铀纯化转化废液萃取-反萃取自动化控制系统的设计与优化

关宇鹏,伍宪玉,侯　录,侯　江,金洪军,赵连喜,伍玉娜

(核工业北京化工冶金研究院,北京　101149)

摘要:铀纯化转化废液的处理流程涉及中和、萃取、反萃等多单元构成的连续循环系统,其稳定性高度依赖于各环节微小流量的精确控制,但依赖经验采用试凑法整定 PID 控制器参数易引发系统超调与振荡,从而导致系统紊乱。针对上述问题,提出以关键设备“贫有机相输送泵”为控制对象建立数学模型,对经典 Ziegler-Nichols(Z-N)法、引入设定点加权的改进 Z-N 法、基于 ISTE 准则的最优设定法、临界比例带法及继电反馈自整定法等 5 种 PID 参数整定方法进行了对比研究,通过 MATLAB 与 Simulink 进行了仿真分析,并将最优方法应用于现场进行试验验证。试验结果表明:相较于传统 Z-N 法,基于 ISTE 准则的最优设定法整定的 PI 控制器表现最佳,在现场流量阶跃变化时,其关键性能指标均优于其他方法,能完全满足工艺流程的严格要求;对于铀纯化转化废液处理中的微小流量控制系统,采用该法进行 PI 参数整定,能有效抑制超调、加快响应并确保精度,显著提升整个工艺流程的稳定性和可靠性。该研究可为同类工业过程的控制器优化提供参考。

关键词:铀纯化转化废液;废液处理;微小流量;PID 参数整定方法;自动控制系统;优化;设计

中图分类号:TL212;TD868　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-2617(2026)02-0256-08

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.02.016

在铀纯化生产流程中会产生多种含铀废液,包括硝酸精馏残液、有机相碱洗液,母液蒸发工序中的脱硝尾气淋洗液、氢还原尾气鼓泡水及蒸发浓缩母液。为使这些废液中的铀含量符合相关要求,需通过中和、萃取、反萃取、碱洗及酸洗 5 个工序处理:首先,将硝酸精馏残液与有机相碱洗液进行中和,之后泵入调配槽,在此与脱硝尾气淋洗液等废液混合调配成浆料,经板框压滤后,滤液储存备用,滤饼洗涤、压榨;滤液进入除油系统以去除 DBP、MBP 等有机物;除油后水相进入萃原液接收槽;萃原液与萃取剂在多级逆流萃取槽中反应,生成的负载铀有机相经反萃取剂洗涤以提高铀纯度,洗涤水返回萃原液槽;负载有机相在加温条件下进行反萃取,铀会进入水相外送,贫有机相则进入净化环节;贫有机相依次进行碱洗和酸洗,碱洗过程用碳酸钠去除残留的铀及 DBP、MBP 等物质,碱洗液回用,酸洗过程用硝酸中和残余碱并稳定萃取酸度,酸洗液可循环使用,若不足则进行补充。上述整个处理流程是一个由多个单元且带循环的连续系统,且整个流程中涉及的流量均较微小,对其进行精确的控制是维持整个系统物料平衡的关键。

比例-积分-微分(Proportional-integral-derivative,PID) 控制技术因其结构简单、使用方便,在工业中得到广泛应用,目前约 95%的控制回路采用 PID 控制技术[1-3]。PID 控制算法是迄今为止最通用的控制策略,有许多不同的方法用于确定合适的控制器参数[4]。

传统方法试凑法,也被称为试错法,是一种直观而实用的 PID 控制器参数整定方法。该法不依赖于系统的精确数学模型,而是通过试验和调整来逐步找到合适的 PID 参数设置。但采用该法对上述连续循环系统各环节微小流量进行控制时,易引发上下游槽罐液位不稳、反应条件变化,从而造成

收稿日期:2025-12-16;**修订日期**:2026-01-08

第一作者简介:关宇鹏(1999—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为铀矿山自动化及信息化。

通信作者简介:伍宪玉(1977—),女,本科,正高级工程师,主要研究方向为矿山自动化及信息化。

系统紊乱，甚至被迫停产。为解决上述问题，提出以关键设备“贫有机相输送泵”为控制对象建立数学模型，系统性对比了经典 Ziegler-Nichols(Z-N)法、引入设定点加权的改进 Z-N 法、基于 ISTE 准则的最优设定法、临界比例带法以及继电反馈自整定法这 5 种 PID 参数整定方法的优缺点，通过 MATLAB 与 Simulink 进行仿真研究，并将最优方法应用于现场进行试验验证，以期选取合适且高效的 PID 参数整定方法，得到稳定可靠的 PID 参数，提升整个工艺流程的稳定性和可靠性。

1　PID 参数整定法的对比

PID 参数整定方法可分为时域和频域两类，Z-N 法与临界比例带法为时域类 PID 参数整定方法，改进 Z-N 法、最优设定法与继电反馈自整定法为频域类 PID 参数整定方法。

1.1　Z-N 法

Z-N 法是一种经典的 PID 控制器参数调整方法，由 John G. Ziegler 和 Nathaniel B. Nichols 在 1940 年代提出，旨在提供一种简单快捷的手段。该法采用可以反映被控对象动态特性的临界点，即通过其 Nyquist 曲线穿越负实轴的相位点的增益 K_p 和频率 ω 设计 PID 控制器参数。Z-N 法使闭环系统对阶跃负载扰动的响应以 1/4 的振荡比衰减，得到基于临界点增益和频率的简单的 PID 参数整定规则[5]。

首先通过试验获取控制对象的阶跃响应，即在系统开环、带负载并处于稳定的状态下，给系统一个阶跃信号，绘制系统的输出响应曲线，如图 1 所示。$y(t)$为系统反馈，t 为时间。

在响应曲线上，识别出曲线的斜率开始显著增加的点，并测定从阶跃发生到该点的时间 τ(延迟时间)，以及从该点到系统输出达到其最终稳态值的时间 T(时间常数)。该对象为 S 型传递函数曲线，对象传递函数可近似为[6]：

$$G(s)=\frac{K}{Ts+1}\mathrm{e}^{-\tau s} \tag{1}$$

$$K=\frac{y(\infty)-y(0)}{\gamma} \tag{2}$$

式中：K—放大系数；r—阶跃信号幅值；s—拉普拉斯变量。

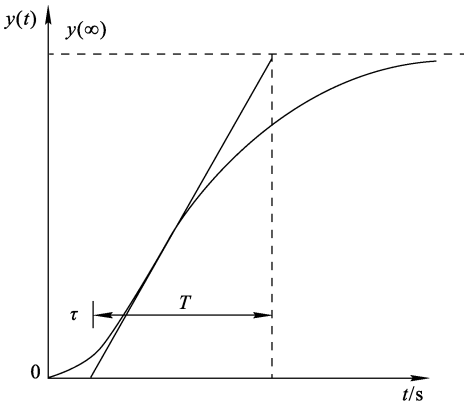


图 1　阶跃响应曲线

Fig. 1　Step response curve

首先使贫有机相输送泵稳定运行一段时间，再调整系统输入。输入一个阶跃扰动并保持不变，观察微小流量计并记录流量变化趋势，直至贫有机相输送泵的流量输出再次变为稳定状态，记录该过程中的数据变化，并绘制阶跃响应曲线。贫有机相输送泵流量随时间的变化情况见表 1。根据表 1 数据绘制贫有机相输送泵阶跃响应曲线，如图 2 所示。

表 1　贫有机相输送泵流量随时间的变化情况

Table 1　Changes of flow rate of lean organic phase transfer pump over time

t/s	流量/(L·h^{-1})	t/s	流量/(L·h^{-1})
0	0	6	377
1	42	7	402
2	97	8	403
3	168	9	401
4	262	10	405
5	324		

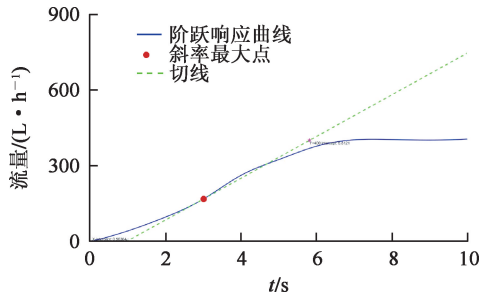


图 2　贫有机相输送泵阶跃响应曲线

Fig. 2　Step response curve of lean organic phase transfer pump

经计算可知，τ=0.96 s，T=4.85 s。得到贫有机相输送泵传递函数：

$$G(s)=\frac{1}{4.85s+1}e^{-0.96s} \tag{3}$$

基于所测定的 τ 和 T，用表 2 中的 Z-N 法公式计算 PID 参数。

表 2 Z-N 法公式

Table 2 Z-N method formula

控制器	K_p	T_i/s	T_d/s
P	$T/K\tau$		
PI	$0.9T/K\tau$	$\tau/0.3$	
PID	$1.2T/K\tau$	2.2τ	0.5τ

注：K_p—比例系数；T_i—积分时间，s；T_d—微分时间，s。

针对该微小流量调节系统快速平稳的响应需求，采用 PI 控制器更为适宜，因为其比例环节可提供足够的响应速度，而积分环节能有效消除稳态误差。相较而言，PID 控制器中的微分作用对测量噪声极为敏感，在阀门、泵等设备引起流量波动时，易放大噪声，导致控制不稳定与振荡。此外，鉴于此类流量系统通常具有较快的动态特性和较低阶次，PI 控制器的控制性能相对更佳，避免了因引入微分环节使系统造成不必要的振荡，而 PID 控制器引入微分作用提升效果不明显，且会增加调试与维护的复杂程度，单纯的 P 控制器又无法满足控制需求。故选择 PI 控制器，并根据表 2 计算得知 PI 控制器参数为：$K_p=4.55$，$T_i=3.2$ s。

1.2 改进的 Z-N 法

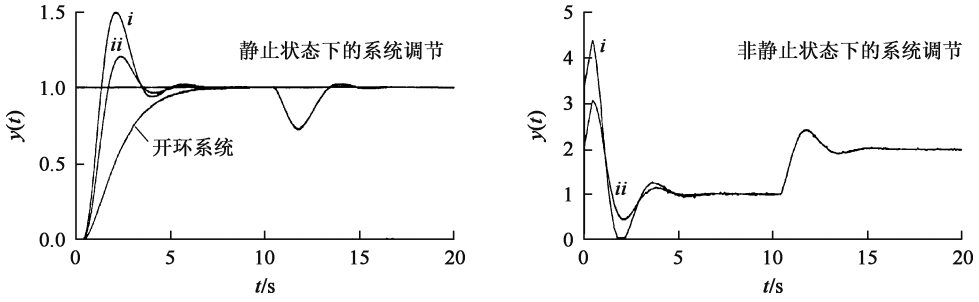
标准 Z-N 整定方法以四分之一衰减振荡作为最佳控制回路性能，会导致测量值超过其设定值并在其附近振荡几次，超调量较大。由于该项目涉及到的 PID 调节对象多数为流量调节，且流量微小，在超调量较大或者振荡剧烈的情况下，流量偏差较大，对当前及后续工序的顺利进行都会造成影响。因此，须对比例环节进行相应调节，提出如下 PID 控制器模型[7]：

$$u(t)=K_p\left[(\beta u_c-y)+\frac{1}{T_i}\int e\mathrm{d}t-T_d\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\right] \tag{4}$$

$$L=\frac{\tau}{T} \tag{5}$$

$$k=2\left[\frac{11L+13}{37L-4}\right] \tag{6}$$

式中：u_c—闭环系统的输入；β—为初始控制信号的加权系数。β 的引入提供了一种调整闭环过程传递函数中零点位置的方法，而零点位置的变化反过来又会影响超调量。一种启发式的解释是，在死区时间较小的情况下，若前向回路增益设置的较大，会导致系统过调。因此，可以通过在比例项中采用 $\beta<1$ 的设定点加权来减少初始控制信号幅度，这在功能上与前馈控制相似。设定点响应的过度超调如图 3 所示。



i—Z-N 法调参；*ii*—$\beta=0.6$ 时，Z-N 法调参[8]

图 3 设定点响应的过度超调

Fig. 3 Overshoot in response to setpoint changes

通过对其他常见过程模型的广泛模拟研究发现，使用设定点加权是设定点滤波的优越解决方案，同等情况下，相同的超调减少对响应速度的牺牲要小得多。在死区时间较小的情况下，通过应用设定点加权可克服相关的大超调，因此无需修改 Z-N 法调优公式。对于不同的 L 或 k 范围可根据式(6)、(7)求出相应的 β 值，并根据需要对传统的 Z-N 法参数做出修正。

若 $2.25<k<15$ 或 $0.16<L<0.57$，则应该保持 Z-N 法参数。为使超调量小于 10%或 20%，可引入系数 β。

20%超调量状态下：

$$\beta=\frac{15-k}{15+k} \tag{7}$$

10%超调量状态下：

$$\beta=\frac{36}{27+5k} \tag{8}$$

若 $1.5<k<2.25$ 或 $0.57<L<0.96$，则应将 Z-N 法参数修正为 $T_i=0.5\mu T_c$，其中

$$\mu=\frac{4}{9}\beta=\frac{8}{17}(\mu-1) \tag{9}$$

若 $1.2<k<1.5$ 或 $L<0.16$，为使超调量小于 10%，则应修改 PID 参数为

$$K_p=\frac{5}{6}\left(\frac{15+k}{15+14k}\right),T_i=\frac{1}{5}\left(\frac{4k}{15}+1\right) \tag{10}$$

将 $\tau=0.96$、$T=4.85$ 代入式(4)、(5)，得 $L=0.198$，$k=9.126$，可知应保持 Z-N 法参数，计算得 $\beta=0.496$。

使用 Simulink 进行仿真试验，拆分 PID 控制器，模拟 PID 控制器模型中的 βu_c-y 部分。

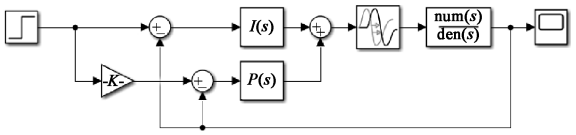


图 4　改进 Z-N 法的 Simulink 仿真

Fig. 4　Simulink simulation of modified Z-N method

1.3　最优设定法

1942 年，Zhuang 与 Atherton 提出不同准则下的 PID 控制器最优整定的算法[8]，该算法考虑的最优准则的一般形式为

$$J_n(\theta)=\int_0^\infty[t^n e(\theta,t)]^2\mathrm{d}t \tag{11}$$

$e(t)$为进入 PID 控制器的误差信号，该算法重点讨论了 2 种输入下的 PID 控制器的自整定算法，即根据设定点信号的最优自整定算法和基于扰动信号 d(t)的自整定算法，对式(11)中给出的最优指标重点考察 3 种情况：当 $n=0$ 时，记为 ISE(误差积分准则)准则，该准则是用系统期望输出与实际输出或主反馈信号之间的偏差的某个函数的积分式表示的一种性能指标，是衡量控制系统性能优良度的重要指标之一；当$n=1$时，记为 ISTE 准则；当 $n=2$ 时，记为 IST²E 准则。PID 最优控制器参数的经验公式为

$$K_p=\frac{a_1}{k}\left(\frac{\tau}{T}\right)^{b_1},T_i=\frac{T}{a_2+b_2\left(\frac{\tau}{T}\right)},$$

$$T_d=a_3T\left(\frac{\tau}{T}\right)^{b_3} \tag{12}$$

对不同的 L 范围可以得出(a,b)参数，结果见表 3。

表 3　设定点 PID 控制器参数

Table 3　PID controller parameters for setpoint response

参数	L 范围					
	0.1～1			1.1～2		
	ISE	ISTE	IST²E	ISE	ISTE	IST²E
a_1	1.048	1.042	0.968	1.154	1.142	1.061
a_2	−0.897	−0.897	−0.904	−0.567	−0.579	−0.583
b_1	1.195	0.987	0.977	1.047	0.919	0.862
b_2	−0.368	−0.238	−0.253	−0.220	−0.172	−0.165
c_1	0.489	0.385	0.316	0.490	0.384	0.315
c_2	0.888	0.906	0.892	0.708	0.839	0.832

取 $n=1$ 时，$L=0.198$，故根据 ISTE 准则下的 PID 参数仿真结果，可绘制出该条件下的贫有机相输送泵响应曲线(图 5)。

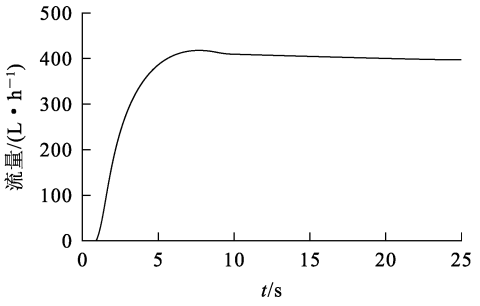


图 5　最优设定法整定下的贫有机相输送泵仿真响应曲线

Fig. 5　Simulated response curve of lean organic phase transfer pump under optimal tuning method

1.4　临界比例带法

临界比例带法分为开环调整方法和闭环调整方法。开环调整法是在系统的开环状态下进行，没有反馈路径参与，是基于系统对于阶跃输入信号的响应；闭环调整法要求系统处于闭环状态，通过选取使系统输出持续振荡的比例增益 K_p来确定 PID 参数。

本研究选取闭环调整法。首先将 PID 控制器配置为纯比例控制模式，即只有比例项有效，积

分和微分项被禁用或设置为零。逐渐增加 K_p，直至系统的输出发生持续振荡，不增大也不减小，此时的 K_p 称为临界增益 K_u，相应的振荡周期为临界周期 T_u。

在 Simulink 模型中，将 PID 控制器积分和微分项设置为零，不断调整 K_p，直至达到持续振荡的要求（图 6）。此时 $K_u=8.58$，$T_u=3.65$ s。

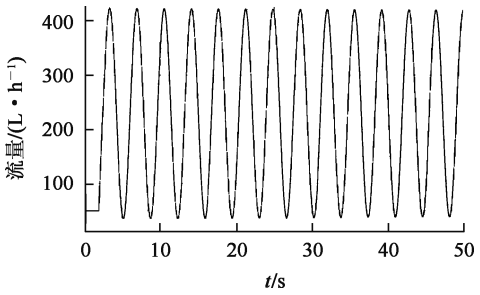


图 6 系统输出持续振荡

Fig. 6 Sustained oscillations in system output

根据测定的 K_u、T_u，以及根据表 4 中公式计算得到了一组 PI 控制器参数：$K_p=3.9$，$T_i=3.04$ s。

表 4 临界比例带法 Z-N 参数整定

Table 4 Z-N parametes tuning viacritical proportional band method

控制器	K_p	T_i/s	T_d/s
P	$K_u/2$		
PI	$K_u/2.2$	$T_u/1.2$	
PID	$K_u/1.7$	$T_u/2$	$T_u/8$

1.5 继电反馈自整定法

继电反馈整定法是在被控系统中设置两种状态：测试状态和控制状态。测试状态的作用是进行系统临界信息获取，通过继电器发出继电激励信号，从而由系统的响应曲线计算出该系统的振荡频率和振荡幅值，然后由获得的临界信息并根据确定的整定公式整定 PID 参数；控制状态是采用整定的 PID 参数来控制系统。如果系统的测试条件发生变化，则须重新回到测试状态，测试完成后再回到控制状态[9]。在测试状态下，由系统的特征参数，首先可得出 PID 控制器的参数，然后使用此 PID 控制器对系统进行调节。在控制状态下，将系统的操作转换为开关方式，即输入值在最大值和最小值之间周期性的转换：当测量值小于设定值时，将控制器的输出值设为最大；而当测量值大于设定值后，将输出值设为最小。这样被控系统就会产生振动，经过至少 3 次过零检测就会得到一个周期的振荡波型，从这个振荡波形中可提取到系统的特征参数，从而获得适宜的 PID 参数[10]。PID 参数继电反馈自整定结构如图 7 所示。

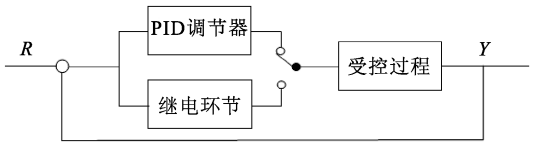


图 7 PID 参数继电反馈自整定结构

Fig. 7 Structure of relay feedback auto-tuning for PID parameters

振荡波形的特性由被控对象的特性决定，因此在整定模式下可将整个控制系统的框图等效如下，其中，S_v 为设定值，P_v 为实际值，e 为误差，d 为控制信号。

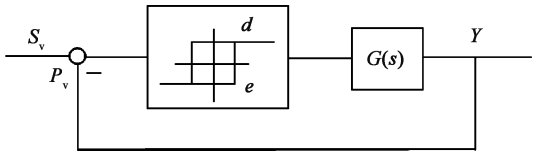


图 8 控制系统等效框图

Fig. 8 Equivalent block diagram of control system

根据实际值与设定值的对比关系给出最大或最小输出值时，基于被控对象的特性会产生一定频率和幅值的振荡波，从而能确定系统的振荡频率 ω_c 与临界增益 K_u。对比常用的确定系统的 ω_c 与 K_u 的方法是描述函数法，该法是根据非线性环节输入信号与输出信号之间基波分量关系进行近似 ω_c 与 K_u 的一种有效方法。

非线性特征的描述函数 $N(A)$ 是当输入值为正弦信号 $A\sin\omega_t$ 时，输出基波分量 $Y\sin(\omega_t+\varphi)$ 对输入正弦量的复数比，即：

$$N(A)=\frac{Y}{A\angle\varphi}=\frac{\sqrt{A_1^2+B_1^2}}{A\angle\arctg}\left(\frac{A_1}{B_1}\right) \quad (13)$$

式中：A_1、B_1—输出 Y 的傅立叶级数的一次项系数；ω_t—正弦信号的相位角；φ—输出基波分量相对于输入正弦信号的相位差。

实际的带有回环的节点非线性环节特性的描述函数可表示为：

$$N(A)=\frac{4h}{\pi A^2}\times\left(\sqrt{A^2-\varepsilon^2}-j\varepsilon\right) \quad (14)$$

式中：A—正弦波幅值；h—回环幅值；ε—回环宽度的二分之一；j—虚数单位；$j^2=-1$。构建继电环节时可认为它是一个理想的继电环节，不带有回环[11]，即 $\varepsilon=0$。将其代入式(14)得

$$N(A)=\frac{4h}{\pi A} \tag{15}$$

上文设被控对象的传递函数为：

$$G(s)=\frac{K}{Ts+1}e^{-\tau s} \tag{16}$$

根据上述继电回路结构框图，在这个简单的反馈系统中，闭环特征方程发生振荡的条件可写为：

$$1+N(A)G(s)=0(s=j\omega_c) \tag{17}$$

即

$$G(j\omega_c)=-\frac{1}{N(A)} \tag{18}$$

则可得出 K_u的计算公式为：

$$K_u=\frac{1}{|G(j\omega_c)|}=N(A)=\frac{4h}{\pi A} \tag{19}$$

系统的振荡周期 T_c可通过测量输出曲线相邻峰值的时间间隔得到，从而得到振荡频率 ω_c所对应的临界增益和临界振荡周期。

在现场实际应用中，由于继电器的输出信号一般是作为执行机构的输入信号，且执行机构无法接受负值输入，因此其输入信号只能限定在 0～100% 的范围内。当测量值小于设定值时，调节器输出 100%的信号，反之输出 0，这种控制方式会使系统产生极限环振荡。将该控制方式应用到贫有机相输送泵时，流量设定值为400 L/h，当实际流量测量值小于设定值时，调节器输出 100%信号；当实际流量测量值大于设定值时，调节器输出 0%信号。

上述整定法是基于理想继电特性和标准 Z-N 整定表，因此可能会产生大的超调，尤其在设定值改变的情况下更明显。由于实际应用工艺要求设定值频繁改变，为使系统调节过程产生少许超调或不产生超调，通常需采用保守整定规则。不同情况下的 Z-N 设定参数见表 5。

表 5　不同情况下的 Z-N 设定参数

Table 5　Z-N tuning parameters for different cases

控制器	K_p	T_i/s	T_d/s
适度超调 PID	$K_c/3$	$T_u/3$	$T_u/8$
无超调 PID	$K_c/5$	$T_u/2$	$T_u/8$

此外，对于 PI 控制器，有基于积分加时延系统整定规则 Tyreus-Luyben PI 和多变量系统的修正规则 Shen-Yu PI(表 6)。

表 6　2 种 PID 整定规则

Table 6　Two PID tuning methodologies

控制器	K_p	T_i/s
时变系统 Tyreus-Luyben PI	$K_c/3.22$	$2.2T_u$
多变量系统 Shen-Yu PI	$K_c/3$	$2T_u$

设定流量为 100 L/h。当流量小于 100 L/h 时，将调节器输出值最大化；当流量大于 100 L/h 时，将调节器输出值最小化。使用 Simulink 工具逐步对此过程进行模拟仿真，结果如图 9 所示。

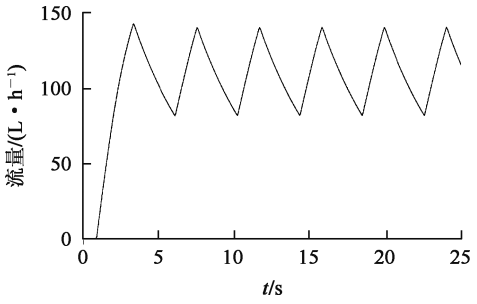


图 9　控制系统的振荡仿真

Fig. 9　Simulating oscillations in control systems

由图 9 可测得 $T_u=4.0$ s，由波峰近似计算出振幅，在根据振幅计算得 $K_c=6.40$。根据表 5 计算得 $K_p=1.99$，$T_i=8.8$ s。

2　PID 参数调节方法结果分析

通过上述算法原理，对 Z-N 法、改进 Z-N 法、最优设定法、临界比例带法及继电反馈自整定法进行仿真研究，并将 5 种 PID 参数整定方法整定后的阶跃曲线在同一个示波器中同时显示进行对比。结果如图 10 所示。

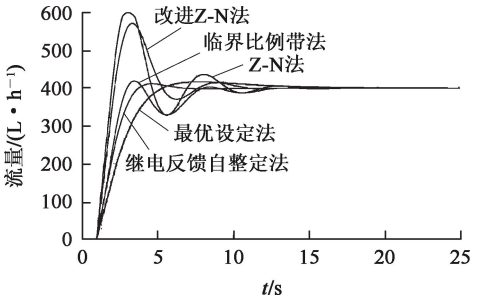


图 10　5 种 PID 参数整定方法整定后阶跃曲线对比

Fig. 10　Comparison of step response curves after tuning of five PID tuning strategies

由图 10 看出：最优设定法和继电反馈自整定法的仿真结果相较于其他 3 种 PID 参数整定方法性能指标更好，超调量更小，且系统响应迅速，符合铀纯化转化废液萃取反萃生产线的要求；但继电反馈自整定方相较于最优设定法整定过程更为复杂，故选取最优设定法。将最优设定法整定的 PID 参数应用于项目现场进行验证试验，即将该方法应用于现场流量 PID 控制，经 MODBUS 输出频率给变频器调节频率实现流量调节，记录贫有机相输送泵出口微小流量计的流量趋势变化。现场运行曲线如图 11 所示。经分析可知：在最优设定法整定下的参数对贫有机相流量的调节效果良好，在初始流量为 150 L/h 条件下，在上位界面调节流量至 200 L/h时，响应时间迅速，且超调量为9.3%，调节时间为 9.4 s，稳态误差≤0.5%，符合工艺流量要求及误差要求。

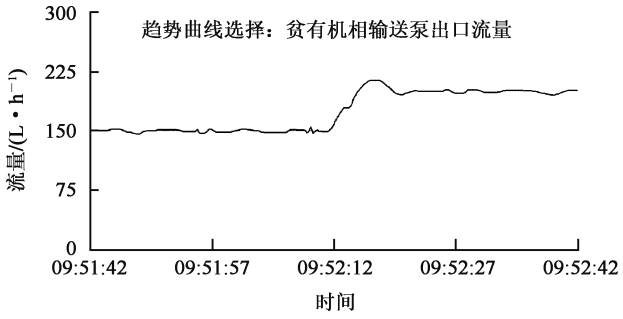


图 11 现场运行曲线

Fig. 11 Field operation curve

3 结论

针对铀纯化转化废液处理工艺中微小流量控制的严苛稳定性需求，系统对比了 5 种典型 PID 参数整定策略在贫有机相输送泵控制中的性能表现。通过 MATLAB/Simulink 仿真与现场运行数据验证发现，基于 ISTE 准则的最优设定法在动态响应与稳态精度方面表现最优，其整定的 PI 控制器可实现9.4s内快速调节，超调量控制在9.3%以内，稳态误差低于 0.5%，显著优于其他方法。该策略能有效满足工艺流程对流量控制精确性、快速性及抗干扰性的综合要求。

参考文献：

[1] GUO L. Feedback and uncertainty：some basic problems and results[J]. Annual Reviews in Control，2020，49：27-36.

[2] SAMAD T. A survey on industry impact and challenges thereof technical activities[J]. IEEE Control Systems Magazine，2017，37(1)：17-18.

[3] BORASE R P，MAGHADE D K，SONDKAR S Y，et al. A review of PID control，tuning methods and applications[J]. International Journal of Dynamics and Control，2021，9(2)：818-827.

[4] 王伟，张晶涛，柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报，2000，26(3)：347-353.
WANG Wei，ZHANG Jingtao，CHAI Tianyou. A survey of advanced PID parameter tuning methods[J]. Acta Automatica Sinica，2000，26(3)：347-353.

[5] ZIEGLER J B，NICHOLS N B. Optimum settings for automatic controllers[J]. Asme Frans，1993，64：759-768.

[6] 刘宁，柴天佑. PID 控制器参数的优化整定方法[J]. 自动化学报，2023，49(11)：2272-2285.
LIU Ning，CHAI Tianyou. An optimal tuning method of PID controller parameters[J]. Acta Automatica Sinica，2023，49(11)：2272-2285.

[7] ÅSTRÖM K J，HÄGGLUND T. Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula[J]. IEE Proceedings：D，1991，138(2)：111-118.

[8] ZHUANG M，ATHERTON D P. Automatic tuning of optimum PID controllers[J]. Control Theory & Applications Iee Proceedings：D，1993，140(3)：216-224.

[9] 侯洪，韩震宇. 基于继电反馈的 PID 参数自整定[J]. 机电工程技术，2014，43(7)：63-65.
HOU Hong，HAN Zhenyu. The PID parameters self-turning based on relay feedback[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology，2014，43(7)：63-65.

[10] 庄轶群. 基于继电反馈的 PID 自整定软件包开发及相关算法研究[D]. 沈阳：东北大学，2024.

[11] 陈福祥，杨芝雄. PID 调节器自整定的 PM 法及其公式推导[J]. 自动化学报，1993，19(6)：736-740.
CHEN Fuxiang，YANG Zhixiong. Self-tuning pm method and its formulas dedu-ction in PID regulators[J]. Acta Automatica Sinica，1993，19(6)：736-740.

Design and Optimization of an Automated Control System for Extraction-Stripping in Uranium Purification and Conversion Waste Liquid

GUAN Yupeng, WU Xianyu, HOU Lu, HOU Jiang, JIN Hongjun, ZHAO Lianxi, WU Yuna

(*Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing* 101149, *China*)

Abstract: The treatment process of uranium purification and conversion waste liquid involves a continuous circulation system composed of neutralization, extraction, stripping and other units. Its stability is highly dependent on the precise control of small flow in each link, and it is easy to cause system overshoot and oscillation when the parameters of PID controller are adjusted by trial and error method based on experience, which leads to system disorder. In view of the above problems, it is proposed to establish a mathematical model with the key equipment ′lean organic phase pump′ as the control object. Five kinds of PID parameter tuning methods, such as classical Ziegler-Nichols (Z-N) method, improved Z-N method with set point weighting, optimal setting method based on ISTE criterion, critical proportional zone method and relay feedback self-tuning method, are compared and studied. The simulation analysis is carried out by MATLAB and Simulink, and the optimal method is applied to the field for experimental verification. The test results show that compared with the traditional Z-N method, the PI controller based on the optimal setting method based on the ISTE criterion performs best. When the field flow step changes, its key performance indicators are better than other methods, which can fully meet the strict requirements of the process flow. For the small flow control system in the treatment of uranium purification and conversion waste liquid, this method is used to adjust the PI parameters, which can effectively suppress overshoot, speed up response and ensure accuracy, and significantly improve the stability and reliability of the whole process. This study can provide a reference for the controller optimization of similar industrial processes.

Key words: uranium purification and conversion waste liquid; waste liquid treatment; small flow; PID parameter tuning method; automatic control system; optimization; design