



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103941701 B

(45) 授权公告日 2016. 05. 11

(21) 申请号 201410175632. 1

(22) 申请日 2014. 04. 29

(73) 专利权人 东北大学

地址 110819 辽宁省沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

CN 103398753 A, 2013. 11. 20,

CN 202735823 U, 2013. 02. 13,

US 3834529 A, 1974. 09. 10,

EP 2468412 A1, 2012. 06. 27,

审查员 李蓓蓓

(72) 发明人 范家璐 姜艺 柴天佑

(74) 专利代理机构 沈阳东大知识产权代理有限公司 21109

代理人 梁焱

(51) Int. Cl.

G05B 19/418(2006. 01)

H04L 29/06(2006. 01)

G06F 19/00(2011. 01)

(56) 对比文件

CN 101763087 A, 2010. 06. 30,

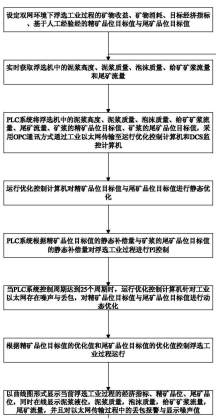
权利要求书3页 说明书9页 附图7页

(54) 发明名称

一种双网环境下浮选工业过程运行控制系统及方法

(57) 摘要

本发明提供一种双网环境下浮选工业过程运行控制系统及方法,该系统包括 PLC 系统、运行优化控制计算机与 DCS 监控计算机,该方法包括:设定矿物收益、矿物消耗、目标经济指标、精矿品位目标值与尾矿品位目标值;实时获取泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量和尾矿流量并通过工业以太网传输;对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行静态优化和动态优化;根据精矿品位目标值的优化值和尾矿品位目标值的优化值控制浮选工业过程运行。本发明可以跟踪预设定的经济指标,达到了经济效益可控的效果。在一定的丢包概率范围内与一定的噪声幅值内,整个系统的运行层是稳定的,稳定状态下余差小或无余差。



1. 一种双网环境下浮选工业过程运行控制系统,其特征在于:包括PLC系统、运行优化控制计算机与DCS监控计算机;

PLC系统布置在浮选工业现场,用于设定精矿品位目标值与尾矿品位目标值,实时获取浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量和尾矿流量,并采用OPC通讯方式通过工业以太网传输至运行优化控制计算机和DCS监控计算机,根据精矿品位目标值的优化值和尾矿品位目标值的优化值控制浮选工业过程运行;

运行优化控制计算机用于设定双网环境下浮选工业过程的矿物收益、矿物消耗、目标经济指标,根据设定的双网环境下浮选工业过程的矿物收益、矿物消耗、目标经济指标以及获取到的浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量、尾矿流量、矿浆的精矿品位目标值和矿浆的尾矿品位目标值,对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行静态优化,针对工业以太网存在噪声与丢包对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行动态优化,并将精矿品位目标值的动态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的动态补偿量下发至PLC系统;

DCS监控计算机用于以曲线图形式显示当前浮选工业过程的经济指标、精矿品位、尾矿品位,同时在线显示泥浆液位,泥浆质量,泡沫质量,给矿矿浆流量,尾矿流量,并且对以太网传输过程中的丢包报警与显示噪声值。

2. 采用权利要求1所述的双网环境下浮选工业过程运行控制系统进行双网环境下浮选工业过程运行的控制方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤1:在运行优化控制计算机中设定双网环境下浮选工业过程的矿物收益、矿物消耗、目标经济指标,并在浮选工业现场的PLC系统中设定精矿品位目标值与尾矿品位目标值;

步骤2:PLC系统实时获取浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量和尾矿流量;

步骤3:PLC系统将浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量、尾矿流量、矿浆的精矿品位目标值、矿浆的尾矿品位目标值,采用OPC通讯方式通过工业以太网传输至运行优化控制计算机和DCS监控计算机;

步骤4:运行优化控制计算机根据设定的双网环境下浮选工业过程的矿物收益、矿物消耗、目标经济指标以及获取到的浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量、尾矿流量、矿浆的精矿品位目标值和矿浆的尾矿品位目标值,对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行静态优化:以设定的精矿品位目标值与精矿品位目标值优化值之间差值最小化和设定的尾矿品位目标值与尾矿品位目标值优化值之间差值最小化为优化目标,计算精矿品位目标值的静态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的静态补偿量以满足目标经济指标,并将精矿品位目标值的静态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的静态补偿量下发至PLC系统;

步骤5:PLC系统根据精矿品位目标值的静态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的静态补偿量对浮选工业过程进行PI控制:以给矿矿浆流量、泥浆高度为控制输入量,以矿浆的精矿品位与矿浆的尾矿品位为控制输出量;

步骤6:当PLC系统控制周期达到25个周期时,运行优化控制计算机针对工业以太网存在噪声与丢包,对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行动态优化:以精矿品位目标值的

静态补偿量与精矿品位目标值优化值之间差值最小化和尾矿品位目标值的静态补偿量与尾矿品位目标值优化值之间差值最小化为优化目标,计算精矿品位目标值的动态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的动态补偿量以满足目标经济指标,并将精矿品位目标值的动态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的动态补偿量下发至PLC系统;

步骤7:PLC系统将精矿品位目标值的静态补偿量、精矿品位目标值的动态补偿量与尾矿品位目标值叠加作为精矿品位目标值的优化值,将尾矿品位目标值的静态补偿量、尾矿品位目标值的动态补偿量与尾矿品位目标值叠加作为尾矿品位目标值的优化值,根据精矿品位目标值的优化值和尾矿品位目标值的优化值控制浮选工业过程运行;

步骤8:利用DCS监控计算机以曲线图形式显示当前浮选工业过程的经济指标、精矿品位、尾矿品位,同时在线显示泥浆液位,泥浆质量,泡沫质量,给矿矿浆流量,尾矿流量,对以太网传输过程中的丢包报警与显示噪声值,并返回步骤2。

3.根据权利要求2所述的控制方法,其特征在于:所述步骤4中的对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行优化,按以下步骤进行:

步骤4.1:建立用来描述浮选工业过程的状态空间方程,将泥浆质量和泡沫质量作为该方程的状态变量,泥浆高度和泥浆流量作为该方程的输入变量,精矿品位和尾矿品位作为该方程的输出变量;

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

其中,状态变量 $x(t) = (M_p^i, M_e^i)$, M_p^i 为泥浆质量, $i=1,2$ 分别表示矿物种类1和矿物种类2, M_e^i 为泡沫质量,输入变量 $u = (h_p, q_a)$ 即PI控制的输入控制量, h_p 为泥浆液位, q_a 为给矿矿浆流量,输出变量 $y(t) = (L_{cg}, L_{tg})$ 即PI控制的控制输出量,精矿品位 $L_{cg} = \frac{M_e^1 g_{cp}^1 + M_e^2 g_{cp}^2}{M_e^1 + M_e^2} L_{cu}$, 尾矿品位 $L_{tg} = \frac{M_p^1 g_{cp}^1 + M_p^2 g_{cp}^2}{M_p^1 + M_p^2} L_{cu}$, g_{cp}^i 为给矿矿浆中矿物种类 i 的品位, L_{cu} 为铜矿的含量, A 是系统矩阵、 B 是控制矩阵、 C 是输出矩阵, t 为浮选工业过程的各个时刻;

步骤4.2:利用PI控制器更新状态空间方程;

PI控制器的输入控制量 $u(t) = Kx(t) + Ly^*$

其中, y^* 为设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值, K 为状态反馈矩阵, L 为输出反馈矩阵;

更新后的状态空间方程 $\dot{x}(t) = A_L x(t) + B_L y^*$

其中,系统矩阵 $A_L = A + BK$, 控制矩阵 $B_L = BL$;

步骤4.3:建立用来描述矿物收益与矿物消耗之差的的目标经济指标方程 $r(t) = My(t) + Nu(t)$,

其中 M 为矿物收益矩阵, N 为矿物消耗矩阵;

步骤4.4:利用PI控制器更新目标经济指标方程;

更新后的目标经济指标方程 $r(t) = C_L x(t) + D_L y^*$;

其中,状态输出矩阵 $C_L = MC + NK$, 输出输出矩阵 $D_L = NL$;

步骤4.5:建立以更新后的状态空间方程和更新后的目标经济指标方程为约束条件,以设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值与它们的优化值之间差值最小为优化目标,建立优化该差值的优化目标函数;

$$\text{优化目标函数为: } \min J = \frac{1}{2} \Delta y^{*T} S \Delta y^*$$

其中,其中S为任意的正定矩阵, Δy^* 为设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值与它们的优化值之间差值;

步骤4.6:利用拉格朗日乘子方法求解优化目标函数,得到设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值与它们的优化值之间差值;

步骤4.7:将设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值与它们的优化值之间差值传输至PLC系统,对设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行静态补偿 $y_s^* = y^* + \Delta y^*$ 。

一种双网环境下浮选工业过程运行控制系统及方法

技术领域

[0001] 本发明属于工业控制领域,具体涉及一种双网环境下浮选工业过程运行控制系统及方法。

背景技术

[0002] 浮选是根据矿物表面物理化学性质的差异,将浮选矿浆分离成品位合格的精矿和尾矿,实现有效分选的过程。浮选过程生产环境恶劣、工艺复杂,检测仪表和控制装置的局限性等因素导致浮选过程自动控制水平不高,实际浮选过程都是现场岗位工人手动操作进行生产。传统的运行控制只能采用人工设定设备层回路设定值的控制方式,即运行层开环,但是由于人工控制不能及时准确地随工况调整设定值,难以将工艺指标控制在目标值范围内,甚至会造成工况故障。与此同时,在大型过程工业生产中,通常采用多层级多时间尺度的控制架构。底层设备层通常采用设备网进行通信,而在与优化层等不同层级间通信时,大量工业数据传输均依靠工业以太网。由于以太网是基于冲突检测/避免的,其本质是不确定的,这种不同层级间的不可靠通信传输可能造成对系统经济指标跟踪性能的影响。

发明内容

[0003] 针对现有技术存在的问题,本发明提供一种双网环境下浮选工业过程运行控制系统及方法。

[0004] 本发明的技术方案如下:

[0005] 一种双网环境下浮选工业过程运行控制系统,包括PLC系统、运行优化控制计算机与DCS监控计算机;

[0006] PLC系统布置在浮选工业现场,用于设定精矿品位目标值与尾矿品位目标值,实时获取浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量和尾矿流量,并采用OPC通讯方式通过工业以太网传输至运行优化控制计算机和DCS监控计算机,根据精矿品位目标值的优化值和尾矿品位目标值的优化值控制浮选工业过程运行;

[0007] 运行优化控制计算机用于设定双网环境下浮选工业过程的矿物收益、矿物消耗、目标经济指标,根据设定的双网环境下浮选工业过程的矿物收益、矿物消耗、目标经济指标以及获取到的浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量、尾矿流量、矿浆的精矿品位目标值和矿浆的尾矿品位目标值,对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行静态优化,针对工业以太网存在噪声与丢包对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行动态优化,并将精矿品位目标值的动态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的动态补偿量下发至PLC系统;

[0008] DCS监控计算机用于以曲线图形式显示当前浮选工业过程的经济指标、精矿品位、尾矿品位,同时在线显示泥浆液位,泥浆质量,泡沫质量,给矿矿浆流量,尾矿流量,并且对以太网传输过程中的丢包报警与显示噪声值。

[0009] 采用所述的双网环境下浮选工业过程运行控制系统进行双网环境下浮选工业过

程运行的控制方法,包括以下步骤:

[0010] 步骤1:在运行优化控制计算机中设定双网环境下浮选工业过程的矿物收益、矿物消耗、目标经济指标,并在浮选工业现场的PLC系统中设定精矿品位目标值与尾矿品位目标值;

[0011] 步骤2:PLC系统实时获取浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量和尾矿流量;

[0012] 步骤3:PLC系统将浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量、尾矿流量、矿浆的精矿品位目标值、矿浆的尾矿品位目标值,采用OPC通讯方式通过工业以太网传输至运行优化控制计算机和DCS监控计算机;

[0013] 步骤4:运行优化控制计算机根据设定的双网环境下浮选工业过程的矿物收益、矿物消耗、目标经济指标以及获取到的浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量、尾矿流量、矿浆的精矿品位目标值和矿浆的尾矿品位目标值,对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行静态优化:以设定的精矿品位目标值与精矿品位目标值优化值之间差值最小化和设定的尾矿品位目标值与尾矿品位目标值优化值之间差值最小化为优化目标,计算精矿品位目标值的静态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的静态补偿量以满足目标经济指标,并将精矿品位目标值的静态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的静态补偿量下发至PLC系统;

[0014] 步骤5:PLC系统根据精矿品位目标值的静态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的静态补偿量对浮选工业过程进行PI控制:以给矿矿浆流量、泥浆高度为控制输入量,以矿浆的精矿品位与矿浆的尾矿品位为控制输出量;

[0015] 步骤6:当PLC系统控制周期达到25个周期时,运行优化控制计算机针对工业以太网存在噪声与丢包,对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行动态优化:以精矿品位目标值的静态补偿量与精矿品位目标值优化值之间差值最小化和尾矿品位目标值的静态补偿量与尾矿品位目标值优化值之间差值最小化为优化目标,计算精矿品位目标值的动态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的动态补偿量以满足目标经济指标,并将精矿品位目标值的动态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的动态补偿量下发至PLC系统;

[0016] 步骤7:PLC系统将精矿品位目标值的静态补偿量、精矿品位目标值的动态补偿量与尾矿品位目标值叠加作为精矿品位目标值的优化值,将尾矿品位目标值的静态补偿量、尾矿品位目标值的动态补偿量与尾矿品位目标值叠加作为尾矿品位目标值的优化值,根据精矿品位目标值的优化值和尾矿品位目标值的优化值控制浮选工业过程运行;

[0017] 步骤8:利用DCS监控计算机以曲线图形式显示当前浮选工业过程的经济指标、精矿品位、尾矿品位,同时在线显示泥浆液位,泥浆质量,泡沫质量,给矿矿浆流量,尾矿流量,对以太网传输过程中的丢包报警与显示噪声值,并返回步骤2。

[0018] 所述步骤4中的对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行优化,按以下步骤进行:

[0019] 步骤4.1:建立用来描述浮选工业过程的状态空间方程,将泥浆质量和泡沫质量作为该方程的状态变量,泥浆高度和泥浆流量作为该方程的输入变量,精矿品位和尾矿品位作为该方程的输出变量;

$$[0020] \quad \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

[0021] 其中,状态变量 $x(t) = (M_p^i, M_e^i)$, M_p^i 为泥浆质量, $i = 1, 2$ 分别表示矿物种类1和矿物种类2, M_e^i 为泡沫质量,输入变量 $u = (h_p, q_a)$ 即PI控制的输入控制量, h_p 为泥浆液位, q_a 为给矿矿浆流量,输出变量 $y(t) = (L_{cg}, L_{tg})$ 即PI控制的控制输出量,精矿品位 $L_{cg} = \frac{M_e^1 g_{cp}^1 + M_e^2 g_{cp}^2}{M_e^1 + M_e^2} L_{cu}$, 尾矿品位 $L_{tg} = \frac{M_p^1 g_{cp}^1 + M_p^2 g_{cp}^2}{M_p^1 + M_p^2} L_{cu}$, g_{cp}^i 为给矿矿浆中矿物种类 i 的品位, L_{cu} 为铜矿的含量, A 是系统矩阵、 B 是控制矩阵、 C 是输出矩阵, t 为浮选工业过程的各个时刻;

[0022] 步骤4.2:利用PI控制器更新状态空间方程;

[0023] PI控制器的输入控制量 $u(t) = Kx(t) + Ly^*$

[0024] 其中, y^* 为设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值, K^* 为状态反馈矩阵, L 为输出反馈矩阵;

[0025] 更新后的状态空间方程 $\dot{x}(t) = A_L x(t) + B_L y^*$

[0026] 其中,系统矩阵 $A_L = A + BK$, 控制矩阵 $B_L = BL$;

[0027] 步骤4.3:建立用来描述矿物收益与矿物消耗之差的目标经济指标方程 $r(t) = My(t) + Nu(t)$, 其中 M 为矿物收益矩阵, N 为矿物消耗矩阵;

[0028] 步骤4.4:利用PI控制器更新目标经济指标方程;

[0029] 更新后的目标经济指标方程 $r(t) = C_L x(t) + D_L y^*$;

[0030] 其中,状态输出矩阵 $C_L = MC + NK$, 输出输出矩阵 $D_L = NL$;

[0031] 步骤4.5:建立以更新后的状态空间方程和更新后的目标经济指标方程为约束条件,以设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值与它们的优化值之间差值最小为优化目标,建立优化该差值的优化目标函数;

[0032] 优化目标函数为: $\min J = \frac{1}{2} \Delta y^{*T} S \Delta y^*$

[0033] 其中,其中 S 为任意的正定矩阵, Δy^* 为设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值与它们的优化值之间差值;

[0034] 步骤4.6:利用拉格朗日乘子方法求解优化目标函数,得到设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值与它们的优化值之间差值;

[0035] 步骤4.7:将设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值与它们的优化值之间差值传输至PLC系统,对设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行静态补偿 $y_s^* = y^* + \Delta y^*$ 。

[0036] 有益效果:

[0037] 整个控制系统底层设备层是一个闭环系统,上层运行层也是一个闭环系统(以前的控制方法都是运行层开环)。然后底层设备层与上层运行层是通过工业以太网通讯的。两个闭环形成两个网络,底层是设备网,上层是以太网,即双网,在双网环境下运行本发明方法后,浮选过程可以跟踪预设定的经济指标,达到了经济效益可控的效果。在一定的丢包概率范围内与一定的噪声幅值内,整个系统的运行层是稳定的,稳定状态下余差小或无余差。

附图说明

- [0038] 图1是本发明具体实施方式的浮选工业过程的半实物仿真实验三层控制结构示意图；
- [0039] 图2是本发明具体实施方式的双网环境下浮选工业过程运行控制方法流程图；
- [0040] 图3是本发明具体实施方式的对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行静态优化流程图；
- [0041] 图4是本发明具体实施方式的对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行动态优化的流程图；
- [0042] 图5是本发明具体实施方式的经济指标运行控制结果图；
- [0043] 图6是本发明具体实施方式的精矿品位运行控制结果图；
- [0044] 图7是本发明具体实施方式的尾矿品位运行控制结果图；
- [0045] 图8是本发明具体实施方式的双网环境下浮选工业过程运行控制系统。

具体实施方式

[0046] 下面结合附图对本发明的具体实施方式做详细说明。

[0047] 浮选工业过程为三层控制结构,由运行优化控制层、过程控制层、浮选过程层构成,如图1所示,本实施方式中,浮选过程层可以采用半实物仿真实验实现,虚拟对象层就是模拟的虚拟浮选过程。运行优化控制层:运行优化控制层包括运行优化控制计算机,通过工业以太网从过程控制PLC上读取当前工况,然后使用双网的运行层算法给出最优的底层控制设定值。过程控制层包括PLC,主要实现底层的控制功能还有底层传感器的读取、与运行优化控制层的通讯。浮选过程层包括虚拟对象计算机,主要模拟浮选过程和虚拟仪表供PLC读取。运行优化控制层与过程控制层通过工业以太网通讯,过程控制层与浮选过程层通过标准的4-20mA工业信号通讯。虚拟仪表与执行机构通过电缆、I/O板卡以标准4~20mA的工业信号与PLC通讯,模拟浮选过程的仪表与执行器,仪表包括泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿流量、精矿尾矿品味的测量仪表,执行机构有搅拌机、给矿阀门等,这些仪表与执行器通过MATLAB模拟其动态特性,包括漂移、噪声,过程虚拟仪表与执行机构通过以太网与虚拟对象连接,虚拟对象计算机通过MATLAB程序来模拟浮选过程。

[0048] 本实施方式的双网环境下浮选工业过程运行控制系统,如图8所示,包括PLC系统、运行优化控制计算机与DCS监控计算机。PLC系统与运行优化控制计算机连接,进行数据交互,PLC系统还连接DCS监控计算机。

[0049] PLC系统布置在浮选工业现场,用于基于人工经验设定精矿品位目标值与尾矿品位目标值,实时获取浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量和尾矿流量,并采用OPC通讯方式通过工业以太网传输至运行优化控制计算机和DCS监控计算机,根据精矿品位目标值的优化值和尾矿品位目标值的优化值控制浮选工业过程运行。

[0050] 运行优化控制计算机用于设定双网环境下浮选工业过程的矿物收益、矿物消耗、目标经济指标,根据设定的双网环境下浮选工业过程的矿物收益、矿物消耗、目标经济指标以及获取到的浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量、尾矿流量、矿浆的精矿品位目标值和矿浆的尾矿品位目标值,对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行静态优化,针对工业以太网存在噪声与丢包对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行动态优化,并将精矿品位目标值的动态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的动态补偿量下发至PLC

系统。

[0051] DCS监控计算机用于以曲线图形式显示当前浮选工业过程的经济指标、精矿品位、尾矿品位,同时在线显示泥浆液位,泥浆质量,泡沫质量,给矿矿浆流量,尾矿流量,并且对以太网传输过程中的丢包报警与显示噪声值。

[0052] 采用所述的双网环境下浮选工业过程运行控制系统进行双网环境下浮选工业过程运行的控制方法,如图2所示,包括以下步骤:

[0053] 步骤1:在运行优化控制计算机中设定双网环境下浮选工业过程的矿物收益、矿物消耗、目标经济指标,并在浮选工业现场的PLC系统中设定精矿品位目标值与尾矿品位目标值;

[0054] 步骤2:PLC系统实时获取浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量和尾矿流量;

[0055] 步骤3:PLC系统将浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量、尾矿流量、矿浆的精矿品位目标值、矿浆的尾矿品位目标值,采用OPC通讯方式通过工业以太网传输至运行优化控制计算机和DCS监控计算机;

[0056] 步骤4:运行优化控制计算机根据设定的双网环境下浮选工业过程的矿物收益、矿物消耗、目标经济指标以及获取到的浮选机中的泥浆高度、泥浆质量、泡沫质量、给矿矿浆流量、尾矿流量、矿浆的精矿品位目标值和矿浆的尾矿品位目标值,对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行静态优化:以设定的精矿品位目标值与精矿品位目标值优化值之间差值最小化和设定的尾矿品位目标值与尾矿品位目标值优化值之间差值最小化为优化目标,计算精矿品位目标值的静态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的静态补偿量以满足目标经济指标,并将精矿品位目标值的静态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的静态补偿量下发至PLC系统;

[0057] 对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行静态优化的过程如图3所示,包括以下步骤:

[0058] 步骤4.1:建立用来描述浮选工业过程的状态空间方程,将泥浆质量和泡沫质量作为该方程的状态变量,泥浆高度和泥浆流量作为该方程的输入变量,精矿品位和尾矿品位作为该方程的输出变量;

$$[0059] \quad \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

[0060] 其中,状态变量 $x(t) = (M_p^i, M_e^i)$, M_p^i 为泥浆质量, $i = 1, 2$ 分别表示矿物种类1和矿物种类2, M_e^i 为泡沫质量,输入变量 $u = (h_p, q_a)$ 即PI控制的输入控制量, h_p 为泥浆液位, q_a 为给矿矿浆流量,输出变量 $y(t) = (L_{cg}, L_{tg})$ 即PI控制的控制输出量,精矿品位

$$L_{cg} = \frac{M_e^1 g_{cp}^1 + M_e^2 g_{cp}^2}{M_e^1 + M_e^2} L_{cu}, \text{尾矿品位 } L_{tg} = \frac{M_p^1 g_{cp}^1 + M_p^2 g_{cp}^2}{M_p^1 + M_p^2} L_{cu}, g_{cp}^i \text{ 为给矿矿浆中矿物种类 } i \text{ 的}$$

品位, L_{cu} 为铜矿的含量, A 是系统矩阵、 B 是控制矩阵、 C 是输出矩阵, t 为浮选工业过程的各个时刻;

[0061] 步骤4.2:利用PI控制器更新状态空间方程;

[0062] PI控制器的输入控制量 $u(t) = Kx(t) + Ly^*$

[0063] 其中, y^* 为基于人工经验设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值, K^* 为状态反馈矩阵, L 为输出反馈矩阵;

[0064] 更新后的状态空间方程 $\dot{x}(t) = A_L x(t) + B_L y^*$

[0065] 其中, 系统矩阵 $A_L = A + BK$, 控制矩阵 $B_L = BL$;

[0066] 步骤4.3: 建立用来描述矿物收益与矿物消耗之差的目标经济指标方程 $r(t) = My(t) + Nu(t)$, 其中 M 为矿物收益矩阵, N 为矿物消耗矩阵;

[0067] 步骤4.4: 利用PI控制器更新目标经济指标方程;

[0068] 更新后的目标经济指标方程 $r(t) = C_L x(t) + D_L y^*$;

[0069] 其中, 状态输出矩阵 $C_L = MC + NK$, 输出输出矩阵 $D_L = NL$;

[0070] 步骤4.5: 建立以更新后的状态空间方程和更新后的目标经济指标方程为约束条件, 以设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值与它们的优化值之间差值最小为优化目标, 建立优化该差值的优化目标函数;

[0071] 优化目标函数为: $\min J = \frac{1}{2} \Delta y^{*T} S \Delta y^*$

[0072] 其中, 其中 S 为任意的正定矩阵, Δy^* 为设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值与它们的优化值之间差值;

[0073] 步骤4.6: 利用拉格朗日乘子方法求解优化目标函数, 得到设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值与它们的优化值之间差值;

[0074] $\tilde{J} = \frac{1}{2} \|\Delta y^*\|_s^2 + \lambda^T [A_L x(t) + B_L (y^* + \Delta y^*)] + \mu^T [C_L x(t) + D_L (y^* + \Delta y^*) - r]$

[0075] \tilde{J} 分别对 $\lambda, \mu, x(t)$ 的平衡点 x_s 和 Δy^* 的平衡点 Δy_s^* 进行求导可以得到如下方程:

$$[0076] \begin{pmatrix} A_L & B_L & 0 & 0 \\ C_L & D_L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_L^T & C_L^T \\ 0 & S & B_L^T & D_L^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_s \\ \Delta y_s^* \\ \lambda \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -B_L y^* \\ r - D_L y^* \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

[0077] 由方程可以求解出 Δy_s^* , 则有MPC的静态参考输入为 $y_s^* = y^* + \Delta y_s^*$;

[0078] 步骤4.7: 将设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值与它们的优化值之间差值传输至PLC系统, 对设定的精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行静态补偿 $y_s^* = y^* + \Delta y_s^*$ 。

[0079] 步骤5: PLC系统根据精矿品位目标值的静态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的静态补偿量对浮选工业过程进行PI控制: 以给矿矿浆流量、泥浆高度为控制输入量, 以矿浆的精矿品位与矿浆的尾矿品位为控制输出量;

[0080] 步骤6: 当PLC系统控制周期达到25个周期时, 运行优化控制计算机针对工业以太网存在噪声与丢包, 对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行动态优化: 以精矿品位目标值的静态补偿量与精矿品位目标值优化值之间差值最小化和尾矿品位目标值的静态补偿量与尾矿品位目标值优化值之间差值最小化为优化目标, 计算精矿品位目标值的动态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的动态补偿量以满足目标经济指标, 并将精矿品位目标值的动态补偿量与矿浆的尾矿品位目标值的动态补偿量下发至PLC系统;

[0081] 对精矿品位目标值与尾矿品位目标值进行动态优化的过程如图4所示,包括以下步骤:步骤6.1:建立用来描述浮选双网工业过程的离散状态空间方程,将泥浆质量和泡沫质量作为该方程的状态变量,精矿品位和尾矿品位作为该方程的输入变量,经济指标作为该方程的输出变量:

$$[0082] \quad \begin{cases} x(k+1) = A_d x(k) + B_d y_u^*(k) \\ r(k) = C_L x(k) + D_L y_u^*(k) \end{cases}$$

[0083] 其中,状态变量 $x(k) = (M_p^i, M_e^i)$, M_p^i 为泥浆质量, $i=1,2$ 分别表示矿物种类1和矿物种类2, M_e^i 为泡沫质量,输入为 $y_u^*(k)$,即精矿品位与尾矿品位设定值,输出为经济指标,

$A_d = e^{A_d T_s}$ 为离散系统矩阵, $B_d = \int_0^{T_s} e^{A_d t} dt$ 为控制矩阵;

[0084] 步骤6.2:按照状态网络丢包与噪声原理建立实际的状态向量;

[0085] $x_f(k) = \delta(k)(1+\rho(k))x(k) + (1-\delta(k))x_f(k-1)$,其中 $\delta(k)$ 、 $\rho(k)$ 为第k步采样的随机变量,服从0-1分布, $\delta(k)=0$ 代表网络丢包, $\rho(k)$ 服从几何分布,代表当前噪声幅值, $\delta(k)$

的期望 $\bar{\delta}$ 具体为 $\begin{cases} P\{\delta(k)=1\} = E\{\delta(k)\} = \bar{\delta} \\ P\{\delta(k)=0\} = 1 - \bar{\delta} \end{cases}$, $\rho(k) \sim U(-\rho_m, \rho_m)$, ρ_m 为 $\rho(k)$ 的幅值,系统的全

局动态可以描述为 $\begin{cases} \bar{x}(k+1) = \begin{pmatrix} A_d & 0 \\ \delta(k)(1+\rho(k))I & (1-\delta(k))I \end{pmatrix} \bar{x}(k) + \begin{pmatrix} B_d \\ 0 \end{pmatrix} y_u^*(k) \\ r(k) = (C_L \quad 0) \bar{x}(k) + D_L y_u^*(k) \end{cases}$, 其中状态向

量为 $\bar{x}(k) = (x(k)^T, x_f(k-1)^T)^T$, I 是单位矩阵;

[0086] 步骤6.3:选取反馈控制律为 $\Delta y_u^*(k) = F(k)x_f(k) = FG\bar{x}(k)$,即求解出反馈控制矩阵

F 则可得到动态补偿,则有最终给PLC的动态补偿设定值为 $y_c^*(k) = F(k)x_f(k) + y^* + \Delta y^*$,

$G = \tilde{\delta}(k)\rho(k)[I \quad 0] + \tilde{\delta}(k)[I \quad -I] + \rho(k)[\bar{\delta}I \quad 0] + [\bar{\delta}I \quad (1-\bar{\delta})I]$ 为中间变量, $\tilde{\delta}(k) = \delta(k) - \bar{\delta}$, 所以系统全局动态可以描述为:

$$[0087] \quad \begin{cases} \bar{x}(k+1) = (\tilde{\delta}(k)\rho(k)\tilde{A}_1 + \tilde{\delta}(k)\tilde{A}_2 + \rho(k)\tilde{A}_3 + \hat{A})\bar{x}(k) \\ r(k) = (\tilde{\delta}(k)\rho(k)\tilde{C}_1 + \tilde{\delta}(k)\tilde{C}_2 + \rho(k)C_3 + \hat{C})\bar{x}(k) \end{cases}, \text{其中}$$

$$[0088] \quad \begin{cases} \tilde{A}_1 = \begin{pmatrix} B_d F & 0 \\ I & 0 \end{pmatrix} \\ \tilde{A}_2 = \begin{pmatrix} B_d F & -B_d F \\ I & -I \end{pmatrix} \\ \tilde{A}_3 = \begin{pmatrix} \bar{\delta}B_d F & 0 \\ \bar{\delta}I & 0 \end{pmatrix} \\ \hat{A} = \begin{pmatrix} A_d + \bar{\delta}B_d F & (1-\bar{\delta})B_d F \\ \bar{\delta}I & (1-\bar{\delta})I \end{pmatrix} \end{cases}$$

$$[0089] \quad \begin{cases} \tilde{C}_1 = (D_L F \quad 0) \\ \tilde{C}_2 = (D_L F \quad -D_L F) \\ \tilde{C}_3 = (\bar{\delta} D_L F \quad 0) \\ \hat{C} = (C_L + \bar{\delta} D_L F \quad (1 - \bar{\delta}) D_L F) \end{cases}$$

[0090] 为中间变量；

[0091] 步骤6.4:根据模型预测的方法求解反馈控制率,求解方法为:在 $Q = \text{diag}\{Q_1, Q_2\}$,

Q_1, Y, W 为任意的正定矩阵、 $\begin{pmatrix} 1 & [\rho_f^{1/2} \bar{\chi}(k)]^T \\ \rho_f^{1/2} \bar{\chi}(k) & Q \end{pmatrix}$ 正定、 $\begin{pmatrix} Q - 2\bar{Y} & \Phi^T \\ \Phi & \Lambda \end{pmatrix}$ 负定的条件下,使得

γ 最小,使用MATLAB求解线性矩阵不等式的方法求出 γ ,在 γ 最小的情况下,可以算出增益 $F = WY^{-1}$,进而求得动态补偿量 $F(k)x_f(k)$,其中

$$[0092] \quad \bar{Y} = \text{diag}\{Y, Y\}$$

$$[0093] \quad \Lambda = -\text{diag}\{\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3\}$$

$$[0094] \quad \Lambda_1 = -\text{diag}\{Q, Q/(q\theta), Q/q, Q/\theta\}$$

$$[0095] \quad \Lambda_2 = -\text{diag}\{\gamma R^{-1}, \gamma R^{-1}/(q\theta), \gamma R^{-1}/q, \gamma R^{-1}/\theta\}$$

$$[0096] \quad \Lambda_3 = -\text{diag}\{\gamma Q_1^{-1}, \gamma Q_1^{-1}/(q\theta), \gamma Q_1^{-1}/q, \gamma Q_1^{-1}/\theta\}$$

$$[0097] \quad \Phi = [\Phi_1^T, \Phi_2^T, \Phi_3^T, \Phi_4^T, \Phi_5^T, \Phi_6^T, \Phi_7^T, \Phi_8^T, \Phi_9^T, \Phi_{10}^T, \Phi_{11}^T, \Phi_{12}^T]^T$$

$$[0098] \quad \Phi_1 = \begin{pmatrix} A_d Y + \bar{\delta} B_d W & (1 - \bar{\delta}) B_d W \\ \bar{\delta} Y & (1 - \bar{\delta}) Y \end{pmatrix}$$

$$[0099] \quad \Phi_2 = \begin{pmatrix} B_d W & 0 \\ Y & 0 \end{pmatrix}$$

$$[0100] \quad \Phi_3 = \begin{pmatrix} B_d W & -B_d W \\ Y & -Y \end{pmatrix}$$

$$[0101] \quad \Phi_4 = \begin{pmatrix} \bar{\delta} B_d W & 0 \\ \bar{\delta} Y & 0 \end{pmatrix}$$

$$[0102] \quad \Phi_5 = (\bar{\delta} W \quad (1 - \bar{\delta}) W)$$

$$[0103] \quad \Phi_6 = (W \quad 0)$$

$$[0104] \quad \Phi_7 = (W \quad -W)$$

$$[0105] \quad \Phi_8 = (\bar{\delta} W \quad 0)$$

$$[0106] \quad \Phi_9 = (C_L + \bar{\delta} D_L W \quad (1 - \bar{\delta}) D_L W)$$

$$[0107] \quad \Phi_{10} = (D_L W \quad 0)$$

$$[0108] \quad \Phi_{11} = (D_L W \quad -D_L W)$$

$$[0109] \quad \Phi_{12} = (\bar{\delta} D_L W \quad 0)$$

$$[0110] \quad \rho_f = (1 - \rho_m)^{-2}$$

[0111] 步骤7:PLC系统将精矿品位目标值的静态补偿量、精矿品位目标值的动态补偿量与尾矿品位目标值叠加作为精矿品位目标值的优化值,将尾矿品位目标值的静态补偿量、尾矿品位目标值的动态补偿量与尾矿品位目标值叠加作为尾矿品位目标值的优化值,根据精矿品位目标值的优化值和尾矿品位目标值的优化值控制浮选工业过程运行;

[0112] 步骤8:利用DCS监控计算机以曲线图形式显示当前浮选工业过程的经济指标、精矿品位、尾矿品位,同时在线显示泥浆液位,泥浆质量,泡沫质量,给矿矿浆流量,尾矿流量,对以太网传输过程中的丢包报警与显示噪声值,并返回步骤2。

[0113] 仿真时使用的底层方程为:

[0114]

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{pmatrix} -17.9956 & 0 & 65.6 & 0 \\ 0 & -0.135634 & 0 & 316 \\ 17.9 & 0 & -65.8473 & 0 \\ 0 & 0.04 & 0 & -316.247 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0.535549 & 0.160952 \\ 35.7989 & 5.24216 \\ -5.64767 & 0 \\ -0.247329 & 0 \end{pmatrix} u \\ y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.287901 & -6.5741 \\ 0.0282756 & -0.000423001 & 0 & 0 \end{pmatrix} x \end{cases}$$

[0115]

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{pmatrix} -17.9848 & 0 & 65.6 & 0 \\ 0 & -0.124798 & 0 & 316 \\ 17.9 & 0 & -65.7327 & 0 \\ 0 & 0.04 & 0 & -316.124 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0.227139 & 0.0612821 \\ 39.9158 & 1.99594 \\ -0.631506 & 0 \\ -0.0618322 & 0 \end{pmatrix} u \\ y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1.30077 & -13.285 \\ 0.0245384 & -0.000139634 & 0 & 0 \end{pmatrix} x \end{cases}$$

[0116] 在半实物仿真过程中,经济指标r设定为20,参考铜矿和尾矿的市场价格,矩阵M=[100,-20,100,-20],N=[0.01,0.1,0.01,0.1],采样时间为30秒,丢包概率为30%,噪声幅值为0.2时,经济指标运行控制结果曲线如图5所示,为了更好地观察经济指标的结果,将结果放大100倍显示,其中曲线1为设定的目标经济指标,曲线2为浮选优化过程中的经济指标优化值。精矿品位运行控制结果曲线如图6所示,为了更好地观察精矿品位的结果,将结果放大10000倍显示,其中曲线1为设定的精矿品位目标值,曲线2为浮选优化过程中的精矿品位目标值的优化值。尾矿品位运行控制结果曲线如图7所示,为了更好地观察尾矿品位的结果,将结果放大10000倍显示,其中曲线1为设定的尾矿品位目标值,曲线2为浮选优化过程中的尾矿品位目标值的优化值。

运行优化控制层

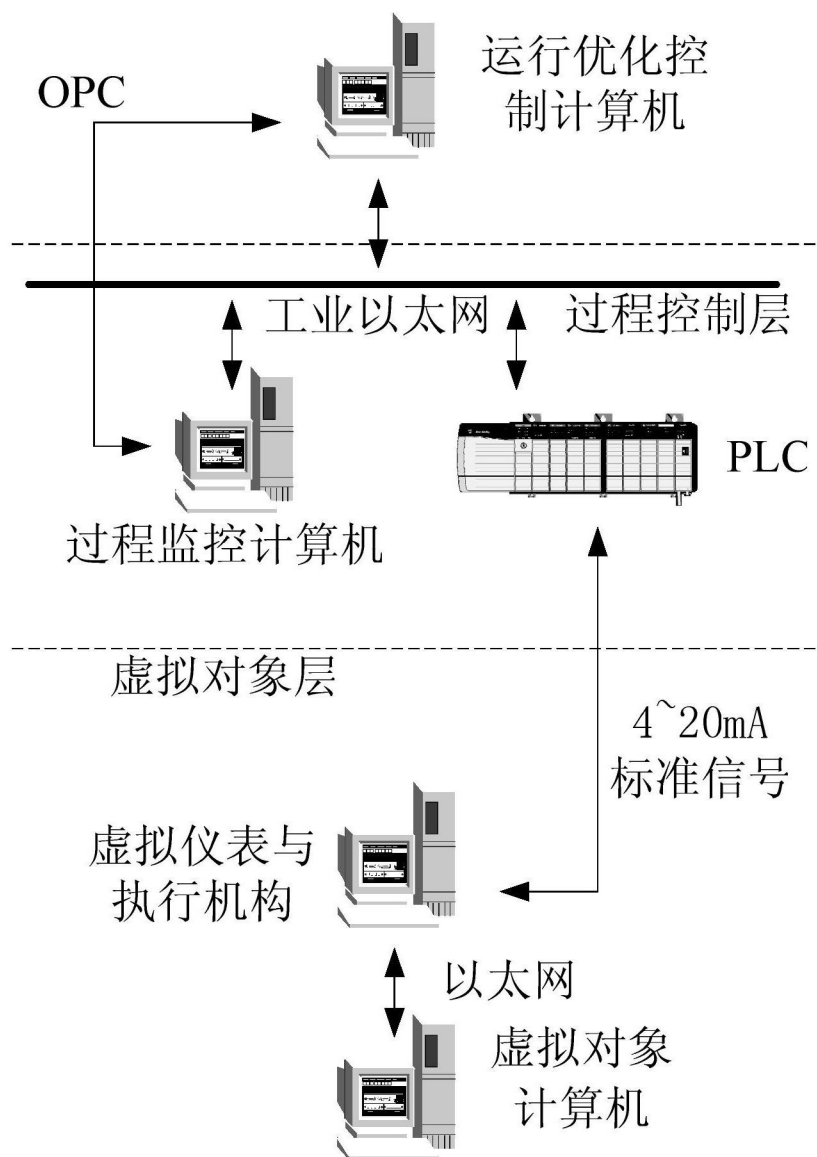


图1

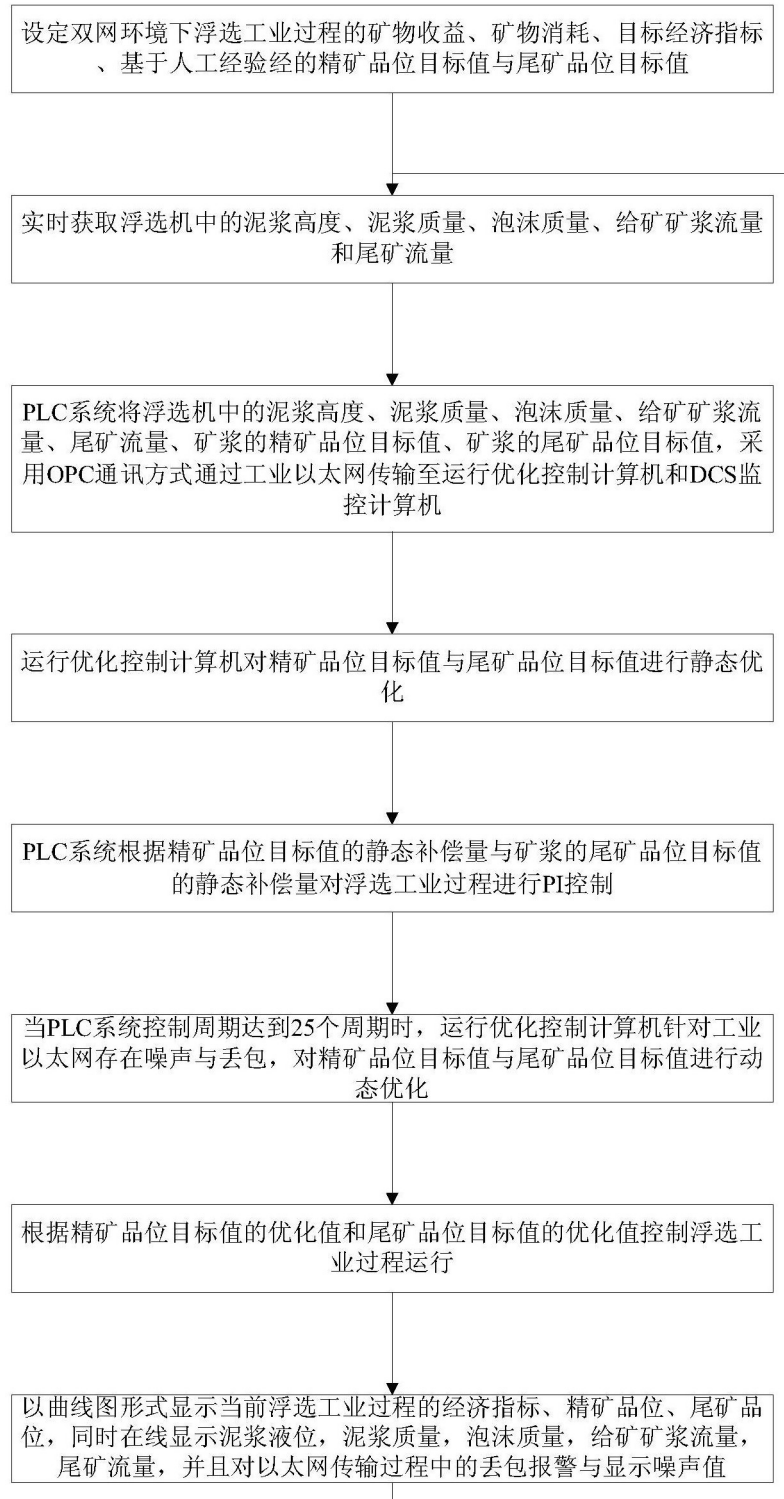


图2

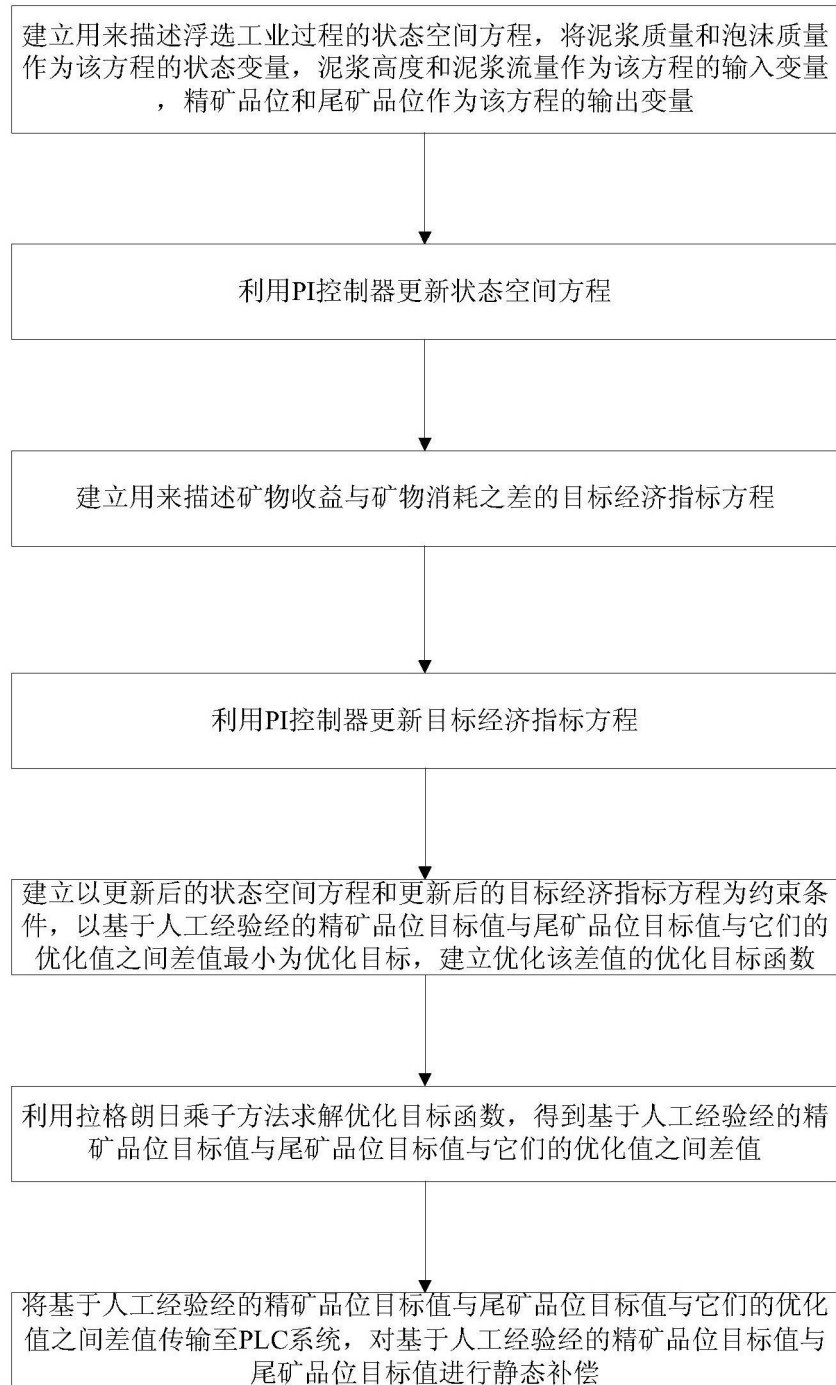


图3



图4

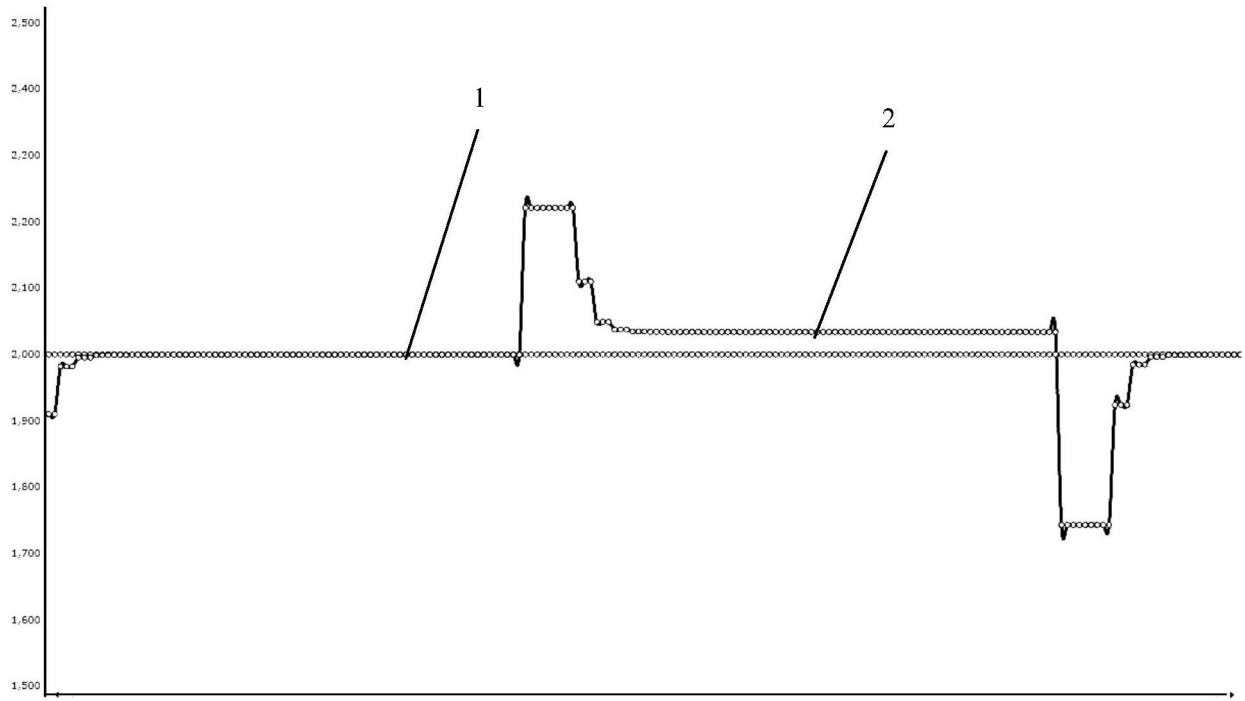


图5

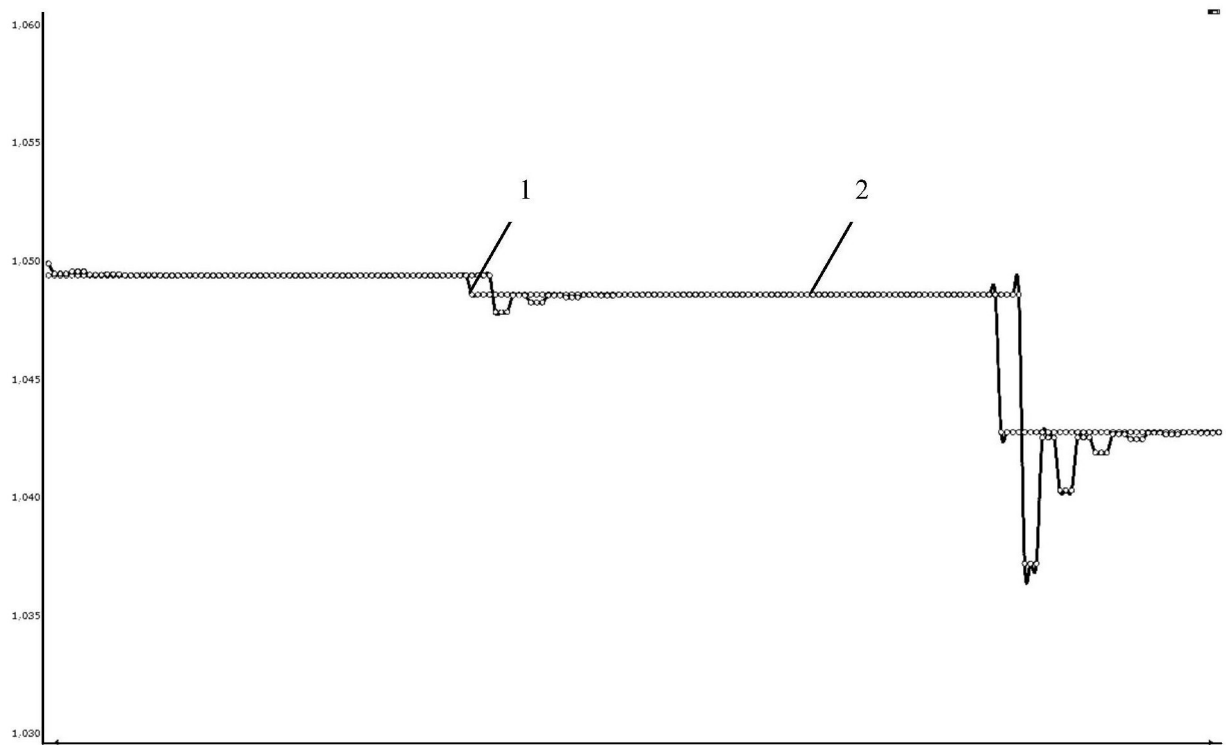


图6

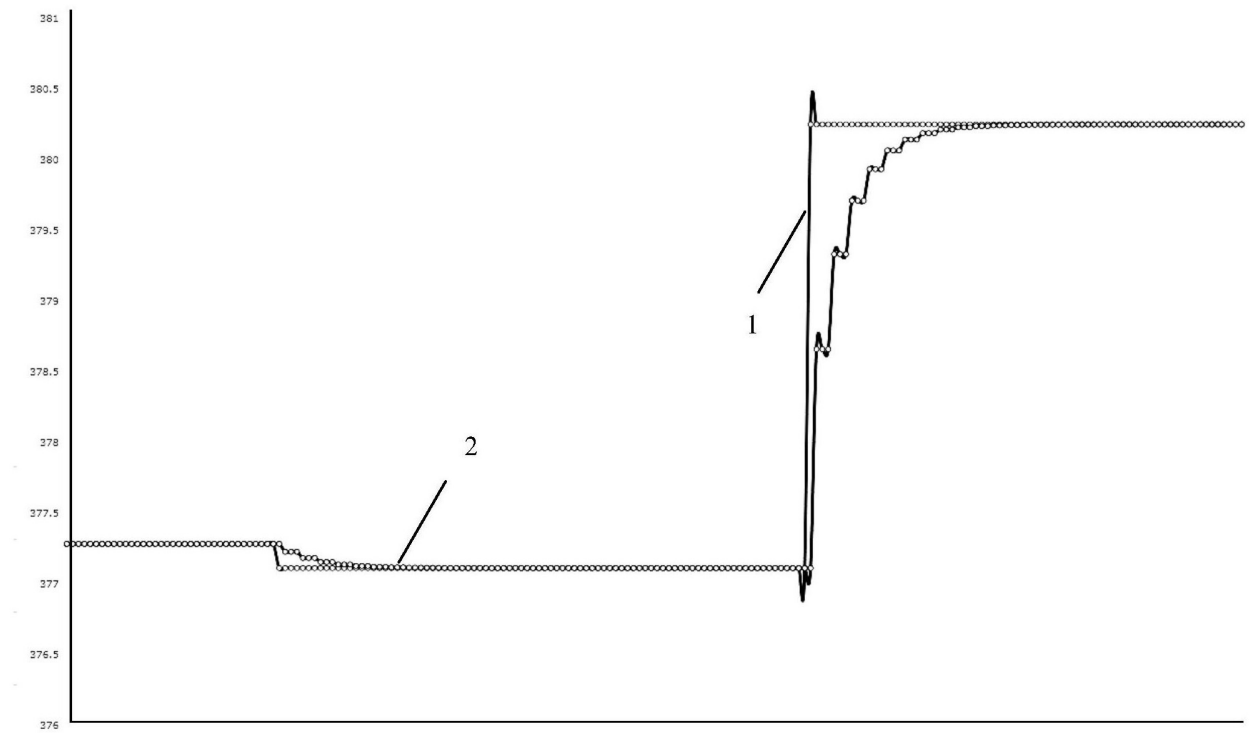


图7

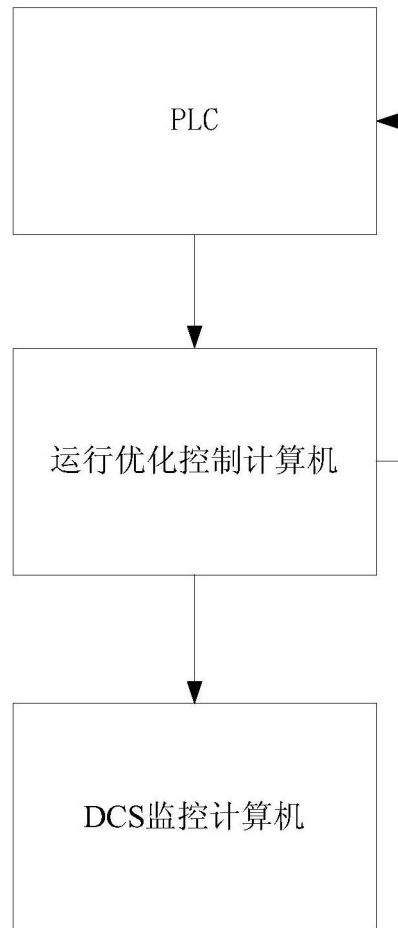


图8