

# 基于 Expert-PID 算法的矿山球磨机 物联网控制系统的设计

杨帆<sup>1</sup>, 王钰涌<sup>1</sup>, 张沛航<sup>1</sup>, 李博<sup>2</sup>, 刘水<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 伦敦玛丽女王大学工程学院, 西安 710072;

2. 西安捷达测控有限公司, 西安 710199)

**摘要:** 针对矿山球磨机采用手动控制呈现出的工人劳动强度大、易受主观因素缺点, 或者采用传统 PID 控制矿浆浓度中出现的稳定性差、波动大、精度低等落后状况, 提出设计开发基于 Expert-PID 算法的矿山球磨机物联网控制系统; 文中首先构建了一个五元组的球磨机的模型  $\text{BallMill} = \langle \text{Ore}, \text{Ball}, \text{Water}, \text{Slurry} \rangle$ , 设计出包含感知层、汇聚层、操作层、应用层等四层物联网测控系统宏观结构, 进而介绍了传统 PID 算法与 Expert-PID 算法详细内容, 重点论述了矿山球磨机 Expert-PID 算法物联网控制系统的原理结构与专家调控规则; 通过企业应用实践与对比实验表明, 该系统采用 Expert-PID 算法比传统的 PID 算法具备更好的鲁棒性、稳定性与可靠性。

**关键词:** 矿山球磨机; 矿浆浓度; 物联网; Expert-PID

## Design of Internet of Things Control System of Mine Ball Mill Based on Expert-PID Algorithm

YANG Fan<sup>1</sup>, WANG Yuyong<sup>1</sup>, ZHANG Peihang<sup>1</sup>, LI Bo<sup>2</sup>, LIU Shui<sup>2</sup>

(1. Queen Mary University of London Engineering School, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

(2. Xi'an Jetta Measurement & Control Co., Ltd., Xi'an 710199, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of high labor intensity, subjective factors, poor stability, large fluctuations and low accuracy in the traditional PID control of slurry concentration under manual control of mine ball mill, the design and development based on the Expert-PID algorithm of the Internet of Things (IoT) control system for the mine ball mill are proposed. The article first constructs a five-tuple ball mill model  $\text{BallMill} = \langle \text{Ore}, \text{Ball}, \text{Water}, \text{Slurry} \rangle$ , designs a four-layer IoT measurement and control system macro structure including the perception layer, the convergence layer, the operation layer, and the application layer, and then introduces the detailed contents of the traditional PID algorithm and the Expert-PID algorithm are discussed, and the principle structure and expert regulation rules for the mine ball mill Expert-PID algorithm of the IoT control system are discussed. The enterprise application practice and comparative experiments show the Expert-PID algorithm of the system has better robustness, stability and reliability than traditional PID algorithm.

**Keywords:** mine ball mill; slurry concentration; IoT; expert-PID

## 0 引言

矿山球磨机是选矿企业非常重要的磨矿设备, 它主要由给料机构、旋转机构、传动机构、加水管、出料机构以及配套测控传感器、控制阀门等组成, 它是矿山采石选矿配套的关键工序设备之一, 其最为常见的为格子型湿式球磨机, 它通过加入一定比例的钢球实现对各种矿石和适量的水进行湿式粉磨<sup>[1]</sup>。工作时矿石物料首先通过螺旋均匀地进入内装不同规格钢球第一仓粗磨, 其次进入第二仓进一步研磨, 最后进入第三或尾仓进行细磨成合格产品并通过出料螺旋筒到回转筛后排出。

矿山球磨机在选矿中主要是将矿石中的有用组分实现单体解离, 不同的矿石在磨矿中其单体解离的程度跟矿石与水的配比息息相关, 该配比也称为矿浆浓度, 其表征磨矿浓度与细度的技术指标, 在整个选矿工艺中有着极为重要的作用。矿浆浓度直接影响筒体内矿浆的流动性和输送粉状矿石颗粒的能力, 也影响磨矿介质钢球作用的发挥。目前部分选矿企业的矿石球磨机矿浆浓度的控制完全靠现场工人凭经验手动调控, 手动方式体现出劳动强度大、易受主观因素影响, 经常会出现大幅度的跑偏<sup>[2-3]</sup>。还有一部分自动化程度高的球磨机采用传统的 PID 算法自动控制加

收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2022-01-25。

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划支持项目(202110699147)。

作者简介: 杨帆(2000-), 男, 江苏阜宁人, 大学本科, 主要从事材料科学与工程、保密管理、物联网方向的研究。

引用格式: 杨帆, 王钰涌, 张沛航, 等. 基于 Expert-PID 算法的矿山球磨机物联网控制系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(3): 120-125.

水阀门,但是由于矿浆浓度受矿石量、钢球量、加水量等多变量影响<sup>[4]</sup>,其控制呈现出非常明显的非线性、滞后性、大惯性等特点,传统的 PID 算法很难解决多因素环境精确控制矿浆浓度,这很容易导致选矿后续工序中有效矿物回收率低<sup>[6]</sup>,给企业带来较大的隐形经济损失。

专家系统 (expert system) 是人工智能传统领域中一个重要的分支,它用知识存储与逻辑推理模拟人类专家解决复杂工程问题,广泛应用于机械、化工、医学、军事等领域<sup>[5]</sup>。选矿过程中把握好合适的矿浆浓度对于选矿后续工艺显得尤为重要,本文拟结合传统 PID 与 Expert System 各自的优越性,将其复合为一个综合控制算法实现矿山球磨机矿浆浓度的精确稳定控制。

## 1 矿山球磨机控制模型建立

矿山球磨机的作用将矿石磨成一定的细度通过加入适量的水为后续分级机提供合适稳定的矿浆浓度。对于球磨机来说主要三个输入参数:给矿量、钢球量、加水量,一个输出参数:特定浓度的排浆量。给矿量一般通过电子秤每隔一定的周期称量送入到球磨机中,钢球的数量一般通过加球机定时推入到球磨机中,加水量一般是通过管道阀门持续不断的输送到球磨机中。因此可以构建一个五元组的球磨机的模型:  $BallMill = \langle Ore, Ball, Water, Slurry \rangle$ 。矿浆浓度 (slurry) 是指矿浆中所含固体重量的多少,并用百分数来表示<sup>[7]</sup>。其计算如公式 (1) 为:

$$W_{Slurry} = W_{Ore} / W_{Total} \times 100\% = W_{Ore} / (W_{Ore} + W_{Ball} + W_{Water}) \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $W_{Slurry}$  为矿浆的重量百分浓度 (%);  $W_{Ore}$  为矿浆中矿石颗粒的重量 (kg);  $W_{Ball}$  为矿浆中钢球损耗的重量 (kg);  $W_{Water}$  为矿浆中液体水的重量 (kg);  $W_{Total}$  为矿浆所有组分总的重量 (kg)。

考虑到球磨机运行过程中,钢球损耗的重量远远小于矿石变为细小颗粒的重量,故可以忽略不计,因此矿浆浓度的计算可以简化为公式 (2):

$$C_{Slurry} = W_{Ore} / (W_{Ore} + W_{Water}) \times 100\% \quad (2)$$

在该模型中,因为给矿量 Ore 是由电子秤每隔一段时间输入到球磨机中,由于上游破碎环节来矿量经常动态变化,加上称量的间隔周期与实际称量很难精确,此时如果以恒定流量加水,很难保证稳定的矿浆浓度,因此需要动态调整阀门使得进水流量动态适应实际给矿量才能保证满足后续浮选工艺的矿浆浓度。进水流量的计算如果公式 (3) 所示:

$$Q = \mu A \sqrt{(2gH)} \quad (3)$$

式中,  $\mu$  为管道流量系数;  $A$  为管道过水面积;  $g$  为重力加速度;  $H$  为管道的作用水头。

管道的流量系数  $\mu$  是衡量管道通水能力的指标,流量系数值大,说明管道的流通能力大,流体流过管道时的压力损失小,其取值可以根据相关设计手册确定。 $A$  在本文中主要就是指的管道截面积,其越大表明同行的上限流量

数值就越大。管道的作用水头  $H$  是管线内液体的压强,管道里的水压力常以  $kg/cm \times cm$  表示。

通过上述系统的模型设计可以看出,矿山球磨机控制系统核心内容就是如何准确、有效控制矿浆中的矿石细小颗粒重量与加水量的合理配比。

## 2 矿山球磨机 Expert-PID 物联网系统设计

大部分选矿企业球磨设备生产环境较为恶劣,灰尘与噪音往往很大,对设备现场操作人员身心健康非常不利。物联网 (IoT, Internet of Things) 是新一代万物互联的网络<sup>[22]</sup>,使用该技术可以在球磨设备上布置若干传感器采集矿山球磨机的加球量、给矿量、加水量、阀门开度等信息,并通过 Expert-PID 算法动态控制加水阀门的大小,使得矿浆浓度满足后续浮选工艺要求。

根据物联网技术的理论、矿山球磨机设备工艺特定与远程安全稳定测控要求,设计出如图 1 所示的矿山球磨机 Expert-PID 物联网系统宏观架构<sup>[9]</sup>,从下至上为感知层、汇聚层、控制层、应用层,下面分别详细介绍。

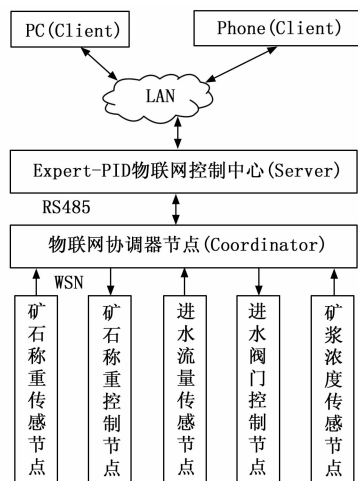


图 1 矿山球磨机 Expert-PID 物联网系统宏观架构图

### 2.1 感知层

感知层位于本物联网系统的最低层,它主要为球磨机设备的信号传感器 (Sensor) 或者执行器 (Actuator), 包含矿石称重传感节点、矿石称重控制节点、进水流量传感节点、进水阀门控制节点、矿浆浓度传感节点。考虑到设备运行环境恶劣,通过有线的方式通信连接不方便且维护成本较高,本系统将感知层设计成无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network), 其采用 Texas Instruments 公司 2.4 GHz 频段 CC2530 ZigBee 协议的片上系统 (SoC) 芯片,其外围连接电路如图 2 所示,CC2530 内置了良好性能的 RF 信号收发器单元、功能强大的 8051 单片机 CPU、较大容量的可编程的 Flash Memory 以及可以扩展的随机存储器 RAM。CC2530 为了适应物联网系统低功耗的要求可以设置不同的运行模式。CC2530 结合了 Texas Instruments 公司的业界领先的黄金单元 ZigBee 协议栈 (Z-

Stack™), 提供了一个强大和完整的 ZigBee 解决方案<sup>[15]</sup>。

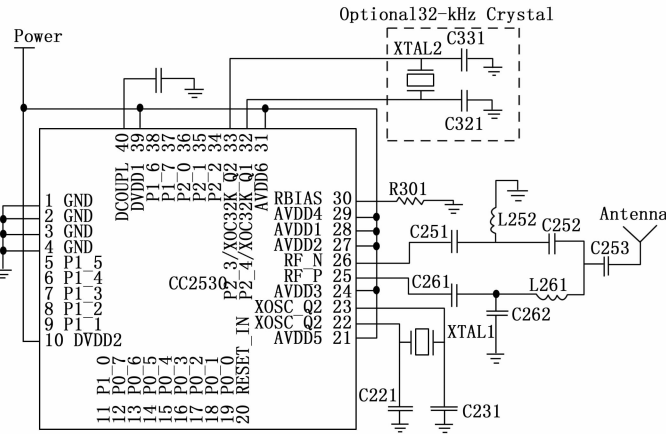


图 2 物联网节点 CC2530 芯片外围连接电路图

本系统的所有传感器节点与执行器节点工作机制基本相同, 只是信号的流向有所差异。传感器节点通过各自的感知电路采集开关量 (ON-OFF 通断信号)、电流 (4~20 mA)、电压 (1~5 V) 等数据, 内部通过 A/D 转换并硬件滤波得到正确的物理量放入 CC2530 缓冲区内存; 执行器节点根据协调器节点发送过来的控制量将开关信号或者数字量输出信号通过 D/A 转换成电流 (4~20 mA)、电压 (1~5 V) 等模拟量信号输出到给矿、加水执行机构上去。

### 2.2 汇聚层

汇聚层在本物联网中就是一个物联网协调器节点 (Coordinator), 主要是将感知层所有的 WSN 节点通过无线通信的形式收集起来发送到控制层, 同时将控制层发出的调控信号下发到感知层的执行器上。协调器节点硬件单元组成原理结构如图 3 所示, 内部包含的主要模块有: CC2530 控制中心单元、外部储存单元、键盘 I/O 单元、无线信号天线单元、节点本地显示单元、直流电池供电单元、USB 本地接口单元、RS485 上行通信单元等组成。

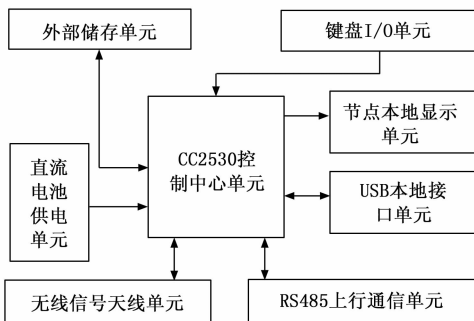


图 3 协调器节点硬件单元组成原理结构图

CC2530 控制中心单元为节点的核心芯片, 它协调和控制其他单元的正常运行。节点通过无线信号天线单元收集下层传感器实时数据或者发送调节信号给执行器。USB 本地接口单元主要实现对协调器节点下载程序、设置参数功能。节点本地显示单元可以将球磨机设备各个传感器采集

或者执行器的控制数据现场本地实时显示, 方便本地测控调试工作。外部储存单元主要是存放协调器节点本地历史采集数据与调节系统参数设置。键盘 I/O 单元使用矩阵扫描方式工作检查用户按键操作信号, 通过它可以跟节点实现本地人机交换。直流电池供电单元通过为节点提供本地直流工作电源支持。RS485 上行通信单元实现跟上层 Expert-PID 物联网控制中心 (Server) 长距离有线抗干扰串口通信。

### 2.3 操作层

操作层为 Expert-PID 物联网控制中心 (Server), 在本系统中包含硬件为一台高性能的工业控制计算机 (industry control computer) 以及在其运行的含有 Expert-PID 算法的服务器软件系统。考虑到球磨机现场环境存在高强度的随机噪声干扰, 需采用可靠性与稳定性较高的工业 PC 作为中心控制计算机, 它需要具备两个接口, 一个是跟下层协调器节点的 RS485 通信接口, 另一个是跟应用层上行通信的网络接口。

操作层最为重要的是 Expert-PID 物联网控制中心 (Server) 软件设计, 它包含的功能模块如图 4 所示, 主要名称与内容描述如下: 1) 系统调度模块, 它为操作层服务器系统的主控模块, 根据系统的事件与优先级动态启动或者停止其他模块的运行; 2) 设备工艺画面模块, 它是服务器软件中主要的人机界面显示模块, 将球磨机设备结合采集量、控制量以虚拟现实的方式直观显示出来; 3) 下行 RS485 通信模块, 它是 Server 软件与下位协调器节点传输信息的通道, 采用工业上主流稳定可靠的长距离 RS485 总线技术; 4) Expert-PID 算法控制模块, 它是操作层服务器系统最为重要的核心模块, 也是本系统达到设计目的的主要依赖工具, 通过本算法实现对矿浆浓度维持符合磨矿工艺要求相对恒定的状态设定量<sup>[14]</sup>; 5) 上行 TCP/IP 通信模块, 它提供给应用层 PC 机或者移动手机客户端访问的通道; 6) 数据记录查询模块, 它实现将采集到球磨机各传感器数据存储到后台数据库中, 用户可以查询浏览数据并为企业生产提供分析决策支持; 7) 动态曲线趋势模块, 它将采集到的数据以图形化动态曲线的形式显示出来, 为用户提供直观的趋势信息判断未来测量信息走势, 从而可以进一步干预后续正确调控设置参数。

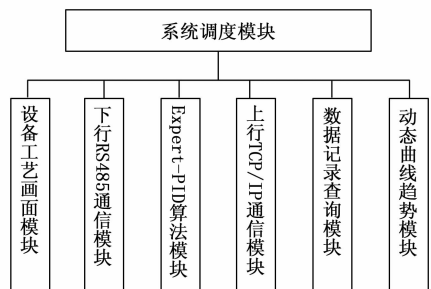


图 4 操作层软件系统主要模块组成图

### 2.4 应用层

应用层包含选矿企业工厂局域网范围的 PC 机设备远程监控客户端程序设计与手机移动客户端程序设计。通过 PC 机或者手机客户端, 选矿设备技术人员可以远程监控设备的各传感器实时采集信息, 根据需要可以远程调整矿浆浓度的 Expert-PID 知识库中各种参数。

应用层的 PC 机或者手机客户端系统的模块主要包含主循环调度模块、网络通信模块、球磨机设备工艺画面模块、Expert-PID 参数查看设置模块、记录数据查询模块、动态曲线显示模块等, 其功能与框图跟操作层类似, 就不再重复论述。

### 3 矿山球磨机 Expert-PID 算法设计

选矿浮选工艺中, 矿浆浓度 Slurry (Slur) 和回收率 Retrieve (Retr) 具有一定程度的相关规律性, 其相关性如式 (4) 所示:

$$Retr = \begin{cases} f(\alpha) * Slur & Slur > 0 \text{ and } Slur \leq SK \\ Rmax - f(\beta) * Slur & Slur \geq SK \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  为浮选正相关系数,  $\beta$  为浮选负相关系数,  $f$  为相关函数。从公式 (4) 可以看出当矿浆浓度  $Slur$  在小于等于  $SK$  范围时,  $Slur$  越大, 回收率逐渐增加,  $Slur = SK$  时达到最大值  $Rmax$ ; 但  $Slur$  超过最佳浓度  $SK$  时, 回收率  $Retr$  又逐渐降低。本系统设计的目的是在给矿量、加水量动态变化的情况下实现选矿后续浮选工艺要求的最佳的矿浆浓度  $SK$ , 其需要一个高性能先进的调控算法—Expert-PID。

#### 3.1 传统的 PID 算法

在自动化过程控制领域中, 目前发展最为成熟的技术就是传统 PID 控制算法<sup>[8]</sup>, 它不需要精确的数学模型, 通过设置合适的经验参数或者动态自整定即可获得较好的调控效果。在球磨机运行过程中, 通过感知层矿浆浓度传感器采集到浓度值  $Slurry$  是随时间  $t$  变化的函数, 其用  $P(t)$  表示, 设定的最佳浓度为  $SK$ , 其偏差为  $e(t) = SK - P(t)$ , 通过 PID 算法最后得到的给水量阀门调控输出值  $v(t)$ 。球磨机采用传统的 PID 算法<sup>[21]</sup>, 如式 (5) 所示:

$$v(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5)$$

式中,  $t$  表示系统运行时间,  $T_i$  是积分动态系数,  $T_d$  是微分动态系数,  $K_p$  是比例动态系数。

公式 (5) 为传统的 PID 算法的模拟运算表示, 它不宜用于计算机数字化连续求解。如果在一定时间周期  $T$  内, 将数学上积分求解化为若干次偏差  $e(k)$  求和, 两次偏差相减  $e(k) - e(k-1)$  表示微分计算, 就可以得到数字化位置型 PID 算法公式 (6), 这样就可以方便计算机离散化数字运算<sup>[13]</sup>。

$$v(k) = K_p \left[ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] \quad (6)$$

其输出控制量  $v(k)$  对应球磨机给水阀门执行机构的控制位置, 但是这种算法每次得到都是阀门应该处于的位置, 由于球磨机设备运行环境恶劣, 容易受到环境噪声的干扰, 导致阀门频繁开大或者关小, 这不利于设备的长久健康运行, 另外该公式运算容易产生大的累加误差<sup>[18]</sup>。如果将两次位置型 PID 算法公式相减, 即  $v(k) - v(k-1)$ , 可以得到增量型 PID 控制算法<sup>[19]</sup>, 如公式 (7) 所示:

$$\Delta v(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (7)$$

从增量型 PID 算法公式 (7) 可以看出, 计算机运算只需要记住最近 3 次的偏差值  $e$ , 就可以计算出在上次阀位的基础上增加或者减少的调整量。这对于球磨机加水管道阀门控制非常有利, 它是基于上次的阀门位置进行增量调控, 不会产生累积误差, 每次控制不会大幅度的调整阀门位置, 这对于阀门的长久稳定运行非常有利<sup>[16]</sup>。

传统的 PID 算法中,  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  系数由用户根据经验设置, 往往不能适应球磨机运行过程中多变量、滞后性、大惯性等复杂情况, 因而有时出现调控偏差大的情况<sup>[20]</sup>。

#### 3.2 Expert-PID 复合算法

专家系统 (Expert System) 是一种根据输入参数基于知识库中的逻辑规则进行推理运算的控制系统, 将传统 PID 的算法跟专家系统进行融合就可以得到矿山球磨机 Expert-PID 复合算法<sup>[10-11]</sup>, 其原理结构如图 5 所示。

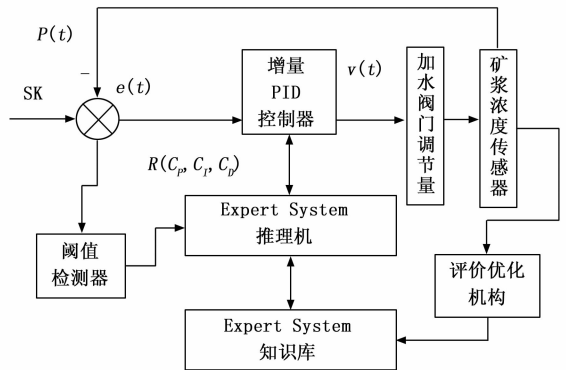


图 5 矿山球磨机 Expert-PID 复合算法原理图

其算法工作原理内容描述如下: 1) 因加入到球磨机给矿量与进水流量动态变化, 球磨机矿浆浓度传感器实时测量值为  $P(t)$ , 它随着时间  $t$  的不同而发生改变; 2) 矿浆浓度测量值根据选矿后续工艺的要求提供最佳浓度设定值  $SK$ , 调控的目标使得偏差  $e(t)$  无限接近零; 3) 阈值检测器主要是给 Expert System 推理机供球磨机工艺状态检测阈值范围参数: 偏差的  $e(t)$  的范围、给矿量的范围、矿浆浓度当前所处范围等; 4) Expert System 知识库存放了球磨机状态参数各种阈值范围内 PID 控制效果知识, 它由矿山专家领域知识和设备操作人员经验知识组成, 它主要是由若干条动态 IF-ELSE 产生式逻辑控制规则组成; 5) Expert System 推理机根据阈值检测器提供的当前状态范围参数条件搜索知识库里面提供的产生式逻辑控制规则知识给增量型 PID 控制

器提供合适的比例参数  $C_p$ 、积分参数  $C_i$ 、微分参数  $C_d$ ，并调用增量型数字 PID 控制器根据偏差  $e(t)$  进行运算得到实际控制输出参数  $v(t)$ ，并将增量值把它发送给球磨机加水阀门上<sup>[17]</sup>；6) 评价优化机构是 Expert System 的优化自主学习评价机构，它根据本次调控输出后偏差  $e(t)$  变化趋势是否处于收缩趋势给出综合评价，在此基础上将优化阈值参数数据写入到知识库更新逻辑产生式规则。

本 Expert-PID 复合算法中主要有如下 4 种产生式规则：

1) if ( $|e(t)| < E_0$ ) then 执行公式 (8)：

$$v(t) = v(t-1) + C_i e(t) \quad (8)$$

当  $|e(t)| < E_0$  时，说明工艺要求矿浆浓度 SK 与测量浓度  $P(t)$  偏差的绝对值低于非常小的阈值  $E_0$  ( $E_0 > 0$ )，此时加水阀门可以基本维持不变，在此基础上作用弱积分效应即可。

2) if ( $e(t) \geq E_1$ ) then 执行公式 (9)：

$$v(t) = V_{\max} \quad (9)$$

当  $e(t) \geq E_1$  成立时，说明工艺要求矿浆浓度 SK 与测量浓度  $P(t)$  正偏差的高于允许设定的上限阈值参数  $E_1$  ( $E_1 > 0$ ) 值，这说明加水量远远低于矿石颗粒形成矿浆的要求，此时将加水阀门直接开到最大值，使其快速达到目标浓度。

③if ( $e(t) \leq E_2$ ) then 执行公式 (10)：

$$v(t) = V_{\min} \quad (10)$$

当  $e(t) \leq E_2$  成立时，说明工艺要求矿浆浓度 SK 与测量浓度  $P(t)$  负偏差的低于允许设定的下限阈值参数  $E_2$  ( $E_2 < 0$ ) 值，这说明加水量远远高于矿石颗粒形成矿浆的要求，此时将加水阀门直接开到最小值，使其快速达到目标浓度。

④if ( $Em \geq e(t) \geq En$ ) then 执行公式 (11)：

$$v(t) = v(t-1) + \{X_p[e(t) - e(t-1)] + X_i e(t) + X_d[e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)]\} \quad (11)$$

将偏差分成若干等级，分别处于不同的阈值  $[Em, En]$  区间范围，应该选取不同的比例参数  $X_p$ 、积分参数  $X_i$ 、微分参数  $X_d$ ，使得数字 PID 运算采用最合适系数运算，最终可以快速调节阀门达到控制目标<sup>[12]</sup>。

#### 4 实验结果与分析

作者运用本文提出的物联网分层架构理论与 Expert-PID 调控算法为国内某选矿厂磨矿车间多台格子型湿式球磨机进行了实际的开发与应用。系统实现的操作层球磨机 Expert-PID 软件运行工艺画面如图 6 所示。

为了验证本系统调控矿浆浓度的效果，运用本文提出的基于 Expert-PID 复合算法与传统的增量型 PID 算法在该选矿企业的格子型湿式球磨机进行对比运行测试实验，两种算法都针对基于同一台球磨机在相同测控硬件、操作系统环境下依次分别运行 2 个小时且加水、给矿设备都处于理想运行状态，两次实验的给矿频次与给矿量基本一致，两次实验的设定  $C_{\text{slurry}} = 28.5\%$ ，Expert-PID 复合算法与传统的增量型 PID 算法初始参数都为： $K_p = 0.45$ ； $T_i =$

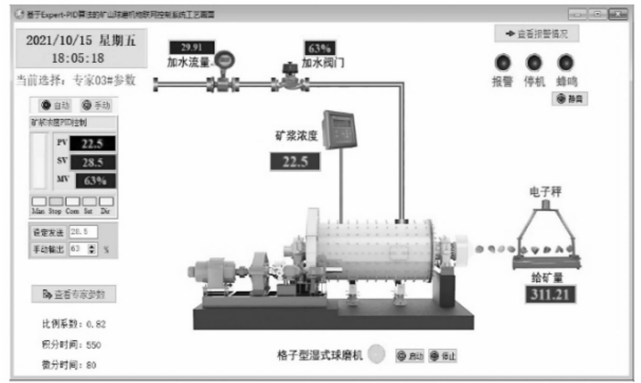


图 6 操作层球磨机 Expert-PID 软件运行工艺画面

255.0； $T_d = 35.0$ ，系统运行后 Expert-PID 根据算法规则动态选择合适比例参数  $C_p$ 、积分参数  $C_i$ 、微分参数  $C_d$  赋给  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$ ，传统的增量型 PID 算法参数维持不变。通过配套软件记录数据后期在软件中合并形成的对比动态曲线如图 7 所示，实验过程中，人为有意不规则的加大与减小瞬时给矿量一次。

通过图 7 的实验对比曲线可以看出，Expert-PID 复合算法能够在较短时间内实现测量矿浆浓度达到目标设定的最佳浓度，传统的 PID 算法需要较长时间才能调控到较为稳定的目标值。对于不规则的外部增加或者减小给矿量引起的测量矿浆浓度值的迅速变化，Expert-PID 复合算法比传统的 PID 算法根据专家系统知识库做出基本一步到位的给水调节输出量，呈现出较好的动态适应性能，从而使得测量值与设定值总体偏差较小，其波动幅度相对较为平稳。

本系统采用物联网 (IoT) 控制技术在某选矿厂磨矿车间多台格子型湿式球磨机进行实际改造运行，改造前该企业的矿山球磨机为仪器仪表辅助手动控制 (Manuel) 方式，通过企业的大约 6 个月对编号 QMJ-III-K3 球磨机改造前后运行记录数据进行对比统计，其改造前后磨矿产品溢流浓度与实际矿石处理能力技术指标对比如表 1 所示。

表 1 某选矿厂球磨机实施本系统前后技术指标对比

| 方式     | 溢流浓度/%    | 处理能力/(t/h) |
|--------|-----------|------------|
| Manuel | 57.2~65.3 | 21.3       |
| IoT    | 66.8~73.6 | 23.6       |

从表 1 中可以看出，采用物联网 (IoT) 控制系统可以一定程度上的提高了矿石处理能力，且磨矿产品的溢流浓度也得到较好的增加，为企业带来了经济效益的较大提升。

#### 5 结束语

球磨机是选矿企业非常重要的生产设备，如果采用传统的人工控制或者仪器仪表辅助控制，会导致生产效率低下、工人劳动强度高、矿浆浓度不稳定等落后状况。运用现代先进的物联网技术设计球磨机矿浆浓度自动化控制系统，采用分层的设计手段，将复杂的问题简单化处理，具

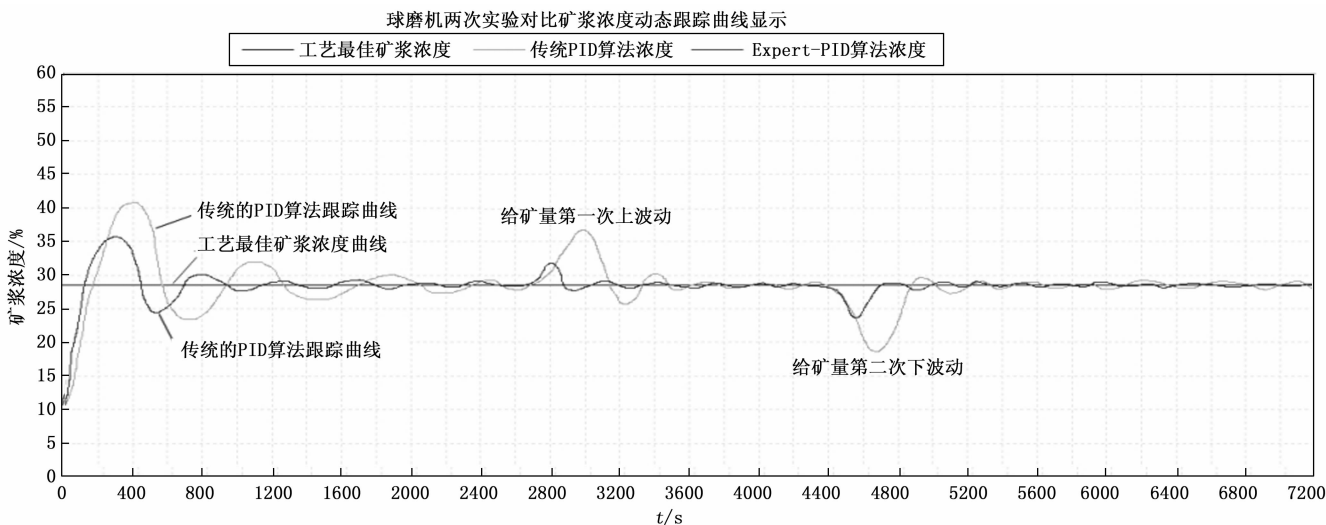


图7 Expert-PID复合算法与传统PID运行效果对比曲线

有较高的可行性与可维护特性。

在物联网系统中对球磨机矿浆浓度采用 Expert-PID 复合算法可以针对不同的外界传感器参数阈值范围实施不同的比例、积分、微分参数运算,可以使得实际矿浆测量值能够快速且较小偏差的跟随选矿要求的最佳浓度值,它比传统的 PID 算法具备更好的鲁棒性、稳定性与可靠性。企业应用实践表明,本物联网控制系统在一定程度上改变矿山球磨机手动控制产品质量相对较低、处理能力落后的状况,具备较好的应用推广价值,同时给同类矿山设备远程控制提供了较好的示范作用。

#### 参考文献:

- [1] 曾明. 半自磨工艺在矿山选矿中的应用现状及发展趋势[J]. 矿山机械, 2021, 49 (7): 32-36.
- [2] 贺耀宜, 刘丽静, 赵立厂, 等. 基于工业物联网的智能矿山基础信息采集关键技术与平台[J]. 工矿自动化, 2021, 47 (6): 17-24.
- [3] 岳恒, 李健, 庞为, 等. 选矿工业全流程物联网实验平台的研发[J]. 控制工程, 2017, 24 (4): 909-916.
- [4] 兰洲. 球磨机控制系统的 PLC 控制改造[J]. 电工技术, 2019 (2): 23-24.
- [5] 隋涛, 孔苓青, 刘秋贺, 等. 专家 PID 控制在矿井提升机直流调速系统中的应用[J]. 中国科技论文, 2017, 12 (2): 226-231.
- [6] 祁中培, 夏青, 吴彩斌. 浮选柱自动控制技术的发展与应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2021 (5): 117-123.
- [7] 姚江, 柳小波, 王智强, 等. 非接触式多通道矿浆浓度在线检测系统及方法[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41 (9): 154-158.
- [8] 张卫锋, 刘致君, 张灿祥. 基于 PID 算法的疫苗保温箱温控系统设计[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49 (7): 1469-1473.
- [9] 刘晔, 王笑波, 王昕. 一类基于 Expert-PID 的智能阀门定位器控制方法[J]. 控制工程, 2019, 26 (1): 87-91.
- [10] 吴俊鸿, 梁青, 连彩云, 等. 基于专家 PID 的变频空调频率调节方法研究[J]. 制冷与空调, 2020, 20 (8): 12-15.

- [11] 陈文科, 刘强, 王健雄. 基于专家 PID 的挤塑机温度控制系统设计[J]. 合成树脂及塑料, 2021, 38 (4): 44-46.
- [12] 单永正, 张旭超, 姚惠元. 一种基于专家 PID 控制的冰风洞稳风速控制方法[J]. 工程技术研究, 2021, 6 (6): 56-57.
- [13] 于岩, 张哲维, 刘传峰, 等. 基于 PID 控制的液黏软启动装置系统分析[J]. 煤炭技术, 2018, 37 (11): 240-242.
- [14] 何巍, 翟守忠. 基于专家 PID 控制的隔爆试验配气系统研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38 (8): 125-128.
- [15] CHEN A H, DONG H. A pipeline on-line detection and control system based on the IoT [C] // IEEE 4th International Conference on Electronics Technology, 2021, Chengdu: ICET 2021, 5 (7): 1095-1098.
- [16] SONG W. Intelligent control and energy conservation of ball mill [C] // 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture, 2020. Shanghai: AIAM 2020, 10 (12): 163-166.
- [17] WANG C G, ZHANG Q, WANG H, et al. Expert PID control of grinding condition for cement vertical roller mill [C] // IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference, 2020. Chongqing: ITAIC 2020, 12 (11): 1880-1884.
- [18] MOHAN V, CHHABRA H S, RANI A, et al. An expert 2DOF fractional order fuzzy PID controller for nonlinear systems [J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31 (8): 4253-4270.
- [19] GAO Y, SU C, LI H G. Sequence-decision PID parameter tuning approach towards control system decoupling [J]. Huangong Xuebao/CIESC Journal, 2018, 69 (3): 1071-1080.
- [20] CARLUCHO I, DE P M, ACOSTA G. Double Q-PID algorithm for mobile robot control [J]. Expert Systems with Applications, 2019, 137 (12): 292-307.
- [21] 景希, 高国伟. 基于 PID 调节的恒温控制系统[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (4): 110-114.
- [22] 麻小娟, 陈世亮, 党建林. 基于物联网实验室环境远程监测系统的研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (11): 65-70.