第 30 卷第 5 期
2013 年 5 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 30 No. 5
May 2013

DOI: 10.7641/CTA.2013.20524

约束不确定非线性系统的鲁棒优化镇定

何德峰†, 宋秀兰, 俞 立

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 针对状态和输入约束不确定非线性仿射系统, 提出一种鲁棒镇定的优化控制器设计方法. 基于弱鲁棒控制Lyapunov函数概念, 构造一个参数可调控制器. 再利用LaSalle定理和逆优化理论, 验证该控制器的鲁棒镇定性和逆最优性. 进一步, 采用滚动优化原理在线计算控制器的可调参数, 实现闭环系统的鲁棒优化镇定. 最后对一个开环不稳定振荡器系统进行鲁棒优化镇定, 其结果验证了文中方法的有效性.

关键词: 非线性仿射系统; 约束控制; 鲁棒镇定; 鲁棒控制Lyapunov函数; 滚动优化

中图分类号: TP273　　**文献标识码**: A

Optimization-based robust stabilization of constrained nonlinear uncertain systems

HE De-feng†, SONG Xiu-lan, YU Li

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310023, China)

Abstract: The design method of optimization-based controllers with robust stabilization is presented for nonlinear affine systems subject to uncertainties and constraints on the state and input. A controller with adjustable parameters is constructed based on the concept of weak robust control Lyapunov functions. Then the LaSalle's theorem and inverse optimization theory are employed to validate the robust stabilization and inverse optimization for the controller with respect to the uncertainty. Furthermore, the receding optimization principle is exploited to compute online the adjustable parameters in the controller, which leads to the optimization-based robust stabilization of the closed-loop system. The robust stabilization method has been applied to an open-loop unstable oscillator system and the successful results validates the effectiveness of the method presented here.

Key words: nonlinear affine systems; constrained control; robust stabilization; robust control Lyapunov functions; receding optimization

1 引言(Introduction)

许多工业控制系统面临同步优化与镇定问题. 对于线性系统, LQ控制、μ-综合和H_∞控制等理论提供了良好的优化镇定方法[1–2], 但如烯烃聚合过程、换热过程和空分过程等复杂工业过程大都具有强非线性, 线性化控制方法很难取得好的控制效果, 甚至稳定性都难以保证[3–4]. 同时, 实际控制系统通常存在一定约束限制和不确定性影响. 因此, 约束不确定非线性系统的同步优化与镇定问题成为了近年来国内外先进控制理论研究的热点课题[5–6].

对于标称非线性系统, 可利用控制Lyapunov函数(CLF)工具构造一镇定控制器, 该控制器对特定的性能指标具有最优性[7–9]. 进一步, 为降低CLF设计难度, 文献[10]利用弱CLF概念设计镇定控制器[11], 而对于约束系统和任意给定的性能指标, 文献[12–13]结合滚动优化原理设计最优镇定控制器. 另一方面, 对于不确定非线性系统, 文献[14]基于鲁棒CLF(RCLF)设计鲁棒镇定控制器[8,15], 可全局镇定无约束的不确定非线性系统, 但其时不变特性对于设计者给定的性能指标缺乏调整性, 且无法显式地满足系统的约束条件. 进一步, 该鲁棒控制器建立在严格意义下的RCLF基础上, 但严格RCLF很难设计, 甚至不存在, 如系统$\dot{x} = g(x)u + p(x)w$就不存在严格意义下的RCLF.

本文考虑约束不确定非线性仿射系统的同步优化与鲁棒镇定问题. 通过引入不确定非线性系统的弱RCLF概念, 构造参数可调控制器. 在此基础上, 利用LaSalle定理[16]和逆优化理论[17], 建立可调控制器的鲁棒镇定性和逆最优性结论. 进一步, 为处理系统约束和给定性能指标, 应用滚动优化原理[18]在线计算控制器的可调参数, 实现控制器的鲁棒优化镇定设计. 最后通过开环不稳定振荡器的优化控制, 验证

收稿日期: 2012−05−15; 收修改稿日期: 2012−12−21.
†通信作者. E-mail: hdfzj@zjut.edu.cn; Tel.: +86 0571-85290601.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60904040); 高校博士点专项科研基金资助项目(200933170002); 中国博士后基金资助项目(2012M511387).

本文结果的有效性和优越性.

2 系统描述(System description)

考虑不确定联合仿射非线性系统

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + p(x)w, \tag{1}$$

其中: $x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m$和$w \in \mathbb{R}^r$分别为系统的状态变量、控制变量和不确定扰动变量, 向量$f(x)$, $g(x)$和$p(x)$分别是定义在原点某邻域内的已知连续可微(C^1)函数, 满足$f(0) = 0$, $g(0) = 0$和$p(0) = 0$. 考虑系统状态约束和控制约束

$$x(t) \in X \subseteq \mathbb{R}^n,\ u(t) \in U \subseteq \mathbb{R}^m,\ t \geqslant 0, \tag{2}$$

其中X和U都是包含原点为内点的、凸的有界闭集合. 进一步, 假设系统状态是完全可测的, 且原点为系统的期望平衡点.

假设 1　不确定扰动由系统状态限界, 即

$$\|w(t)\| \leqslant n(x(t)),\ t \geqslant 0, \tag{3}$$

其中: $n(x) \geqslant 0$是定义在X上的已知C^1函数, $\|\cdot\|$表示向量2-范数. 如果扰动w满足条件(3), 则称w是系统(1)的容许扰动. 所有容许扰动组成的集合记为$W \subseteq \mathbb{R}^r$.

假设 2　对于任意初始状态$x(0) \in X$和分段右连续输入$u \in U$及$w \in W$, 系统(1)的解连续且唯一.

定义 1　考虑系统(1)及集合$S \subseteq \mathbb{R}^n$和控制律$u(t) \in U$, 如果闭环系统的解满足$x(t; x(0), u, w) \in S, \forall t \geqslant 0, x(0) \in S, w \in W$, 则称$S$为闭环系统的一个鲁棒不变集[19].

定义 2　考虑系统(1)及容许扰动$w \in W$, 如果对于$\forall x \neq 0$, 正定C^1函数$V(x)$满足

$$L_gV(x) = 0 \Rightarrow L_fV(x) + n(x)\|L_pV(x)\| \leqslant 0, \tag{4}$$

则称$V(x)$为系统(1)的弱鲁棒控制Lyapunov函数(WRCLF), 其中$L_fV(x)$, $L_gV(x)$和$L_pV(x)$分别为$V(x)$对$f(x)$, $g(x)$和$p(x)$的李导数. 进一步, 如果$\|x\| \to \infty \Rightarrow V(x) \to \infty$, 则称$V(x)$为全局WRCLF.

注 1　相比于常规RCLF定义即不等式(4)严格小于零[8,14–15], 定义2放宽了该函数的存在条件.

定义 3　考虑系统(1)及其镇定控制律$u(t)$, 如果对任意容许扰动w和连续扇形函数$\varphi(s) = \mathrm{diag}\{\varphi_1(s), \cdots, \varphi_m(s)\}$, 即$\forall s \neq 0$, $as^2 < s\varphi_i(s) < bs^2$, $0 < a < b$, $i = 1, \cdots, m$, 闭环系统$\dot{x} = f(x) + g(x)\varphi(u) + p(x)w$全局渐近稳定, 则称控制律$u(t)$具有鲁棒扇形裕度$(a, b)$.

3 鲁棒优化镇定控制(Optimized-based robust stabilization control)

3.1 鲁棒镇定控制(Robust stabilization control)

设$V(x)$是系统(1)的一个WRCLF, 则对有限常数$D_1 > 1$和$D_2 > 0$, 构造如下可调控制器:

$$u(x; \mu) = -p(x; \mu)\beta'(x), \tag{5}$$

其中: 向量$\mu = (\mu_1, \mu_2) \in [1, D_1] \times (0, D_2]$为可调参数, $\beta(x) = L_gV(x)$和

$$p(x; \mu) = \begin{cases} \dfrac{\tilde{\alpha}(x) + \mu_1\sqrt{\tilde{\alpha}(x)^2 + \mu_2\|\beta(x)\|^4}}{\|\beta(x)\|^2}, & \beta(x) \neq 0, \\ 0, & \beta(x) = 0, \end{cases}$$

其中: $\tilde{\alpha}(x) = \alpha(x) + n(x)\|\gamma(x)\|$, $\alpha(x) = L_fV(x)$和$\gamma(x) = L_pV(x)$. 令$(\mu_1, \mu_2) = (1, 1)$, 则控制器(5)简化为标准Freeman型控制器[8,14].

定理 1　设$V(x)$是系统(1)的WRCLF, 定义集合$S_1 = \{x \in \mathbb{R}^n : \alpha(x) + n(x)\|\gamma(x)\| = 0,\ \beta(x) = 0\} \subseteq X$. 如果假设1和2成立, 则当闭环系统(1)和(5)在S_1内只有平凡解时, 有如下结论:

1) 存在一个鲁棒不变集$M \subseteq X$, 使闭环系统在M内对$\forall w \in W$鲁棒渐近稳定, 且当$X = \mathbb{R}^n$及$U = \mathbb{R}^m$时, 闭环系统全局鲁棒渐近稳定.

2) 控制器(5)极小化如下一类可调性能泛函:

$$\begin{cases} J(x; \mu) = \displaystyle\int_0^\infty [L(x; \mu) + \frac{1}{2p(x; \mu)}u'u]\mathrm{d}t, \\ L(x; \mu) = 0.5p(x; \mu)\beta(x)\beta'(x) - \tilde{\alpha}(x). \end{cases} \tag{6}$$

3) 对于无约束系统(1), 控制器(5)具有鲁棒扇形裕度$(0.5, \infty)$.

证　1) 考虑约束系统(1)–(2)及WCLF $V(x)$, 定义$V(x)$的水平集$M(r) = \{x \in \mathbb{R}^n : V(x) \leqslant r,\ r > 0\} \subseteq X$, 使其满足$u(x; \mu) \in U$, $\forall (x, \mu) \in M(r) \times D$, 其中$D = [1, D_1] \times (0, D_2]$. 因为$X$和$U$分别是包含原点为内点的闭凸集和紧凸集, 故至少存在一个$\hat{r} > 0$使集合$M(\hat{r})$存在且非空. 又因为闭环系统(1)和(5)在集S_1内只有平凡解, 所以$S_1 \subset M(\hat{r})$.

令$M = M(\hat{r})$. 考虑$\forall (x, \mu) \in M \times D$. 当$\beta(x) = 0$时, 有$\dot{V}(x) = \tilde{\alpha}(x) = \alpha(x) + n(x)\|\gamma(x)\| \leqslant 0$; 当$\beta \neq 0$时, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \alpha(x) + \|\gamma(x)\|w + \beta(x)\kappa(x, \mu) \leqslant \\ &-\mu_1\sqrt{\tilde{\alpha}^2(x) + \mu_2\|\beta(x)\|^4}. \end{aligned} \tag{7}$$

即对$\forall (x, \mu) \in M \times D$, 闭环系统满足$\dot{V}(x) \leqslant 0$. 故集$M$为系统(1)和(5)的一个鲁棒不变集, 且原点为闭环稳定平衡点. 进一步, 函数$V(x)$满足$\dot{V}(x) = 0 \Leftrightarrow \tilde{\alpha}(x) = 0,\ \beta(x) = 0$, 从而在集$\{x \in M : \dot{V}(x) = 0\}$内的闭环系统轨迹也必将在集$S_1$内, 反之亦然. 考虑到闭环系统在$S_1$上只有平凡解, 则由LaSalle定理[16]可知, 对于$\forall w \in W$, 闭环系统在鲁棒不变集M内渐近稳定. 进一步, 若$V(x)$径向无穷大函数, 则当$X = \mathbb{R}^n$和$U = \mathbb{R}^m$时, 闭环系统全局鲁棒渐近稳定.

2) 考虑$\forall (x, \mu) \in M \times D$. 当$\beta(x) = 0$时, 由

WRCLF性质可得$L(x;\mu)=-\tilde{\alpha}(x)\geqslant 0$; 当$\beta\neq 0$时, $L(x;\mu)=0.5p(x,\mu)\beta(x)\beta'(x)-\tilde{\alpha}(x)\geqslant 0$, 从而泛函$J(x;\mu)$有意义. 进一步, 令$v=u-u(x;\mu)$并代入式(6), 得

$$\begin{aligned}J(x;\mu)=&\int_0^{\infty}\{0.5p(x;\mu)\beta(x)\beta'(x)-\tilde{\alpha}(x)+\\&\frac{1}{2p(x;\mu)}[v+u(x;\mu)]'[v+u(x;\mu)]\}\mathrm{d}t=\\&\int_0^{\infty}[-\beta(x)u-\tilde{\alpha}(x)+\frac{1}{2p(x;\mu)}v'v]\mathrm{d}t=\\&\int_0^{\infty}[-\dot{V}(x)-n(x)\|\gamma(x)\|+\gamma(x)w+\\&\frac{1}{2p(x;\mu)}v'v]\mathrm{d}t\leqslant\\&\int_0^{\infty}[-\dot{V}(x)+\frac{1}{2p(x;\mu)}v'v]\mathrm{d}t.\end{aligned}$$

显然, 当$v=0$时, 泛函$J(x;\mu)$取极小值, 从而式(5)是泛函$J(x;\mu)$的最优控制律.

3) 考虑系统(1)及任意给定的连续扇形函数$\varphi=\mathrm{diag}\{\varphi_1,\cdots,\varphi_m\}$, 其中$s\varphi_i(s)>0.5s^2$, $s\neq 0$, $i=1,\cdots,m$, 验证对于$\forall w\in W$, 闭环系统$\dot{x}=f(x)+g(x)\varphi(u(x;\mu))+p(x)w$是全局鲁棒渐近稳定的.

当$\beta(x)=0$时, $\dot{V}(x)=\tilde{\alpha}(x)\leqslant 0$; 当$\beta(x)\neq 0$时,

$$\begin{aligned}&\dot{V}(x)=\\&\alpha(x)+\|\gamma(x)\|w+\beta(x)\varphi(u(x;\mu))\leqslant\\&\tilde{\alpha}(x)-0.5p(x;\mu)\beta'(x)\beta(x)+\\&0.5p(x;\mu)\beta'(x)\beta(x)+\beta(x)\varphi(u(x;\mu))=\\&\beta(x)\varphi(u(x;\mu))-L(x;\mu)-0.5\beta(x)u(x;\mu)\leqslant\\&\beta(x)[\varphi(u(x;\mu))-0.5u(x;\mu)]=\\&-\frac{1}{p(x;\mu)}u'(x;\mu)[\varphi(u(x;\mu))-0.5u(x;\mu)]\leqslant 0.\end{aligned}$$

则由$p(x;\mu)$和$\varphi(s)$的性质, 可得$\dot{V}(x)=0\Leftrightarrow u(x;\mu)=0\Leftrightarrow\beta(x)=0$. 进一步, 根据WRCLF性质, 可得$\tilde{\alpha}(x)\leqslant 0$. 再次利用LaSalle定理可得, 对于$\forall w\in W$, 闭环系统$\dot{x}=f(x)+g(x)\varphi(u(x;\mu))+p(x)w$全局鲁棒渐近稳定, 即控制器(5)具有鲁棒扇形裕度$(0.5,\infty)$. 证毕.

注 2 控制器(5)对泛函(6)具有最优性, 但泛函(6)无明确物理意义, 难以在实际中应用. 其次, 假设函数$V(x)$是系统(1)的一个能量函数, 则由式(7)可知: 调节μ可影响闭环系统的"衰减速率", 即调节μ值可优化系统的性能. 这反映在性能泛函上, 就是控制器(5)对变化的控制目标具有适应性. 最后, 采用文献[13]的方法估计闭环系统(1)和(5)的最大鲁棒不变集M, 及可调参数初始值$\hat{\mu}$.

3.2 鲁棒控制器滚动优化(Receding optimization of robust controllers)

考虑约束系统(1)–(2), 定义t时刻有限时域目标函数

$$J(t)=\int_t^{t+T}[l_1(x(s))+l_2(u(s))]\mathrm{d}s,\ t\geqslant 0,\qquad(8)$$

其中: 优化时域$T>0$, 函数$l_1(x)\geqslant 0$及$l_2(u)>0$. 为降低在线优化的计算量, 采用标称模型优化控制器(5)可调参数μ, 步骤如下:

Step 1 构造系统(1)–(2)及其WRCLF $V(x)$, 计算可调控制器(5), 不变集M和初始值$\hat{\mu}$;

Step 2 给定性能泛函$J(t)$, 参数区间D和充分小采样周期$0<\delta<T$;

Step 3 测量t时刻状态量x_t, 以$\hat{\mu}$为μ初始值, 利用序列二次规划(SQP)法或遗传算法等数值算法[20–21], 在线计算有限时域最优控制问题(9), 得最优参数$\mu^*(t)$;

$$\begin{aligned}&\min_{\mu(t)\in D}J(t),\ t\geqslant 0,\\&\text{s.t. }\dot{x}=f(x(s))+g(x(s))u(s),\\&\quad u(s)=u(x(s);\mu(t)),\ x(t)=x_t,\\&\quad x(s)\in X,\ u(s)\in U,\ t\leqslant s<t+T;\end{aligned}\qquad(9)$$

Step 4 根据滚动优化原理[18], 将t时刻最优控制量$u^{\rm op}(x(s))\triangleq u(x(s);\mu^*(t))$, $t\leqslant s<t+\delta$作用于系统(1);

Step 5 在$t+\delta$时刻, 令$t:=t+\delta$, 返回Step 3.

根据上述设计步骤得闭环系统为

$$\dot{x}=f(x)+g(x)u^{\rm op}(x)+p(x)w.\qquad(10)$$

定理 2 设函数$V(x)$是系统(1)的一个WRCLF. 如果假设1和2成立, 且闭环系统(10)在集S_1上只有平凡解, 则如下性质成立:

1) 对任意容许扰动$w\in W$, 闭环系统(10)在鲁棒不变集M内渐近稳定. 特别, 当$X=\mathbb{R}^n$及$U=\mathbb{R}^m$时, 闭环系统全局鲁棒渐近稳定;

2) 控制器$u^{\rm op}(x)$极小化泛函(6), 其中$\mu=\mu^*$;

3) 当不考虑系统约束(2)时, 控制器$u^{\rm op}(x)$具有鲁棒扇形裕度$(0.5,\infty)$.

证 1) 考虑闭环系统(10)和定理1定义的鲁棒不变集M, 存在$\hat{\mu}$使$u(x;\hat{\mu})\in U$和$\dot{V}(x)|_{\mu=\hat{\mu}}\leqslant 0$, $\forall x\in M$. 从而闭环系统解$x(t+s;x(t),u(x(\cdot);\hat{\mu}))\in M\subseteq X,\forall x(t)\in M,s\geqslant 0$, 即优化问题(10)在每个时刻总是优化可行的. 进一步, 应用定理1结论可得性质1).

同理, 应用定理1可得性质2)和3). 证毕.

注 3 由定理2可知: 闭环系统(10)在不变集M内稳定性与泛函$J(t)$相分离, 从而在线调整目标(8)以满足控制要求, 但不影响闭环系统的鲁棒稳定性. 其次, 优化问题(9)把对时域区间$[0,T]$内控制量的优化转化为对控制器参数的计算, 从而降低优化的在线计算量. 最后, 定理2结论是在

最优解μ^*精确计算下得到, 但对于次优解, 定理结论同样成立. 所有这些结果都有利于鲁棒控制器获得更好的性能和更大的应用范围.

4　实例仿真(Simulation of example)

考虑一开环不稳定的不确定振荡器系统

$$\begin{cases}\dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\mathrm{e}^{x_1}[x_1 + \dfrac{1+\theta_1}{2}x_2] + \theta_2 u,\end{cases} \tag{11}$$

其中: θ_1表示系统参数摄动, $|\theta_1| \leqslant 0.5$, θ_2表示控制器增益扰动. 对于标称模型即$(\theta_1, \theta_2) = (0, 1)$, 文献[12]考虑弱CLF和系统约束, 设计了一优化镇定控制器, 但未考虑系统不确定性影响. 本节研究系统在输入不确定性和参数不确定性作用下的优化镇定控制器设计.

假设原点为系统(11)的期望平衡点, 令

$$X = \{x \in \mathbb{R}^2 : |x_i| \leqslant 1, i = 1, 2\},$$

$$U = \{u \in \mathbb{R} : |u| \leqslant 0.5\},\ w(t) = \theta_1(t)x_2(t)\mathrm{e}^{x_1(t)},$$

其中$|\theta_1(t)| \leqslant 0.5$, 则$n(x(t)) = 0.5x_2(t)\mathrm{e}^{x_1(t)}$. 对系统(11), 构造函数$V(x) = x_1^2 + x_2^2$, 计算参数:

$$\alpha(x) = L_f V(x) = 2x_1x_2(1 - \mathrm{e}^{x_1}) + x_2^2\mathrm{e}^{x_1},$$

$$\beta(x) = L_g V(x) = 2x_2,\ \gamma(x) = L_p V(x) = -x_2.$$

则对$|\theta_1| \leqslant 0.5$和$\theta_2 = 1$, 函数$V(x)$满足$\forall\, 0 \neq x \in X$, $\beta(x) = 0 \Rightarrow \alpha(x) + n(x)\|\gamma(x)\| = 0$, 从而$V(x)$为系统(11)的一个WRCLF. 由方程(5)构造控制器$u(x;\mu)$及其鲁棒不变集$M = \{x \in \mathbb{R}^2 : x_1^2 + x_2^2 \leqslant 1.0\}$.

仿真中, 采用Euler法离散系统(11), 取$\delta = 0.1\,\mathrm{s}$, $T = 2.0\,\mathrm{s}$, $D = [1, 5] \times (0, 2]$, 及目标函数

$$J(t) = \int_t^{t+T} [10x_1^2(s) + 20x_2^2(s) + u^2(s)]\mathrm{d}s.$$

以系统初始状态$A(-0.8, 0.6)$和$B(-0.7, -0.7)$及$\hat{\mu} = (1.0, 0.01)$为启动点, 仿真结果如图1和2所示.

图1对应系统初始条件$A(-0.8, 0.6)$, 控制器无增益扰动即$\theta_2(t) = 1$和不确定参数$\theta_1(t) = 0.5\sin(0.1t)$时的闭环系统状态轨迹和控制曲线, 其中点线为Freeman型常规鲁棒镇定控制器[8]即$\mu = (1, 1)$的仿真结果, 实线为本文所得控制器的仿真结果(下同). 类似地, 图2对应系统初始条件$B(-0.7, -0.7)$, 控制器无增益扰动和不确定参数$\theta_1(t) = 0.5\sin(10t)$时的闭环系统状态轨迹和控制曲线. 分析图1和2结果可知, 通过在线优化参数μ可使闭环系统获得更好的控制性能, 即在控制输入和系统状态满足约束条件下, 不确定闭环系统能快速收敛到平衡原点. 相反, Freeman型鲁棒镇定控制器在初始时段不但产生较大的控制量而违反控制约束, 而且需要较长过渡时间才能镇定不确定系统, 不利于系统安全平稳运行.

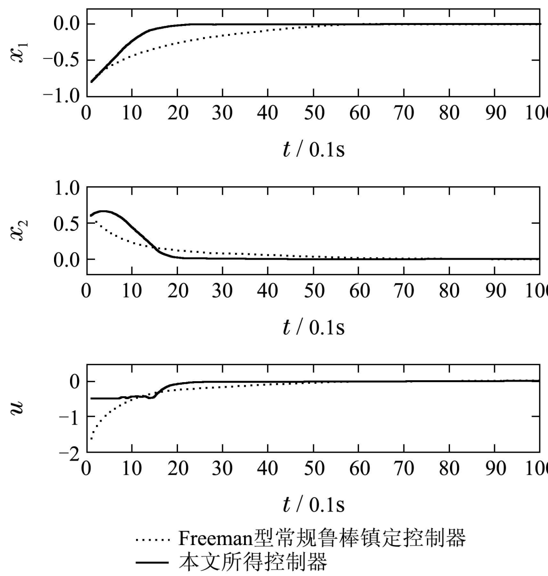

图 1　A点闭环状态轨迹和控制曲线

Fig. 1　Closed-loop state trajectories and control profiles of A

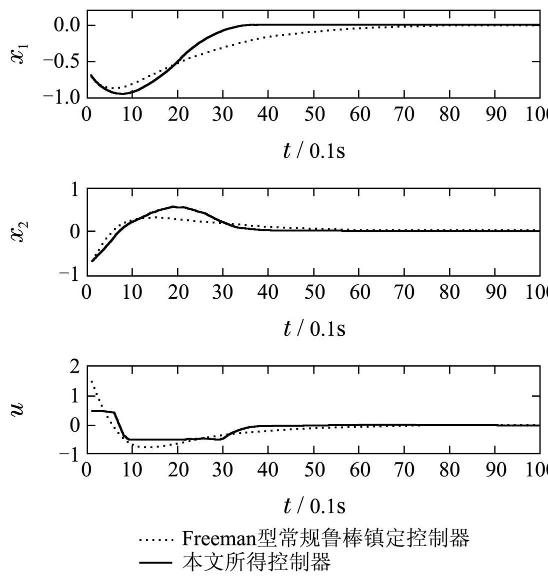

图 2　B点闭环状态轨迹和控制曲线

Fig. 2　Closed-loop state trajectories and control profiles of B

进一步, 为验证优化控制器$u^{\mathrm{op}}(x)$的鲁棒扇形裕度$(0.5, \infty)$, 考虑交流电源对系统的影响. 令参数不确定性$\theta_1(t)$和控制器增益扰动$\theta_2(t)$为

$$\theta_1(t) = 0.5\sin(0.1t),\ \theta_2(t) = 0.5 + |\sin(t)|. \tag{12}$$

再以A点为初始条件, 在相同仿真环境下其结果如图3所示, 其中点线为常规鲁棒镇定控制器的仿真结果, 实线为本文所得控制器的仿真结果. 从图3可以看出, 在参数不确定性$\theta_1(t)$和控制器增益扰动$\theta_2(t)$同步作用时, 本文所得优化控制器同样能快速地镇定系统(11), 且控制输入和闭环状态都满足系统约束, 从而进一步验证了本文结果的可行性和有效性.

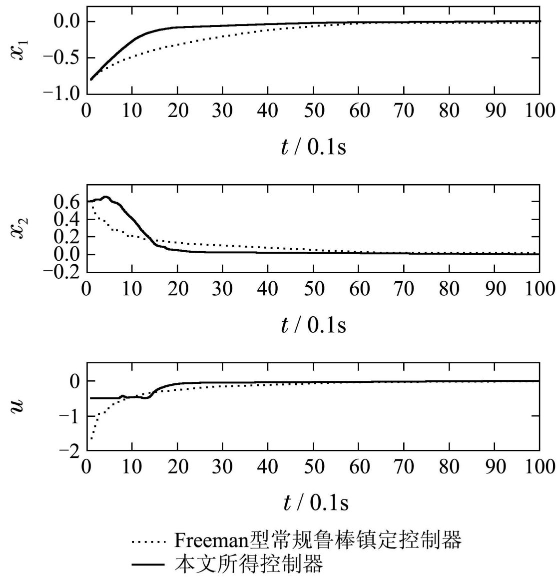

图 3 A点闭环状态轨迹和控制曲线

Fig. 3 Closed-loop state trajectories and control profiles of A

5 结论(Conclusions)

针对约束不确定非线性仿射系统, 本文利用弱鲁棒控制Lyapunov函数设计了一种具有闭环系统鲁棒稳定的优化控制器. 利用LaSalle定理和逆优化理论, 建立了控制器的鲁棒镇定性和逆最优性结论. 进一步, 考虑约束和给定性能指标, 结合滚动优化原理在线计算控制器参数, 实现了闭环系统的约束满足和控制器的优化镇定. 最后以开环不稳定的振荡器控制为例, 通过与常规鲁棒镇定控制器的对比研究, 验证了本文结果的优越性.

参考文献(References):

[1] ZHOU K M, DOYLE J C, GLOVER K. *Robust and Optimal Control* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.

[2] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
(YU Li. *Robust Control–Linear Matrix Inequality Approach* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)

[3] KADAM J V, MARQUARDT W, SRINIVASAN B, et al. Optimal grade transition in industrial polymerization processes via NCO tracking [J]. *AIChE Journal*, 2007, 53(3): 627 – 140.

[4] 何德峰, 邹涛, 俞立. 大型聚丙烯生产装置牌号切换滚动时域控制 [J]. 化工学报, 2010, 61(2): 405 – 412.
(HE Defeng, ZOU Tao, YU Li. Receding horizon control for grade transition of large-scale polypropylene production plants [J]. *CIESC Journal*, 2010, 61(2): 405 – 412.)

[5] JIANG Z P, MAREELS I M Y. New trends in nonlinear control [J]. *Systems & Control Letters*, 2006, 55(8): 623 – 623.

[6] BELMILOUDI A. *Stabilization, Optimal and Robust Control* [M]. London: Springer, 2008.

[7] SONTAG E D. A universal construction of Artstein's theorem on nonlinear stabilization [J]. *Systems & Control Letters*, 1989, 13(2): 117 – 123.

[8] KOKOTOVIC P V, ARCAK M. Constructive nonlinear control: a historical perspective [J]. *Automatica*, 2001, 37(5): 637 – 662.

[9] ISIDORI A. *Nonlinear Control Systems II* [M]. Berlin: Springer, 1999.

[10] 陈少白, 谭光兴, 毛宗源. 非线性仿射控制系统的C^0镇定性 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(6): 1005 – 1008.
(CHEN Shaobai, TAN Guangxing, MAO Zongyuan. C^0-stabilizability of nonlinear control-affine systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(6): 1005 – 1008.)

[11] YE H W, DAI G Z, WANG H. The application of the control Lyapunov function to stabilization designs [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(3): 430 – 435.

[12] 杨国诗, 何德峰, 季海波. 约束Sontag型控制器的滚动优化设计 [J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(2): 210 – 215.
(YANG Guoshi, HE Defeng, JI Haibo. Receding optimal design of constrained sontag-type controllers [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2010, 40(2): 210 – 215.)

[13] HE D F, YU L, SONG X L. Optimized-based stabilization of constrained nonlinear systems: a receding horizon approach [C] //*Proceedings of the 18th International Federation of Automatic Control (IFAC) World Congress*. Milano, Italy: IFAC, 2011: 4904 – 4908.

[14] FREEMAN R A, KOKOTOVIC P V. *Robust Nonlinear Control Design: State-Space and Lyapunov Techniques* [M]. Boston: Birkhauser, 1996.

[15] EL-FARRA N H, CHRISTOFIDES P D. Bounded robust control of constrained multivariable nonlinear processes [J]. *Chemical Engineering Sciences*, 2003, 58(13): 3025 – 3047.

[16] KHALIL H K. *Nonlinear Systems* [M]. 3rd Edition. New York: Prentice Hall, 2002.

[17] SEPULCHRE R, JANKOVIC M, KOKOTOVIC P V. *Constructive Nonlinear Control* [M]. London: Springer, 1997.

[18] KWON W H, HAN S. *Receding Horizon Control: Model Predictive Control for State Models* [M]. London: Springer, 2005.

[19] BLANCHINI F. Set invariance in control [J]. *Automatica*, 1999, 35(11): 1747 – 1767.

[20] YUAN Y X, SUN W Y. *Theory and Methods of Optimization* [M]. Beijing: Science Press, 2007.

[21] XUAN G N, CHEN R W. *Genetic Algorithms and Engineering Optimization* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

作者简介:

何德峰 (1979–), 男, 博士, 副教授, 目前研究方向为非线性预测控制与鲁棒控制等, E-mail: hdfzj@zjut.edu.cn;

宋秀兰 (1982–), 女, 博士研究生, 目前研究方向为智能电网储能优化与非线性控制, E-mail: songxl2008@zjut.edu.cn;

俞 立 (1961–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为鲁棒控制与网络化控制等, E-mail: lyu@zjut.edu.cn.