

文章编号: 1001-0920(2005)10-1189-04

均方可镇定系统的随机状态反馈控制策略

王帅宇, 张宇河

(北京理工大学 自动控制系, 北京 100081)

摘 要: 提出网络控制系统随机最优控制律中随机 Riccati 方程在一定条件下存在稳态解 给出了稳态解存在的条件, 并在此基础上提出了均方可镇定系统的随机状态反馈控制策略 该方法在保持控制性能的基础上, 减小了控制律的复杂性, 具有实际应用价值

关键词: 网络控制系统; 网络诱导延时; 随机状态反馈控制; 均方可镇定

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Stochastic State Feedback Control Strategy of Mean Square Stabilizable Systems

WANG Shuai-yu, ZHANG Yu-he

(Department of Automatic Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China Correspondent: WANG shuai-yu, E-mail: wangshuaiyu@bit.edu.cn)

Abstract: The existence of the steady solution of the stochastic Riccati equation in the stochastic optimal control of networked control systems is proposed and proved. The stochastic state feedback control strategy of the mean square stabilizable systems is given based on the existence condition. The proposed method that can obtain better response and reduce the complexity of algorithm has practical application values.

Key words: Networked control systems; Network-induced delay; Stochastic state feedback control; Mean square stabilizable

1 引 言

通过网络形成闭环的反馈控制系统称为网络控制系统(NCS), 其主要优点是可以实现资源共享, 具有高诊断能力, 安装与维护简单以及增加了系统的灵活性和可靠性^[1,2].

研究网络控制系统的目的是希望能够利用其上述优势, 但将通讯网络引入控制系统使分析和设计变得非常困难. 在已有网络条件下, 如何设计NCS工作方式和控制器使得系统在保证稳定性的基础上提高控制性能, 达到满意的控制效果是NCS研究的重要内容之一. 目前, NCS 控制器的设计主要有确定性和随机控制两种方法. 文献[3]考虑了具有连续时间对象和离散时间控制器的网络控制系统, 系统采用增广状态空间法表示, 从而得到一个有限维的

时变离散时间模型. 但该方法仅适用于周期时延的网络系统. 文献[4]提出一种随机调节器的设计方法, 采用随机最优控制理论和动态规划理论, 得到了LQR 问题的最优状态反馈控制律, 但该方法中控制器采用时间驱动方法, 传感器信息得不到及时利用. 为此, 文献[5]中的控制器采用了事件驱动的方法, 但所得到的控制律太复杂, 每一步控制量的求取涉及到后向随机 Riccati 方程及大量数学期望的计算, 这便为其实现带来一定的困难, 制约了该方法的实际应用.

本文在文献[5]的基础上证明了开环系统在均方可镇定的条件下, 随机 Riccati 方程存在一个稳态解, 并进一步得到了NCS 随机状态反馈控制律. 所得结果大大减少了算法的计算量和计算时间, 具有

收稿日期: 2004-10-15; 修回日期: 2005-01-27.

作者简介: 王帅宇(1979-), 男, 北京人, 博士生, 从事闭环网络控制系统等研究; 张宇河(1940-), 男, 福建漳州人, 教授, 博士生导师, 从事机器人和运动控制等研究.

较高的工程应用价值

2 网络控制系统数学模型的建立

为了对闭环控制系统进行数学建模, 首先对系统作如下假设:

假设 1 传感器节点采用时间驱动, 采样周期为 T , 控制器和执行器节点采用事件驱动方式

假设 2 整个回路总的时间延迟 $\tau_k = \tau_k^c + \tau_k^a < T$, 且 $\{\tau_k\}$ 为一相互独立、具有相同概率分布、统计特性已知的随机变量序列

假设 3 控制器可以获得过去时刻的延时值, 即在 k 时刻, $\{\tau_k^c, \tau_{k-1}^c, \dots, \tau_0^c, \tau_{k-1}^a, \tau_{k-2}^a, \dots, \tau_0^a\}$ 对于控制器为已知量 实现的方法之一是为系统中传输的每个信号打上时间戳

在上述假设条件下, 可画出控制系统中各信号的时序图, 如图 1 所示

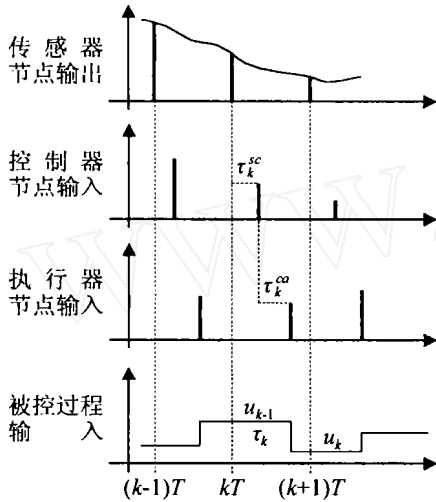


图 1 闭环网络控制系统中各信号时序图

假设被控对象的状态方程为

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gv \quad (1)$$

其中: x 为对象的被控状态, u 为对象输入, v 为白噪声 对式(1)进行离散化, 并考虑延时 τ_k 的影响, 可得系统(1)的离散时间模型为

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma_0(\tau_k^c, \tau_k^a) u_k + \Gamma_1(\tau_k^c, \tau_k^a) u_{k-1} + v_k \quad (2)$$

其中

$$\Phi = e^{AT},$$

$$\Gamma_0(\tau_k^c, \tau_k^a) = \int_0^{T-\tau_k^c-\tau_k^a} e^{A t} dt \cdot B,$$

$$\Gamma_1(\tau_k^c, \tau_k^a) = \int_0^{\tau_k^c} e^{A t} dt \cdot B,$$

$$v_k = \int_{kT}^{(k+1)T} e^{A[(k+1)T-t]} v(t) dt \cdot G,$$

$$E(v_k v_k^T) = R_1 \quad 0,$$

v_k 是均值为零, 协方差为 R_1 的不相关白噪声

3 问题的提出

本文讨论使以下性能指标极小的控制律设计:

$$J_N = x_N^T Q_N x_N + E \sum_{k=0}^{N-1} \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 Q 为对称半正定矩阵 文献[5] 给出使性能指标最小的控制律为

$$u_k = -L(\tau_k^c, S_{k+1}) \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix},$$

其中 S_{k+1} 通过后向随机 Riccati 方程获得, 即

$$S_k = E_{\tau_k^c} \{ F_1^T(\tau_k^c) Q F_1(\tau_k^c) + F_2^T(\tau_k^c) \cdot E_{\tau_k^a} \{ G^T(\tau_k^c, \tau_k^a) S_{k+1} G(\tau_k^c, \tau_k^a) \mid \tau_k^c \} \cdot F_2(\tau_k^c) \}. \quad (4)$$

其中

$$G(\tau_k^c, \tau_k^a) = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_0(\tau_k^c, \tau_k^a) & \Gamma_1(\tau_k^c, \tau_k^a) \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_1(\tau_k^c) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -L(\tau_k^c, S_{k+1}) & I \end{bmatrix},$$

$$F_2(\tau_k^c) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -L(\tau_k^c, S_{k+1}) & I \end{bmatrix}, S_N = \begin{bmatrix} Q_N & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

因为控制律中每一步迭代计算量大且复杂, 因此不适合实际工程应用 如何设计出一种具有较大工程应用价值的控制律, 使理论成果能够服务于实际应用是迫切需要解决的问题

4 准备知识

引入一增广状态向量 $z_k = \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix}$, 则原被控对象等价于下列增广对象:

$$z_{k+1} = \Psi_k z_k + \Omega_k u_k + v_k \quad (5)$$

其中

$$\Psi_k = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_1(\tau_k^c, \tau_k^a) \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Omega_k = \begin{bmatrix} \Gamma_0(\tau_k^c, \tau_k^a) \\ I \end{bmatrix}, v_k = \begin{bmatrix} v_k \\ 0 \end{bmatrix}.$$

当 $u_k = -L \cdot z_k$ 时, $z_{k+1} = (\Psi_k - \Omega_k \cdot L) z_k + v_k$, 令 $\Theta_{,k} = \Psi_k - \Omega_k \cdot L$, 则上式可表示成

$$z_{k+1} = \Theta_{,k} z_k + v_k \quad (6)$$

相应地, 性能指标(3)为

$$J_N = z_N^T Q_N z_N + E \sum_{k=0}^{N-1} [z_k^T Q z_k + u_k^T u_k] \quad (7)$$

其中: $Q_N = \begin{bmatrix} Q_N & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$

定义 1(系统均方稳定性) 对于随机参数系统, $z_{k+1} = A_k z_k + v_k$, z_k 为系统状态, v_k 为零均值白噪声, 若对任意初态 (z_0, v_0) 有 $\lim_k E \{ \|z_k\|^2 \} = 0$,

则称该系统是均方稳定的

定义 2(系统均方可镇定) 对于开环系统(5), 如果存在一状态反馈阵 L , 使得闭环系统(6) 均方稳定, 则称该系统(5) 是均方可镇定的

5 主要结果

引入线性变换 $T_L X = E\{\Theta_{,0} X \Theta_{,0}\}$, 则有下面的引理:

引理 1 线性变换 T_L 是单调的

证明 根据单调性定义直接可证

引理 2 如果开环系统(5) 均方可镇定, 则必存在 L , 使得 T_L 稳定

证明 将式(6) 代入 $E\{z_k^T z_k\} = E\{z_k^T z_k\}$, 因为 v_k 是零均值白噪声且与系统延时 τ_k^c, τ_k^d 及状态 z_k 独立, 所以有

$$E\{z_k^T z_k\} = E\{z_{k-1}^T \Theta_{,k-1} \Theta_{,k-1} z_{k-1}\} + E\{v_{k-1}^T v_{k-1}\}$$

$$E\{z_k^T z_k\} = E\{z_0^T (T_L^k I) z_0\} + E\left\{v_0^T \begin{bmatrix} T_L^{k-1} I \\ \vdots \\ T_L I \end{bmatrix} v_0\right\} \quad (8)$$

若开环系统(5) 均方可镇定, 则

$$\lim_k E\{z_k^T z_k\} = 0, \forall z_0, \forall v_0$$

根据式(8) 和初始条件的任意性可得

$$\lim_k E\{z_0^T (T_L^k I) z_0\} = 0 \quad (9)$$

且 $\lim_k E\left\{v_0^T \begin{bmatrix} T_L^{k-1} I \\ \vdots \\ T_L I \end{bmatrix} v_0\right\} = 0$ 由式(9), 并根据 z_0 的任意性可得 $\lim_k T_L^k I = 0$, 则 T_L 稳定

引理 3 式(7) 所示性能指标的最小值为

$$\min J_N = E\{z_0^T S_0 z_0\} + \sum_{k=0}^{N-1} \text{tr}(S_{k+1}^H R_1)$$

其中 S_{k+1}^H 表示矩阵 S_{k+1} 对应位置的分块

证明 利用动态规划方法可证

定理 1 假设开环系统(5) 均方可镇定, 则随机 Riccati 方程(4) 必存在稳态解, 即 $S = \lim_N S_0 |_{N, Q_N=0}$ 必存在

证明 将 $u_k = -L \cdot z_k$ (L 可取任意值) 代入性能指标(7), 由引理 2 证明可知, 当 Q_N 为零矩阵时可得

$$J_N = E\left\{z_0^T \begin{bmatrix} T_L^{N-1} (Q' + L^T Q L) \\ \vdots \\ T_L (Q' + L^T Q L) \end{bmatrix} z_0\right\} + E\left\{v_0^T \begin{bmatrix} T_L^{N-1} (Q' + L^T Q L) \\ \vdots \\ T_L (Q' + L^T Q L) \end{bmatrix} v_0\right\} \quad (10)$$

在线性变换 T_L 的基础上, 定义一种新的线性变换 $I_L X = T_L X + Q' + L^T Q L$. 对式(10) 进行化简

可得

$$J_N = E\{z_0^T (I_L^N \Theta) z_0\} + E\left\{v_0^T \begin{bmatrix} I_L^{N-1} \Theta \\ \vdots \\ I_L \Theta \end{bmatrix} v_0\right\}, \quad (11)$$

其中符号 Θ 表示零矩阵, 即 $\Theta = 0$

根据引理 2, 假如开环系统(5) 均方可镇定, 则存在 L 使得 T_L 稳定 对于该反馈阵 L , 方程 $X = I_L X = T_L X + Q' + L^T Q L$ 存在解

$$X_s = \sum_{k=0}^{N-1} T_L^k (Q' + L^T Q L)$$

由于 T_L 稳定, 该解为有限解, 解的存在性可将 X_s 代入方程中加以验证 显然有 $X_s = I_L X_s = I_L^2 X_s = \dots = I_L^N X_s$. 由引理 1 知, 线性变换 T_L 单调, 所以 I_L 单调, 于是 $0 < X < Y \Rightarrow I_L^N X < I_L^N Y$, 因此有

$$I_L^N \Theta < I_L^N X_s = X_s \quad (12)$$

因为

$$\min J_N (Q_N = \Theta) = J_N (Q_N = \Theta), \quad (13)$$

当 $Q_N = \Theta$ 时 $Q_N = \Theta$, 则 $S_N = \begin{bmatrix} Q_N & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \Theta$ 为了加以区分, 将 S_0 写为 $S_0 |_{N, Q_N}$ 形式, 将引理 3 的结论和式(11) 代入(13), 可以推知

$$E\{z_0^T (S_0 |_{N, \Theta}) z_0\} + \sum_{k=0}^{N-1} \text{tr}(S_{k+1}^H R_1)$$

$$E\{z_0^T (I_L^N \Theta) z_0\} + E\left\{v_0^T \begin{bmatrix} I_L^{N-1} \Theta \\ \vdots \\ I_L \Theta \end{bmatrix} v_0\right\} \quad (14)$$

当 $Q_N = \Theta$ 时, 根据 S_k 和 S_k 的定义, 结合 Q 为半正定阵的条件可推知 $S_k^{H1} (k = 1, 2, \dots, N)$ 半正定 又因为 S_k^{H1} 为对称矩阵, $R_1 > 0$ 且为对角形矩阵, 所以可

证明 $S_k^{H1} \cdot R_1$ 半正定, 则显然有 $\sum_{k=0}^{N-1} \text{tr}(S_{k+1}^H R_1) > 0$

化简式(14), 因为初始条件 z_0, v_0 具有任意性, 可令 $v_0 = 0$, 进而有 $E\{z_0^T (S_0 |_{N, \Theta}) z_0\} = E\{z_0^T (I_L^N \Theta) z_0\}$. 再由 z_0 的任意性可知 $S_0 |_{N, \Theta} = I_L^N \Theta$ 由式(12) 可知 $I_L^N \Theta < X_s$, 所以 $S_0 |_{N, \Theta} < X_s$

在 $S_0 |_{N, \Theta}$ 半正定, $X_s - S_0 |_{N, \Theta}$ 正定, X_s 有界的条件下, 利用矩阵范数的定义, 结合 $S_0 |_{N, \Theta}$ 和 X_s 本身是对称阵的特点^[5], 可以证明 $S_0 |_{N, \Theta}$ 有界

因为 $S_{N+1} |_{N+1, \Theta} = \Theta$, 所以

$$S_N |_{N+1, \Theta} = E\{F_1^T(\bar{w}) Q F_1(\bar{w})\}$$

又因为 $S_N |_{N, \Theta} = \Theta$, 所以

$$S_N |_{N+1, \Theta} - S_N |_{N, \Theta} = E\{F_1^T(\bar{w}) Q F_1(\bar{w})\}$$

由 Q 为半正定阵可知

$$S_N |_{N+1, \Theta} - S_N |_{N, \Theta} \geq 0 \quad (15)$$

同样

$$S_{N-1} |_{N+1, \Theta} - S_{N-1} |_{N, \Theta} =$$

$$E_{N-1} \{F_2^T(\tau_{N-1}^c)\} E_{N-1} \{G^T(\tau_{N-1}^c, \tau_{N-1}^a) (S_N |_{N+1, \Theta} - S_N |_{N, \Theta}) G(\tau_{N-1}^c, \tau_{N-1}^a) \} F_2(\tau_{N-1}^c),$$

由式(15)又可推知 $S_{N-1} |_{N+1, \Theta} = S_{N-1} |_{N, \Theta}$ 依此类推可得 $S_0 |_{N+1, \Theta} = S_0 |_{N, \Theta}$, 即 $S_0 |_{N, \Theta}$ 单调递增 同时因为 $S_0 |_{N, \Theta}$ 有界, 所以 $S = \lim_N S_0 |_{N, \Theta}$ 存在

在上述定理的基础上, 当开环系统(5)均方可镇定时, 利用 S 代替文献[5]控制律中的 S_k 可避免对式(4)所示的随机Riccati方程的计算 本文提出的随机状态反馈控制律为 $u_k = -L(\tau_k^c) \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix}$. 其中

$$L(\tau_k^c) = (Q_{22} + \tilde{S}_{k+1}^{22})^{-1} [Q_{12}^T + \tilde{S}_{k+1}^{21} \tilde{S}_{k+1}^{23}],$$

$$\tilde{S}_{k+1}(\tau_k^c) = E_k \{G^T(\tau_k^c, \tau_k^a) S G(\tau_k^c, \tau_k^a) | \tau_k^c\},$$

$$G(\tau_k^c, \tau_k^a) = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_0(\tau_k^c, \tau_k^a) & \Gamma_1(\tau_k^c, \tau_k^a) \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix}.$$

若开环系统(5)均方可镇定, 则稳态解 S 可通过对式(4)进行迭代或求解如下随机Riccati方程得到:

$$S = E_k \{F_1^T(\tau_k^c) Q F_1(\tau_k^c) + F_2^T(\tau_k^c) \cdot E_k \{G^T(\tau_k^c, \tau_k^a) S G(\tau_k^c, \tau_k^a) | \tau_k^c\} \cdot F_2(\tau_k^c)\}. \quad (16)$$

求解式(16)所示的随机方程时, 因为 τ_k^c, τ_k^a 是随机变量, 所以首先根据其统计特性求取与之相关的随机变量的数学期望, 将 $F_1(\tau_k^c), F_2(\tau_k^c)$ 和 $G(\tau_k^c, \tau_k^a)$ 转化为常值矩阵 在此基础上, 随机方程(16)转变为常系数矩阵方程, S 为该方程的非负定解

实际应用时可将 τ_k^c 与 $L(\tau_k^c)$ 一一对应制成表格, 控制器节点在获得延时值 τ_k^c 后可在线查询表格, $L(\tau_k^c)$ 的值由表中实时插值得到

$$L(\tau_k^c) = \frac{L(\tau_{k,l_2}^c) - L(\tau_{k,l_1}^c)}{\tau_{k,l_2}^c - \tau_{k,l_1}^c} \cdot \tau_k^c + \frac{L(\tau_{k,l_1}^c) \tau_{k,l_2}^c - L(\tau_{k,l_2}^c) \tau_{k,l_1}^c}{\tau_{k,l_2}^c - \tau_{k,l_1}^c}.$$

其中: $\tau_{k,l_1}^c, \tau_{k,l_2}^c, L(\tau_{k,l_1}^c), L(\tau_{k,l_2}^c)$ 为表中已有数据

6 仿真研究

下面以一套生物质气化炉实验装置为对象进行仿真研究 通过辨识和简化, 被控对象的模型为

$$\dot{x} = Ax + Bu = \begin{bmatrix} -0.2 & -0.04 \\ 0.25 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix} \xi,$$

$$y = [0 \quad 0.48]x + \eta$$

其中: $E[\xi(t)] = E[\eta(t)] = 0, E[\xi(t_1)\xi(t_2)] = E[\eta(t_1)\eta(t_2)] = \delta(t_1 - t_2)$. 仿真过程中各参数选择如下:

$$Q_N = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$T = 5$ s, 初值 $x_0 = [0 \quad 4]^T$. 经验证该系统均方可镇定 利用本文提出的随机状态反馈方法设计控制器, 仿真结果如图2所示

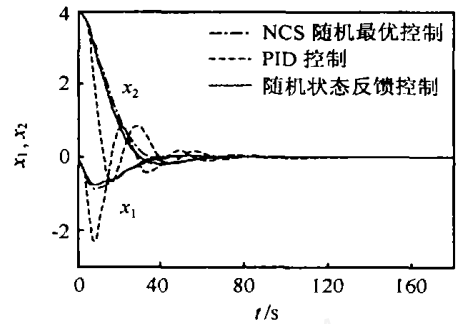


图2 NCS的状态响应曲线

从图2可以看出, NCS随机最优控制方法在控制系统超调量和提高系统快速性等方面均优于传统的PID控制方法; 本文提出的随机状态反馈控制策略利用 S 代替 S_k 确定反馈增益阵 L , 使得算法在快速性和实时性方面明显优于随机最优方法, 但同时也带来了性能的损失 选取ITAE作为性能指标, 离散后 $ITAE = \sum_{k=1}^n t_k |e_k| \Delta t$, 利用公式 $(ITAE_{\text{本文算法}} - ITAE_{\text{最优控制}}) / ITAE_{\text{最优控制}}$, 可得性能损失占随机最优方法性能指标的4.35%. 可见, 本文所提出控制策略, 其控制效果与NCS随机最优控制方法基本一致, 即控制性能接近最优 仿真结果说明了本文提出的控制策略的有效性 更重要的是, 通过离线制表, 在线插值的方法只需进行4次加减运算和3次乘除运算便可得到状态反馈阵 相比之下, 文献[5]给出的控制律要通过11次矩阵乘法, 3次矩阵加法, 3次矩阵转置, 1次数学期望, 1次条件数学期望, 一次矩阵求逆, 4次矩阵积分, 2次矩阵指数运算以及矩阵分块等计算才能得到控制律 显然, 本文算法耗时大大减少, 从而满足了系统实时性的要求

7 结语

本文研究了NCS随机最优控制律中随机Riccati方程稳态解的存在问题 通过证明给出了稳态解存在的条件, 并在此基础上进一步针对均方可镇定系统提出了相应的控制策略 与文献[5]的结果相比, 在控制效果方面基本一致, 但本文提出的控制策略显著降低了算法的复杂性, 具有更大的工程应用价值 (下转第1196页)

表2 判断原约束条件中的冗余约束

	原约束条件	第1层之一	第1层之二	
第1层之一	$L_{1:} : -x + y \leq 2$	$B_{1,1:} : -x + y = 2$	$B_{2,2:} : -2x = 1$	原约束条件
	$L_{2:} : -x - y \leq -1$	$F_{2,1:} : -2x \leq 1$	$F_{3,2:} : -1/2 \leq 2$	$L_{1:} : -x + y \leq 2$
	$L_{3:} : x \leq 2$	$F_{3,1:} : x \leq 2$	$F_{4,2:} : -2 \leq -3$ (矛盾)	是冗余约束
	$L_{4:} : x + 3y \leq 3$	$F_{4,1:} : 4x \leq -3$		
第1层之二	$L_{1:} : -x + y \leq 2$	$F_{1,1:} : -2x \leq 1$	$F_{1,2:} : -4 \leq 1$	原约束条件
	$L_{2:} : -x - y \leq -1$	$B_{2,1:} : -x - y = -1$	$B_{3,2:} : x = 2$	$L_{2:} : -x - y \leq -1$
	$L_{3:} : x \leq 2$	$F_{3,1:} : x \leq 2$	$F_{4,2:} : -4 \leq 0$	不是冗余约束
	$L_{4:} : x + 3y \leq 3$	$F_{4,1:} : 2x \leq 0$		
第1层之三	$L_{1:} : -x + y \leq 2$	$F_{1,1:} : y \leq 4$	$F_{1,2:} : -1 \leq 4$	原约束条件
	$L_{2:} : -x - y \leq -1$	$F_{2,1:} : -y \leq 1$	$B_{2,2:} : y = -1$	$L_{3:} : x \leq 2$
	$L_{3:} : x \leq 2$	$B_{3,1:} : x = 2$	$F_{4,2:} : -3 \leq 1$	不是冗余约束
	$L_{4:} : x + 3y \leq 3$	$F_{4,1:} : 3y \leq 1$		

$$X_{m+1} = (2, 1/3), Z_{m+1} = 5$$

由表2可判断出原约束条件中 $L_{1:} : -x + y \leq 2$ 相对于新问题而言是冗余约束,可以删除。若再增加新的约束条件 $L_{5:} : x - y \leq -2$,仿表1同样的方法判断可知该约束为矛盾约束,算法停止。

6 结 语

关于不断增加约束条件的LP问题的研究,对许多实际问题具有重要意义。如何快速地判断新增加的约束是否为矛盾约束,以及不矛盾的情况下如何快速判断约束条件中的哪些约束是冗余的,均有利于对新的LP问题求解的简化。本文提出的基于凸空间思想的算法有效地解决了该类问题,并可利用算法的递推性将其应用于在线辨识等领域。实验仿真表明,该算法具有可行性和高效性。

参考文献(References)

- [1] 黄圣乐. 用线性规划单纯形法在计算机上进行控制环节辨识[J]. *同济大学学报*, 1989, 17(2): 259-264.
(Huang S L. Identification of Controlled Processes with Linear Programming Simplex Method on Computer [J]. *Tongji University J*, 1989, 17(2): 259-264.)
- [2] 王应明. 参数辨识的线性规划法及其快速实现[J]. *计算*

技术与自动化, 1992, 11(2): 31-36

(Wang Y M. Parameter Identification and its Fast Realization Based on Linear Programming [J]. *Computer Technology and Automation*, 1992, 11(2): 31-36.)

- [3] 程小辉. 不确定性系统区间鲁棒辨识方法的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2001: 40-46.
(Cheng X H. *Research of Interval Robust Identification of System with Uncertainty* [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2001: 40-46.)
- [4] 钱颂迪, 胡运权, 甘应爱, 等. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990: 62-64.
(Qian S D, Hu Y Q, Gan Y A, et al. *Operational Research* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990: 62-64.)
- [5] 宋恩民, 黄文奇. 判断具有多线性约束条件的凸空间是否为空的交边算法[J]. *计算机学报*, 1996, 19(9): 704-708.
(Song E M. An Intersecting-side Algorithm to Determine Whether Convex Regions Bounded by Multiple Constraints are Empty [J]. *Chinese J Computer*, 1996, 19(9): 704-708.)

(上接第1192页)

参考文献(References)

- [1] Zhang W, Branicky M S, Philips S M. Stability of Networked Control Systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(2): 85-99.
- [2] Walsh G C, Beldiman O, Bushnell L G. A asymptotic Behavior of Nonlinear Networked Control Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(7): 1093-1097.
- [3] Halevi Y, Ray A. Integrated Communication and Control Systems [J]. *J of Dynamic Systems Measurement and Control*, 1988, 110(4): 367-381.
- [4] Luen Woei Liou, A sok Ray. A Stochastic Regulator for Integrated Communication and Control Systems[J]. *J of Dynamic Systems Measurement and Control*, 1991, 113(4): 604-617.
- [5] Nilsson J, Bernhardsson B, Wittenmark B. Stochastic Analysis and Control of Real-time Systems with Random Time Delay[J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 57-64.