

无线网络环境下工业过程运行反馈控制方法

范家璐¹ 姜 艺¹ 柴天佑¹

摘 要 针对一类工业过程运行控制中采用无线网络传输运行指标反馈值时存在的噪声和丢包问题, 建立了输入为过程控制的输入输出、输出为运行指标的随机过程模型; 提出了由不同采样速率的过程控制与过程控制设定值反馈控制组成的运行反馈控制方法; 采用 Lyapunov 函数和不同采样频率的提升技术设计了过程 PI 控制器参数和过程控制设定值反馈控制器参数, 保证了双闭环控制系统的随机稳定性; 同时实现了运行指标实际值与目标值稳态误差的均值为零; 通过浮选过程运行反馈控制仿真实验验证了本文所提方法的有效性。

关键词 运行指标, 无线网络, 噪声, 丢包, 浮选过程

引用格式 范家璐, 姜艺, 柴天佑. 无线网络环境下工业过程运行反馈控制方法. 自动化学报, 2016, 42(8): 1166–1174

DOI 10.16383/j.aas.2016.c150771

Operational Feedback Control of Industrial Processes in a Wireless Network Environment

FAN Jia-Lu¹ JIANG Yi¹ CHAI Tian-You¹

Abstract This paper studies operational control design for a class of industrial processes in which the operational index is transmitted back via wireless networks, whose noise and packet dropout may negatively affect the operational control performance. Firstly, a stochastic process model of operational index is established with the input and output of process control as its input and the operational index as its output. Secondly, a dual-layer model combining process control and set-point feedback control is presented with different sampling rates. Thirdly, a Lyapunov function and a lifting method between multirate systems are adopted to design a process PI controller and a set-point feedback controller to guarantee the stochastic stability of the dual closed-loop control system and that the mean value of steady-state error between the realistic and target operational index is zero. Finally, a simulation experiment on the operational feedback control in an industrial flotation process is conducted to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words Operational index, wireless networks, noise, packet dropout, flotation processes

Citation Fan Jia-Lu, Jiang Yi, Chai Tian-You. Operational feedback control of industrial processes in a wireless network environment. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(8): 1166–1174

工业过程运行优化与控制^[1–5] 由过程控制设定值优化和过程控制两层结构组成. 过程控制设定值优化通过优化反映产品加工过程中质量、效率与消耗等运行指标产生过程控制设定值; 过程控制使被控输出跟踪设定值。

实时优化 (Real time optimization, RTO)^[6–7] 以运行效益为运行指标, 采用运行层的非线性静态模型开环优化运行指标, 确定过程控制设定值, 通过

过程控制使被控输出跟踪设定值, 从而尽可能使过程运行在经济优化状态. 对于复杂工业过程, 如电熔镁炉、磨机和浮选机等, 由于其生产边界条件变化频繁, 如原材料成分波动、原矿品位低等, 生产过程处于动态运行, 难以采用 RTO 等基于稳态模型的运行优化, 虽然可以采用智能运行反馈控制^[8], 然而上述两种方法均没有考虑过程控制跟踪设定值的动态误差对运行优化与控制的影响。

现有的工业过程运行优化控制中, 过程控制输入与输出信息传输采用设备网, 设定值控制的信息传输采用工业以太网. 已有运行优化控制方法中鲜有考虑不同网络环境下数据通信对运行控制的影响^[9]. 文献 [10] 首次探讨了双网环境下以太网通信可能出现的丢包现象对过程控制设定值闭环优化控制的影响, 并相应提出了设定值模型预测控制方法; 文献 [11–12] 进一步将该方法扩展为基于输出反馈的运行控制方法; 文献 [13] 首次探讨了双网环境下以太网通信可能出现的随机时滞现象, 对过程控制设

收稿日期 2015-11-17 录用日期 2016-02-26
Manuscript received November 17, 2015; accepted February 26, 2016

国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2015AA043802), 国家自然科学基金 (61304028, 61333012, 61533015) 资助

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2015AA043802) and National Natural Science Foundations of China (61304028, 61333012, 61533015)

本文责任编辑 夏元清

Recommended by Associate Editor XIA Yuan-Qing

1. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110819

1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819

定值闭环优化控制的影响. 然而, 该类方法只适用于通过以太网传输运行指标的优化控制.

由于运行指标是表征产品在加工中的质量指标、效率指标和能耗与物耗等相关的指标, 现有的工业过程控制系统没有考虑运行指标闭环控制, 运行指标的检测往往远离控制系统, 加上工业生产中设备通常处于运动状态 (如回转窑、球磨机) 或者工作在恶劣环境 (封闭、高温、高压、烟雾) 下, 难以采用有线网络传输运行指标. 因此, 在该类工业生产过程中, 仍普遍采用人工设定开环控制, 当工况变化频繁时, 不能及时准确地调整设定值, 致使这类设备长期运行在非经济优化状态, 甚至造成故障工况. 与此同时, 随着物联网^[14-15] 等新兴技术的出现, 可以采用工业无线网络将运行指标反馈至控制系统, 从而对无法或不易部署有线网络的工业过程实现运行反馈控制.

当然, 物联网在实现工业过程信息物理系统 (Cyber physical systems, CPS) 的同时, 易受丢包、尤其是噪声的干扰, 从而引起系统控制性能下降, 甚至不稳定. 以往仅用于实现工业过程在线监测与开环控制^[16]. 但采用闭环反馈控制运行指标, 就必须考虑无线网络可能出现的噪声、丢包的影响.

因此, 本文针对运行指标无线传输时噪声和丢包共同存在的一类工业过程, 采用 Lyapunov 函数设计了过程 PI 控制器和设定值反馈控制器, 并以浮选过程为对象进行了仿真实验.

1 问题描述

无线网环境下工业过程运行指标反馈控制结构如图 1 所示, 工业过程由被控对象与运行过程组成. 过程控制设定值反馈控制器根据经无线传输处理的运行指标 $r_f(T)$ 与运行指标目标值 $r^*(T)$ 的误差产生过程控制设定值 $y^*(T)$, 过程 PI 控制根据输出 $y(k)$ 与设定值 $y^*(T)$ 的误差产生输入 $u(k)$ 作用于被控对象, 使其输出 $y(k)$ 跟踪设定值 $y^*(T)$.

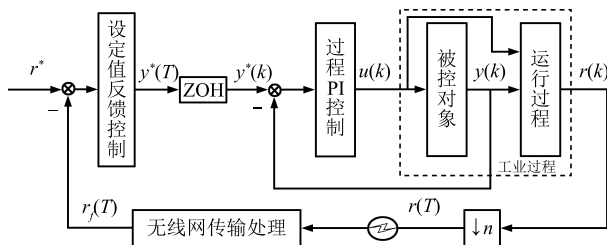


图 1 无线网络环境下工业过程运行反馈控制结构

Fig. 1 The structure of industrial process operational feedback control under wireless network environment

在实际工业过程中, 设定值反馈控制是慢过程, 过程控制是快过程; 设过程控制采样周期为 1, 设定

值反馈控制采样周期为 n , $n \in \mathbf{Z}^+$. $r(T)$ 经无线传输后, 由于噪声和丢包的影响, 经无线网传输处理产生 $r_f(T)$, $r_f(T)$ 可能与 $r(T)$ 不同, 这将对整个控制系统的性能产生影响.

1.1 运行控制过程模型

1.1.1 过程控制对象模型

工业装置运行在工作点附近, 在工作点过程控制对象的输入输出模型线性化后, 由状态空间模型描述

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $x(k)$ 是被控对象状态, 为 $n_x \times 1$ 维, $u(k)$ 是被控输入, 为 $n_u \times 1$ 维, $y(k)$ 是被控输出, 为 $n_y \times 1$ 维. A 、 B 和 C 分别为 $n_x \times n_x$ 、 $n_x \times n_u$ 和 $n_y \times n_x$ 维.

1.1.2 无线网环境下运行指标模型

某些工业过程的运行指标通常与过程控制的输入、输出相关, 其模型如下:

$$r(k) = My(k) + Nu(k) \quad (2)$$

其中, $r(k)$ 维数为 $n_r \times 1$, M 为过程控制输出的系数矩阵, 为 $n_r \times n_y$ 维, N 为过程控制输入的系数矩阵, 为 $n_r \times n_u$ 维. 运行指标仅在设定值反馈控制的采样时刻 T 进行检测传输.

本文考虑无线网噪声和丢包对运行指标传输的影响, 运行指标经无线网传输后处理模型描述如下:

$$\begin{aligned} r_f(T) &= \delta(T)(1 + \rho(T))r(T) + \\ &\quad (1 - \delta(T))r_f(T-1) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\delta(T)$ 的值与丢包概率相关, 服从 0-1 分布, 设丢包的概率为 $\bar{\delta}$ ($0 < \bar{\delta} < 1$), 那么下式成立:

$$\begin{cases} P\{\delta(T) = 1\} = E\{\delta(T)\} = \bar{\delta} \\ P\{\delta(T) = 0\} = 1 - \bar{\delta} \end{cases} \quad (4)$$

冲击噪声是引发无线网络传输差错的主要因素^[17]. 本文假设网络噪声与真实信号比值为服从均匀分布 $\rho(T) \sim U(-\rho_m, \rho_m)$, 其中 $0 < \rho_m < 1$, 则

$$E\{\rho(T)\} = 0, \quad E\{\rho^2(T)\} = \frac{\rho_m^2}{3} = \theta \quad (5)$$

由模型 (3)~(5) 可知, 本文采用无线网传输处理方式对运行指标成功传输 ($\delta(T) = 1$) 时, 反馈值为包含噪声的真实运行指标 $r_f(T) = (1 + \rho(T)) \times r(T)$; 传输发生丢包 ($\delta(T) = 0$) 时, 则反馈上一设定值反馈控制采样时刻运行指标反馈值 $r_f(T) = r_f(T-1)$.

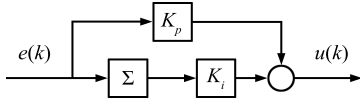


图3 过程PI控制器

Fig.3 Process PI controller

其中, K_p 与 K_i 分别是 PI 控制器的比例系数和积分系数, 维数均为 $n_u \times n_y$; 取 $K = [K_p \ K_i]$, 为本节所求项, 其维数为 $n_u \times 2n_y$; $e(k) = y^*(k) - y(k)$ 表示在每个采样时刻输出 $y(k)$ 与设定值 $y^*(k)$ 的误差, 其中 $y^*(k)$ 由设定值反馈控制器产生. $e(k)$ 维数为 $n_y \times 1$, 并且有 $E(k) = \sum_{i=0}^{k-1} e(i)$.

为了设计 K , 引入增广向量 $\eta(k) = (x^T(k), E^T(k))^T$, 维数为 $(n_x + n_y) \times 1 = n_\eta \times 1$, 则有 PI 控制的闭环系统方程:

$$\begin{aligned} \eta(k+1) &= A_h \eta(k) + B_h y^*(k) \\ y(k) &= C_h \eta(k) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $A_h = \bar{A} + \bar{B}K\bar{C}$, 维数为 $n_\eta \times n_\eta$; $\bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & I \end{bmatrix}$, 维数为 $n_\eta \times n_\eta$; $\bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$, 维数为 $n_\eta \times n_u$; $\bar{C} = \begin{bmatrix} -C & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$, 维数为 $2n_y \times n_\eta$; $B_h = \begin{bmatrix} BK_p \\ I \end{bmatrix}$, 维数为 $n_\eta \times n_y$; $C_h = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix}$, 维数为 $n_y \times n_\eta$.

选取 Lyapunov 函数 $V(k) = \eta^T(k)P\eta(k)$, 其中 P 为对称正定矩阵 ($P > 0$ 且 $P^T = P$), 维数为 $n_\eta \times n_\eta$. 根据 Lyapunov 第二方法, 如有式 (10) 成立, 则有系统 (9) 渐近稳定.

$$\Delta V(k) = V(k+1) - V(k) < -\alpha V(k) \quad (10)$$

其中, $\alpha \geq 0$. 衰减率取值越大, 则由此得到的控制器参数使系统响应越快, 超调也会变大. 式 (10) 等价于 $A_h^T P A_h - P < -\alpha P$, 即

$$(\bar{A} + \bar{B}K\bar{C})^T P (\bar{A} + \bar{B}K\bar{C}) - (1 - \alpha)P < 0 \quad (11)$$

根据 Schur 补定理, 有

$$\begin{bmatrix} -P & P(\bar{A} + \bar{B}K\bar{C}) \\ (\bar{A} + \bar{B}K\bar{C})^T P & -(1 - \alpha)P \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

因为 $P\bar{B}K\bar{C}$ 项存在, 式 (12) 不是线性矩阵不等式形式, 需将其转化为线性矩阵不等式才可以求解^[18]. 做变量替换 $P\bar{B} = \bar{B}W$ 及 $X = WK$, 维数

为 $n_u \times n_u$, X 维数为 $n_u \times 2n_y$, 其中 W 非奇异, 则有

$$\begin{bmatrix} -P & P\bar{A} + \bar{B}X\bar{C} \\ (P\bar{A} + \bar{B}X\bar{C})^T & -(1 - \alpha)P \end{bmatrix} < 0 \quad (13)$$

可以通过 Matlab 工具包 YALMIP 求解式 (13) 得 P 和 X , 则过程跟踪控制器的增益 $K = [K_p \ K_i] = W^{-1}X$, 使闭环系统 (9) 渐近稳定.

注 1. 对于 $y^*(k) = 0$ 的系统, 根据 Lyapunov 定理, 系统在以上控制器参数条件下是渐近稳定的, 当 $y^*(k)$ 恒定时, 系统的平衡点变为 $(I - A_f)^{-1}B_f y^*(k)$, 并且闭环系统可以到达该平衡点. 且存在积分部分, 系统可以跟踪给定的设定值.

2.2.2 设定值反馈控制器设计

设定值反馈控制的被控对象的动态方程可采用提升技术获得. 首先将过程 PI 控制闭环方程 (9) 结合式 (6) 得到

$$\begin{aligned} \eta(T+1) &= \eta(n(k+1)) = \eta(nk+n) = \\ &A_h \eta(nk+n-1) + B_h y^*(nk+n-1) = \\ &A_h \eta(nk+n-1) + B_h y^*(T) = \\ &A_h^2 \eta(nk+n-2) + A_h B_h y^*(T) + \\ &B_h y^*(T) = \dots = \\ &A_h^n \eta(nk) + \sum_{i=0}^{n-1} A_h^i B_h y^*(T) = \\ &A_h^n \eta(T) + \sum_{i=0}^{n-1} A_h^i B_h y^*(T) \end{aligned}$$

可简写为

$$\eta(T+1) = A_o \eta(T) + B_o y^*(T) \quad (14)$$

其中, $A_o = A_h^n$, $B_o = \sum_{i=0}^{n-1} A_h^i B_h$, 维数分别为 $n_\eta \times n_\eta$ 和 $n_\eta \times n_y$.

结合式 (2) 与式 (14), 得运行指标 $r(T)$ 与设定值 $y^*(T)$ 的动态模型:

$$\begin{aligned} r(T) &= My(T) + Nu(T) = \\ &\left(M \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} + NK \begin{bmatrix} -C & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \right) \eta(T) + \\ &NK \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} y^*(T) = C_o \eta(T) + D_o y^*(T) \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $C_o = MC_h + NK\bar{C}$, $D_o = NK[I \ 0]^T$, 维数分别为 $n_r \times n_\eta$ 和 $n_r \times n_y$.

由图 2 知, $e_f(T)$ 为无线网环境下运行指标反馈值与目标值的误差, 设定值控制器在每一次设定层采样时刻计算设定值补偿量 $\Delta y^*(T) = Fe_f(T)$, 其中 F 为待设计反馈控制律, 从而过程控制设定值

$$\begin{aligned} y^*(T+1) &= y^*(T) + \Delta y^*(T) = \\ &= y^*(T) + Fe_f(T) = \\ &= y^*(T) + F(r^* - r_f(T)) \end{aligned} \quad (16)$$

本文采用 Lyapunov 函数方法设计 F , 从而实现整体闭环系统随机稳定与期望跟踪. 因而, 联合式 (14)~(16), 构造如下系统模型

$$\chi(T+1) = \tilde{A}\chi(T) + \tilde{B}r^* \quad (17)$$

其中, $\chi(T) = [\eta^T(T), y^{*T}(T), r_f^T(T-1)]^T$ 为状态向量, 维数为 $(n_\eta + n_y + n_r) \times 1 = (n_x + 2n_y + n_r) \times 1 = n_\chi \times 1$, $\tilde{A} = \begin{bmatrix} A_o & B_o & 0 \\ -\delta(T)(1+\rho(T))FC_o & I - \delta(T)(1+\rho(T))FD_o & (\delta(T)-1)F \\ \delta(T)(1+\rho(T))C_o & \delta(T)(1+\rho(T))D_o & 1-\delta(T) \end{bmatrix}$, 维数为 $n_\chi \times n_\chi$, $\tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ F \\ 0 \end{bmatrix}$, 维数为 $n_\chi \times n_r$.

由于系统 (17) 为随机系统, 其稳定性定义^[19]如下:

对于式 (17) 的系统状态 $\chi(T)$, 如果存在正实数 ε 使得如下不等式成立, 则系统 (17) 为均方意义下随机稳定.

$$\mathbb{E} \left\{ \sum_{T=0}^{\infty} \|\chi(T)\|_2 \right\} < \varepsilon \quad (18)$$

其中, $\|\chi(T)\|_2$ 为 $\chi(T)$ 的 2-范数.

选取 Lyapunov 函数 $\bar{V}(T) = \chi^T(T)\bar{P}\chi(T)$, 其

中, $\bar{P}$ 为对称正定矩阵, 即 $\bar{P} = \begin{bmatrix} \bar{P}_1 & \bar{P}_2 & \bar{P}_3 \\ \bar{P}_2^T & \bar{P}_4 & \bar{P}_5 \\ \bar{P}_3^T & \bar{P}_5^T & \bar{P}_6 \end{bmatrix} > 0$, $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3, \bar{P}_4, \bar{P}_5, \bar{P}_6$ 的维数分别为 $n_\eta \times n_\eta$, $n_\eta \times n_y$, $n_\eta \times n_r$, $n_y \times n_y$, $n_y \times n_r$, $n_r \times n_r$, 则有

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{\Delta\bar{V}(T)\} &= \mathbb{E}\{\bar{V}(T+1) - \bar{V}(T)\} = \\ &= \mathbb{E}\{[\tilde{A}\chi(T)]^T \bar{P} [\tilde{A}\chi(T)] - \\ &= \chi^T(T)\bar{P}\chi(T)\} = \\ &= \chi^T(T)[\bar{\Phi} - \bar{P}]\chi(T) \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $\bar{\Phi} = \mathbb{E}\{\tilde{A}^T \bar{P} \tilde{A}\}$. 定义衰减率 $\gamma \geq 0$, 假设存在 $\bar{P}$ 和 F 使不等式 $\mathbb{E}\{\Delta\bar{V}(T)\} < -\gamma \mathbb{E}\{\bar{V}(T)\}$ 成

立, 将其从 $T=0$ 到 $T=\infty$ 叠加, 可得

$$\begin{aligned} &\chi^T(\infty)\bar{P}\chi(\infty) - \chi^T(0)\bar{P}\chi(0) < \\ &- \gamma \mathbb{E} \left\{ \sum_{T=0}^{\infty} \chi^T(T)\bar{P}\chi(T) \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

因为 $\lambda_{\min}(\bar{P})\|\chi(T)\|_2 < \chi^T(T)\bar{P}\chi(T) < \lambda_{\max}(\bar{P})\|\chi(T)\|_2$, $\lambda_{\min}(\bar{P})\|\chi(T)\|_2$ 为 $\|\chi(T)\|_2$ 的最小特征值, $\lambda_{\max}(\bar{P})\|\chi(T)\|_2$ 为 $\|\chi(T)\|_2$ 的最大特征值, 所以

$$\begin{aligned} &\chi^T(\infty)\bar{P}\chi(\infty) - \chi^T(0)\bar{P}\chi(0) < \\ &- \lambda_{\min}(\bar{P})\gamma \mathbb{E} \left\{ \sum_{T=0}^{\infty} \|\chi(T)\|_2 \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

由于 $\chi^T(\infty)\bar{P}\chi(\infty) \geq 0$, 不等式 (21) 等价于

$$\mathbb{E} \left\{ \sum_{T=0}^{\infty} \|\chi(T)\|_2 \right\} < \chi^T(0)S\chi(0) \quad (22)$$

其中, $S = (\lambda_{\min}(\bar{P})\gamma)^{-1}\bar{P}$, 显然 S 是正定的, 则式 (22) 满足式 (19), 所以系统稳定条件可以等价于 $\mathbb{E}\{\Delta\bar{V}(T)\} < -\gamma \mathbb{E}\{\bar{V}(T)\}$ 且 $\bar{P}$ 是对称正定矩阵, 即

$$\bar{\Phi} - \bar{P} < -\gamma\bar{P}, \quad \bar{P} > 0 \quad (23)$$

做变量替换 $\bar{P}_5^T = G_1\bar{P}_4$, $\bar{P}_2 = G_2\bar{P}_4$, $Y = \bar{P}_4F$, 其中 G_1 与 G_2 为给定矩阵, 维数为 $n_\eta \times n_y$ 和 $n_r \times n_y$, Y 维数为 $n_y \times n_r$, 则可以将式中的 $\bar{\Phi}$ 转换为如下形式:

$$\bar{\Phi} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & \Phi_2 & \Phi_3 \\ \Phi_4 & \Phi_5 & \Phi_6 \\ \Phi_7 & \Phi_8 & \Phi_9 \end{bmatrix}$$

其中,

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= A_o^T \bar{P}_1 A_o - \bar{\delta} C_o^T Y^T G_2^T A_o + \bar{\delta} C_o^T \bar{P}_3^T A_o - \\ &\bar{\delta} A_o^T G_2 Y C_o + \bar{\delta}(1+\theta) C_o^T Y^T \bar{P}_4^{-1} Y C_o - \\ &\bar{\delta}(1+\theta) C_o^T G_1 Y C_o + \bar{\delta} A_o^T \bar{P}_3 C_o - \\ &\bar{\delta}(1+\theta) C_o^T Y^T G_1^T C_o + \bar{\delta}(1+\theta) C_o^T \bar{P}_6 C_o \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= A_o^T \bar{P}_1 B_o - \bar{\delta} C_o^T Y^T G_2^T B_o + \bar{\delta} C_o^T \bar{P}_3^T B_o + \\ &A_o^T G_2 \bar{P}_4 - \bar{\delta} C_o^T Y^T + \bar{\delta} C_o^T G_1 \bar{P}_4 - \bar{\delta} A_o^T G_2 Y D_o + \\ &\bar{\delta}(1+\theta) C_o^T Y^T \bar{P}_4^{-1} Y D_o - \bar{\delta}(1+\theta) C_o^T G_1 Y D_o + \\ &\bar{\delta} A_o^T \bar{P}_3 D_o - \bar{\delta}(1+\theta) C_o^T Y^T G_1^T D_o + \\ &\bar{\delta}(1+\theta) C_o^T \bar{P}_6 D_o \end{aligned}$$

$$\Phi_3 = (\bar{\delta} - 1)A_o^T G_2 Y + (1 - \bar{\delta})A_o^T \bar{P}_3$$

$$\Phi_4 = \Phi_2^T$$

$$\begin{aligned} \Phi_5 = & B_o^T \bar{P}_1 B_o + \bar{P}_2^T B_o - \bar{\delta} D_o^T Y^T G_2^T B_o + \\ & \bar{\delta} D_o^T \bar{P}_3^T B_o + B_o^T G_2 \bar{P}_4 + \bar{P}_4 - \bar{\delta} D_o^T Y^T + \\ & \bar{\delta} D_o^T G_1 \bar{P}_4 - \bar{\delta} B_o^T G_2 Y D_o - \bar{\delta} Y D_o + \\ & \bar{\delta}(1 + \theta) D_o^T Y^T \bar{P}_4^{-1} Y D_o - \bar{\delta}(1 + \theta) D_o^T G_1 Y D_o + \\ & \bar{\delta} B_o^T \bar{P}_3 D_o + \bar{\delta} \bar{P}_4 G_1^T D_o - \bar{\delta}(1 + \theta) D_o^T Y^T G_1^T D_o + \\ & \bar{\delta}(1 + \theta) D_o^T \bar{P}_6 D_o \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_6 = & (\bar{\delta} - 1)B_o^T G_2 Y + (\bar{\delta} - 1)Y + \\ & (1 - \bar{\delta})B_o^T \bar{P}_3 + (1 - \bar{\delta})G_1 \bar{P}_4 \end{aligned}$$

$$\Phi_7 = \Phi_3^T$$

$$\Phi_8 = \Phi_6^T$$

$$\begin{aligned} \Phi_9 = & (1 - \bar{\delta})Y^T \bar{P}_4^{-1} Y - (1 - \bar{\delta})G_1 Y + \\ & (1 - \bar{\delta})\bar{P}_6 - (1 - \bar{\delta})Y^T G_1^T \end{aligned}$$

利用 Schur 补定理, 可将式 (23) 转化为

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -[\bar{\delta}(1+\theta)]^{-1} \bar{P}_4 & Y C_o & Y D_o & 0 & 0 \\ * & \Pi_{11} & \Pi_{12} & \Pi_{13} & 0 \\ * & * & \Pi_{22} & \Pi_{23} & 0 \\ * & * & * & \Pi_{33} & Y^T \\ * & * & * & * & -(1-\bar{\delta})^{-1} \bar{P}_4 \end{bmatrix} < 0 \\ & \begin{bmatrix} \bar{P}_1 & G_2 \bar{P}_4 & \bar{P}_3 \\ * & \bar{P}_4 & \bar{P}_4 G_1^T \\ * & * & \bar{P}_6 \end{bmatrix} > 0 \end{aligned} \quad (24)$$

其中,

$$\begin{aligned} \Pi_{11} = & A_o^T \bar{P}_1 A_o - \bar{\delta} C_o^T Y^T G_2^T A_o + \bar{\delta} C_o^T \bar{P}_3^T A_o - \\ & \bar{\delta} A_o^T G_2 Y C_o - \bar{\delta}(1 + \theta) C_o^T G_1 Y C_o + \bar{\delta} A_o^T \bar{P}_3 C_o - \\ & \bar{\delta}(1 + \theta) C_o^T Y^T G_1^T C_o + \bar{\delta}(1 + \theta) C_o^T \bar{P}_6 C_o - \\ & (1 - \gamma) \bar{P}_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{12} = & A_o^T \bar{P}_1 B_o - \bar{\delta} C_o^T Y^T G_2^T B_o + \bar{\delta} C_o^T \bar{P}_3^T B_o + \\ & A_o^T G_2 \bar{P}_4 - \bar{\delta} C_o^T Y^T + \bar{\delta} C_o^T G_1 \bar{P}_4 - \bar{\delta} A_o^T G_2 Y D_o - \\ & \bar{\delta}(1 + \theta) C_o^T G_1 Y D_o + \bar{\delta} A_o^T \bar{P}_3 D_o - \\ & \bar{\delta}(1 + \theta) C_o^T Y^T G_1^T D_o + \bar{\delta}(1 + \theta) C_o^T \bar{P}_6 D_o - \\ & (1 - \gamma) G_2 \bar{P}_4 \end{aligned}$$

$$\Pi_{13} = \Phi_3 - (1 - \gamma) \bar{P}_3$$

$$\Pi_{22} = B_o^T \bar{P}_1 B_o + \bar{P}_2^T B_o - \bar{\delta} D_o^T Y^T G_2^T B_o +$$

$$\bar{\delta} D_o^T \bar{P}_3^T B_o + B_o^T G_2 \bar{P}_4 + \bar{P}_4 - \bar{\delta} D_o^T Y^T +$$

$$\bar{\delta} D_o^T G_1 \bar{P}_4 - \bar{\delta} B_o^T G_2 Y D_o - \bar{\delta} Y D_o -$$

$$\bar{\delta}(1 + \theta) D_o^T G_1 Y D_o + \bar{\delta} B_o^T \bar{P}_3 D_o + \bar{\delta} \bar{P}_4 G_1^T D_o -$$

$$\bar{\delta}(1 + \theta) D_o^T Y^T G_1^T D_o + \bar{\delta}(1 + \theta) D_o^T \bar{P}_6 D_o -$$

$$(1 - \gamma) \bar{P}_4$$

$$\Pi_{23} = \Phi_6 - (1 - \gamma) \bar{P}_4 G_1^T$$

$$\Pi_{33} = -(1 - \bar{\delta}) G_1 Y - (1 - \bar{\delta}) Y^T G_1^T +$$

$$(1 - \bar{\delta}) \bar{P}_6 - (1 - \gamma) \bar{P}_6$$

求解式 (24), 可得 $\bar{P}_4$ 和 Y , 从而设定值反馈控制器 (16) 的参数 $F = \bar{P}_4^{-1} Y$, $\bar{P}$ 和 F , 使不等式 $E\{\Delta \bar{V}(T)\} < -\gamma E\{\bar{V}(T)\}$ 成立, 故不等式 (22) 成立, 系统 (17) 满足在均方意义下随机稳定性。

随机线性系统的均方稳定即全局稳定, 故向量 $\chi(T) = [\eta^T(T), y^{*T}(T), r_f(T-1)]^T$ 中的每个状态均收敛于平衡点. 由式 (16) 得 $\lim_{T \rightarrow \infty} E\{\Delta y^*(T)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} E\{F e_f(T)\} = 0$, 而 $\|F\|_2 \neq 0$, 故 $\lim_{T \rightarrow \infty} E\{e_f(T)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} E\{r^* - r_f(T)\} = 0$, 即

$$\lim_{T \rightarrow \infty} E\{r_f(T)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} E\{r_f(T)\} = r^* \quad (25)$$

又有

$$\lim_{T \rightarrow \infty} E\{r_f(T)\} = \bar{\delta}(1 + \rho) \lim_{T \rightarrow \infty} E\{r(T)\} +$$

$$(1 - \bar{\delta}) \lim_{T \rightarrow \infty} E\{r_f(T)\} \Rightarrow$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} E\{r_f(T)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} E\{r(T)\} \quad (26)$$

即实现了 $\lim_{T \rightarrow \infty} E\{r(T) - r^*\} = 0$.

3 仿真实验与性能分析

3.1 浮选过程模型简介

以浮选工业过程为对象, 进行本文提出的无线网络环境下工业过程运行指标反馈控制方法的仿真实验, 对于单个槽体, 浮选过程的数学模型为^[20-22]

$$\frac{dM_p^i}{dt} = - \left(k_p^i + \frac{q_T}{(1 - \varepsilon_g) A h_p} \right) M_p^i +$$

$$k_e^i M_e^i + q_a X_a^i \quad (27)$$

$$\frac{dM_e^i}{dt} = - \left(k_e^i + \frac{q_c}{(1 - \varepsilon_g)A(H - h_p)} \right) M_e^i + k_p^i M_p^i$$

(28)

其中, 精矿品位为

$$L_{cg} = \frac{M_e^1 g_{cp}^1 + M_e^2 g_{cp}^2}{M_e^1 + M_e^2} L_{cu}$$

(29)

尾矿品位为

$$L_{tg} = \frac{M_p^1 g_{cp}^1 + M_p^2 g_{cp}^2}{M_p^1 + M_p^2} L_{cu}$$

(30)

其中, $i = 1, 2$ 分别表示矿物种类 1 (主要为黄铜矿) 和矿物种类 2 (主要为脉石). M_p^i 为泥浆质量, M_e^i 为泡沫质量, q_a 为给矿矿浆流量, h_p 为矿浆液位高度. 其他参数均为常数, 物理意义见文献 [10].

选取黄铜矿浮选生产过程经济收益为运行指标, r^* 为单位时间目标经济收益, $r(T)$ 为单位时间实际经济收益. 过程控制输入为泥浆高度 h_p 与给矿流量 q_a , 即 $u = (h_p, q_a)$; 输出为精矿品位 L_{cg} 与尾矿品位 L_{tg} , 即 $y = (L_{cg}, L_{tg})$. $y^*(T) = (L_{cg}^*, L_{tg}^*)$ 的物理意义为黄铜矿浮选产品精尾矿品位设定值. 状态变量为泥浆质量与泡沫质量, 即 $x = (M_p^i, M_e^i)$. 由于时间常数相对较小, 给矿流量与矿浆入口电动阀门 PWM 占空比的信号转换可以认为是线性的. 各符号及其物理含义见表 1.

表 1 浮选过程符号表
Table 1 Flotation process symbol table

符号	物理含义	符号	物理含义
M_p	泥浆质量	h_p	液位高度
M_e	泡沫质量	q_a	泥浆流量
L_{cg}	精矿品位	r^*	运行指标目标值
L_{tg}	尾矿品位	$r(T)$	运行指标实际值

表 2 丢包与噪声序列表
Table 2 Packetdrop and noise table

采样点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\delta(k)/a$	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
$\delta(k)/b$	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
$\delta(k)/c$	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
$\rho(k)/a$	-0.1256	0.0803	0.1931	0.1227	0.0814	-0.0060	-0.1542	0.0659	-0.0539	-0.1440	0.0267	0.1292	0.0696
$\rho(k)/b$	-0.0197	-0.0351	0.1606	-0.1978	-0.0810	-0.1803	0.0773	0.0600	0.1932	0.0211	-0.0400	-0.1205	-0.0273
$\rho(k)/c$	-0.1224	0.1619	0.0277	0.0527	-0.1062	0.0195	0.1726	-0.0659	0.0622	-0.0432	0.0509	0.0796	0.0214

3.2 仿真实验设计及分析

3.2.1 对比实验方案

为验证本文提出方法 (Packetdrop + Noise) 的控制效果, 设计实验对比其与只考虑网络丢包对系统影响的运行反馈控制方法 (Packetdrop)^[11] 的性能.

3.2.2 参数选择

在仿真实例中, 令运行指标目标值 $r^* = 12$; 参考铜矿和尾矿的市场价格, 定义式 (2) 中 $M = [100 \quad -20]^T$, $N = [-0.01 \quad -0.1]^T$.

实验中过程控制的采样周期选择为 1 min, 设定值反馈控制的采样周期为 1 h, 即 $n = 60$. 过程控制和设定值反馈控制的衰减率取值分别为 $\alpha = 0.3$ 和 $\beta = 0$. 实验中的随机丢包序列满足伯努利二项分布, 其值为 1 表示正常传输, 为 0 时表示丢包发生. 噪声序列服从 $\rho(k) \sim U(-0.2, 0.2)$ 的均匀分布. 为说明实验结果的普遍性, 本实验随机选取 a 、 b 、 c 三组丢包与噪声序列下的实验结果, 三组丢包与噪声序列见表 2.

3.2.3 实验结果及分析

图 4 为采用表 2 实验参数两种控制方法的运行指标实际值与目标值曲线. 由图 4 可知在三组实验情况下, 方法 1 (Packetdrop) 尽管使运行指标实际值在目标值周围波动; 但由于噪声的影响, 波动较大; 本文所提方法 (Packetdrop + Noise) 由于设定值反馈控制, 考虑了丢包与噪声, 运行指标实际值在目标值上下波动明显减小.

图 5 给出了无线网络存在噪声和丢包时精尾矿品位设定值与实际值曲线. 设定初始值为 $y^* = [0.1, 0.05]$, 从图 5 中可以看到, 在每一个设定层采样时刻, 实际的精矿品位与尾矿品位能够分别快速跟踪设定值.

图 6 给出了三组实验情况下过程控制输入 u 曲线, 对照图 5 可以看出, 当精矿品位与尾矿品位跟踪设定值变化趋于稳定时, 过程控制输入也趋于稳定.

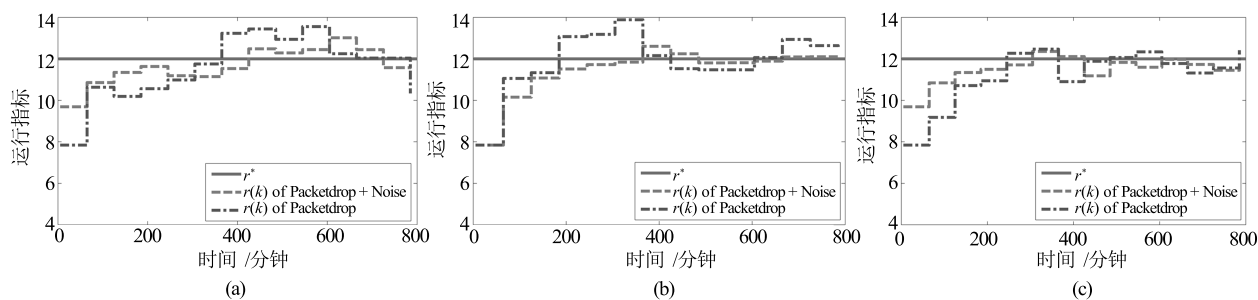


图 4 运行指标实际值与目标值曲线

Fig. 4 The actual operational index and target operational index

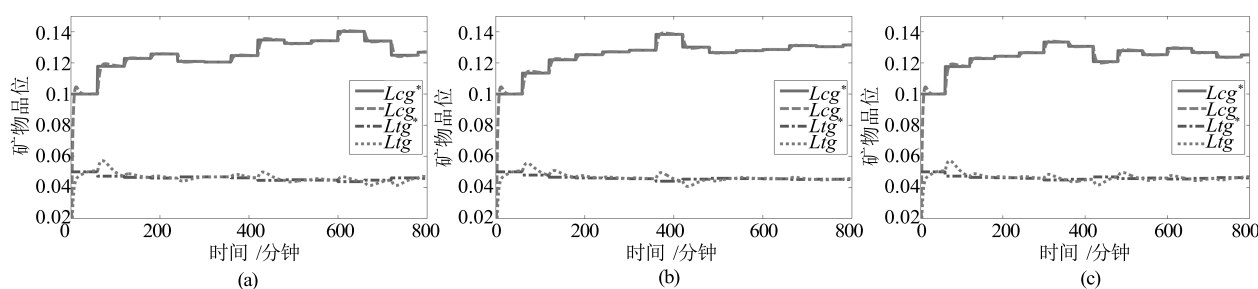


图 5 过程控制设定值与输出曲线

Fig. 5 The process control setpoint and output

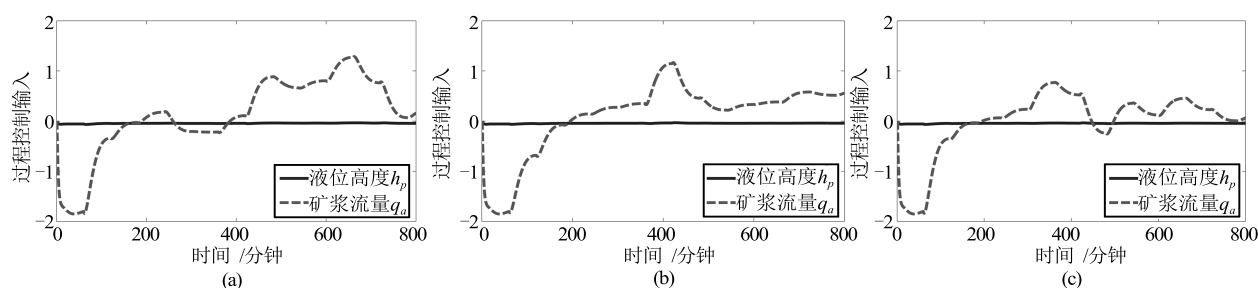


图 6 过程控制输入 \$u\$ 的曲线

Fig. 6 The process control input \$u\$

4 结论

本文针对运行指标无线传输时噪声和丢包共同存在的一类工业过程, 提出了由过程 PI 控制和设定值反馈控制组成的不同采样速率的双闭环运行反馈控制方法, 由于采用 Lyapunov 函数和不同采样频率的提升技术设计了 PI 控制器和设定值反馈控制器的参数, 保证了双闭环控制系统的随机稳定性和运行指标实际值与目标值的稳态误差均值为零. 浮选工业过程的仿真实验和理论分析表明本文方法对于在无线网络环境下的运行反馈控制具有参考价值.

致谢

感谢加拿大阿尔伯塔大学陈通文教授在本文成文过程中的诸多启发性讨论和建设性意见.

References

- 1 Cutler C R, Perry R T. Real time optimization with multi-variable control is required to maximize profits. *Computers and Chemical Engineering*, 1983, **7**(5): 663–667
- 2 Dai Wei, Chai Tian-You. Data-driven optimal operational control of complex grinding processes. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(9): 2005–2014
(代伟, 柴天佑. 数据驱动的复杂磨矿过程运行优化控制方法. *自动化学报*, 2014, **40**(9): 2005–2014)
- 3 Chai Tian-You. Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms of control and optimization theories. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 641–648
(柴天佑. 生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战. *自动化学报*, 2009, **35**(6): 641–648)
- 4 Chai T Y, Ding J L, Wu F H. Hybrid intelligent control for optimal operation of shaft furnace roasting process. *Control Engineering Practice*, 2011, **19**(3): 264–275

- 5 Chai Tian-You. Operational optimization and feedback control for complex industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1744–1757
(柴天佑. 复杂工业过程运行优化与反馈控制. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1744–1757)
- 6 Pan Hong-Guang, Gao Hai-Nan, Sun Yao, Zhang Ying, Ding Bao-Cang. The algorithm and software implementation for double-layered model predictive control based on multi-priority rank steady-state optimization. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(3): 405–414
(潘红光, 高海南, 孙耀, 张英, 丁宝苍. 基于多优先级稳态优化的双层结构预测控制算法及软件实现. 自动化学报, 2014, **40**(3): 405–414)
- 7 Findeisen W, Bailey F N, Bryds M, Malinawski K, Tatjewski P, Wozniak A. *Control and Coordination in Hierarchical Systems*. New York: John Wiley & Son, 1980.
- 8 Chai Tian-You, Ding Jin-Liang, Wang Hong, Su Chun-Yi. Hybrid intelligent optimal control method for operation of complex industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(5): 506–515
(柴天佑, 丁进良, 王宏, 苏春翌. 复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法. 自动化学报, 2008, **34**(5): 506–515)
- 9 Fan Jia-Lu, Zhang Ye-Wei, Chai Tian-You. Optimal operational feedback control for a class of industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(10): 1754–1761
(范家璐, 张也维, 柴天佑. 一类工业过程运行反馈优化控制方法. 自动化学报, 2015, **41**(10): 1754–1761)
- 10 Chai T Y, Zhao L, Qiu J B, Liu F Z, Fan J L. Integrated network-based model predictive control for setpoints compensation in industrial processes. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, **9**(1): 417–426
- 11 Liu F Z, Gao H J, Qiu J B, Yin S, Fan J L, Chai T Y. Networked multirate output feedback control for setpoints compensation and its application to rougher flotation process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, **61**(1): 460–468
- 12 Wang T, Gao H J, Qiu J B. A combined adaptive neural network and nonlinear model predictive control for multirate networked industrial process control. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2016, **27**(2): 416–425
- 13 Jiang Y, Fan J L, Chai T Y, Chen T W. Setpoint dynamic compensation via output feedback control with network induced time delays. In: *Proceedings of the 2015 American Control Conference*. Chicago, IL: IEEE, 2015. 5384–5389
- 14 Perera C, Zaslavsky A, Christen P, Georgakopoulos D. Sensing as a service model for smart cities supported by internet of things. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2014, **25**(1): 81–93
- 15 Xu L D, He W, Li S C. Internet of things in industries: a survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, **10**(4): 2233–2243
- 16 Gungor V C, Hancke G P. Industrial wireless sensor networks: challenges, design principles, and technical approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(10): 4258–4265
- 17 Lu X, Zhang H S. Optimal estimation in wireless sensor networks with double measurements and multiplicative noise. In: *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference (CCC)*. Beijing, China: IEEE, 2010. 4837–4840
- 18 Boyd S, El Ghaoui L, Feron E, Balakrishnan V. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994.
- 19 Khasminskii R. *Stochastic Stability of Differential Equations*. Springer-Verlag, 2012.
- 20 Harris C C. Multiphase models of flotation machine behaviour. *International Journal of Mineral Processing*, 1978, **5**(2): 107–129
- 21 Thornton A J. The Application and Future Development of Adaptive Control to the Froth Flotation Process [Ph. D. dissertation], The University of Queensland, Australian, 2015.
- 22 Maldonado M, Sbarbaro D, Lizama E. Optimal control of a rougher flotation process based on dynamic programming. *Minerals Engineering*, 2007, **20**(3): 221–232



范家璐 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室副教授. 2011 年获浙江大学控制科学与工程系博士学位 (与美国宾夕法尼亚州立大学联合培养). 主要研究方向为工业过程运行控制, 工业无线传感器网络与移动社会网络. 本文通信作者. E-mail: fanjialu@gmail.com

(**FAN Jia-Lu** Associate professor at the State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University. She received her Ph. D. degree from Zhejiang University in 2011. She was a visiting scholar with the Pennsylvania State University during 2009~2010. Her research interest covers networked operational control, industrial wireless sensor networks, and mobile social networks. Corresponding author of this paper.)



姜 艺 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室控制理论与控制工程专业硕士研究生. 2014 年获得东北大学自动化学士学位. 主要研究方向为工业过程运行控制, 网络控制.

E-mail: JY369356904@163.com

(**JIANG Yi** Master student at the State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University. He received his bachelor degree in automation from Northeastern University in 2014. His research interest covers industrial process operational control and networked control.)



柴天佑 中国工程院院士, 东北大学教授, IEEE Fellow, IFAC Fellow. 1985 年获得东北大学博士学位. 主要研究方向为自适应控制, 智能解耦控制, 流程工业综合自动化理论、方法与技术.

E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn

(**CHAI Tian-You** Academician of Chinese Academy of Engineering, professor at Northeastern University, IEEE Fellow, IFAC Fellow. He received his Ph. D. degree from Northeastern University in 1985. His research interest covers adaptive control, intelligent decoupling control, and integrated automation theory, method and technology of industrial process.)