



面向工业过程的鲁棒 PID 控制器设计¹⁾

岳 红 高东杰 刘 圣

(中国科学院自动化研究所 北京 100080)

摘 要 将内模控制原理和极小极大优化原则相结合,提出了一种新的鲁棒 PID 控制器设计方法.优化设计过程分步进行,综合采用多参数随机优化和解析优化方法.设计结果具有算法稳定、鲁棒性强、一致性好等特点,适合于工况变化频繁的工业过程回路控制.

关键词 极小极大原则,内模控制,PID 控制,分步优化,鲁棒性.

ROBUST TUNING OF PID CONTROLLERS FOR INDUSTRIAL PROCESSES

YUE Hong GAO Dongjie LIU Sheng

(ERC of Integrated Automation, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract A novel method for robust PID controller design is proposed based on the internal model control theory and min-max optimization rule. The optimization design includes two steps and features a combination of multi-parameter stochastic search and analytical optimization. The method can provide good stability, robustness and consistent control performance over dynamic ranges, which are very important for industrial applications.

Key words Min-max rule, IMC, PID control, multi-step optimization, robustness

1 引言

将鲁棒控制思想引入 PID 控制,旨在提高 PID 控制器适应生产过程不确定性变化的能力. PID 控制本身就具有一定的鲁棒性,但在用于实际过程控制时还存在一些问题,主要有两点:一是控制器适应系统不确定性的能力不够强,难以适应较大范围的不确定性;二是在不确定性范围内,系统性能没有得到综合考虑,一致性差.如果在设计控制器时能有效地利用关于过程变化的信息,考虑主要的不确定性因素,便可以提高 PID 控制的鲁棒性,克服现有的缺陷.

1) 国家“九五”科技攻关项目资助课题.

鲁棒 PID 控制在现有 PLC,DCS 系统和新型现场总线控制系统中都能方便地实施,不需要增加硬件设备投资,就可得到良好的控制效果,具有较高的推广价值.

2 内模 PID 设计

2.1 内模控制(IMC)设计

在内模控制框架下进行 PID 控制器设计^[1-4],一方面可以得到明确的解析结果,降低了参数设计的复杂性和随机性;另一方面能够方便地考虑系统的鲁棒性要求.

内模控制设计分两步进行. 第一步是对标称性能的设计,在暂时不考虑系统不确定性的情况下,对标称控制器 \tilde{q} 进行 H_2 最优设计,使标称系统具有良好的动态性能. 标称设计根据定理1进行.

定理1^[1]. 设过程 \tilde{p} 是稳定的,将其分解为全通部分 \tilde{p}_A 和最小相位部分 \tilde{p}_M ,即

$$\tilde{p} = \tilde{p}_A \tilde{p}_M, \quad (1)$$

\tilde{p}_A 中包含了所有的右半平面零点和纯滞后,且有

$$|\tilde{p}_A(i\omega)| = 1, \quad \forall \omega. \quad (2)$$

通常, \tilde{p}_A 可写成下面的形式

$$\tilde{p}_A(s) = e^{-s\theta} \prod_i \frac{-s + \zeta_i}{s + \zeta_i^H}, \quad \text{Re}(\zeta_i), \theta > 0, \quad (3)$$

其中上标 H 表示复共轭. 对系统输入 v 也可以进行同样的分解

$$v = v_A v_M. \quad (4)$$

满足 H_2 最优的控制器 \tilde{q} 由下式给出

$$\tilde{q} = (\tilde{p}_M v_M)^{-1} \{ \tilde{p}_A^{-1} v_M \}_*, \quad (5)$$

其中运算符 $\{\cdot\}_*$ 表示在部分分式展开之后,将所有包含 \tilde{p}_A^{-1} 极点的项省去.

第二步是通过对标称控制器 \tilde{q} 引入 IMC 滤波器 f ,实现对系统鲁棒稳定性和鲁棒性能的设计,最终得到 IMC 控制器 $q = \tilde{q}f$.

2.2 IMC-PID 设计

根据内模控制系统与常规反馈控制系统间存在的对应关系,必要时进行降阶简化处理,便可完成 IMC-PID 设计. 在鲁棒 PID 控制器设计中,控制器结构选用常规 PID 控制器加上一阶后置滤波器的形式,这主要是为了增强系统的鲁棒性^[5]. 本文对几种过程控制中常见的对象模型进行 IMC-PID 设计,结论列于表1中. 表中系统输入形式为阶跃函数,纯滞后项采用一阶 pade 近似处理.

IMC-PID 参数整定的缺点是,在设计中没有考虑不确定性范围的大小,鲁棒性的程度很难掌握,对 λ 的调整需要通过反复试凑才能完成. 如果只根据经验进行设计,当不确定性范围较大时,无法保证系统的全局稳定性. 针对这一不足,本文将极小极大原理与内模控制原理相结合,提出了新的设计方法.

表1 IMC-PID 整定结果

过程模型	K_c	T_i	T_d	T_f
$\frac{K}{Ts+1}e^{-\theta s}$	$\frac{2T+\theta}{2K(\lambda+\theta)}$	$T+\frac{\theta}{2}$	$\frac{T\theta}{2T+\theta}$	$\frac{\theta\lambda}{2(\lambda+\theta)}$
$\frac{K}{as^2+bs+1}e^{-\theta s}$	$\frac{b+\frac{\theta}{2}}{K(\lambda+\theta)}$	$b+\frac{\theta}{2}$	$\frac{a+\frac{\theta}{2}b}{b+\frac{\theta}{2}}$	$\frac{\theta\lambda}{2(\lambda+\theta)}$
$\frac{K(-T_a s+1)}{as^2+bs+1}$	$\frac{b}{K(\lambda+2T_a)}$	b	$\frac{a}{b}$	$\frac{T_a\lambda}{\lambda+2T_a}$
$\frac{K(T_a s+1)}{as^2+bs+1}$	$\frac{b}{K\lambda}$	b	$\frac{a}{b}$	T_a
$\frac{K}{s}e^{-\theta s}$	$\frac{1}{K(\lambda+\theta)}$	∞	$\frac{\theta}{2}$	$\frac{\theta\lambda}{2(\lambda+\theta)}$

3 鲁棒 PID 控制器设计

3.1 优化问题描述

鲁棒 PID 控制器的参数整定是通过优化设计来完成的,优化性能指标选择平方误差积分指标(ISE),这与内模控制中的 H_2 最优指标是一致的.除此之外,根据工业过程回路控制中对响应速度的要求,还希望系统的闭环响应时间与开环响应时间之比(称为性能比)达到设计规定.在控制器设计中引入性能比要求,有助于折衷考虑鲁棒稳定性和鲁棒性能,但也增加了寻优过程的约束条件.本文利用内模控制的特点,将性能比约束条件与内模控制滤波环节相联系,从而把有约束的优化问题转化为无约束的优化问题,降低了求解的复杂性.

优化设计采用极小极大准则,使系统在最坏条件下的性能指标达到最好.最坏点选择模型不确定性范围内系统稳定性最差的点.极小极大设计不仅使最坏条件下的性能指标最优,同时能够获得在一定不确定性范围内的系统一致性,提高系统在整个参数摄动范围的总体性能.

3.2 控制器参数整定算法

通常可以用数值方法进行 ISE 优化,但由于本文不以最坏点 ISE 最小作为唯一条件,还需要考虑性能比约束,只采用数值方法是不够的.按照 IMC 设计原则, H_2 指标最优时,后置滤波器的时间常数接近于 0,滤波器不起作用,这显然与鲁棒设计的要求不相符.同时,作为面向工业应用的参数整定软件,其算法的稳定性和可靠性都是非常重要的,而数值寻优方法一般对初值比较敏感,也是必须解决的问题.

基于以上考虑,本文将数值寻优与内模控制中的解析优化设计相结合,提出如下的控制器参数优化算法:

1) 首先,根据内模控制原理对标称系统进行控制器设计,包括 IMC 标称设计和鲁棒设计,此时没有定量地引入不确定性因素,但已初步考虑了系统的鲁棒性;如果系统对鲁棒性的要求不是很高,也可以直接作为 PID 设计结果使用;

2) 然后,根据模型参数的不确定范围判断系统的最坏点,并按照极小极大原则对后置滤波器参数进行设计;由于内模控制设计中的滤波环节时间常数与系统闭环响应时间有着对应关系,这步设计同时还可以满足性能比的要求.

3) 最后,按照极小极大原则对控制器的 PID 参数进行优化整定,此时的寻优问题是一个无约束的优化问题,在保证滤波器时间常数不变的情况下,只需要对 PID 的参数进行寻优,计算复杂性得到简化,寻优初值采用1)中的 IMC 设计结果,减少了优化结果的随机性.寻优采用单纯形法.

本算法采用分步优化设计的思路:总体上分为两个大的步骤——IMC 初始化设计和极小极大优化设计.第一步,IMC 初始化设计在标称点进行,包括了 IMC 设计中的标称设计和鲁棒设计两部分;第二步,极小极大优化设计也分为两部分,分别是后置滤波器的 IMC 解析优化设计和 PID 控制器的数值寻优设计.这一新的方法以简捷、可靠的方式解决了鲁棒 PID 优化设计问题.

4 仿真结果

将本文方法与常规 IMC-PID 法和 Honeywell 公司推出的设计方法(H-RPID)(这两种方法也是较有代表性的工业过程鲁棒 PID 设计方法)进行比较,对二阶加纯滞后对象 $G(s) = \frac{1.5}{21s^2 + 10s + 1} e^{-4s}$ 做阶跃响应仿真,测试点都选最坏点,设计性能比为1.0.

仿真图形见图1和图2,其中图(a)~(c)中曲线1对应标称系统,曲线3对应设计不确定

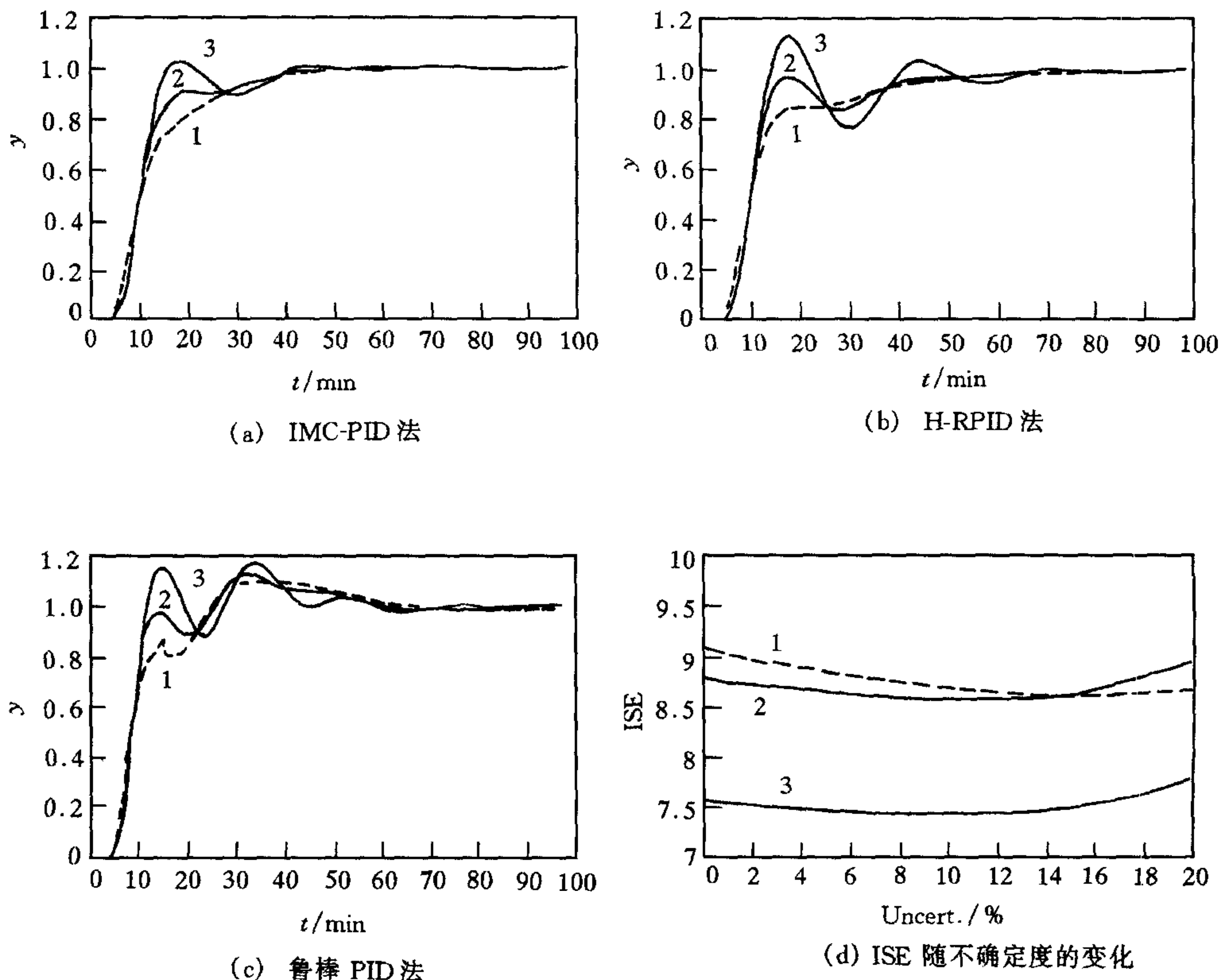


图1 不确定度20%下的方法比较

度,曲线2介于二者之间,对应设计不确定度的50%;图(d)表示系统性能指标 ISE 随不确定度的变化,曲线1表示 IMC-PID 法,曲线2表示 H-RPID 法,曲线3表示本文的鲁棒 PID

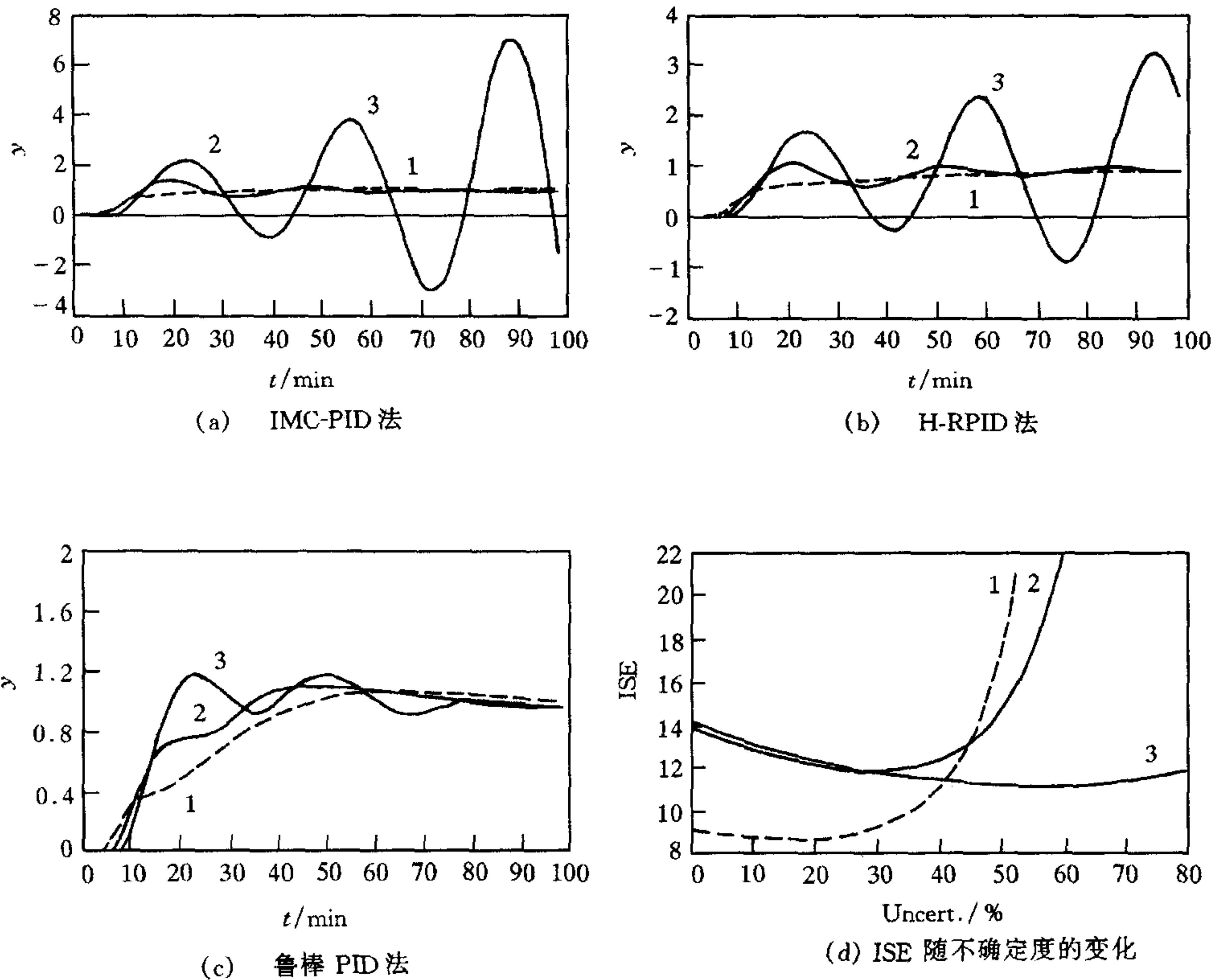


图2 不确定度80%下的方法比较

法. 模型参数变化范围如下: 下限值 = 标称值 / (1 + 不确定度%), 上限值 = 标称值 × (1 + 不确定度%).

仿真结果表明, 本文方法能适应较大范围的不确定性, 鲁棒性、一致性都很好, 特别是在大不确定度下其优点尤为突出.

5 小结

本文面向实际工业过程单回路 PID 控制问题, 提出了一种新的参数整定方法, 该方法具有以下特点:

- 1) 将极小极大优化原理与内模控制技术相结合, 在设计过程中直接引入不确定性范围信息, 确保了系统的闭环稳定性, 并折衷地考虑了系统的鲁棒稳定性与鲁棒性能;
- 2) 将数值优化和解析优化相结合, 有效地降低了优化设计的复杂性和随机性;
- 3) 能够适应较大范围的参数摄动, 在不确定性范围内保持系统性能的一致性;
- 4) 寻优过程分步进行, 算法简单、稳定、可靠, 能满足工业过程应用要求.

参 考 文 献

- 1 Morari M. Robust Process Control. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1989
- 2 Brambilla A, Chen S, Scali C. Robust tuning of conventional controllers. *Hydrocarbon Processing*, 1990, 69(11):

53—58

- 3 Chien I L, Fruehauf P S. Consider IMC tuning to improve controller performance. *Chem, Eng, Progress*, 1990, **86** (10):33—41
- 4 Rivera D E, Morari M, Skogestad M. Internal model control IV-PID controller design. *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, 1986, **25**(1):252—265
- 5 刘圣. 鲁棒 PID 控制器的研究与应用[硕士学位论文]. 北京:中国科学院自动化研究所, 1997

岳 红 1968年生, 1996年在华东理工大学自动化所获工学博士学位, 现在中国科学院自动化所工作. 主要研究方向为过程建模、控制及优化、现场总线控制等.

高东杰 1943年生, 中国科学院自动化所研究员, 博士生导师. 主要研究方向为工业自动化、系统辨识和先进控制等.

刘 圣 1971年生, 1997年在中国科学院自动化研究所获工学硕士学位. 主要研究方向为工业自动化和机电一体化. 现在美国攻读博士学位.

论文清稿规格及要求

1. **直接制版** 论文须为可供直接照相制版的清稿(此稿不退). 为此, 清稿必须用激光打印机在 A4 白纸上单面打印, 清稿的打印区尺寸统一规定: 长为210毫米, 宽为145毫米. 打印区外不能印任何字迹或图纸.

2. **题目** 题目一律居中用4号黑体字, 其余均用5号字.

3. **作者姓名和单位** 文题下空两行印作者姓名, 其下(不空行)印作者单位名.

4. **摘要** 作者单位名下空两行印摘要. 格式: 先印“摘要”二字, 后空二字开始印摘要的内容. 建议勿超过10行.

5. **正文** 由于论文数量较多, 建议每篇论文篇幅勿超过8页.

6. **节和节标题** 正文可以分为若干节, 每节有一个节标题. 节可编号可不编号. 节标题从打印区边线缩进15毫米(不要居中).

7. **参考文献** 参考文献列于正文之后, 内容依次为: 编号、作者、题目、出版单位(或期刊, 或会议), 年份.

8. **图和图题** 若图不能直接在文中排版, 可以贴在正文中, 也可附在全稿最后(参考文献和附录之后). 图号打印在图下方, 与文呼应. 图题可有可无.

9. **页码** 在清稿每页打印区以外的右上角用铅笔写上页码.