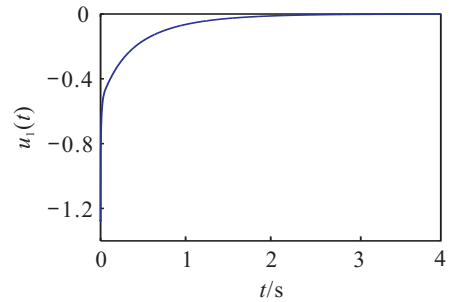


图3 控制输入 $u_1(t)$

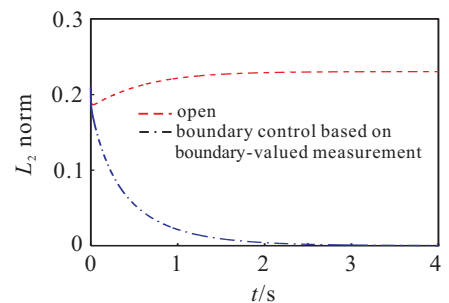


图4 系统开环和施加边界控制时状态的 L_2 范数(II)

注6 基于平均域测量与基于边界值测量的边界控制在控制效果上有一定区别. 由于平均域测量相比于边界值测量更多地包含了系统数据信息, 所以在收敛速率上, 基于平均域测量的边界控制更快, 在1.5 s左右稳定, 基于边界值测量的边界控制在3 s左右稳定. 但由于基于边界值测量的边界控制对传感器的有效测量范围等性能和待测量环境的要求更低, 更加容易在实际工程中实施应用, 所以这种方式更有应用价值. 两种测量方式的边界控制下系统状态范数收敛情况如图5所示.

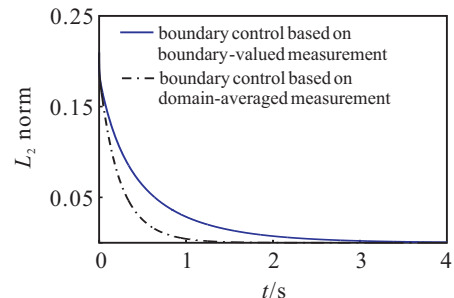


图5 基于两种不同测量方式下的边界控制后状态的 L_2 范数对比

注7 在仿真过程中, 利用 LMI 工具箱求解控制增益 k 和 k_1 时, 线性矩阵不等式(LMI)中的参数 λ 和 λ_1 同时被求解出来. 这里 λ 和 λ_1 没有选定为常数, 相当于增加了未知参量, 即减少了限定条件, 从而提高自由度, 使得控制增益的求解结果更优.

4 结论

本文研究了一类半线性抛物型分布参数系统的边界控制问题,分别采用平均域测量和边界值测量两种方式获得边界反馈控制的信息,并利用线性矩阵不等式求得控制增益的可行解,采用Lyapunov直接法对该闭环系统进行稳定性分析.最后的仿真实验验证了本文所设计控制器的有效性.

本文利用两种测量方式对一类Robin或混合边界条件下的半线性抛物型分布参数系统边界反馈镇定问题的研究,一定程度上丰富了分布参数系统的研究内容.以后的工作可以考虑对于一类测量输出有噪声、控制输入有干扰以及非均匀介质的扩散过程的镇定问题.

参考文献(References)

- [1] Boskovic D M, Krstic M, Liu W J. Boundary control of an unstable heat equation via measurement of domain-averaged temperature[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2001, 46(12): 2022-2028.
- [2] Chen J, Zhuang B, Chen Y Q, et al. Diffusion control for a tempered anomalous diffusion system using fractional-order PI controllers[J]. ISA Trans, 2018, 82: 94-106.
- [3] Logist F, Impe J F V. Multiple objective optimisation of cyclic chemical systems with distributed parameters[J]. The 14th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization, 2009, 42(2): 295-300.
- [4] Bellomo N, Dogbe C. On the modeling of traffic and crowds: A survey of models, speculations, and perspectives[J]. SIAM Review, 2011, 53(3): 409-463.
- [5] Salsa S. Partial differential equations in action from modelling to theory[M]. Italia: Springer Milan, 2008: 13-101.
- [6] Yadav V, Padhi R, Balakrishnan S. Robust/optimal temperature profile control of a high-speed aerospace vehicle using neural networks[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2007, 18(4): 1115-1128.
- [7] Luo B, Wu H N, Li H X. Adaptive optimal control of highly dissipative nonlinear spatially distributed processes with neuro-dynamic programming[J]. IEEE Trans on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(4): 684-696.
- [8] Zahra W K, Ouf W A, El-azab M S. Cubic B-spline collocated algorithm for the numerical solution of newell-whitehead-segal type equations[J]. Electronic J of Mathematical Analysis and Applications, 2014, 2(2): 81-100.
- [9] Verma A, Jiwari R, Koksai M E. Analytic and numerical solutions of nonlinear diffusion equations via symmetry reductions[J]. Advance in Difference Equations, 2014, 2014(1): 1-13.
- [10] Schaum A, Moreno J A, Alvarez J, et al. A simple observer scheme for a class of 1-D semi-linear parabolic distributed parameter systems[C]. 2015 European Control Conf. Linz: IEEE, 2015: 49-54.
- [11] Christofides P D. Nonlinear and robust control of PDE systems: Methods and applications to transport-reaction processes[M]. Boston, MA: Birkhauser, 2001: 75-79.
- [12] Armaou A, Dubljevic S, Christofides P D. Computation of empirical eigenfunctions and order reduction for control of time-dependent parabolic PDEs[C]. Proc of the 2003 American Control Conf. Denver: IEEE, 2003: 2089-2096.
- [13] Demetriou M A. Design of consensus and adaptive consensus filters for distributed parameter systems[J]. Automatica, 2010, 46(2): 300-311.
- [14] Smyshlyaev A, Krstic M. Explicit state and output feedback boundary controllers for partial differential equations[J]. J of Automatic Control, 2003, 13(2): 1-9.
- [15] Fridman E, Terushkin M. Exact observability of semilinear multidimensional wave equations: An LMI approach[C]. Proc of the 54th IEEE Conf on Decision and Control. Osaka: IEEE, 2015: 2507-2512.
- [16] Morris K, Demetriou M A, Yang S D. Using H_2 -control performance metrics for the optimal actuator location of distributed parameter systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2015, 60(2): 450-462.
- [17] Fahroo F, Demetriou M A. Optimal actuator/sensor location for active noise regulator and tracking control problems[J]. J of Computational and Applied Mathematics, 2000, 114(1): 137-158.
- [18] Armaous A, Demetriou M A. Using spatial H_2 norm for sensor placement in parabolic partial differential equations[C]. Proc of the 2006 American Control Conf. Minneapolis: IEEE, 2006: 1467-1472.
- [19] Demetriou M A. Guidance of mobile actuator-plus-sensor networks for improved control and estimation of distributed parameter systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2010, 55(7): 1570-1584.
- [20] 江正仙, 崔宝同, 楼旭阳, 等. 基于防撞的移动SAN对分布参数系统的控制[J]. 控制与决策, 2014, 29(12): 2242-2246.
(Jiang Z X, Cui B T, Lou X Y, et al. Controlling distributed parameter systems utilizing mobile sensor-actuator networks with guaranteed collision avoidance[J]. Control and Decision, 2014, 29(12): 2242-2246.)
- [21] Baccoli A, Orlov Y, Pisano A, et al. On the boundary control of distributed parameter systems by second-order sliding-mode technique: Recent advances and new results[C]. The 13th Int Workshop on Variable Structure Systems (VSS). Nantes: IEEE, 2014: 1-6.
- [22] Boskovic D M, Krstic M, Liu W J. Boundary control of an unstable heat equation via measurement of domain-averaged temperature[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2001, 46(12): 2022-2028.
- [23] Liu W J. Boundary feedback stabilization of an unstable heat equation[J]. SIAM J on Control and Optimization,

2003, 42(3): 1033-1043.

[24] 栾小丽, 李凯, 刘飞. 双曲线型分布参数系统边界控制下的干扰解耦[J]. 控制与决策, 2016, 31(2): 256-260. (Luan X L, Li K, Liu F. Disturbance decoupling for hyperbolic-type distributed parameter systems with boundary control[J]. Control and Decision, 2016, 31(2): 256-260.)

[25] Krstic M. Compensating actuator and sensor dynamics governed by diffusion PDEs[J]. Systems & Control Letters, 2009, 58(5): 372-377.

[26] Chen Y Q, Wang Z M, Liang J S. Optimal dynamic actuator location in distributed feedback control of a diffusion process[C]. Proc of the 44th IEEE Conf on Decision and Control and the European Control Conf. Seville: IEEE, 2005: 5562-5667.

[27] Cao J X, Chen Y Q, Li C P. Multi-UAV-based optimal crop-dusting of anomalously diffusing infestation of crops[C]. Proc of the 2015 American Control Conf. Chicago: IEEE, 2015: 1278-1283.

[28] Jafarizadeh S. Optimal diffusion processes[J]. IEEE Control Systems Letters, 2018, 2(3): 465-470.

[29] Vazquez R, Krstic M. Boundary observer for output-feedback stabilization of thermal-fluid convection loop[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2010, 18(4): 789-797.

[30] Talaei B, Jagannathan S, Singler J. Boundary control of linear uncertain 1-D parabolic PDE using approximate dynamic programming[J]. IEEE Trans on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(4): 1213-1225.

[31] Krstic M, Smyshlyaev A. Boundary control of PDEs: A course on backstepping designs[M]. Philadelphia: SIAM, 2008: 29-50, 161-171.

[32] Smyshlyaev A, Krstic M. On control design for PDEs with space-dependent diffusivity or time-dependent reactivity[J]. Automatica, 2005, 41(9): 1601-1608.

[33] Ge F D, Chen Y Q, Kou C H. Boundary feedback stabilisation for the time fractional-order anomalous diffusion system[J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(11): 1250-1257.

[34] Chen J, Zhuang B, Chen Y Q, et al. Backstepping-based boundary feedback control for a fractional reaction diffusion system with mixed or Robin boundary conditions[J]. IET Control Theory & Applications, 2017, 11(17): 2964-2976.

[35] Hardy G H, Littlewood J E, Polya G. Inequalities[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1934: 184-185.

[36] Boyd S, Ghaoui L E, Feron E, et al. Linear matrix inequalities in system and control theory[M]. Philadelphia: SIAM, 1994: 7-35.

[37] Wu H N, Wang J W, Li H X. Exponential stabilization for a class of nonlinear parabolic PDE systems via fuzzy control approach[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2012, 20(2): 318-329.

[38] Pazy A. Semigroups of linear operators and applications

to partial differential equations[M]. New York: Springer-Verlag, 1983: 14-15, 187-189.

附录 A

对于 \mathcal{A} 和任意给定常数 $\sigma > 0$, 都有 $\text{Ran}(\sigma\mathcal{I} - \mathcal{A}) = \mathcal{H}$, 表示对于任意 $\bar{z} \in \mathcal{H}$, 如下等式有唯一解:

$$(\sigma\mathcal{I} - \mathcal{A})\bar{z} = \bar{z}, \tag{A1}$$

其中 $\bar{z} \in \mathcal{D}(\mathcal{A})$. 根据 \mathcal{A} 的定义, 式(A1) 可改写为

$$\sigma\bar{z}(x) - \frac{d^2\bar{z}(x)}{dx^2} = \bar{z}, x \in [0, l], \tag{A2}$$

且满足以下边界条件:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{z}(x)}{x} \Big|_{x=0} - p\bar{z}(x)|_{x=0} = 0, \\ \frac{d\bar{z}(x)}{x} \Big|_{x=l} + q\bar{z}(x)|_{x=l} = -k \int_0^l \bar{z}(x) dx. \end{cases} \tag{A3}$$

式(A2)的特征方程 $\sigma - s^2 = 0$ 有两个不同的实数根 $\pm\sqrt{\sigma}$, 因此有以下形式的通解:

$$\begin{aligned} \bar{z}(x) = & c_1 \exp(\sqrt{\sigma}x) + c_2 \exp(-\sqrt{\sigma}x) - \\ & \frac{1}{2\sqrt{\sigma}} \exp(\sqrt{\sigma}x) \int_0^x \exp(-\sqrt{\sigma}\tau) \bar{z}(\tau) d\tau + \\ & \frac{1}{2\sqrt{\sigma}} \exp(-\sqrt{\sigma}x) \int_0^x \exp(\sqrt{\sigma}\tau) \bar{z}(\tau) d\tau, \end{aligned} \tag{A4}$$

其中 c_1 和 c_2 是两个常数.

将通解(A4)代入边界条件(A3)计算, 可得常数 c_1 和 c_2 满足以下等式:

$$\begin{cases} (\sqrt{\sigma} - p)c_1 - (\sqrt{\sigma} + p)c_2 = 0, \\ \left[\sqrt{\sigma} \exp(\sqrt{\sigma}l) - q \exp(\sqrt{\sigma}l) + k \int_0^l \exp(\sqrt{\sigma}x) dx \right] c_1 - \\ \left[\sqrt{\sigma} \exp(-\sqrt{\sigma}l) + q \exp(-\sqrt{\sigma}l) - \right. \\ \left. k \int_0^l \exp(-\sqrt{\sigma}x) dx \right] c_2 = \tilde{g}. \end{cases} \tag{A5}$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{g} \triangleq & \tag{32} \\ & \frac{1}{2} \exp(\sqrt{\sigma}l) \int_0^l \exp(-\sqrt{\sigma}\tau) \bar{z}(\tau) d\tau + \\ & \frac{1}{2} \exp(-\sqrt{\sigma}l) \int_0^l \exp(\sqrt{\sigma}\tau) \bar{z}(\tau) d\tau - \\ & \frac{q}{2\sqrt{\sigma}} \exp(\sqrt{\sigma}l) \int_0^l \exp(-\sqrt{\sigma}\tau) \bar{z}(\tau) d\tau + \\ & \frac{q}{2\sqrt{\sigma}} \exp(-\sqrt{\sigma}l) \int_0^l \exp(\sqrt{\sigma}\tau) \bar{z}(\tau) d\tau + \\ & \frac{k}{2\sqrt{\sigma}} \int_0^l \exp(\sqrt{\sigma}x) \int_0^x \exp(-\sqrt{\sigma}\tau) \bar{z}(\tau) d\tau dx - \\ & \frac{k}{2\sqrt{\sigma}} \int_0^l \exp(-\sqrt{\sigma}x) \int_0^x \exp(\sqrt{\sigma}\tau) \bar{z}(\tau) d\tau dx. \end{aligned} \tag{A6}$$

可以将式(A5)和(A6)的方程组改写成如下矩阵相乘的形式:

$$\begin{bmatrix} \sqrt{\sigma} - p & -(\sqrt{\sigma} + p) \\ (2, 1) & (2, 2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{g} \end{bmatrix}. \quad (\text{A7})$$

其中(2,1)和(2,2)分别为

$$(2, 1) \triangleq \sqrt{\sigma} \exp(\sqrt{\sigma}l) - q \exp(\sqrt{\sigma}) + k \int_0^l \exp(\sqrt{\sigma}x) dx,$$

$$(2, 2) \triangleq -[\sqrt{\sigma} \exp(-\sqrt{\sigma}l) + q \exp(-\sqrt{\sigma}) - k \int_0^l \exp(-\sqrt{\sigma}x) dx].$$

将式(A7)中 c_1, c_2 的系数矩阵记为 C ,即

$$C \triangleq \begin{bmatrix} \sqrt{\sigma} - p & -(\sqrt{\sigma} + p) \\ (2, 1) & (2, 2) \end{bmatrix}. \quad (\text{A8})$$

系数矩阵 C 的行列式 $|C|$ 为

$$\begin{vmatrix} \sqrt{\sigma} - p & -(\sqrt{\sigma} + p) \\ (2, 1) & (2, 2) \end{vmatrix}. \quad (\text{A9})$$

考虑式(A9)行列式值的情况,可由如下两种方式得出结果:

1) 行列式的值为

$$\begin{aligned} |C| &= (p\sqrt{\sigma} + q\sqrt{\sigma})[\exp(\sqrt{\sigma}l) + \exp(-\sqrt{\sigma}l)] + \\ &(\sigma + pq)[\exp(\sqrt{\sigma}l) - \exp(-\sqrt{\sigma}l)] + \\ &\sqrt{\sigma}k \int_0^l \exp(\sqrt{\sigma}x) + \exp(-\sqrt{\sigma}x) dx + \\ &pk \int_0^l \exp(\sqrt{\sigma}x) - \exp(-\sqrt{\sigma}x) dx. \quad (\text{A10}) \end{aligned}$$

其中: $\sigma > 0, k > 0, p > 0, q > 0$.易知,式(A10)中等号右边第1项和第2项分别大于0,第3项和第4项分别由指数函数图像得出结果大于0. 综上 $|C| > 0$.

2) 行列式的值为

$$\begin{aligned} |C| &= (p\sqrt{\sigma} + q\sqrt{\sigma})[\exp(\sqrt{\sigma}l) + \exp(-\sqrt{\sigma}l)] + \\ &(\sigma + pq)[\exp(\sqrt{\sigma}l) - \exp(-\sqrt{\sigma}l)] + \\ &\frac{qk}{\sqrt{\sigma}}[\exp(\sqrt{\sigma}l) + \exp(-\sqrt{\sigma}l) - 2]. \quad (\text{A11}) \end{aligned}$$

其中: $\sigma > 0, k > 0, p > 0, q > 0$.易知,式(A11)中等号右边第1项和第2项分别大于0,第3项根据引理2(Young不等式)得出结果大于0. 综上 $|C| > 0$.

根据矩阵的性质,其行列式不为0,说明该矩阵可逆,即式(A7)矩阵 C 是可逆的.因此,式(A5)的解是唯一的,即方程的通解(A4)在边界条件(A3)下是唯一的.也就是说,对于任意给定的常数 $\sigma > 0$,参数 $k > 0$ 和任意给定的 $z \in \mathcal{H}$,满足边界条件(A3)的方程式(A2)有唯一解.综上所述,对于任意给定常数 $\sigma > 0$,参数 $k > 0$,都有 $\text{Ran}(\sigma I - A) = \mathcal{H}$.

作者简介

周延九(1994-),女,博士生,从事分布参数系统边界控制的研究, E-mail: zhouyanjiu99@163.com;

崔宝同(1960-),男,教授,博士生导师,从事复杂系统控制理论与应用等研究, E-mail: btcui@jiangnan.edu.cn.

(责任编辑:孙艺红)

《控制与决策》喜获“百种中国杰出学术期刊”称号

本刊讯: 2019年11月19日,由国家科学技术部中国科学技术信息研究所主办的“2018年中国科技论文统计结果发布会”在北京国际会议中心隆重举行,大会发布了2018年度中国科技论文统计结果和获奖名单.据《2018年版中国科技期刊引证报告(核心版)》(简称:《报告》)文献计量指标统计,全国自然科学类期刊共6718种,其中核心期刊2049种,归类于112个学科类别.东北大学主办的《控制与决策》在信息科学与系统科学类核心期刊中“核心影响因子”“综合评价

总分”均排名第1,被评为2018年度“百种中国杰出学术期刊”.这是《控制与决策》继2013年第6次被评选为“百种中国杰出学术期刊”以来,再次获此殊荣.

《报告》通过综合评价指标体系(25项学术计量指标),从各个角度对期刊进行统计描述和分析评价,客观地体现期刊的学术水平、学科地位和出版质量.“百种中国杰出学术期刊”是严格依据《报告》数据评选出的中国核心中英文学术期刊年度奖项,代表了中国学术期刊的最高水平.