文章编号:1000-8152(2011)02-0199-07

多变量解耦控制的工业过程运行层次控制方法

周 平,柴天佑

(东北大学 流程工业综合自动化教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

摘要:基于多变量解耦控制技术,提出了一种工业过程运行的层次控制方法,用于实现表征过程整体运行性能的 工艺指标.底层回路控制系统采用多回路PI/PID控制技术进行设计,用于将关键工艺参数控制在给定的工作点.针 对由被控过程和底层回路控制系统构成的广义对象,采用扩展的单位反馈解耦方法设计上层回路设定控制器.该 回路设定控制器能够克服系统具有的多变量耦合和不确定干扰影响,根据期望的工艺指标,对底层控制器的设定值 进行在线调整.磨矿过程运行控制系统设计实例验证了所提方法的有效性.

关键词:多变量解耦控制;回路设定控制器;过程运行;工艺指标;区间约束控制中图分类号:TP273 文献标识码:A

Hierarchical control approach for industrial process operation based on multivariable decoupling control

ZHOU Ping, CHAI Tian-you

(Key Laboratory of Process Industry Automation, Northeastern University, Ministry of Education,

Shenyang Liaoning 110004, China)

Abstract: A hierarchical control approach for industrial process operation is proposed to achieve the desired technical indices (TIs) by using the extended multivariable decoupling control technique. The lower-level loop control system designed by the multi-loop PI/PID control technique is responsible for forcing the key process variables that closely relate to the TIs to track the given setpoints. By using the extended decoupling control method within a unity feedback structure, we develop a higher-level setting controller for the generalized plant consisting of the controlled process and the lower-level control system. To achieve the desired TIs, this setting controller automatically adjusts the setpoints for the lower-level controllers in response to process uncertainties and disturbances with good decoupling performance. An application to the grinding process is presented to demonstrate the proposed control approach.

Key words: multivariable decoupling control; loop setting controller; process operation; technical indices (TIs); range constrained control

1 引言(Introduction)

过程控制的目的不仅仅使控制系统输出跟踪动态设定点的变化,而且要控制整个过程运行,使反映过程整体运行性能的产品质量、产量等工艺指标控制在工艺需求的目标范围内^[1~7].过程运行控制不仅涉及到常规底层的反馈控制,而且涉及到上层工艺指标的反馈控制,更重要的是需要根据时变工况来实时确定与期望工艺指标相对应的底层控制回路的设定值.因此,以实现工艺指标为目标的工业过程运行控制对现有基于假定可以获得控制回路设定值的常规过程控制技术提出了挑战,并已成为过程控制界研究的热点和新兴方向^[2,3].

在石化行业,采用了实时优化控制(real time optimization, RTO)来实现过程的优化运行^[1,8,9]. 但RTO 基于过程稳态模型,忽略了过程中广泛存在的动态 特性,并且由于稳态假设而使得控制过程存在较大 的时滞^[1].冶金行业的过程运行控制常常采用图1具 有底层回路控制和上层回路设定构成的分层运行控 制结构^[2~7,10,11]:回路控制系统通过调节相关操作 变量U使得关键过程变量Y连续稳定的跟踪给定设 定值.回路设定系统综合考虑各种过程干扰D和生 产约束S信息,根据工艺指标期望值R*对底层控制 器的设定值Y*进行调节.实际工业运行过程通常具 有多变量、强耦合及多时滞特性,并且又不时受各 种不确定动态的影响.因此这就要求回路设定系统 具有较好的多变量解耦、干扰抑制以及鲁棒性能.目 前,回路设定系统设计主要采用案例推理、专家系 统以及模糊推理等智能方法以及基于过程经验数学

收稿日期: 2009-07-20; 收修改稿日期: 2010-08-30.

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(N090608001);国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB320600);国家自然科学基金资助项目(61020106003,60821063);高等学校学科创新引智计划资助项目(B08015).

模型的方法^[2~7].但是这些方法的具体实施因过程 而异,难以进行理论分析,因而参考使用价值不足.



图 1 过程运行的分层控制结构

Fig. 1 Hierarchical control structure for process operation

目前多变量解耦控制理论的研究及应用已得 到了长足的发展^[12~15],并且多变量预测控制及其 与RTO的结合已在工业过程运行控制中得到成功应 用^[1].本文将文献[13~15]用于常规过程控制的多变 量解耦控制技术在过程运行控制中进行综合和扩 展,提出了一种工业过程运行层次控制方法,给出了 控制系统的详细设计过程,分析了系统的稳定性能. 最后,通过磨矿过程^[5,10,11]运行控制系统设计实例 验证了所提方法的有效性.

2 控制系统设计(Control system design)

2.1 控制策略(Control strategy)

将文献[13~15]的多变量解耦控制技术在工业过 程运行控制进行推广和扩展,提出了图2所示的工业 过程运行控制策略. 控制系统由底层回路控制系统 和上层回路设定系统构成,该控制系统的控制对象 可看成是由底层回路控制系统Kc和被控工业过程 G构成的广义对象 $\tilde{G} = GK_{\rm C}$, 而其控制器即为回 路设定系统,其核心是回路设定控制器 K_{s} . K_{s} 的作 用就是根据工艺指标期望设定值R*与实际值R的偏 统的设定值Y*. 与常规过程控制采用的定值跟踪控 制方式不同,图2工艺指标R的控制采用区间约束控 制的方式^[2~7]. 区间约束控制有利于维护系统的稳 定以及减少底层执行机构的磨损.按照区间约束控 制的思想, 当 $R \in (R^* - \Delta_R, R^* + \Delta_R)(\Delta_R \to R)$ 的偏 差允许限值),即R在工艺目标范围内时,认为过程运 行是优的,因而不进行回路设定值的更新,反之要 对Y*进行调节. 图2中的切换机制Qs就是用于R的 区间约束控制而设立的.





Fig. 2 Proposed hierarchical control strategy for process operation

 $K_{\rm C}$

2.2 回路设定控制器设计(Design of loop setting controller)

实际中,图2中被控运行过程G通常建模成如 下多变量以及多时滞非奇异传递函数矩阵形式:

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) \cdots g_{1m}(s) \\ \vdots & \vdots \\ g_{m1}(s) \cdots g_{mm}(s) \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

式中: $g_{ij}(s) = g_{ij0}(s)e^{-\tau_{ij}s}$, 且 $g_{ij0}(s)$ 为稳定正则 的传递函数式, $\tau_{ij} \ge 0$ 为时滞因子. 回路控制系 统 $K_{\rm C}$ 通常采用SISO PID控制技术设计, 设对象模 型为

$$G_{\rm Y} = \\ \operatorname{diag}\{\frac{n_{\rm y,11}(s){\rm e}^{-\tau_{\rm c,11}s}}{d_{\rm y,11}(s)}, \cdots, \frac{n_{\rm y,mm}(s){\rm e}^{-\tau_{\rm c,mm}s}}{d_{\rm y,mm}(s)}\},$$
(2)

式中: $\tau_{c,ii} \ge 0$ 为时滞因子, $n_{y,ii}(s)$ 和 $d_{y,ii}(s)$ 为关于s的标量多项式, 且均不含时滞. 假设设计的SISO PID回路控制器 K_Y 为

$$K_{\mathrm{Y}} = \mathrm{diag}\{k_{\mathrm{y},11}(s), \cdots, k_{\mathrm{y},mm}(s)\},$$
可求得为

$$K_{\rm C} = \text{diag}\{k_{\rm c,11}(s), \cdots, k_{\rm c,mm}(s)\} = G_{\rm Y}K_{\rm Y}(I + G_{\rm Y}K_{\rm Y})^{-1}.$$
 (3)

显然, k_{c,ii}(s)具有如下通式:

$$k_{c,ii}(s) = \frac{k_{y,ii}(s)n_{y,ii}(s)e^{-\tau_{c,ii}s}}{d_{y,ii}(s) + k_{y,ii}(s)n_{y,ii}(s)e^{-\tau_{c,ii}s}},$$

这里定义 $k_{c,ii}$ 的时滞为 $\tau(k_{c,ii}) = \tau_{c,ii}$,其中 $\tau(\varphi)$ 表示函数 φ 的时滞,以下同.

设回路设定控制器的传递函数矩阵为

$$K_{\rm S}(s) = \begin{bmatrix} k_{\rm s,11}(s) \cdots k_{\rm s,1m}(s) \\ \vdots & \vdots \\ k_{\rm s,m1}(s) \cdots k_{\rm s,mm}(s) \end{bmatrix}.$$
 (4)

假设过程无系统干扰*D*_I、测量噪声*D*_Y, *D*_R以及 建模误差, 那么图2闭环控制系统的传函矩阵为

$$H = [I + GK_{\rm C}K_{\rm S}]^{-1}GK_{\rm C}K_{\rm S}.$$

不难得到

$$K_{\rm S} = K_{\rm C}^{-1} G^{-1} (H^{-1} - I)^{-1}, \tag{5}$$

从而有

$$k_{\mathrm{s},ij} = \frac{1}{k_{\mathrm{c},ii}} \frac{G^{ji}}{|G|} \frac{h_{jj}}{1 - h_{jj}}, \ i, j = 1, \cdots, m, \quad (6)$$

式中G^{ji}是G(s)中g_{ji}(s)对应的代数余子式. 定义

$$\Xi_{1,ij} \triangleq \frac{1}{k_{\mathrm{c},ii}} \frac{G^{ji}}{|G|} h_{jj}, \ \Xi_{2,ij} \triangleq \frac{1}{1 - h_{jj}},$$

从而式(6)可写成

$$k_{\mathrm{s},ij} = \Xi_{1,ij} \Xi_{2,ij}.\tag{7}$$

对于*Ξ*_{2,*ij*},可采用前向通道为1、反向通道为*h*_{*jj*}的 正反馈单元实现;对于*Ξ*_{1,*ij*},为了使*k*_{s,*ij*}可稳定实 现,那么*Ξ*_{1,*ij*}的时滞、零极点必须满足一定的要 求,下面对其进行一一考虑.

首先, $k_{s,ij}$ 可稳定实现, 必须满足 $\tau(\Xi_{1,ij}) \ge 0$, 否则 $k_{s,ij}$ 因含有超前环节而物理上不可实现, 从而有

$$\tau(G^{ji}) + \tau(h_{jj}) - \tau(k_{c,ii}) - \tau(|G|) \ge 0,$$

这可推出

$$\tau(h_{ii}) \ge \max_{j \in m} \tau(k_{c,jj}) + \tau(|G|) - \min_{j \in m} \tau(G^{ij}).$$
(8)

式(8)体现了解耦后的闭环传递函数矩阵H(s)的时滞要求.

下面考虑
$$K_{\rm S}$$
的零极点要求. 定义 $\eta_{\rm z}(\varphi)$ 是使
$$\lim_{s \to z} \varphi(s)/(s-z)^v$$

存在且不为零的整数v, \mathbb{C}^+ 表示右半复平面. 另 外定义 Z_{φ}^+ 是函数 $\varphi(s)$ 的不稳定零点集合. 令 $z \in Z_{k_{c,ii}|G|}^+$, 那么 K_S 可稳定实现, 必须满足 $\eta_z(k_{s,ij}) \ge 0$, 即 $\eta_z(\Xi_{1,ij}) \ge 0$, 从而有

$$\eta_{\mathbf{z}}(G^{ji}) + \eta_{\mathbf{z}}(h_{jj}) - \eta_{\mathbf{z}}(k_{\mathbf{c},ii}) - \eta_{\mathbf{z}}(|G|) \ge 0,$$

这可推出

$$\eta_{z}(h_{ii}) \ge \max_{j \in m} \eta_{z}(k_{c,jj}) + \eta_{z}(|G|) - \min_{j \in m} \eta_{z}(G^{ij}).$$
(9)

综上所述,为了获得稳定可实现的回路设定控制器K_S,首先给出实际期望实现的对角化闭环系统传递函数矩阵*H*:

$$H = \text{diag}\{h_{11}(s), \cdots, h_{mm}(s)\},$$
(10)

其甲
$$h_{ii}$$
具有如下形式:
$$h_{ii}(s) = \frac{\mathrm{e}^{-\tau(h_{ii})s}}{(\alpha_{ii}s+1)^{N(h_{ii})}} \prod_{z \in Z^+_{k_{\mathrm{c},ii}|G|}} (\frac{z-s}{\bar{z}+s})^{\eta_z(h_{ii})},$$
(11)

式中: $1/(\alpha_{ii}s+1)^{N(h_{ii})}$ 为滤波器, 其作用有两个: 首先是通过选取适当的正整数 $N(h_{ii})$ 使得 K_S 的每 一个元素是正则的; 其次就是通过调节 α_{ii} 使得运 行系统的响应性能达到预期的要求, 如系统响应 快速性、干扰抑制能力、鲁棒稳定性等.

H(*s*)给定后,结合式(6)(7)(11),即可求得回路 设定控制器的各个元素*k*_{s,*ij*}为

$$k_{s,ij} = \frac{1}{k_{c,ii}} \frac{G^{ji}}{|G|} \frac{e^{-\tau(h_{jj})s}}{(\alpha_{jj}s+1)^{N(h_{jj})}} (\prod_{z \in \mathbb{Z}^+_{k_{c,jj}|G|}} (\frac{z-s}{\bar{z}+s})^{\eta_z(h_{jj})}) \Xi_{2,ij}, \quad (12)$$

其中: $\tau(h_{jj}), \eta_z(h_{jj})$ 的值可按式(8)(9)进行选取, 而 $N(h_{jj})$ 可根据为保证 K_S 的正则性以及期望实 现的控制系统性能进行合理选取.

2.3 模型降阶(Model reduction)

对于具有多变量、多时滞特性的大多数工业过程来说, |G|和G^{ji}为如下复杂的高阶多时滞形式:

$$\sum_{j=1}^{\xi} ((\sum_{i=0}^{m_j} \tilde{b}_{j,i} s^i e^{-\tau_j s}) / (\sum_{i=0}^{n_j} \tilde{a}_{j,i} s^i)),$$

这在Ks的设计中不便于提取时滞和非最小相位 零点.为此,采用文献[16]的频域加权RLS降阶算 法将其降阶成二阶加纯滞后模型,模型降阶的具 体算法参见文献[16].

2.4 切换机制设计(Switcher design)

为了对工艺指标进行区间约束控制,设置一切换机制Q_S,并采用如下切换律^[11]:

$$Y^* = \begin{cases} z^{-1}Y^*(z), \ P(R) = 1, \\ Y^*(z), \ P(R) = 0. \end{cases}$$
(13)

201

式中: $P(\cdot)$ 为切换函数, $Y^*(z)$ 为离散后的回路设 定值, P(R) = 0表示 $R \notin (R^* - \Delta_R, R^* + \Delta_R)$, 反 之, P(R) = 1意味着 $R \in (R^* - \Delta_R, R^* + \Delta_R)$.

3 稳定性分析(Stability analysis)

根据输入输出稳定性分析方法^[17]可知,该闭环 控制结构的标称稳定性可以通过*D*_I,*R**到*R*,*Y**的 传递函数矩阵

$$\begin{vmatrix} (I + GK_{\rm C}K_{\rm S})^{-1}G & (I + GK_{\rm C}K_{\rm S})^{-1}GK_{\rm C}K_{\rm S} \\ -(G^{-1}K_{\rm S}^{-1} + K_{\rm C})^{-1} & (K_{\rm S}^{-1} + GK_{\rm C})^{-1} \end{vmatrix}$$

进行分析.显然,如果该传函矩阵中的各元素均 保持稳定,那么图2闭环控制结构的标称稳定性 就可以得到保证.观察该传函矩阵的特征,不难 得到判定图2闭环结构标称稳定性的充要条件为 (*I*+*GK*_C*K*_S)⁻¹是稳定的.

实际工业过程面临各种不确定动态,因此必须确保系统的鲁棒稳定性.这里考虑实际工业 中常见的过程加性不确定性和过程乘性不确定 性^[14,17,18].在图2所示运行控制结构中,加性不确 定性 $\Pi_A = \{G_A(s)|G_A(s) = G(s) + \Delta_A\}$ 视为G的 辨识参数的不确定性;乘性输出不确定性 $\Pi_O = \{G_O(s)|G_O(s) = (I + \Delta_O)G(s)\}$ 视为R的测量不 确定性;乘性输入不确定性 $\Pi_I = \{G_I(s)|G_I(s) = G(s)(I + \Delta_I)\}$ 视为 K_C 的不确定性.这里假定 Δ_A , Δ_I , Δ_O 都是稳定正则的.

根据分析闭环控制系统的鲁棒稳定性通常采用的 $M - \Delta$ 结构^[14,17,18],可以先导出存在 Δ_A, Δ_I , Δ_O 的输出端到其输入端的传递函数矩阵 Ω . 然后, 根据鲁棒稳定性定理^[14,18],可知图2所示闭环控制 结构是鲁棒稳定的,当且仅当

$$\rho(\Omega\Delta) < 1, \,\forall \omega \in [0,\infty),\tag{14}$$

式中 $\rho(\cdot)$ 表示谱半径.对于实际中指定的某一类 不确定性界 Δ_A 或 Δ_I 或 Δ_O 或它们的组合,可以选 取 Ω 的相应元素右乘不确定性界来求谱半径以判 定控制系统的鲁棒稳定性.

4 设计实例(Example)

4.1 过程介绍及运行控制系统设计(Process description and operation control system design)

选矿行业中, 磨矿过程就是将大颗粒矿石磨碎 到需要的粒度. 针对图3所示的典型湿式磨矿回路 对象,建立了式(15)所示的运行过程输入输出模型:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-0.55e^{-5.8s}}{5.8s+1} & \frac{0.025(74s+1)e^{-1.6s}}{(2.3s+1)(5.5s+1)} \\ \frac{2e^{-4.5s}}{6s+1} & \frac{2.6e^{-1.1s}}{5.3s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix},$$
(15)

式中: r_1 , r_2 为表征过程运行性能的磨矿产品粒度 指标(%, -200 mu)和循环负荷指标(t/h); y_1 和 y_2 为 与 r_1 , r_2 密切关联的磨机给矿量(t/h)和泵池加水 量(t/h).





底层控制系统主要包括通过调节电振给矿机 频率 $u_1(Hz)$ 和泵池加水阀门开度 $u_2(\%)$ 来对 y_1, y_2 进行定值控制的两个主控制回路.另外,在底层还 设有2个本地控制回路,一个是通过调节底流泵频 率 $v_2(Hz)$ 来控制泵池液位 γ_2 的超弛控制回路,另一 个是通过控制磨机加水量 $\gamma_1(t/h)$ 来间接控制磨矿 浓度的比值控制回路,其操作变量为磨机加水阀 门开度 $v_1(\%)$.建立的 y_1, y_2 过程对象模型分别为:

 $y_1/u_1 = e^{-0.2s}/(2s+1), y_2/u_2 = 1/(s+1).$ 相应PI控制器为:

 $k_{y,11} = (10s + 5)/6s, k_{y,22} = (2s + 2)/s.$ 从而底层回路控制系统可表示为

 $K_{\rm C} = {\rm diag}\{5{\rm e}^{-0.2s}/(6s + 5{\rm e}^{-0.2s}), 2/(s+2)\}.$

最后采用本文控制系统设计方法,可得回路设 定控制*K*_S为

$$K_{\rm S} = \begin{bmatrix} \frac{-0.52\Theta(6s+5{\rm e}^{-0.2s})}{(5.3s+1)(\alpha_{11}s+1)} & \frac{0.005\Theta(74s+1)(6s+5{\rm e}^{-0.2s})}{(2.3s+1)(5.5s+1)(\alpha_{22}s+1)} \\ \frac{(s+2)\Theta{\rm e}^{-3.6s}}{(6s+1)(\alpha_{11}s+1)} & \frac{0.275\Theta(s+2){\rm e}^{-4.4s}}{(5.8s+1)(\alpha_{22}s+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{1-{\rm e}^{5.47}/(\alpha_{11}s+1)} \\ \frac{1}{1-{\rm e}^{4.97}/(\alpha_{22}s+1)} \end{bmatrix}^{\rm T},$$

第2期

其中 $\Theta = (18.9295s^2 + 9.2147s + 1)/(0.0055s^2 + 0.0356s + 1.48).$

4.2 仿真(Simulation)

假设标称磨矿过程存在如下过程不确定性:

$$\Delta_{\rm I} = {\rm diag}\{\frac{s+0.3}{s+1}, \frac{s+0.3}{s+1}\},\tag{16}$$

$$\Delta_{\rm O} = \text{diag}\{\frac{-s - 0.3}{2s + 1}, \frac{-s - 0.3}{2s + 1}\}.$$
 (17)

根据给出的鲁棒稳定性判决式(14), 画出上述摄动 磨矿系统谱半径的幅频曲线, 如图4所示. 可以看 出他们的最大幅值均明显小于1, 这说明磨矿回路 运行控制系统能够保持很好的鲁棒稳定性.





下面考察同时存在式(16)(17)所示 $\Delta_{\rm I}$, $\Delta_{\rm O}$ 的摄 动磨矿过程运行控制性能.仿真时,整定两组可 调参数做比较, 即 $\alpha_{11} = \alpha_{22} = 5$ 及 $\alpha_{11} = \alpha_{22} = 15$. 工艺指标设定值阶跃信号,并且在t=150 min及t=430 min将幅值为5 t/h和-5 t/h的阶跃干扰信号分 别加入到给矿对象和泵池加水对象,以模拟给矿 矿石硬度和矿粒大小的变化对系统产生的严重 干扰. 另外, 假设在 $r_1, r_2 \mathcal{D} y_1, y_2$ 的输出反馈信号 中混入功率分别为0.01, 0.1, 0.01, 0.01的强白噪声 信号,以表示他们在正常操作范围内具有较大的 随机检测误差. 得到2组可调参数下的摄动磨矿 运行控制系统响应如图5所示.可以看出:虽然存 在较强测量噪声信号,但r1,r5变化时,摄动磨矿 系统的r1, r2响应实现了完全解耦,并且响应平稳. 在过程阶跃干扰下, r1, r2虽然产生了尖峰突变, 但是通过 $K_{\rm S}$ 改变 y_1^*, y_2^* 后, r_1, r_2 又很快跟踪 r_1^*, r_2^* , 这说明系统具有较好的干扰抑制性能. 另外, 可 以看到较小的可调参数具有较快的响应速度和 较强的干扰抑制能力,但是y*,y*抖动较剧烈,对

噪声比较敏感,不利于控制系统的鲁棒稳定性. $\alpha_{11} = \alpha_{22} = 15$ 时,系统虽然响应较慢, $(\mu_{y_1^*}, y_2^*)$ 能量较小,从而有利于减小制回路执行机构的磨损,提高系统的鲁棒稳定性.



Fig. 5 Control performance of perturbed grinding system operation according to the two groups of filter parameters

由于在实际磨矿过程中,工艺指标的采样一般 慢于底层回路控制系统过程变量的采样.因此, 在K_S的输入设置一个采样时间为2 min的零阶保 持器,以表示实际工艺指标的检测频率为2 min一 次.在K_S的输出设置采样时间为10 min的零阶保 持器,以表示回路设定值的刷新频率为10 min,这 样当设定值变化时,回路控制系统能够从一个稳 态到达另一个稳态.另外,底层回路控制系统的采 样频率和控制器的刷新频率均设为0.1 min一次.

下面考察具有多速率采样频率的磨矿系统运行控制效果. 仿真试验时, 仍假设标称磨矿过程同时存在式(16)(17)所述的输入、输出不确定性. 在t=50min及t=700min分别加入幅值为2和10的

工艺指标设定值阶跃信号,并且在 $t = 400 \min \mathcal{D}t =$ 1100min将幅值为3t/h和-3t/h的阶跃干扰信号分 别加入到给矿系统对象和泵池加水对象,以模拟 给矿矿石硬度和矿粒大小的变化对系统产生的严 重干扰. 另外, 假设在 r_1 , r_2 及 y_1 , y_2 的输出反馈信 号中混入频率分别为2min, 2min, 0.1min, 0.1min, 噪声功率分别为0.01, 0.1, 0.01, 0.01的强白噪声信 号, 以表示r1, r2及y1, y2在正常操作范围内具有较 大的随机检测误差. 选取 $\alpha_{11} = \alpha_{22} = 10$, 得到具有 多速率采样频率的摄动磨矿系统运行控制效果如 图6所示.可以看出, r*, r*变化时, 摄动磨矿系统在 强干扰和测量噪声影响下的r1, r2响应仍然解耦良 好,超调较小,显示出很好的鲁棒稳定性.在过程 阶跃干扰下, r1, r2虽然产生了较大的尖峰突变, 但 是通过回路设定控制器改变y1, y2, r1, r2又很快跟 踪其设定值,这说明控制系统具有很好的干扰抑 制能力,另外,进一步的仿真还表明上述测量噪声 的不利影响可以通过在线增大Ks的可调参数来 消弱.





由图6还可以看出, 摄动磨矿系统在负载干扰 和严重测量噪声作用下, 虽然r₁, r₂得到较好的控制, 但是y₁^{*}, y₂的调节过于频繁, 这在实际中将加大 底层控制系统相关执行机构的磨损和控制系统的 不稳定. 因此, 这种基于工艺指标定值跟踪控制的 过程运行控制方法在具有工况多变、干扰严重以 及测量仪表精确度不高的实际工业过程运行控制 中是不可取的, 应当采用区间约束控制.

为了对磨矿过程的工艺指标实施区间约束控制,给出如下工况及约束条件S以模拟实际磨矿生产的各种约束和工艺要求:首先限定 $\Delta_{\rm R} = [0.5, 2]$,即 r_1, r_2 的目标区间分别为 $[r_1^* - 0.5, r_1^* + 0.5]$ (%, -200 mu)及 $(r_2^* - 2, r_2^* + 2)$ t/h;其次限定 y_1^*, y_2^* 的幅度变化任何时候均不能超过10 t/h.另外,为了生产安全的需要,任何时候 y_1^*, y_2^* 的值分别只能在约束范围45~75 t/h和35~65 t/h内变化.

采用区间约束控制重复上述实验,得到的摄动 磨矿系统运行效果如图7所示,可以看出,在严重 测量噪声作用下, r1, r2虽然出现了侵蚀和抖动, 但 都能控制在各自的期望区间内,并且y*,y*的阶梯 变化频率非常少, r1, r2的波动幅度也较图6定值控 制时小. 这说明基于区间约束控制的运行控制系 统对测量噪声不敏感,这在实际工业控制中可减 少因不可避免的测量误差而对回路设定值进行频 繁调节,从而有利于系统的稳定.在大阶跃变化和 强负载干扰下, r1, r2虽然产生了一定耦合和尖峰 突变,但是通过回路设定控制器对y1,y2进行仅有 的几次调整, r1, r2又很快返回到各自的期望区间 内.这说明设计的磨矿回路运行控制系统能够快 速响应系统干扰和测量噪声的影响,通过对回路 设定值进行及时且少量的调整,而将工艺指标控 制在期望目标范围内.







system due to range constrained control

5 结论(Conclusion)

提出了一种使用多变量解耦控制技术设计上 层回路设定系统的工业过程运行层次控制方法. 磨矿回路运行控制系统的具体设计实例及仿真表 明:提出的方法具有良好的解耦性能、鲁棒稳定性 及干扰抑制能力,能够实现过程的优化运行.相对 于MPC方法,本文方法因设置有滤波器而能够对 控制系统的鲁棒稳定性、响应性能以及干扰抑制 能力进行显示设计和最佳折中处理,从而为控制 系统的具体实施带来很大方便.

参考文献(References):

- SEBASTIAN E. Feedback control for optimal process operation[J]. Journal of Process Control, 2007, 17(3): 203 – 219.
- [2] 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[J]. 自动化学报, 2009, 35 (6): 641 649.
 (CHAI Tianyou. Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms of control and optimization theories[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 641 649.)
- [3] 柴天佑,丁进良,王宏,等.复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法[J].自动化学报,2008,34 (5):505-515.
 (CHAI Tianyou, DING Jinliang, WANG Hong, et al. Hybrid intelligent optimal control method for operation of complex industrial processes[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(5):505-515.)
- [4] CHAI T Y, LIU J X, DING J L, et al. Hybrid intelligent control for hematite high intensity magnetic separating process[J]. *Measurement* and Control, 2007, 29(40): 171 – 175.
- [5] ZHOU P, CHAI T Y, WANG H. Intelligent optimal-setting control for grinding circuits of mineral processing process[J]. *IEEE Transactions* on Automation Science and Engineering, 2009, 6(4): 730 – 743.

- [6] WANG Z J, WU Q D, CHAI T Y. Optimal-setting control for complicated industrial processes and its application study[J]. *Control En*gineering Practice, 2004, 12(1): 65 – 74.
- [7] LI H X, GUAN S P. Hybrid intelligent control strategy—supervising a DCS-controlled batch process[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(3): 36 – 48.
- [8] ZANIN A C, TVRZSKA D G M, ODLOAK D. Industrial implementation of a real-time optimization strategy for maximizing production of LPG in a FCC unit[J]. *Journal of Chemical Engineering*, 2000, 24(2/7): 525 – 531.
- [9] SKOGESTAD S. Plantwide control: the search for the selfoptimizing control structure[J]. *Journal of Process Control*, 2000, 10(5):487-507
- [10] 周平, 柴天佑. 磨矿过程磨机负荷的智能监测与控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 1095 1098.
 (ZHOU Ping, CHAI Tianyou. Intelligent monitoring and control of mill load for grinding processes[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(6):1095 1098.)
- [11] 周平, 柴天佑, 陈通文. 工业过程运行的解耦内模控制方法[J]. 自动化学报, 2009, 35(10): 1362 1368.
 (ZHOU Ping, CHAI Tianyou, CHEN Tongwen. Decoupling internal model control method for operation of industrial process [J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(10): 1362 1368.)
- [12] 柴天佑. 多变量自适应解耦控制及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

(CHAI Tianyou. Multivariable Adaptive Decoupling Control and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2001.)

- [13] WANG Q G, ZHANG Y, CHIU M S. Non-interacting control design for multivariable industrial processes[J]. *Journal of Process Control*, 2003, 13(3): 253 – 265.
- [14] LIU T, ZHANG W D, GAO F R. Analytical decoupling strategy using a unity feedback control structure for MIMO processes with time delays[J]. *Journal of Process Control*, 2007, 17(2): 173 – 186.
- [15] WANG Q G, ZHANG Y, CHIU M S. Decoupling internal model control for multivariable systems with multiple time delays[J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, 57(1): 115 – 124.
- [16] ZHOU P, CHAI T Y, LIU Q, et al. Frequency-domain weighted RLS model reduction for complex SISO linear dynamic system[C] //Proceedings of American Control Conference. Piscataway, NJ, USA : IEEE, 2009: 5719 – 5724
- [17] SKOGESTAD S, POSTLETHWAITE I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design[M]. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [18] MORARI M, ZAFIRIOU E. Robust Process Control[M]. New York: Prentice Hall, 1989.

作者简介:

周 平 (1980—), 男, 博士研究生, 助教, 主要从事复杂工业过程 优化运行的反馈控制、软测量技术及其应用的研究, E-mail: zhoup1980@ 126.com;

柴天佑 (1947—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从 事自适应控制、多变量智能解耦控制与流程工业综合自动化等方面的研 究工作, E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn.