

产品随机缺陷生产系统有限时域最优生产控制

宋春跃, 王 慧

(浙江大学 工业控制研究所 工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对合格产品产量呈随机分布的单设备单产品类型不可靠生产系统, 假设所生产合格产品的产量占所生产产品总量比例的概率分布已知, 且产品质量检测消耗时间与生产控制时域相比较小. 本文通过对目标函数的离散化, 在离散空间上对生产控制策略进行寻优, 得到基于当前状态下的最优生产控制策略, 该策略可解析表示为合格产品产量分布、成本惩罚系数 $c^+(c^-)$ 、当前状态及产品质量检测时间的函数. 与同类文献所得结果相比较, 该控制策略克服了文献[8]结论有可能导致系统状态发散的缺点, 并且最优控制策略表达式更简洁, 所得结论对实际工程应用而言有显著意义.

关键词: 生产控制; 产品缺陷; 成本最小; 随机产量

中图分类号: TP11 **文献标识码:** A

Optimization production control for production system in a defect-prone environment over finite horizon

SONG Chun-yue, WANG Hui

(State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: The optimization production control is studied for a single-machine, single-type product unreliable production system, operating in a defect-prone environment. It is assumed that there is a random yield proportion of non-defective products, with known probability distribution, and the inventory of non-defective products can be observed within a finite duration which is small enough in comparison with the production control horizon. The optimal production control policy that minimizes a linear combination of expected surplus and shortage costs over the planning horizon is obtained by discrete technique and is formulated as a function of the yield rate distribution, $c^+(c^-)$, the current state and observation duration of the product inventory. This policy overcomes the drawback in [8] which may give rise to state divergence, and the results are more explicit and meaningful in engineering project.

Key words: production control; defect-prone; cost minimization; random yield

1 引言(Introduction)

对不可靠生产系统生产控制的研究由来已久, 自提出该命题以来, 许多学者进行了多角度的探讨. 大致说来, 对不可靠生产系统生产控制的研究形成两个分支: 其一是研究生产设备的不可靠性情况, 即生产设备时有故障和修复事件的发生而导致的生产系统不可靠(见文[1~5]及其参考文献). 该方向研究的生产控制命题是考虑设备故障影响(一般假设设备过程为Markov过程)时寻求最优的生产控制策略以使成本函数最小; 分支二是生产系统操作条件及生产原料供给的波动致使生产出的成品不完全符合要求, 有次品的产生, 从而导致的生产系统不可靠(见

文[6~8]及其参考文献). 该分支的研究命题是考虑合格产品产量的随机性, 寻求最优的生产控制策略以使成本函数最小. 本文的不可靠性是指后一种情形.

对于考虑合格产品产量的随机性命题, K. Kogan, C. shu and J. R. Perkins采用连续系统理论处理方法, 解析给出了单设备单产品类型情况下一个产品质量测度区间上的最优生产控制策略^[8], 该策略是开环控制策略. 实际上, 在满足该文献所给条件下, 其最优控制策略有可能会产生系统状态发散, 则最优命题也无从谈起. 另外, 随着企业信息化的进程, 企业已普遍建立起了企业内部的资源信息共享平台, 使

得产品库存状态在线可测成为可能. 为此, 本文对存在产品随机缺陷的不可靠生产系统最优生产控制进行了研究, 研究对象仍具有文[8]所述对象特性, 即单设备单产品类型不可靠生产系统, 且生产的成品中合格产品呈随机分布, 并假设合格产品的产量占总产量比例的概率分布已知. 考虑产品质量检测所消耗时间与整个生产控制时域相比较小情况, 针对生产可满足需求, 对系统建立了流率模型, 修正了文[8]的生产控制约束条件, 采用对目标函数进行离散化然后在离散空间上对原始命题进行寻求, 解析给出了该不可靠生产控制命题的最优生产控制策略, 且保证了系统状态的收敛.

2 问题描述(Description of the problem)

所研究的不可靠生产系统只有一台设备组成, 且该系统仅能生产一类产品 P . 由于生产系统的操作条件及生产原料属性的波动, 使得该系统所生产出的成品中含有一定量的次品. 为保证售出产品质量, 对产品进行在线质量抽检, 设每次产品检测所耗费的时间为 Δt . 在一个检测时域 Δt 内产品中合格产品情况并不清楚. 假设合格产品产量呈随机分布, 且合格产品产量占产品总产量比例的概率分布已知. 令该系统的生产速率为 $u(t)$, 这里生产速率为系统的控制变量. 由于受生产设备自身特性的限制, 生产速率 $u(t)$ 有界, 设 r 为系统对产品 P 的最大生产能力, 即有

$$0 \leq u(t) \leq r. \quad (1)$$

假设系统的原材料供应及产品的生产可近似为连续流动的流体, 且在已知生产时域内, 产品 P 的需求率 $z(t)$ 是常数 z , $z > 0$. 定义 $x(t) \in R$ 为系统的库存过程, $x(t)$ 为系统状态变量. 则系统所生产产品 P 的库存过程 $x(t)$ 可由如下流率模型来刻画:

$$\dot{x}(t) = \alpha u(t) - z, \quad x(0) = x_0. \quad (2)$$

其中 α 为取值在 $[0,1]$ 上的随机变量, 它表征了系统所生产的合格产品(non-defective)产量所占产品总生产产量的比例. 随机变量 α 由其概率密度函数 $f(\alpha)$ 来刻画, 其期望为 $E(\alpha)$. 上述模型所表述的不可靠生产系统在实际生产过程中有典型的代表性, 特别是诸如印染、食品、造纸等一些流程企业生产线. 对于 $t \geq 0$, 还需要有以下约束条件:

$$r \geq \frac{z}{E(\alpha)}. \quad (3)$$

约束方程(3)是系统稳定的内在要求, 在该方程约束下, 系统的生产方可满足市场需求, 否则, 生产控制将无现实意义.

有限时域下该不可靠生产系统的生产控制命题可表述为: 寻求时域 $[0, t_f]$ 内系统的最优生产速

率 $\{u(t) : 0 \leq t \leq t_f\}$ 以使如下期望成本泛函最小:

$$J(u(t)) = \min_{u(t)} E \left[\int_0^{t_f} g(x(t)) dt \right]. \quad (4)$$

其中 $g(\cdot)$ 为库存的瞬时成本函数, 这里假设 $g(\cdot)$ 的形式为分段线性瞬时成本函数, 并有如下表达式:

$$g(x(t)) = c^+ x^+(t) + c^- x^-(t). \quad (5)$$

式中: c^+ 及 c^- 分别表示产品库存盈余及缺损时的成本惩罚系数, 有 $c^+(c^-) > 0$. $x^+(t)$, $x^-(t)$ 定义如下:

$$x^+(t) = \max\{0, x(t)\}, \quad x^-(t) = \max\{0, -x(t)\}. \quad (6)$$

对于此类优化命题, 文[8]在一个检测时域内通过构造一个Hamilton函数在连续空间来寻求最优解, 给出了最优控制策略的解析表达式. 若检测时域比较小, 应用该文结论时, 控制策略有可能在小区间上进行跳变, 给实际生产控制带来了更多的扰动, 最主要的是在满足该文条件下, 所给的控制策略会导致系统不稳定, 致使库存发散. 本文重新考虑了该生产控制命题, 并假设 t_f 远远大于 Δt , 给出了使系统稳定的约束条件, 解析求解出了基于当前状态和检测时域的最优控制策略.

3 主要结果(Main results)

令 $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = t_f$ 为产品检测时间序列, 且有 $t_{l+1} - t_l = \Delta t$, Δt 为产品检测时域, $l = 0, 1, \dots, n$. $n = \lceil t_f / \Delta t \rceil$, $\lceil \cdot \rceil$ 为取整函数. 记 $x_k := x(t_k)$, $u_k := u(t_k)$. 由于 t_f 远远大于 Δt , 则式(4)可改写如下:

$$\begin{aligned} J(u(t)) &= \min_{u(t)} E \left[\sum_{l=0}^{n-1} \int_{t_l}^{t_{l+1}} g(x(t)) dt \right] \approx \\ &\min_{u(t)} E \left[\sum_{l=0}^{n-1} \int_{t_l}^{t_{l+1}} g(x(t_l)) dt \right] = \\ &\min_{u(t)} \sum_{l=0}^{n-1} E[g(x(t_l))] \Delta t. \end{aligned} \quad (7)$$

在区间 $[t_l, t_{l+1}]$ 对式(2)两边积分得, $l = 0, 1, \dots, n-1$,

$$\int_{t_l}^{t_{l+1}} \dot{x}(t) dt = \int_{t_l}^{t_{l+1}} (\alpha u(t) - z) dt,$$

则有 $x_{l+1} - x_l = (\alpha u_l - z) \Delta t$, 即

$$x_{l+1} = (\alpha u_l - z) \Delta t + x_l. \quad (8)$$

把式(8)代入式(7)得

$$\begin{aligned} J(u(t)) &= \\ &\min_{u(t)} \{g(x_0) \Delta t + \\ &\sum_{l=1}^{n-1} E[g((\alpha u_{l-1} - z) \Delta t + x_{l-1})] \Delta t\}. \end{aligned} \quad (9)$$

由于 $g(x_0)$ 及 Δt 为定值, 则若使式(9)最小, 只要

使下式取最小值, 即

$$\begin{aligned} & \sum_{l=1}^{n-1} E[g((\alpha u_{l-1} - z)\Delta t + x_{l-1})] = \\ & \sum_{l=1}^{n-1} E\{c^+[(\alpha u_{l-1} - z)\Delta t + x_{l-1}]^+ + \\ & c^-[(\alpha u_{l-1} - z)\Delta t + x_{l-1}]^-\} = \\ & \sum_{l=0}^{n-2} JL(u_l) \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} JL(u_l) = & c^+[(\alpha u_l - z)\Delta t + x_l]^+ + \\ & c^-[(\alpha u_l - z)\Delta t + x_l]^- \end{aligned} \quad (11)$$

对于式(11), 有下式成立:

$$0 \leq [u_l - z]\Delta t + x_l]^+ \perp [u_l - z]\Delta t + x_l]^- \geq 0. \quad (12)$$

其中, $\perp$ 表示正交. 由于 $g(\cdot)$ 的特性, 即为非负函数, 且为严格凸函数, 从式(11)及(12)可以得 $JL(u_l)$ 对于控制策略 u_l 而言也是凸的. 为使 $J(u(t))$ 最小, 只须寻求 u_l 使 $JL(u_l) \rightarrow \min$. 由式(11)可得

$$\begin{aligned} JL(u_l) = & c^+ \int_{\beta}^{\infty} [(\alpha u_l - z)\Delta t + x_l] f(\alpha) d\alpha - \\ & c^- \int_{-\infty}^{\beta} [(\alpha u_l - z)\Delta t + x_l] f(\alpha) d\alpha. \end{aligned}$$

其中 $\beta = (z\Delta t - x_l)/(u_l\Delta t)$. 由概率密度函数性质可得下式:

$$\begin{aligned} JL(u_l) = & c^+ \int_{-\infty}^{\infty} [(\alpha u_l - z)\Delta t + x_l] f(\alpha) d\alpha - (c^+ + \\ & c^-) \int_{-\infty}^{\beta} [(\alpha u_l - z)\Delta t + x_l] f(\alpha) d\alpha. \end{aligned}$$

若不考虑 u_l 的约束式(1), 则要使 $JL(u_l) \rightarrow \min$, 须有 $\frac{d(JL(u_l))}{du_l} = 0$, 即

$$\begin{aligned} & \frac{d(JL(u_l))}{du_l} = \\ & c^+ \Delta t \int_{-\infty}^{\infty} \alpha f(\alpha) d\alpha - (c^+ + c^-) [(x_l - \\ & z\Delta t) f(\beta) (\frac{d\beta}{du_l}) + \Delta t \int_{-\infty}^{\beta} \alpha f(\alpha) d\alpha + \\ & u_l \Delta t \beta f(\beta) (\frac{d\beta}{du_l})] = 0. \end{aligned}$$

β 代入上式, 整理可得 $c^+E(\alpha) - (c^+ + c^-) \int_{-\infty}^{\beta} \alpha f(\alpha) d\alpha = 0$, 即

$$\int_0^{\beta} \alpha f(\alpha) d\alpha = \frac{c^+}{c^+ + c^-} E(\alpha). \quad (13)$$

此时最优控制策略为

$$u_l = \frac{z}{\beta} - \frac{x_l}{\beta \Delta t}.$$

其中 β 满足式(13). 对于式(13)而言, 要求 $\beta \in (0, 1)$. 若 $\beta \leq 0$ 或 $\beta \geq 1$ 时, 式(13)均不成立. 综合控制策略约束式(1), 可得系统最优控制策略, 表述如下:

$$u_l = \begin{cases} \max\{\min\{\frac{z}{\beta} - \frac{x_l}{\beta \Delta t}, r\}, 0\} & \text{if } x_l > 0, \\ \min\{\frac{z}{\beta} - \frac{x_l}{\beta \Delta t}, r\} & \text{if } x_l \leq 0. \end{cases} \quad (14)$$

特别地, 当 $x_l = 0$ 时, $u_l = \min\{z/\beta, r\}$.

从式(14)可以看出, 最优控制策略 u_l 是合格产品产量分布、成本惩罚系数 $c^+(c^-)$ 、当前状态及产品质量检测时间的函数. $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 由式(14)可知: 当 $x_l > 0$ 时, $u_l = 0$; 当 $x_l = 0$ 时, $u_l = \min\{z/\beta, r\}$; 当 $x_l < 0$ 时, $u_l = r$. 即 $x(t) = 0$ 是该生产系统的最优库存, 当目前库存大于该值时, 系统停止生产; 当目前库存小于该值时, 系统以最大生产速率生产; 若目前库存等于该值时, 系统以 $u_l = \min\{z/\beta, r\}$ 速率进行生产. 以上结论与文[8]中当 $T \rightarrow 0$ 时所得结果完全相同. 这种具有开关结构特性的最优控制策略性质在由设备故障引起的不可靠生产系统生产控制策略^{[1][2]}中也同样具有.

需要指出的是, 文[8]以是否满足 $r \geq z/\beta$ 把系统分为两种情况, 即满足 $r \geq z/\beta$ 的为“nondeficient”系统, 不满足的为“deficient”系统, 并分别给出了最优生产控制策略的解析解(见文[8]中Lemma 4.3~4.4及Lemma 4.7~4.8). 这里不再区分“nondeficient”系统和“deficient”系统, 所给控制策略式(14)已包括了文[8]中的两类系统情况下的结果. 本文是在 $r \geq z/E(\alpha)$ 情况下给出的结论, 即系统须满足约束不等式(3). 实时上, 文[8]所给结论有可能导致库存过程 $x(t)$ 发散. 当 $r \geq z/\beta$ 成立而 $r \geq z/E(\alpha)$ 不成立时(即有 $rE(\alpha) < z$ 时), 系统将处于不稳定状态, 说明如下:

任意 $t \geq 0$, 设控制策略 $u(t) = C$, 其中 $C \geq 0$ 常数, 由式(2)可得

$$E(\int_0^t \dot{x}(s) ds) = E(\int_0^t (\alpha u(s) - z) ds),$$

即

$$E(x(t)) = (CE(\alpha) - z)t + x_0. \quad (15)$$

令 $C = r$, 则 $E(x(t)) = (rE(\alpha) - z)t + x_0$, 若 $rE(\alpha) < z$, 则 $E(x(t))$ 发散. 这种情况在下节例子2中将有说明. 故针对该情况, 本文增加了式(3)的约束.

4 例子(Examples)

例子1 系统参数如下: $r = 1.0, z = 0.3, t_f = 150, c^+ = 1.0, c^- = 3.0, \Delta t = 0.45$. 假设 α 是在区间 $[0, 1]$ 上的均匀分布, 则有 $E(\alpha) = 0.5, \beta = 0.5$.

分别采用文[8]及本文策略进行仿真,针对初始状态 $x_0 = 15.0$ 及 $x_0 = -15.0$ 两种情况,仿真结果如图1(a)所示. 其中图1(a)的上半部分是针对情况 $x_0 = 15.0$ 进行的仿真结果,下半部分是针对情况 $x_0 = -15.0$ 进行的仿真结果. 图中破折线表示需求 z 随时间的累计(为了便于比较,该线分别向下/向上平移了 $|x_0|$ 个单位). 点划线表示本文所求控制策略 $u(t)$ 下 $x(t)$ 的轨迹及 $\alpha u(t)$ 随时间的累计. 不难看出,在该策略下,生产能很好的满足需求并保持最优库存(几乎为零).

图1中虚线对应的是当 $[0, t_f]$ 区间内 $x(t)$ 不可测情况下采用文[8]所给策略的相应曲线. 图1(a)上半图中实线所示为 Δt 时域内 $x(t)$ 不可测情况下采用文[8]所给策略时 $x(t)$ 的轨迹及 $\alpha u(t)$ 随时间的累计轨迹. 数值仿真结果表明,若质量检测所消耗时间与整个生产控制时域相比较小,本文所给策略与文[8]所给策略效果一样,与第3节理论分析结果相一致,且实际库存被控制在最优库存附近.

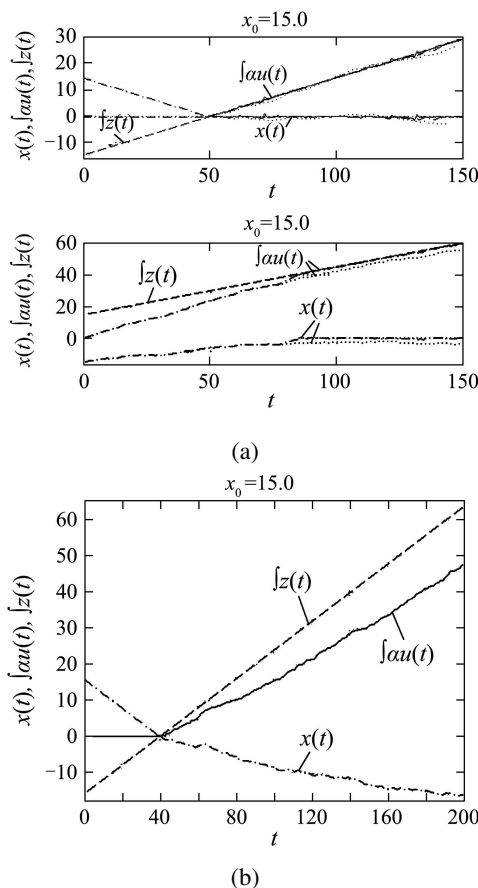


图1 $x(t), \int \alpha u(t), \int z(t)$ 轨迹
Fig. 1 Trajectory of $x(t), \int \alpha u(t), \int z(t)$

例子2 系统参数如下: $r = 0.75, z = 0.4, t_f = 200, c^+ = 1.0, c^- = 2.0, \Delta t = 0.6$. 并假设 α 在区间 $[0, 1]$ 上仍服从均匀分布, 则有 $E(\alpha) = 0.5, \beta = 0.58$.

此时 $r \geq z/\beta$, 而 $r < z/E(\alpha)$. 显然, 约束式(3)不满足, 但该例条件仍满足文[8]所给的最优控制策略条件, 采用其所给控制策略, 则系统在初始状态为 $x_0 = 15.0$ 情况下的仿真图如图1(b)所示, 点划线和实线分别表示所求控制策略 $u(t)$ 下 $x(t)$ 的轨迹及 $\alpha u(t)$ 随时间的累计. 显然 $x(t)$ 发散.

从上述例子可以看出, 本文所述最优控制策略对实际工程应用而言有显著的意义. 需要说明的是, 这里所给出的结论是针对产品质量检测时域相对于整个生产控制时域而言比较小的情况下给出的. 若产品质量检测时域比较长, 则生产控制策略仍应采用文[8]所给结论.

5 结论(Conclusion)

人类社会信息化进程的加快促使社会生产方式发生了很大变化. 随着全球市场经济的迅猛发展, 企业间的竞争也日趋激烈. 传统上由于信息反馈能力差而导致生产系统按计划生产的生产方式已不能真实反映社会对产品的真实需求, 取而代之的是面向“订单”的生产方式. 这种转变要求工业生产线的生产必须根据产品和订单的属性改变而不断地改变生产, 对生产进行控制以达最佳的生产效益成为当今工业生产急需解决的重要问题. 本文从控制理论与工程的应用角度对存在产品随机缺陷不可靠生产系统的最优生产控制策略进行了研究, 通过离散化技术, 解析的给出了单设备单产品类型不可靠生产系统的最优生产控制策略. 与同类文献所得结果相比较, 该控制策略克服了以往结论会导致系统状态发散的缺点, 并且表达更简洁, 更方便求取. 所得结论为多设备多产品此类不可靠生产系统最优生产控制的进一步研究提供了理论及技术上的支持. 造成生产系统不可靠性的原因是多样的, 如何给出综合考虑设备故障和存在产品随机缺陷二者都存在情况下的最优生产控制策略将是下一步的研究工作.

参考文献(References):

- [1] AKELLA R, KUMAR P R. Optimal control of production rate in a failure-prone manufacturing systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1986,31(2): 116 – 126.
- [2] SHARIFNIA A. Optimal production control of a manufacturing system with machine failures[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1988,33(7): 620 – 625.
- [3] CHEN M, DUBRAWSKI R, MEYN S P. Management of demand-driven production systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004,49(5): 1795 – 1800.
- [4] MARTINELLI F, VALIGI P. Hedging point remain optimal under limited backlog and inventory space[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004,49(10): 1863 – 1869.

- [12] HERRERA F, LOZANO M. Adaptive genetic operators based on co-evolution with fuzzy behaviors[J]. *IEEE Trans on Evolutionary computation*, 2001, 5(2): 149 – 165.
- [13] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
(WANG Xiaoping, CAO Liming. *Genetic algorithms-theory, application and software implementation*[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.)
- [14] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995(6): 15 – 20.
(LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators[J]. *J of Computer Research and Development*, 1995, 32(6): 15 – 20.)
- [15] 刘常昱, 李德毅, 潘莉莉. 基于云模型的不确定性知识表示[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(2): 32 – 35.
(LIU Changyu, LI Deyi, PAN Lili. Uncertain knowledge representation based on cloud model[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 40(2): 32 – 35.)
- [16] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28 – 34.
(LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model[J]. *Engineering Science*, 2004, 6(8): 28 – 34.)

作者简介:

戴朝华 (1974—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为计算智能、模式识别等, E-mail: dchzyf@126.com;

朱云芳 (1974—), 女, 硕士, 讲师, 目前研究方向为测控系统、信号分析与处理, E-mail: zyfdch@126.com;

陈维荣 (1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能检测技术、图像处理与计算机视觉, E-mail: wrchen@home.swjtu.edu.cn.

(上接第642页)

参考文献(References):

- [5] KENNE J P, GHARBI A. Stochastic optimal production control problem with corrective maintenance[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2004, 46(4): 865 – 875.
- [6] GROSFELD-NIR A, GERCHAK Y, HE Q M. Manufacturing to order with random yield and costly inspection[J]. *Operations Research*, 2000, 48(5): 761 – 767.
- [7] GURNANI H. Supply management in assembly systems with random yields and random demand[J]. *IIE Transactions*, 2000, 32(8): 701 – 714.
- [8] KOGAN K, SHU C, PERKINS J R. Optimal finite-horizon production control in a defect-prone environment[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(10): 1795 – 1800.

作者简介:

宋春跃 (1972—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为最优生产控制、随机过程的建模及优化、数据挖掘等, E-mail: cysong@iipc.zju.edu.cn;

王慧 (1959—), 女, 教授, 研究领域为智能交通系统、复杂过程建模、控制与优化, 计算机控制, E-mail: hwang@iipc.zju.edu.cn.

(上接第645页)

参考文献(References):

- [1] HA Q P, NGUYEN Q H, RYE D C, et al. Fuzzy sliding-mode controllers with applications[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2001, 48 (1): 38 – 46.
- [2] HSU Feng-Yih, FU Li-Chen. Nonlinear control of robot manipulators using adaptive fuzzy sliding mode control[J]. *Proceedings of the IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems* 95, 1995, 1(1): 156 – 161.
- [3] EMAMI M R, GOLDENBERG A A, TURKSEN I B. A robust model-based fuzzy-logic controller for robot manipulators[J]. *Proceedings of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 1998, 3(3): 2500 – 2505.
- [4] TSAY T I, HUANG J H. Robust nonlinear control of robot manipulators[J]. *Proceedings of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 1994, 8(3): 2083 – 2088.
- [5] BEKIT B W, WHIDBORNE J F, SENEVIRATNE L D. Fuzzy sliding mode control for a robot manipulator[J]. *Proceedings of the IEEE Int Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, 1997, 33(2): 149 – 160.
- [6] GRIMM W M . Robot nonlinear bounds evaluation techniques for robust control[J]. *Adaptive Cont Signal Processing*, 1990, 4(2): 501 – 522.
- [7] MAN Zhihong, PALANISWAMI M . Robust tracking control for rigid robotic manipulators[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(1): 154 – 159.

作者简介:

林雷 (1970—), 男, 博士研究生, 研究领域为机器人智能控制, E-mail: leilin@tom.com;

王洪瑞 (1956—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 河北大学校长, 研究领域为机器人控制、现代控制理论、冶金自动化, E-mail: wanghr_999@yahoo.com.cn;

任华彬 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究领域为机器人智能变换结构控制, E-mail: rhb-888@163.com.