

基于切换原理的含损失数据系统的间歇式控制

王宏伟[†], 连捷, 夏浩

(大连理工大学 控制科学与控制工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对含有数据丢失的不确定性连续系统, 采用切换控制理论对其进行研究. 首先, 讨论含有损失数据连续系统的工作状态和相应的模型; 然后, 采用间歇式控制方式, 即在数据持续反馈期间对系统持续施加控制信号, 在数据持续丢失期间不施加控制信号, 对含有最大数据丢失率和外部干扰的不确定性系统, 利用切换控制原理对其进行研究, 并以定理形式给出控制器设计方法; 最后, 通过仿真实例表明所提出方法的有效性.

关键词: 切换原理; 间歇控制; H_∞ 性能指标; 鲁棒控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Intermittent control of system with lost data based on switching principles

WANG Hong-wei[†], LIAN Jie, XIA Hao

(School of Control Science and Control Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The uncertain continuous system with data loss is studied by using the switching control theories. Firstly, the working cases and the corresponding model of the continuous system with loss data are discussed. Then, the intermittent control is employed, namely during data continuous feedback, a control signal is applied to the system, and during the data continuously losing, the control signal is not exerted to the system. The uncertain control system with maximum data loss rate and external disturbance is studied by using the principle of switching control, and the controller design method is given in the form of the theorem. Finally, a simulation example is given to illustrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: switching principles; intermittent control; H_∞ performance index; robust control

0 引言

随着通信、计算机、自动控制等技术的发展和相互融合, 形成了 3C 融合技术. 在 3C 融合的现代工业控制中, 需要使用很多传感器和执行器. 由于传感器的故障、执行器失效、网络通信带宽的限制, 常常使系统在某些采样点的观测数据难以得到, 出现数据丢失或者数据包丢失等情况, 造成系统不稳定, 因此此类系统的研究仍是当前控制领域的研究热点.

数据丢失的控制研究主要包括跳变系统方法^[1-2]、切换系统方法^[3-6]、异步动态系统方法^[7-8]和功率谱密度分析方法^[9-10]等. 文献[11]研究了传感器与控制器之间存在数据的丢失情况, 通过工作状态分析将其构建成异步动态系统, 通过 Lyapunov 稳定性定理给出其系统指数稳定性的条件. 文献[3-4]针对含有数据丢失的系统, 将其看作若干个子系统的切换系统, 采用切换控制理论对其进行研究, 给出了系统

稳定性的充分必要条件. 文献[5]对系统的输入侧和输出侧均含有数据丢失的系统, 利用切换控制方法进行了研究. 文献[1-2]将存在数据丢失的系统等效成一个 Markov 跳变系统, 采用跳变系统理论对其进行研究. 文献[9-10]提出了功率谱密度 (PSD) 函数, 在数据丢失过程满足 Markov 链时, 给出了输出功率谱密度与数据丢失率的关系, 在此基础上进行了控制方法的研究. 文献[12]研究了含有数据丢失的模糊控制系统, 基于系统的模糊模型, 运用 Lyapunov 稳定性定理对非线性系统存在数据丢失的情况进行了研究. 文献[13]对大数据丢失的修复方法进行了研究和综述.

尽管人们对于含有数据丢失系统的控制进行了很多研究, 但是有些问题还需要探讨. 对于此类系统, 一般控制系统的稳定性与丢失数据量的大小、丢失率的大小是相关的; 对于数据丢失的系统, 系统中往

收稿日期: 2016-11-21; 修回日期: 2017-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金重点面上项目 (61273098).

作者简介: 王宏伟 (1969—), 男, 副教授, 博士, 从事系统辨识、智能控制等研究; 连捷 (1986—), 女, 教授, 博士, 从事复合切换系统控制等研究.

[†]通讯作者. E-mail: wanghw@dlut.edu.cn

往还包含参数不确定性和外界干扰. 为此, 本文开展了一些针对性的研究, 创新性地提出基于切换原理的含有数据丢失系统的间歇式控制方法. 首先, 将数据的丢失和持续反馈看作是两种工作模式, 讨论了含有损失数据的不确定性连续系统的工作状态; 然后, 采用间歇控制方式, 即在数据持续反馈时, 给系统持续施加控制信号, 在数据持续丢失期间, 不施加控制信号, 对含有最大丢失率和不确定性外部干扰的系统, 基于 H_∞ 性能指标给出了基于切换原理的鲁棒控制器的设计; 最后, 对仿真实例进行了研究, 以验证所提出方法的有效性.

1 含有损失数据的系统模型建立

对于如图1所示的含有损失数据的连续系统, 给出如下一些假设:

1) 使用数据反馈开关表示系统状态反馈的工作情况. 开关闭合时, 表示状态 $x(t)$ 反馈传送到控制器, 获得了数据; 开关断开时, 表示状态 $x(t)$ 没有反馈传送到控制器, 丢失了数据.

2) 每次数据丢失的时间区间长度是有界的, 假定数据丢失的时间长度为 $T_L (0 < T_L < \infty)$.

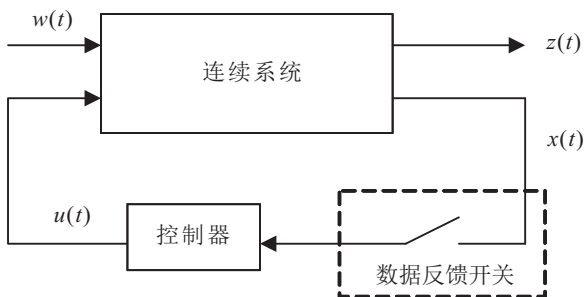


图1 含有损失数据的连续时间动态系统

数据丢失的系统动态过程如图2所示. 根据图2的数据丢失情况, 可以将系统分为数据丢失和正常反馈两种工作状态交替进行. 记工作状态交替的起始时刻集合为

$$\Gamma = \{t_0, t_1, t_2, \dots | 0 \leq t_0 < t_1 < t_2 < \dots\},$$

其中 t_0 为系统运行的起始时间, 即从 $t_0 \rightarrow t_1$ 期间开关闭合, 使得数据持续反馈; 从 $t_1 \rightarrow t_2$ 期间开关断开, 数据持续丢失. 依此类推, 两种工作状态持续发生的时刻集合分别为

$$\begin{cases} \Omega_1 = \bigcup_{k=1}^{\infty} \{(t_{2k-1}, t_{2k})\}, \text{ 开关断开;} \\ \Omega_2 = \bigcup_{k=1}^{\infty} \{(t_{2k-2}, t_{2k-1})\}, \text{ 开关闭合.} \end{cases} \quad (1)$$

系统中数据丢失的发生无法预见, 发生是随机的、不确定的, 这里 $t_i \rightarrow t_{i+1} (i = 1, 2, \dots)$ 的间隔不是固定的, 是时变的. 考虑被控对象还含有不确定

性, 此时含有数据丢失的不确定系统可以表示如下:

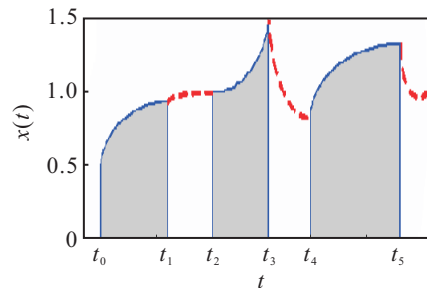


图2 数据丢失的系统动态过程

开关断开

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + Gw(t), t \in \Omega_1; \\ z(t) = Cx(t). \end{cases}$$

开关闭合

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B_1 + \Delta B_1) \times \\ \quad u(t) + Gw(t), t \in \Omega_2; \\ z(t) = Cx(t) + B_2u(t). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x \in R^n$ 为系统状态向量; $u \in R^m$ 为输入向量; $z \in R^l$ 为输出向量; A, B_1, B_2, C 为适当维数的参数矩阵; $w(t) \in L_2[0, \infty)$ 为外界扰动信号; $\Delta A, \Delta B_1$ 为参数不确定项, 满足

$$[\Delta A \ \Delta B_1] = DF(t)[E_1 \ E_2], \quad (3)$$

D, E_1, E_2 为已知描述不确定部分的实数矩阵. 不确定时变部分 $F(t)$ 满足 $F^T(t)F(t) \leq I$.

2 含有损失数据的系统控制器设计

对于系统(2), 采用间歇控制方式, 即数据持续反馈时, 采用状态反馈控制作为控制器, 在数据持续丢失时, 控制器输出为零, 即

$$u(t) = \begin{cases} Kx(t), t \in \Omega_1; \\ 0, t \in \Omega_2. \end{cases}$$

将上式代入式(2), 相应闭环系统如下:

开关断开

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \bar{A}x(t) + Gw(t), t \in \Omega_1; \\ z(t) = Cx(t). \end{cases}$$

开关闭合

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \bar{A}_Lx(t) + Gw(t), t \in \Omega_2; \\ z(t) = C_Lx(t). \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{A} &= A + \Delta A, \quad \bar{A}_L = A_L + \Delta A_L, \\ C_L &= C + B_2K, \quad A_L = A + B_1K, \\ \Delta A_L &= DF(t)(E_1 + E_2K). \end{aligned}$$

为了更好地说明含有数据丢失的系统,引入符号 $T_0(\tau, t), T_1(\tau, t), t > \tau$, 其中 $T_0(\tau, t)$ 代表数据丢失的总时间, $T_1(\tau, t)$ 代表数据反馈的总时间. 有

$$T_0(\tau, t) + T_1(\tau, t) = t - \tau. \quad (5)$$

在控制器设计前,给出与含有数据丢失系统相关的定义和引理.

定义1 若 $\forall t, \tau \in R^+, t > \tau$, 存在常数 $\lambda \in (0, 1), T_u > 0$, 使得

$$T_0(\tau, t) \leq \lambda(t - \tau) + T_u \quad (6)$$

成立, 则称系统(4)具有不大于 λ 的数据丢失率, 此时 λ 称为最大数据丢失率.

定义2 对于系统(4), 如果对于任意外界干扰信号 $w(t) \in L_2[0, \infty)$, 有 $z(t) \in L_2[0, \infty)$, 则称系统(2)为输入输出稳定.

定义3 对于给定的正常数 γ 和初始条件 $x(0) = 0$, 在状态反馈控制器下, 在外界干扰信号 $w(t) \in L_2[0, \infty)$ 下, 如果满足如下控制指标:

$$\int_0^\infty z^T(\tau)z(\tau)d\tau \leq \gamma^2 \int_0^\infty w^T(\tau)w(\tau)d\tau,$$

则称系统式(4)具有 H_∞ 性能指标 γ .

引理1 (Shur 补性质)^[14] 对于给定对称矩阵 A 和 C , 若存在矩阵 $B, A + B^T C B < 0$, 则等价于

$$\begin{bmatrix} A & B^T \\ B & -C^{-1} \end{bmatrix} < 0 \text{ 或 } \begin{bmatrix} -C^{-1} & B \\ B^T & A \end{bmatrix} < 0.$$

引理2^[14] 给定对称矩阵 Y 和 R , 适当的维数矩阵 H 和 E , 对于所有满足 $F^T F \leq I$ 的矩阵 F , 有

$$Y + HFE + E^T F^T H^T < 0$$

成立, 当且仅当存在正常数 $\varepsilon > 0$, 使得

$$Y + \varepsilon H H^T + \varepsilon^{-1} E^T R H^T < 0.$$

在上述引理和定义的基础上, 给出如下定理.

定理1 设最大数据丢失率为 λ , 对于系统(4), 采用间歇式反馈控制器, 如果存在正定矩阵 $P > 0$, 以及正数 $\lambda_0, \lambda_1, \gamma_0$, 使得如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \bar{A}^T P + P \bar{A}^T - \lambda_0 P & (PG)^T & C^T \\ PG & -\gamma_0^2 & 0 \\ C & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_L^T P + P \bar{A}_L^T - \lambda_1 P & (PG)^T & C_L^T \\ PG & -\gamma_0^2 & 0 \\ C_L & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (8)$$

$$\lambda_0 \lambda - \lambda_1 (1 - \lambda) < 0. \quad (9)$$

则系统(4)指数渐近稳定, 并且具有 H_∞ 性能指标 γ , 满足

$$\gamma = \gamma_0 \sqrt{\frac{\lambda_1 e^{(\lambda_1 + \lambda_0) T_u}}{\lambda_1 (1 - \lambda) - \lambda_0 \lambda}}. \quad (10)$$

在定理1的基础上, 通过定理2给出间歇控制器的

的设计方法.

定理2 设最大数据丢失率为 λ , 对于系统(4), 如果存在矩阵 W , 正数 $\hat{\lambda}_0, \hat{\lambda}_1, \rho, \beta, \varepsilon_0, \varepsilon_1$, 使得如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} M & \beta E_1^T & G & \beta C^T \\ * & -\varepsilon_0 I & 0 & 0 \\ * & * & -\rho I & 0 \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{M} & \beta E_1^T + W^T E_2^T & G & \beta C^T + W^T B_2^T \\ * & -\varepsilon_1 I & 0 & 0 \\ * & * & -\rho I & 0 \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (12)$$

$$\hat{\lambda}_0 \lambda < \hat{\lambda}_1 (1 - \lambda). \quad (13)$$

其中: I 为单位矩阵; M, \hat{M} 满足

$$M = \beta(A + A^T) - \hat{\lambda}_0 I + \varepsilon_0 D D^T,$$

$$\hat{M} =$$

$$\beta(A + A^T) + B_1 W + W^T B_1^T + \hat{\lambda}_1 I + \varepsilon_1 D D^T.$$

则存在控制器

$$u(t) = \frac{Wx(t)}{\beta},$$

使得系统(4)渐近稳定, 并且具有满足式(10)的 H_∞ 性能指标 γ , 有

$$\lambda_0 = \hat{\lambda}_0 / \beta, \lambda_1 = \hat{\lambda}_1 / \beta, \gamma_0 = \sqrt{\rho}.$$

3 仿真实例

考虑如下系统的控制问题, 动态模型^[12]如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A + r_1 A_1 + r_2 A_2)x(t) + \\ &\quad (B + s\hat{B})u(t) + w(t), \\ z(t) &= Cx(t). \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -0.0366 & 0.0271 & 0.0188 & 0.4555 \\ 0.0482 & -1.0100 & 0.0024 & -4.0208 \\ 0.1002 & 0.2855 & -0.7070 & 1.3229 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0.4422 & 0.1711 \\ 3.0447 & -7.5922 \\ -5.5200 & 4.9900 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2031 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1.0673 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, x_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$r_1 = \cos(0.5t), r_2 = \sin(0.5t),$$

$$s = \cos(0.5t) \sin(0.5t).$$

定义

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, E_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.2192 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.2031 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1.0673 & 0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix}.$$

则式(14)可以整理为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A + DFE_1)x(t) + (B + DFE_2)u(t) + w(t), \\ z(t) &= Cx(t). \end{aligned} \tag{15}$$

假设采样周期 $T = 10 \text{ ms}$, 仿真时间为 5 s , 共采集 500 个点, 系统的有效数据反馈率为 90% , 即数据丢失率为 10% , 丢失了 50 个数据, 在 $[0.5, 1]$ 之间连续丢失. 外界干扰 $w(t)$ 为均值为零, 方差为 0.02 的白噪声. 由定理 2 可得, $\beta = 0.85, \lambda_0 = 0.5618, \lambda_1 = 0.8985, \rho = 0.5423$, 鲁棒性能指标 $\gamma = 0.7364$. 此时矩阵 W 为

$$W = \begin{bmatrix} -0.5713 & 0.1633 & 0.7313 & 1.0067 \\ 0.2895 & 0.8555 & -0.2538 & -1.0317 \end{bmatrix},$$

反馈控制器为

$$K = \begin{bmatrix} -0.6721 & 0.1921 & 0.8604 & 1.1844 \\ 0.3406 & 1.0065 & -0.2986 & -1.2138 \end{bmatrix}.$$

图 3 给出了状态变量的动态变化, 图 4 给出了控制器的变化. 与文献 [7] 提出的方法在系统稳定性、收敛性方面进行比较. 图 5 给出了状态变量的动态变化, 图 6 给出了控制器的变化. 可见, 本文方法优于文

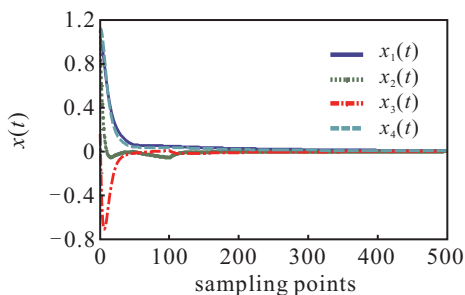


图 3 状态变量的动态变化

献 [7] 的控制方法, 采用本文方法能够实现含有数据丢失系统的控制, 并且控制效果良好.

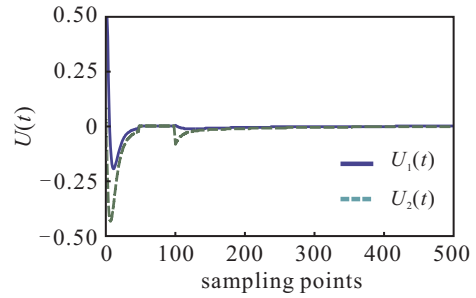


图 4 控制器变化

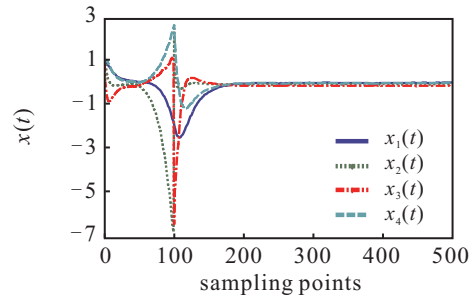


图 5 文献 [7] 方法状态变量的动态变化

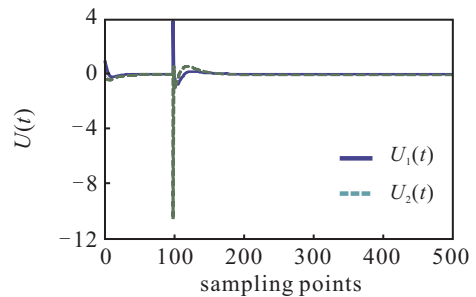


图 6 文献 [7] 方法控制器变化

4 结论

针对含有损失数据的系统, 可以采用反馈开关“通”和“断”来描述数据持续反馈和持续丢失两种工作状态, 运用切换系统的相关控制理论作为主要工具, 研究这两种状态相互切换的控制问题. 本文首先讨论了含有损失数据的连续时间系统模型和工作状态; 然后采用间歇控制方式, 对含有数据丢失和不确定性外部干扰的系统, 基于 H_∞ 性能指标给出了基于切换原理的鲁棒控制器的设计. 对于含有损失数据的非线性系统仍然很难控制, 这是未来的研究方向.

参考文献 (References)

- [1] Seiler P, Sengupta R. An H_∞ approach to networked control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2015, 50(3): 356-364.
- [2] Zhang Y, Tian Y P, Cai J. Stability analysis of networked control systems packet Loss[C]. Proc of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. New York: IEEE, 2006: 4556-4560.

- [3] Branicky M S. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(4): 475-482.
- [4] Jamal D, Pierre R, Claude I. Stability analysis and control synthesis for switched systems: A switched Lyapunov function approach[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(11): 1883-1887.
- [5] Zhang W A, Yu L. Output feedback stabilization of networked control systems with packet dropouts[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(9): 1705-1710.
- [6] 关治洪, 黄剑, 丁李, 等. 网络控制系统的性能分析与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 34-38.
(Guan Z H, Huang J, Ding L, et al. The performance of network control system analysis and design[M]. Beijing: Science Press: 2016: 34-38.)
- [7] Rabello A, Bhaya A. Stability of asynchronous dynamical systems with rate constraints and application[J]. Proc Control Theory Application, 2003, 150(5): 546-550.
- [8] 张喜民, 李建东, 陈实. 具有时延和数据包丢失的网络控制系统稳定性[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 494-502.
(Zhang X M, Li J D, Chen S. Stability of the networked control systems with time-delay and data packet dropout[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(3): 494-502.)
- [9] Ling Q, Lemmon M D. Roust performance of soft real-time networked control systems with data dropouts[C]. Proc of the 41st IEEE Conf on Decision and Control. New York: IEEE, 2002: 1225-1230.
- [10] Ling Q, Lemmon M D. Soft real-time scheduling of networked control systems with dropouts governed by a Markov chain[C]. Proc of American Control Conf. New York: IEEE, 2003: 4845-4850.
- [11] 邱占芝, 张庆灵, 连志春, 等. 存在时延和数据包丢失情况下状态反馈网络控制系统的指数稳定性[J]. 信息与控制, 2005, 34(5): 567-575.
(Qiu Z Z, Zhang Q L, Lian Z C, et al. Exponential stability of state feedback networked control system with time-delay and data packet dropout[J]. Information and Control, 2005, 34(5): 567-575.)
- [12] Liu Wenhui, Lim Cheng-Chew, Shi Peng, et al. Sampled-data fuzzy control for a class of nonlinear systems with missing data and disturbances[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2016, 76(3): 320-341.
- [13] Daltrophe Hadassa, Dolev Shlomi, Lotker Zvi. Brief announcement: Mending the big-data missing information[C]. Distributed Computing—30th Int Symposium. Springer Verlag, 2016: 474-476.
- [14] 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: 74-79.
(Yu L. Robust control—A linear matrix inequality approach[M]. Beijing: Tsinghua University, 2002: 74-79.)

(责任编辑: 郑晓蕾)

下 期 要 目

- 绿色车间调度优化研究进展..... 王 凌, 等
- 基于自适应配对控制的多目标演化算法..... 张秀杰, 等
- 一种基于多工况识别的过程在线监测方法..... 熊伟丽, 等
- 基于工序指标耦合关系分解的选冶全流程分层优化方法..... 刘 潭, 等
- WSNs中基于期望网络覆盖和分簇压缩感知的数据收集方案..... 刘洲洲, 等
- 基于2D理论的点对点综合预测迭代学习控制..... 洪英东, 等
- 斐波那契树优化算法全局随机性概率收敛分析..... 董 易, 等
- 基于反卷积特征提取的深度卷积神经网络学习..... 吕恩辉, 等
- 基于Block-RPLS模型自适应更新的质量预测方法..... 王培良, 等
- 考虑可靠性的时域证据组合方法..... 陈云翔, 等
- 基于局部分布的贝叶斯自适应共振理论增量聚类算法..... 王 玲, 等
- 基于全状态预设性能的受限指令反演控制器设计..... 张 杨, 等
- 基于改进暗通道先验的交通图像去雾新方法..... 王泽胜, 等