

文章编号: 1001-0920(2005)04-0366-06

带有持续扰动非线性系统的前馈-反馈最优控制

唐功友, 高德欣

(中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266071)

摘 要: 研究具有外界持续扰动作用下非线性系统的最优控制问题, 提出了一种设计前馈—反馈最优控制器的逐次逼近算法. 利用该算法可将扰动作用下的非线性系统的最优控制问题转化为求解线性非齐次两点边值序列的问题. 得到的最优控制律由解析的线性前馈—反馈项和伴随向量序列极限形式的非线性补偿项组成. 通过截取非线性补偿序列的有限项, 可得到前馈—反馈次优控制律. 仿真结果表明, 该方法抑制外部持续扰动的鲁棒性优于经典反馈最优控制.

关键词: 非线性系统; 持续扰动; 前馈—反馈最优控制; 逐次逼近法

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Feedforward and feedback optimal control for nonlinear systems with persistent disturbances

TANG Gong-you, GAO De-xin

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266071, China
Correspondent: TANG Gong-you, E-mail: gtang@ouc.edu.cn)

Abstract: The optimal control problem is considered for nonlinear systems affected by external persistent disturbances. A successive approximation algorithm of designing feedforward and feedback optimal controllers is developed. By using the successive approximation approach, the original optimal control problem is transformed into a sequence of nonhomogeneous linear two-point boundary value (TPBV) problems. The obtained optimal control law consists of analytical linear feedforward and feedback terms and a nonlinear compensation term which is the limit of the adjoint vector sequence. By using the finite-step iteration of nonlinear compensation sequence, a feedforward and feedback suboptimal control law is obtained. Simulations show the result is more robust with respect to external persistent disturbances than the classical feedback optimal control.

Key words: nonlinear systems; persistent disturbances; feedforward and feedback optimal control; successive approximation approach

1 引 言

控制系统普遍具有非线性特性,且通常会受到外部扰动的影响.在带有扰动的系统最优控制中,正弦扰动和周期扰动^[1-3]系统的减振最优控制受到了人们的关注.实际上,控制系统的性能往往受到各种复杂外在扰动的影响,如:海洋平台振动的实时控制系统中,海洋结构物承受风力或海浪力的扰动^[4];飞机飞行姿态控制系统中,机翼承受风剪应力的扰

动^[5]等.因此,研究一般意义的外部扰动作用下的系统最优控制问题,具有重要的理论及应用价值.

一般非线性系统最优控制问题的解析解不存在,所以其近似解法受到人们的重视.在非线性的最优控制问题的近似解方面,具有代表性的方法包括 Galerkin 逐次逼近法^[6]和级数展开法^[7-9]. Galerkin 逐次逼近法利用迭代过程寻求非线性 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程的逼近解序列

收稿日期: 2004-06-14; 修回日期: 2004-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(60074001); 山东省自然科学基金项目(Y2000G02).

作者简介: 唐功友(1953—),男,山东烟台人,教授,博士生导师,从事非线性系统、时滞系统等研究;高德欣(1978—),男,山东烟台人,博士生,从事非线性控制理论与应用、计算机控制的研究.

级数展开法直接利用级数展开或引进灵敏度参数将系统变量在其原点邻域内展开级数, 由此寻求 HJB 方程或非线性两点边值问题(TPBV)的级数近似解. 这些方法都是针对最优控制的初值问题寻求非线性系统最优控制的近似算法, 而未考虑外部扰动对系统的影响

本文针对含有已知动态特性的外部扰动的非线性系统, 提出一种最优控制的逐次逼近算法. 首先, 给出带有外部持续扰动的非线性系统模型, 并对最优控制问题进行描述; 其次, 构造其解收敛于原系统的系统序列, 将系统的最优控制问题转化为由精确线性项和非线性补偿项组成的两点边值问题族, 并得到前馈-反馈最优控制律的逐次逼近算法; 最后, 通过截取最优控制序列解的有限项, 得到系统的前馈-反馈最优控制律及其设计算法

2 问题描述

考虑下列带有持续扰动的非线性系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + f(x) + Dw(t), \\ t_0 &< t < t_f; \\ x(t_0) &= x_0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x \in R^n$ 为状态向量; $u \in R^r$ 为控制向量; $w \in R^m$ 为外部干扰向量; A, B 和 D 为适当维数的常量矩阵; (A, B) 为完全能控的. 假设 $f(x)$ 满足下列条件:

$$\begin{aligned} f(x) &= \alpha \hat{x}, \\ f(x) - f(\hat{x}) &= \beta (x - \hat{x}), \\ \forall x, \hat{x} &\in R^n. \end{aligned} \quad (2)$$

其中 α 和 β 为正常数. 假设外部干扰 w 的动态特性可描述为下列外系统:

$$\dot{w}(t) = Gw(t), t > t_0 \quad (3)$$

其中: $w \in R^m, G$ 为已知适当维数的常量矩阵. 假设:

- 1) 矩阵 G 的所有特征值满足 $\text{Re}[\lambda(G)] < 0, i = 1, 2, \dots, m;$ (4)

且 G 的最小多项式在虚轴上的根为单根;

- 2) 外系统(3)的初始条件是未知的

注 1 由外系统(3)描述的外部扰动是持续扰动的一般形式. 例如: 当矩阵 G 的特征值为共轭纯虚根时, 外系统(3)表示一类已知振荡频率, 但未知幅值和初相角的正弦扰动; 当 G 的特征值全为互异单位特征根时, 外系统(3)表示的扰动为周期扰动. 选择不同的 G , 外系统(3)可描述各种不同的持续扰动. 所以说, 具有形如外系统(3)的外部扰动是正弦扰动、周期扰动及各类持续扰动的推广.

选取如下形式的二次型平均性能指标:

$$J = \frac{1}{2} [x^T(t_f)Q_f x(t_f) +$$

$$\int_{t_0}^{t_f} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt] \quad (5)$$

其中: $Q, Q_f \in R^{n \times n}$ 为半正定对称矩阵, $R \in R^{r \times r}$ 为正定对称矩阵. 目的是寻找最优控制 $u^*(t)$ 使 J 在约束(1)下取最小值.

根据极大值原理, 系统(1)关于式(5)的最优控制律为

$$u(t) = -R^{-1}B^T\lambda(t). \quad (6)$$

其中 $\lambda(t)$ 为下面非齐次两点边值问题的解:

$$\begin{aligned} -\dot{\lambda}(t) &= Qx(t) + A^T\lambda(t) + f_x^T(x)\lambda(t), \\ \dot{x}(t) &= Ax(t) - S\lambda(t) + f(x) + Dw(t), \\ t_0 &< t < t_f; \\ x(t_0) &= x_0, \lambda(t_f) = Q_f x(t_f). \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $S = BR^{-1}B^T, f_x^T(x) = \partial^T f(x)/\partial x$. 因为求非齐次两点边值问题(7)的解析解非常困难, 所以本文采用逐次逼近法求解该问题. 下面首先给出两个引理.

3 预备引理

对于系统(1), 若选择有限时域的前馈-反馈控制律

$$u(t) = -K(t)x(t) + g(x, w, t), \quad t_0 < t < t_f. \quad (8)$$

其中: $g \in C^1[t_0, t_f]: (R^n \times R^m) \rightarrow R^n, K(t)$ 为适当维数的有界时变矩阵, 则式(1)的闭环系统可描述为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \bar{A}(t)x(t) + f(x, w, t), t_0 < t < t_f; \\ x(t_0) &= x_0 \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $\bar{A}(t) = A - BK(t), f(x, w, t) = Bg(x, w, t) + Dw(t)$ 满足 Lipschitz 条件, $f(0, 0, t) = 0$. 定义向量函数序列 $\{x^{(k)}(t)\}$ 为

$$\begin{aligned} x^{(0)}(t) &= \Phi(t, t_0)x_0, t > t_0; \\ x^{(k)}(t) &= \Phi(t, t_0)x_0 + \\ &\int_{t_0}^t [\Phi(t, r)f(x^{(k-1)}(r), w(r), r)] dr, \\ t_0 &< t < t_f; \\ x^{(k)}(t_0) &= x_0; k = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (10)$$

其中 Φ 为系统(9)对应于矩阵 $\bar{A}(t)$ 的状态转移矩阵.

引理 1 函数向量序列(10)一致收敛于系统(9)的解.

证明 将 $\{x^{(k)}(t)\}$ 看作 $C^N[t_0, t_f]$ 的一个序列, 由序列(10)得

$$x^{(1)}(t) - x^{(0)}(t) = \int_{t_0}^t \Phi(t, r)f(x^{(0)}(r), w(r), r) dr, \quad t_0 < t < t_f. \quad (11)$$

令

$$\begin{aligned} \sup_{t_0}^{t_f} \Phi(t, t_0) &= M, \quad x_0 = \mathcal{Y}, \\ \sup_{t_0}^{t_f} f(x, w, t) &\leq \alpha x, \\ \sup_{t_0}^{t_f} f(x, w, t) - f(\hat{x}, w, t) &\leq \beta |x - \hat{x}|. \end{aligned}$$

为了方便, 选择矩阵范数, 使得 $\Phi(t_0, t_0) = I = 1$. 从而保证了 $M \geq 1$. 由式(11)得

$$x^{(1)}(t) - x^{(0)}(t) \leq M \int_{t_0}^t \alpha |x^{(0)}(r)| dr + M^2 \alpha \mathcal{Y}(t - t_0). \quad (12)$$

又由式(10)得

$$\begin{aligned} x^{(2)}(t) - x^{(1)}(t) &= \int_{t_0}^t \Phi(t, r) [f(x^{(1)}(r), w(r), r) - f(x^{(0)}(r), w(r), r)] dr. \end{aligned} \quad (13)$$

从而有

$$\begin{aligned} x^{(2)}(t) - x^{(1)}(t) &\leq M \int_{t_0}^t [f(x^{(1)}, w, r) - f(x^{(0)}, w, r)] dr \\ &\leq \beta M \int_{t_0}^t |x^{(1)}(r) - x^{(0)}(r)| dr \\ &\leq M^3 \alpha \beta \mathcal{Y} \frac{(t - t_0)^2}{2!}. \end{aligned} \quad (14)$$

归纳可得

$$\begin{aligned} x^{(k)}(t) - x^{(k-1)}(t) &\leq M^{k+1} \alpha \beta^{k-1} \mathcal{Y} \frac{(t - t_0)^k}{k!}. \end{aligned} \quad (15)$$

由三角不等式知, 对任意的 j 和 k 有

$$\begin{aligned} |x^{(k-j)}(t) - x^{(k)}(t)| &\leq \sum_{i=k+1}^{k+j} M^{i+1} \alpha \beta^{i-1} \mathcal{Y} \frac{(t - t_0)^i}{i!} \\ &\leq \frac{M^{k+2} \alpha \beta^k \mathcal{Y} (t - t_0)^{k+1}}{(k+1)!} \exp(M \beta (t - t_0)). \end{aligned} \quad (16)$$

因式(16)满足

$$\lim_k |x^{(k-j)}(t) - x^{(k)}(t)| = 0, \quad \forall j > 0, \quad (17)$$

所以 $\{x^{(k)}(t)\}$ 是 $C^N[t_0, t_f]$ 中的 Cauchy 序列, 且该序列为一致收敛. 因 j 是任意的, 故该序列的极限是系统(9)的解.

引理 2^[10] 设 $A_1 \in R^{n \times n}, B_1 \in R^{m \times m}, C_1 \in R^{n \times m}, X \in R^{n \times m}$, 则矩阵方程

$$A_1 X + X B_1 = -C_1 \quad (18)$$

的解 X 存在且唯一的充要条件是

$$\begin{aligned} \lambda(A_1) \cup \lambda(B_1) &\neq 0, \\ i &= 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $\lambda(\cdot)$ 为矩阵的特征值

4 有限时域最优控制律设计

为了利用逐次逼近法求解两点边值问题(7),

令

$$\dot{\lambda}(t) = P(t)x(t) + \bar{P}(t)w(t) + g(t). \quad (20)$$

其中 $P(t)$ 是 Riccati 矩阵方程

$$\begin{aligned} -\dot{P}(t) &= P(t)A + A^T P(t) - P(t)S P(t) + Q, \\ P(t_f) &= Q_f \end{aligned} \quad (21)$$

的唯一半正定解; $\bar{P}(t)$ 是矩阵微分方程

$$\begin{aligned} -\dot{\bar{P}}(t) &= [A - S P(t)]^T \bar{P}(t) + \bar{P}(t)G + P(t)D, \\ \bar{P}(t_f) &= 0 \end{aligned} \quad (22)$$

的唯一解; $g(t) \in R^n$ 为待求的共态向量. 将式(20)~(22)代入(7), 可得

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= [P(t)S - A^T - f_x^T(x)]g(t) - P(t)f(x) - f_x^T(x)P(t)[x(t) + w(t)], \end{aligned} \quad (23a)$$

$$\dot{x}(t) = [A - S P(t)]x(t) + [D - S \bar{P}(t)]w(t) - S g(t) + f(x). \quad (23b)$$

边界条件为

$$g(t_f) = 0, x(t_0) = x_0 \quad (23c)$$

最优控制律为

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T [P(t)x(t) + \bar{P}(t)w(t) + g(t)] \quad (24)$$

为求解式(23)和(24), 构造如下共态向量族 $\{g^{(k)}(t)\}$:

$$\begin{aligned} g^{(0)}(t) &= 0, \\ g^{(k)}(t) &= [P(t)S - A^T - Y^{(k-1)}]g^{(k)}(t) - P(t)f(x^{(k-1)}) - Y^{(k-1)}P(t)x^{(k-1)}(t) - Y^{(k-1)}P(t)w(t), \\ g^{(k)}(t_f) &= 0, \quad k = 1, 2, \dots; \end{aligned} \quad (25)$$

状态向量族 $\{x^{(k)}(t)\}$

$$\begin{aligned} x^{(0)}(t) &= 0, \\ x^{(k)}(t) &= [A - S P(t)]x^{(k)}(t) + [D - S \bar{P}(t)]w(t) - S g^{(k)}(t) + f(x^{(k-1)}), \\ x^{(k)}(t_0) &= x_0, \quad k = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (26)$$

其中 $Y^{(k)} = \hat{q}^T(x^{(k)})/\hat{\alpha}^{(k)}$, 其相应最优控制序列 $\{u^{(k)}(t)\}$ 为

$$\begin{aligned} u^{(k)}(t) &= -R^{-1}B^T [P(t)x^{(k)}(t) + \bar{P}(t)w(t) + g^{(k)}(t)], \quad k = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (27)$$

对于第 k 次的最优控制问题, 记最优状态轨线和最优控制律分别为 $x^{(k)}(t)$ 和 $u^{(k)}(t)$, 并给出下面定理

定理 1 设 $\{x^{(k)}(t)\}$ 和 $\{u^{(k)}(t)\}$ 分别为式(26)

和 (27) 的解序列, 则 $\{x^{(k)}(t)\}$ 和 $\{u^{(k)}(t)\}$ 分别一致收敛到系统 (1) 关于性能指标 (5) 的最优状态轨线 $x^*(t)$ 和最优控制律 $u^*(t)$.

证明 由假设 (4) 知 $w(t)$ 有界, 在序列 $\{x^{(k)}(t)\}$ 和 $\{u^{(k)}(t)\}$ 中可认为 $w(t)$ 是常量 根据引理 1, 共态向量族 $\{g^{(k)}(t)\}$ 和状态向量族 $\{x^{(k)}(t)\}$ 分别一致收敛到式 (26) 和 (27), 即

$$\lim_k g^{(k)}(t) = g(t), \lim_k x^{(k)}(t) = x(t). \quad (28)$$

由式 (27) 知, 控制序列 $\{u^{(k)}(t)\}$ 仅关联 $\{x^{(k)}(t)\}$ 和 $\{g^{(k)}(t)\}$, 因此, $\{u^{(k)}(t)\}$ 一致收敛到最优控制律 $u^*(t)$, 即

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T \lim_k [P(t)x^{(k)}(t) + \bar{P}(t)w(t) + g^{(k)}(t)] = -R^{-1}B^T [P(t)x(t) + \bar{P}(t)w(t) + \lim_k g^{(k)}(t)] \quad (29)$$

由此, 定理 1 得证

注 2 注意到式 (25) 中, $P(t), x^{(k-1)}, f(x^{(k-1)})$ 和 $Y^{(k-1)}$ 都是已知函数, 所以方程 (25) 是一个非齐次线性向量微分方程, 通过反向积分可解出 $g^{(k)}(t)$, 从而得到第 k 次逼近的最优控制 事实上, 当 k 时, 该问题的解是无法求得的 在实际应用中可取 $k = N$, 即将第 N 次的结果近似为该问题的解, 从而得到 N 阶前馈 - 反馈次优控制律

$$u_N(t) = -R^{-1}B^T [P(t)x(t) + \bar{P}(t)w(t) + g^{(N)}(t)] \quad (30)$$

注 3 在实际的次优控制器设计中, 只需解一次方程 (21) 和方程 (22). 因此在次优控制律 (30) 中, 线性最优控制部分的计算是精确的, 只有 $g^{(N)}(t)$ 是近似的, 用于补偿系统中非线性部分

5 无限时域最优控制律设计

对于系统 (1) 的最优控制问题, 也可以类似讨论无限时域的情形 ($N \rightarrow \infty$). 当矩阵 G 至少有一个特征值在虚轴上时, 持续外部扰动 w 将趋向于等幅振荡, 其状态向量 x 和控制向量 u 至少有一个不趋于零 如果选择通常的无限时域二次型性能指标, 其性能指标函数是不收敛的 因此, 可选取下列二次型平均性能指标:

$$J = \lim_T \frac{1}{T} \int_0^T (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (31)$$

而对于外系统 (3) 为渐近稳定的情况, 可选取常规的无限时域二次型性能指标

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (32)$$

当性能指标为式 (31) 和 (32) 时, 其最优控制的推导过程和形式是一样的

在 (A, B) 能控和 $(A, Q^{1/2})$ 能观测的假设条件下, 前馈 - 反馈最优控制律和相应的次优控制律分别为

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T [Px(t) + \bar{P}w(t) + g^{(*)}(t)], \quad (33)$$

$$u_N(t) = -R^{-1}B^T [Px(t) + \bar{P}w(t) + g^{(N)}(t)] \quad (34)$$

其中 P 为 Riccati 矩阵方程

$$A^T P + PA - PSP + Q = 0 \quad (35)$$

的唯一正定解; \bar{P} 为矩阵方程

$$(A - SP)^T \bar{P} + \bar{P}G = -PD \quad (36)$$

的唯一解 根据引理 2, 方程 (36) 的解存在且唯一.

$g^{(k)}(t)$ 由下式决定:

$$\begin{aligned} g^{(0)}(t) &= 0, \\ g^{(k)}(t) &= (PS - A^T - Y^{(k-1)})g^{(k)}(t) - Pf(x^{(k-1)}) - Y^{(k-1)}Px^{(k-1)}(t) - Y^{(k-1)}Pw(t), \\ g^{(k)}(t) &= 0, k = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (37)$$

$x^{(k)}(t)$ 满足

$$\begin{aligned} x^{(0)}(t) &= 0, \\ \dot{x}^{(k)}(t) &= (A - SP)x^{(k)}(t) + (D - S\bar{P})w(t) - Sg^{(k)}(t) + f(x^{(k-1)}), \\ x^{(k)}(t_0) &= x_0, k = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (38)$$

注 4 在次优控制器的实际设计中, 次优控制律 (34) 的计算过程和 N 的确定方法与次优控制律 (30) 的算法类似

前馈 - 反馈最优控制律算法总结如下:

Step 1: 由方程 (21) 和 (22) 分别求得 $P(t)$ 和 $\bar{P}(t)$; 令 $x^{(0)}(t) = g^{(0)}(t) = 0, J_0 = 0, k = 1$; 并给定 $\epsilon > 0$

Step 2: 由式 (25) 计算 $g^{(k)}(t)$.

Step 3: 令 $N = k$, 由式 (30) 计算 $u_N(t)$.

Step 4: 由式 (5) 计算 J_N .

Step 5: 若 $|(J_{N-1} - J_N)/J_N| < \epsilon$, 则输出 $u_N(t)$, 结束

Step 6: 由式 (26) 计算 $x^{(k)}(t)$, 令 $k = k + 1$, 转

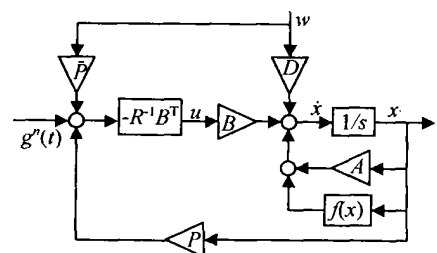


图 1 系统结构

Step2

由此得到的控制系统是半闭环半开环的, 系统结构如图1所示

6 仿真示例

考虑如下带持续干扰的非线性系统:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 5x_1x_2 \\ 0 & 3x_2^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + w(t),$$

$$x(0) = [0 \ 0]^T. \tag{39}$$

扰动方程的初始状态为 $w(0) = [1 \ 0]^T$, 选择 $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $R = 1$.

1) 设 $G = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$, 其特征值为 $\lambda_{1,2} = \pm i$ 此时, $w(t)$ 表示稳定但非渐近稳定情形的扰动, 取二次型平均性能指标

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (x_1^2 + u^2) dt \tag{40}$$

由仿真计算可得, 采用传统的反馈最优控制计算的性能指标 $J = 5.6423$; 采用本文方法得到的前馈-反馈最优控制律计算, 当 $N = 1, 2, \dots, 4$ 时的性能指标分别为 $J_1 = 0.7778, J_2 = 0.7642, J_3 = 0.7635, J_4 = 0.7634$ 若给定 $\epsilon = 0.001$, 则有 $|(J_2 - J_3)/J_3| < \epsilon$ 那么 $u_3(t)$ 可作为系统(39)关于性能指标(40)的前馈-反馈最优控制律 图2给出了反馈最优控制律和前馈-反馈最优控制律在 $N = 3$ 时的控制量 $u_3(t)$ 以及对应的状态变量 $x_1(t)$ 的仿真

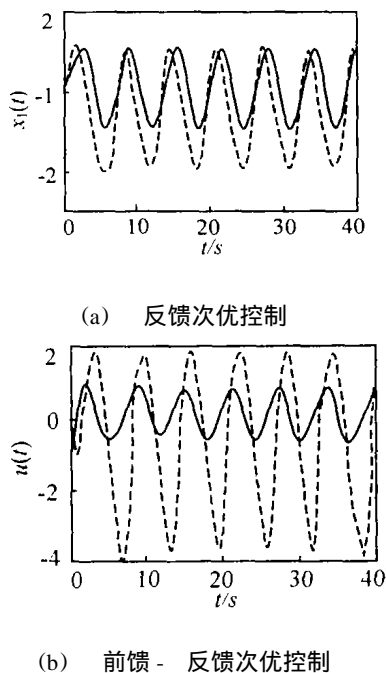


图2 外系统(3)稳定时的仿真曲线

结果

2) 设 $G = \begin{bmatrix} -0 & 1 & 1 \\ -1 & - & 0 & 2 \end{bmatrix}$ 时, 其特征值为 $\lambda_{1,2} = -2 \pm i$, 此时, $w(t)$ 表示渐近稳定情形的扰动, 取无限时域二次型性能指标

$$J = \int_0^{\infty} (x_1^2 + u^2) dt \tag{41}$$

由仿真计算得到, 采用传统的反馈最优控制计算的性能指标 $J = 14.8847$; 采用本文的方法得到的前馈-反馈最优控制律计算, 当 $N = 1, 2, \dots, 4$ 时的性能指标分别为 $J_1 = 5.2327, J_2 = 5.2165, J_3 = 5.2160, J_4 = 5.2160$ 若给定 $\epsilon = 0.001$, 则有 $|(J_2 - J_3)/J_3| < \epsilon$ 那么 $u_3(t)$ 可作为系统(39)关于性能指标(41)的前馈-反馈最优控制律 图3给出了反馈最优控制律和前馈-反馈最优控制律在 $N = 3$ 时的控制量 $u_3(t)$ 以及对应的状态变量 $x_1(t)$ 的仿真结果

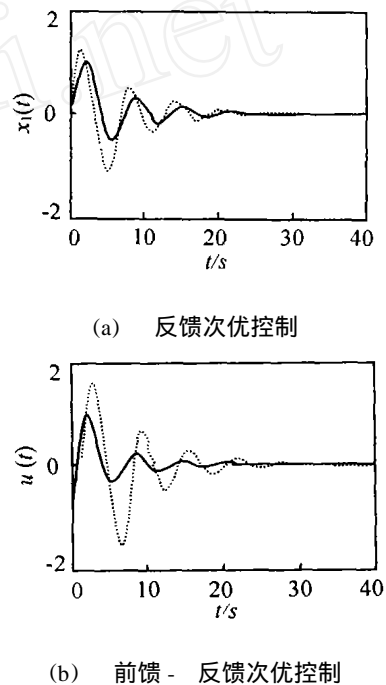


图3 外系统(3)渐近稳定时的仿真曲线

从计算结果和仿真曲线可以看出, N 取值越大, 性能指标 J 越小, 系统性能越好. 本文构造的前馈-反馈最优控制器对外部的持续动态扰动具有更好的抑制作用, 比经典的反馈最优控制具有更好的鲁棒性

7 结论

本文研究非线性系统在外部持续干扰作用下的最优控制问题, 提出了一种前馈-反馈最优控制器的逐次逼近算法. 与经典的反馈最优控制相比, 本文设计的前馈-反馈最优控制器对外部持续扰动抑制效率更高, 具有更好的鲁棒性, 且容易实现

参考文献(References)

- [1] Lindquist A, Yakubovich V A. Optimal damping of forced oscillations in discrete-time systems [J]. *IEEE Trans Automatic Control*, 1997, 42(6): 786-802
- [2] Tang G Y. Feedforward and feedback optimal control for linear systems with sinusoidal disturbances [J]. *High Technology Letters*, 2001, 17: 16-19
- [3] 唐功友, 赵艳东, 陈显利. 带正弦干扰的线性时滞系统的次优控制[J]. *控制与决策*, 2004, 19(5): 529-533
(Tang G Y, Zhao Y D, Chen X L. Suboptimal control for time-delay linear systems under sinusoidal disturbances [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(5): 529-533)
- [4] Li H, Hu S J, Cheng Z. Multiple-step predictive control for offshore structure [J]. *China Ocean Engineering*, 1999, 13: 231-246
- [5] Mile A. Optimal trajectories and guidance trajectories for aircraft flight through wind shears [A]. *Proc 29th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Hawaii, 1990: 737-746
- [6] Beard R W, Saridis G N, Wen J T. Galerkin approximation of the generalized Hamilton-Jacobi-Bellman equation [J]. *Automatica*, 1997, 33(12): 2159-2177
- [7] Chanane B. Optimal control of nonlinear systems: A recursive approach [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 1998, 35(3): 29-33
- [8] Nishikawa Y, Sannomiya N, Itakura H. A method for suboptimal design of nonlinear feedback systems [J]. *Automatica*, 1971, 7(6): 703-712
- [9] 唐功友, 曲海鹏, 高延铭. 一类非线性系统次优控制的灵敏度法 [J]. *青岛海洋大学学报*, 2002, 32(4): 615-620
(Tang G Y, Qu H P, Gao Y M. Sensitivity approach of suboptimal control for a class of nonlinear systems [J]. *J Ocean University Qingdao*, 2002, 32(4): 615-620)
- [10] Lancaster P, Lerer L, Tismenetsky M. Factored forms for solutions of $AX - XB = C$ and $X^T A X B = C$ in companion matrices [J]. *Linear Algebra and Its Applications*, 1984, 62(3): 19-49
- (上接第 365 页)
- [18] Higuchi T. Monte Carlo filtering using genetics algorithm operator [J]. *J of Statistical Computation and Simulation*, 1997, 59(1): 1-23
- [19] Mo Y W, Xiao D Y. Hybrid system monitoring and diagnosing based on particle filter algorithm [J]. *Acta Automation Sinica*, 2003, 29(3): 641-648
- [20] Fox D. Adapting the sample size in particle filters through KLD-sampling [R]. Washington: University of Washington, 2003: 1-27
- [21] Doucet A, Gordon N. *Sequential Monte Carlo methods in practice* [M]. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [22] Julier S J, Uhlmann J K. A new method for the nonlinear transformation of means and covariance in filters and estimators [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(3): 477-482
- [23] Wan E A, VanderMerwe R. The unscented Kalman filter for nonlinear estimation [J]. *Proc of Signal Processing*, 2000, 3(1): 153-158
- [24] Doucet A, Davy M. Particle filtering for multi-target tracking and sensor management [A]. *The 5th Int Conf on Information Fusion* [C]. Annapolis, 2002: 474-481.
- [25] Hue C, Cadre J, Perez P. Sequential Monte Carlo methods for multiple target tracking and data fusion [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2002, 50(2): 309-325
- [26] Storvik G. Particle filters for state-space models with the presence of unknown static parameters [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2002, 50(2): 281-289
- [27] Chib S, Nardari F, Shephard N. Markov chain Monte Carlo methods for stochastic volatility models [J]. *J of Econometrics*, 2002, 8(1): 281-316
- [28] Papavasiliou A. Adaptive particle filters with applications [R]. Princeton: University of Princeton, 2002
- [29] Heinrich A. Applications of statistical bootstrapping in finance [R]. Oxford: University of Oxford, 2000
- [30] Isard M, Blake A. Condensation-conditional density propagation for visual tracking [J]. *J of Computer Vision*, 1998, 29(1): 5-28
- [31] Isard M, Blake A. Condensation: Unifying low-level and high-level tracking in a stochastic framework [A]. *Proc of the Fifth European Conf on Computer Vision* [C]. Berlin, 1998: 893-908
- [32] Maccormick J, Maccormick F. *Stochastic algorithms for visual tracking* [M]. Paris: Telos Press, 2003
- [33] Morales R, Poole D. Real-time monitoring of complex industrial processes with particle filters [R]. Orlando: University of British Columbia, 2003
- [34] Karlsson R, Jansson J. Model-based statistical tracking and decision making for collision avoidance application [R]. Volvo Car/Control & Communication Active Safety, 2003: 1-6
- [35] Vaswani N, Chellappa R. A particle filtering approach to abnormality detection in nonlinear systems and its application to abnormal activity detection [R]. Maryland: University of Maryland, 2003