

化工多变量时滞过程的 频域解耦控制设计的研究进展¹⁾

刘 涛 张卫东 顾诞英 蔡云泽

(上海交通大学自动化系 上海 200030)
(E-mail: liurouter@ieee.org)

摘 要 化工多变量时滞过程的频域解耦控制设计方法在工程实践中被广泛采用, 是过程控制领域中的一个重要研究方向. 本文根据近些年来这一研究方向上的主要研究成果, 简要地概述了具有主导影响的几种频域解耦控制结构及其整定方法的研究进展, 分析和讨论了它们各自的主要优缺点, 然后指出了一些当前化工实践中具有迫切要求的相关研究课题.

关键词 多变量过程, 时滞, 解耦, 控制器矩阵, 多回路控制, 鲁棒稳定性
中图分类号 TP273

Research Progress of Frequency Domain Decoupling Control Design for Chemical and Industrial Multivariable Processes with Time Delays

LIU Tao ZHANG Wei-Dong GU Dan-Ying CAI Yun-Ze

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)
(E-mail: liurouter@ieee.org)

Abstract Frequency domain decoupling control design methods have been widely adopted for chemical and industrial multivariable processes with time delays in engineering practice, and they belong to an important research branch in the process control field. In this paper, the research progress of several decoupling control structures and their tuning methods with dominant influence in the frequency domain are briefly generalized according to the main research achievements in recent years, and their primary virtues and deficiencies are also analyzed and discussed. Then some closely related research topics required in the current chemical and industrial practice are pointed out.

Key words Multivariable process, time delay, decoupling, controller matrix, multiloop control, robust stability

1 引言

化工生产中普遍存在具有传输时滞的多输入多输出过程, 而且随着各种各样的先进生产工艺的快速发展, 越来越多的生产过程被构造为高维多变量控制系统, 从而实现高效率

1) 国家自然科学基金 (60474031), 高校博士点基金 (20030248040) 和上海市科技启明星项目 (04QMH1405) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of P.R. China (60474031), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20030248040), and Science and Technology Rising-Star Program of Shanghai (04QMH1405)

收稿日期 2005-4-25 收修改稿日期 2005-10-9

Received April 25, 2005; in revised form October 9, 2005

地生产高质量的产品. 然而由于多变量过程的各输出通道之间存在交联耦合作用, 使得大多数已发展的单变量控制方法很难用于多变量过程^[1], 并且由于各路过程输出存在传输时滞, 使得已较成熟发展的线性多变量控制理论和设计方法^[2~10] 难以用于实际的化工多变量生产过程. 因此, 近些年来, 过程控制领域中的许多学者和工程专家对于这个具有挑战性的控制难题进行了大量和深入的研究和探讨, 以期满足当前化工生产实践中对于有效和简便地调节和控制多变量生产过程的迫切要求, 尤其是对于解耦调节这一基本控制要求. 基于频域传递函数矩阵模型设计多变量过程的控制和解耦调节方法是过程控制领域中被广泛采用的重要研究手段和途径, 相应的系统辨识理论和方法已经有了比较成熟和系统化的发展^[11~14], 笔者根据这一研究方向上近年来出版和发表的主要研究成果, 对多变量时滞过程解耦控制的研究进展做一个简要综述, 希望能够促进这方面研究工作的深入发展和工程实践.

2 基于单位反馈控制结构的解耦控制方法

由于经典的单位反馈控制结构具有形式简单、物理直观和易于操作等优点, 在工程实践中得到了最为广泛的应用, 因而目前许多解耦控制研究基于这一控制结构. 早期的解耦控制思想可以追溯到著名学者钱学森等人提出的不相干控制论^[15], 即对角化闭环控制系统的传递函数矩阵, 由此衍生和发展了静态解耦器、动态解耦器、顺序解耦以及解耦控制器矩阵的设计方法, 下面分别对它们进行介绍和评析.

2.1 静态解耦器

化工多变量生产过程通常是在实际运行工作点附近进行稳态调节和实施抗负载干扰控制, 为了便于描述被控过程特征以及设计控制器, 通常采用有理线性化附加时滞环节的建模方法来构造被控过程的传递函数矩阵

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1} & \cdots & g_{mm} \end{bmatrix}$$

其中 $g_{ij}(s) = g_{0ij}(s)e^{-\theta_{ij}s}$; $i, j = 1, 2, \dots, m$, $g_{0ij}(s)$ 是稳定正则的有理传递函数, θ_{ij} 表示纯滞后时间. 需要说明, 过程传函矩阵 G 必须稳态非奇异, 即 $\det[G(0)] \neq 0$, 才可能实现解耦控制^[1], 这可以由闭环解耦控制系统所对应的对角化传函矩阵行列式的稳态终值不能为零的要求, 来得到直观的理解. 为了便于实际操作和控制, 通常是基于被控多变量过程的各路输入—输出之间的配对关系来建立传函矩阵 G . 因此, 如果 G 非对角占优, 则表明各路输入—输出之间具有比较明显的耦合作用, 这可以通过合理地选取输入和输出变量之间的配对来减小耦合作用, 如采用由 Bristol^[16] 和 Shinskey^[17] 等人发展起来的相对增益法以及由其演化和发展关联分析法^[18~21], 当这样仍然不能保证 G 对角占优时, 实际中较多采用的一个方法就是在被控过程的输入端设置静态解耦器, 它的形式取为被控过程的稳态增益传递矩阵的逆阵, 即 $G^{-1}(0)$, 从而可以确保开环系统输出响应的稳态无偏差. 为了消除和抑制负载干扰信号对系统输出所产生的不利影响, 该方法需要结合多回路控制 (亦称多环控制) 方式来构造闭环控制系统, 然后应用已发展的多回路控制器设计方法来整定控制系统, 近期文献 [22~25] 给出了改善的静态解耦控制设计方法, [26] 分析了采用这种控制结构可以达到的闭环控制性能. 需要说明, 虽然近期发展的多回路控制方法^[27~36] 能够显著地改进闭环控制系统的调节性能, 但是相对于采用前置解耦器或解耦控制器矩阵的控制方法, 所能达到的解耦调节能力仍然要低很多^[22, 37~39]. 另外, 近期文献 [27] 通过利用鲁

棒 H_2 最优性能指标设计多回路控制器, 分析和指出静态解耦器的引入并不能达到明显改进闭环控制系统的解耦调节能力的目的。

2.2 动态解耦器

相对于静态解耦器, 动态解耦器能够有效地改善被控过程的动态输出响应性能, 可以显著地提高各路过程输出之间的动态解耦水平, 因而常用于解耦调节性能要求较高的场合。近期文献 [40~47] 给出了一些采用动态解耦器的控制方法, 取得了比较好的控制效果, 但是这些方法基本上只局限于双输入双输出过程, 不能推广用于具有更多输入输出变量的化工过程。事实上, 对于高维多变量时滞过程, 按照对角化被控过程传函矩阵的要求而得到的动态解耦器, 将不可避免地非有理和正则, 并且会以复杂的方式在其各元素的分子和分母中混含有时滞因子, 所以即便是采用有理近似和高通滤波器来复制超前微分环节, 也难以有效地构造出合适的动态解耦器^[48,49]。此外, 由于实际被控过程不确定性的存在, 使得不可能完全匹配地构造动态解耦器, 由此可能造成系统输出偏差, 并且为了消除和抑制负载干扰信号对各路过程输出可能产生的不利影响, 该方法仍然需要结合多回路控制方式来构造闭环控制系统, 然后应用多回路控制器的设计方法, 对于已实现对角化的过程传函矩阵, 分回路来整定和调节控制系统, 至于由此构造的控制系统的鲁棒稳定性, 仍然需要由对应采用的多回路控制器的设计方法所依据和发展的稳定分析方法来进行确定。

2.3 顺序解耦

结合多变量过程顺序闭环辨识的思想和方法^[50~53], 一些学者提出了顺序闭环控制来实现解耦调节的方法^[54~57], 其主要思想是通过从内环到外环顺序上的逐个闭环整定, 实现由外环到内环的相对独立调节。其突出优点是某一外环的控制性能下降乃至失效, 对内环的影响甚微, 从而保证控制系统中各闭环的独立工作性强。该控制方法适用于具有单方向耦合特性的多变量过程, 即在传递函数矩阵形式上表现为上(或下)三角矩阵, 因此, 控制内环和外环的选取顺序应该按照输出变量之间的耦合由弱到强的方向进行。当然, 该控制方法的缺点也比较明显, 即随着控制闭环的逐个叠加, 上一级外环的整定和计算愈为繁琐和困难, 而且为了保证控制系统的全局稳定性, 通常需要将上一级控制闭环的稳定裕度相对增大, 从而需要相对牺牲一些可以达到的标称控制性能。如何确定科学合理且便于整定控制外环的设计性能指标, 是目前顺序解耦控制发展的一个研究焦点。

2.4 解耦控制器矩阵

基于单位反馈控制结构设计解耦控制器矩阵虽然已经在线性多变量系统的控制理论中有了比较成熟的发展^[48], 但是对于多变量时滞过程, 由于多重时滞的存在以及可能隐含的复右半平面(RHP)零点(通过检验被控过程传函矩阵的行列式才能确定), 使得被控过程传函矩阵的逆阵非有理和正则, 并且可能是不稳定的, 因而使基于线性控制理论发展的解耦控制器矩阵的设计方法难以应用。[58~61]分析和讨论了过程传输时滞和RHP零点对闭环控制系统的性能约束和限制。Wang等人^[62,63]通过将实际工作要求变通和转化为闭环控制系统输出的频域响应指标(如谐振峰值和幅相裕度等), 提出实际期望的闭环系统对角化传递函数矩阵的形式, 然后经反向推导得出最优解耦控制器矩阵, 接着采用最小二乘法拟合最优控制器矩阵的形式来做有理逼近实现, 取得了良好的控制效果, 并且根据Nyquist曲线分析, 指出了常规PID控制器由于形式过于简单而不能达到合适的逼近, 因而不适用于多变量时滞过程的解耦控制设计。其不足之处在于仍然没有摆脱以往利用 H_∞ 最优性能指标的设计方法^[37,47,64]的主要缺点, 即数值化求解运算量大以及不便于在线调节等。最近文献[65]采用过程控制领域中常用的误差平方积分(ISE)性能指标来设计实际期望的闭环系统对角化传函矩阵形式, 由此反向推导得出最优解耦控制器矩阵的形式, 然后基于数学线性分式Padé逼近变换, 给了解析近似的实现形式, 从而大大地减小了求解运算

量,可以实现在线调节来适应被控过程的未建模动态,而且相对于近期 Wang 等人的方法^[62],显著地提高了解耦控制效果和系统输出响应性能,并且指出,被控过程的多重时滞必须作为参考来设计解耦控制器矩阵的每列控制器,从而得出一个重要结论,即每列控制器中至少有一个可以不含时滞环节来有理实现,其它的则应串接时滞补偿器,以指定滞后时间的匹配方式执行,这样才能够实现显著乃至完全解耦控制和调节.需要指出,如何根据过程控制领域中其它常用的性能指标,如绝对误差积分 (IAE)、时间与平方误差乘积的积分 (ITSE) 和时间与绝对误差乘积的积分 (ITAE) 等,来设计解耦控制器矩阵以及分析相应的控制系统的鲁棒稳定性,还有待于深入的研究和解决.

3 其它解耦控制结构

除了采用经典的单位反馈控制结构设计解耦控制方法以外,近年来许多学者进一步推广和发展了单变量控制领域中的一些高级过程控制结构,在提高多变量时滞过程的标称输出响应性能和抑制负载干扰方面,取得了一些引人注目的控制效果.

3.1 多变量内模控制结构

作为对有效地用于单变量时滞过程的内模控制结构^[38]的直接推广,标准多变量内模控制结构如图 1 所示.

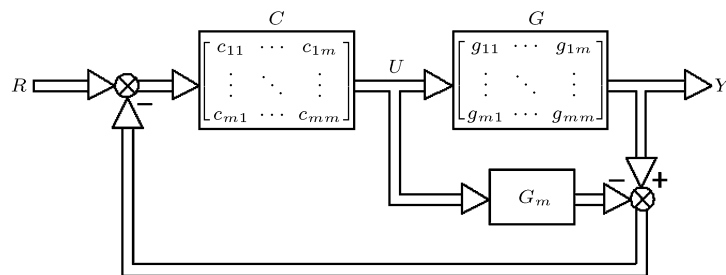


图 1 标准内模控制结构

Fig. 1 Standard internal model control structure

图 1 中, $C = [c_{ij}]_{m \times m}$ 是解耦控制器矩阵, $G = [g_{ij}]_{m \times m}$ 是被控多变量时滞过程, G_m 是对象辨识模型. 在标称情况下, 即 $G = G_m$, 该控制结构为开环控制方式, 只要控制器矩阵 C 被设计为稳定正则的, 就能够确保整个控制系统的稳定性, 因而简化了控制系统的稳定性分析, 以及关于控制输入限幅和输出饱和和非线性的分析, 所以在现代预测控制中得到了广泛采用^[66~70]. 根据内模控制理论^[38], 利用被控过程传函矩阵的逆阵 G^{-1} 的互质分解, 就可以确定出能够达到 H_2 最优性能指标的解耦控制器矩阵 C 的形式. 然而对于多变量时滞过程, G^{-1} 中各元素的分子和分母均以复杂的方式混含有时滞因子, 因而很难进行互质分解, 并且可能隐含有 RHP 极点, 所以不便于直接用以构造最优的解耦控制器矩阵 C . 近期文献 [71, 72] 基于内模控制结构及其设计理论, 通过确定被控过程传函矩阵行列式的 RHP 零点的分布情况, 提出实际期望可行的对角化系统传函矩阵 H 的形式, 然后利用标称系统传函矩阵方程 $G = GC$ 以及数值化拟合方法, 求解出可以稳定实现的解耦控制器矩阵, 取得了显著的解耦控制效果. 文献 [73, 74] 根据内模控制结构与单位反馈控制结构之间的等价变换关系^[38], 基于内模控制原理给出了两种整定闭环解耦控制器矩阵的方法. 需要指出, 随着现代计算机控制技术和数字控制器在化工实践中的广泛应用, 在控制系统中构造被控过程模型的经济成本已大为降低, 因而该控制结构具有良好的工程实用价值和应用前

景.

3.2 多变量 Smith 预估控制结构

由于 Smith 预估控制结构已被成功地应用于单变量大时滞过程的控制与调节, 很多学者将其推广用于多变量时滞过程, 从而构造出多变量 Smith 预估控制结构, 如图 2 所示.

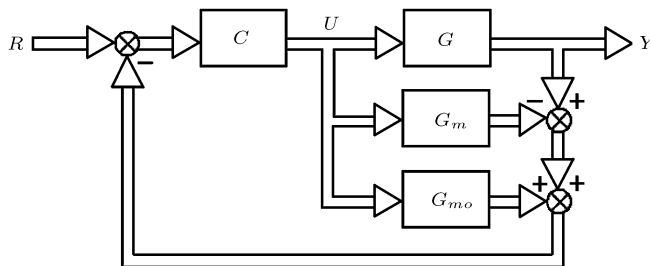


图 2 多变量 Smith 预估控制结构

Fig. 2 Multivariable Smith predictor control structure

图 2 中, C 是解耦控制器矩阵, G 是被控多变量时滞过程, G_m 是对象辨识模型, G_{mo} 是由 G_m 中各元素不包含时滞的部分组成的有理传递函数矩阵. 在标称情况下, 即 $G = G_m$, 从系统输入到系统输出的传函矩阵可以简化为 $H_{yr} = GC(I + G_{mo}C)^{-1}$. 因此, 整个闭环控制系统的稳定性就取决于有理传函矩阵 $C(I + G_{mo}C)^{-1}$, 从而可以只针对 G_{mo} 来设计控制器矩阵 C , 然后应用已经比较成熟发展的线性多变量解耦控制理论来设计闭环控制系统的期望响应性能. [75~80] 给出了一些多变量 Smith 预估控制结构的整定方法和实际应用, 取得了相对于同时期的一些基于单位反馈控制结构的解耦控制方法的优越性. Amparo 等学者进一步将其推广到现代多变量预测控制中^[81]. 然而当实际存在被控过程的不确定性时, 如此构造的闭环控制系统的传函矩阵会变得很复杂, 难以评估其响应性能和稳定性. Maciejowski 通过分析闭环系统的灵敏度和余灵敏度函数的结构奇异值的限定范围, 给出了一种判断多变量 Smith 预估控制结构的鲁棒稳定性的分析方法^[82]. Wang 利用鲁棒控制理论中的小增益定理, 将具有被控过程加性不确定性的摄动系统等价转化为用于鲁棒控制分析的标准 $\Delta - M$ 结构^[83], 从而给出了相应的充要判定条件^[48]. 国内庞国仲等学者针对被控过程存在加性摄动的情况, 利用 Nyquist 稳定判据讨论了控制系统保证稳定性的“鲁棒对角优势”条件^[84]. 但是, 对于被控过程具有其它形式的结构和非结构不确定性, 如实际中常见的控制输入和系统输出测量的不确定性, 更为深入和细致的稳定性分析和判定条件还有待于进一步的研究和完善.

3.3 多变量两自由度控制结构

对于化工多变量时滞过程, 设计控制系统的一个重要目的是消除负载干扰信号对各路过程输出的不利影响以及可能产生的系统输出偏差. 前面介绍的几种控制结构实际上都只包含有一个控制器矩阵, 注意多回路控制结构对应着一个对角化的控制器矩阵, 根据闭环反馈控制^[37]和鲁棒过程控制理论^[38,83], 调节和整定这个控制器矩阵, 只能在闭环控制系统的灵敏度 (即系统输出端负载干扰传函矩阵 S) 和余灵敏度 (即闭环系统传函矩阵 T) 之间进行折中, 也即在闭环控制系统的标称响应性能和鲁棒稳定性之间权衡. 为了分别优化控制系统的给定值响应性能和负载干扰抑制性能, 需要采用两自由度控制结构. 虽然两自由度控制方式在单变量控制系统中已有了比较深入的研究和广泛的工程实践, 但是对于多变量时滞过程, 由于控制问题的复杂性和解耦调节要求, 使得已经得到普遍认可并且能够实际应用的研究成果并不多见. 近期文献 [85, 86] 结合被控过程的实际不确定性形式, 针

对归一化后的广义对象模型发展了两自由度控制方式的结构奇异值 μ 分析方法. Limebeer 和 Yaesh 等学者利用 H_∞ 最优性能指标构造混合灵敏度的最优化目标函数, 由此数值化求解得出两自由度控制的最佳实现形式^[87,88]. 从实质上讲, 这些方法最终得到的是一个合成的控制器矩阵形式, 并不能同时和在线分别独立地调节和优化系统的给定值响应和负载干扰响应, 而且数值化运算量比较大, 目标函数求解中的权函数需要根据具体情况做不同的试探和选取, 因而不便于实际应用和推广. 如何构造稳定可靠的多变量两自由度控制结构和形式, 以及相应的解析化和简便化的整定方法, 有待于长足的研究和进步.

需要说明, 某些文献针对被控过程的具体物理特性以及可以测量的负载干扰, 提出了一些前馈补偿和解耦调节的变结构控制策略和方法, 由于它们具有特殊适用性和相应的研究背景, 限于篇幅不便于逐一介绍, 感兴趣的读者可以参阅有关文献和资料. 另外, 还有一些文献提出了其它更为复杂的两 (或多) 自由度控制结构和形式来实现解耦控制和抑制负载干扰, 由于没有得到广泛的认可和重视, 故略去评述.

4 研究展望

关于化工多变量时滞过程的解耦控制和调节, 从已经得出的主要研究成果来看, 还远不能满足当前诸多工程实践的需要, 有待于长足的发展和完善, 这里指出几个目前实际中具有迫切需求的相关研究课题:

1) 部分解耦控制设计. 由于某些变量之间的耦合作用具有实际意义和生产需要, 或者它们可能只是被控过程的不同物理属性而根本不能实现解耦调节, 要求实施部分解耦控制的化工多变量生产过程在实际中大量存在着^[41,48,89], 例如存在单方向耦合特性的多变量过程, 在传递函数矩阵形式上表现为上 (或下) 三角矩阵, 已发展的顺序解耦控制方法以及其它控制策略有待于深入的改进和革新.

2) 具有非方传函矩阵形式的多变量过程的解耦控制. 大部分已有的研究成果都是针对被控过程的传函矩阵是方阵的情形, 即被控过程的输入和输出维数相同, 然而实际中存在许多生产工艺要求采用较少的控制输入变量来调节相对更多的过程输出变量, 或反之以达到更好的控制效果^[37,90], 如何应用和推广基于方阵的解耦控制方法, 以及结合工艺背景提出新的解耦控制结构和设计方法, 有待于继续深入的研究和发展.

3) 周期性负载干扰的抑制和解耦调节. 随着现代电力和电子设备的快速发展和大量采用, 周期性负载干扰如高频谐波信号所带来的危害日益突出, 已经受到广泛关注和研究^[91,92]. 基于常规的阶跃或斜坡型负载干扰信号设计的闭环控制系统, 对于周期性负载干扰会产生周期性的输出振荡甚至输出残差^[48,93], 如何针对这类负载干扰改造已有的解耦控制结构和创新设计方法, 是一个极具理论和实用价值的重要研究课题.

4) 非自衡多变量过程的解耦控制. 非自衡过程的鲁棒控制和调节一直是过程控制领域中的研究难题, 目前关于非自衡单变量过程的控制研究尚处于完善阶段^[94], 有关非自衡多变量过程控制的研究成果, 尤其是针对解耦控制和调节的, 更为少见^[95,96]. 实际中一些化工不稳定过程, 如夹套冷却式搅拌反应釜和蒸汽锅炉等, 为了维持运行和操作的稳定性, 通常将控制系统整定得比较松弛, 即标称响应性能设计得比较低, 以换取较强的鲁棒稳定性, 从而造成生产材料和能源的可观浪费^[22,37]. 随着不断增多的高级和复杂制造过程因工艺特性和生产要求而构造为非自衡多变量系统, 这一控制难题日益期待着突破性的研究进展.

5) 多变量时滞系统的鲁棒稳定性分析和判据. 衡量闭环控制系统的设计和整定方法优劣的重要标准和依据, 是对其进行鲁棒稳定性分析和判断, 二者是相辅相成和协同发

展的。目前已发展的多变量系统鲁棒稳定性分析方法和判据, 已明显相对滞后于闭环解耦控制方法的发展, 如多变量 Nyquist 稳定判据难以实际应用, 鲁棒控制小增益定理过于保守, 会对于一些经过计算和实际验证为稳定可行的整定方法产生误判^[48], 结构奇异值 μ 分析方法要求人为确定求解权函数^[37], 并且数值化运算量大, 不便于实际应用和推广。因此, 多变量时滞系统的鲁棒稳定性分析理论和方法的深入研究, 将有力地推动和促进多变量时滞过程的解耦控制方法的发展和进步。

6) 数字离散化实现方法: 基于被控过程的频域传函矩阵模型设计的解耦控制方法, 在采用计算机控制系统和数字化控制器实现时, 需要做时域离散化变换, 即 Z 变换, 经典的前向 ($s = (z - 1)/T$)、后向 ($s = (z - 1)/Tz$) 和双线性 ($s = (2z - 1)/(Tz + 1)$) 变换规则对于线性有理的传递函数比较适用, 已经在工程实践中得到广泛的认可和应用^[38]。然而对于时滞过程, 如果其传递函数中的时滞因子 (表示过程输出纯滞后时间) 不是采样周期 T 的整数倍, 仍然应用经典的 Z 变换规则就需要采用有理近似来处理时滞因子中的余数, 从而可能导致不可忽略的变换偏差, 使控制系统性能下降严重, 甚至会失去稳定性, 尤其是对于多变量时滞过程, 多重时滞因子的存在使得采样周期 T 的选择更为棘手和缺乏指导依据。尽管近期有一些文献给出了新的 Z 变换和离散化实现方法^[97,98], 但是严密和系统化的离散化实现理论和方法, 还有待于进一步的发展和完善。

5 结束语

多变量时滞过程的解耦控制设计属于过程控制领域中的研究难题, 然而迅速发展的化工先进生产工艺和工程实践对此具有迫切需求。本文简要地概述了目前具有主导影响的几种频域解耦控制结构及其整定方法的研究进展, 针对各自的主要优缺点浅作了一些对比分析和讨论, 然后指出了几个目前化工实践中具有迫切需求的相关研究课题, 希望能够起到抛砖引玉的作用, 从而促进多变量时滞过程的解耦控制理论和应用研究的快速进步和发展。

References

- 1 Luyben W L. Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers. New York: McGraw Hill Book Company, 1990
- 2 Layton J M. Multivariable Control Theory. Stevenage, England: Peter Peregrinus [for] the Institution of Electrical Engineers, 1976
- 3 Apte Y S. Linear Multivariable Control Theory. London: McGraw Hill Book Company, 1981
- 4 Owens D H. Feedback and Multivariable Systems. Stevenage, England: Peter Peregrinus [for] the Institution of Electrical Engineers, 1978
- 5 Liu C H. General Decoupling Theory of Multivariable Process Control Systems. Berlin: Springer-Verlag, 1983
- 6 Maciejowski J M. Multivariable Feedback Design. Wokingham, England: Addison-Wesley, 1989
- 7 Liu C H. Decoupling Theory of Multivariable Process Control Systems. Beijing: Water Conservancy & Electric Power Press, 1984
- 8 Gao D L, Wu Q. Frequency Domain Multivariable Control Theory. Beijing: Tsinghua University Press, 1998
- 9 Wang S M. Analysis and Design of Multivariable Control Systems. Beijing: Chinese Electric Power Press, 1996
- 10 Jiang W S, Ye Y Z. Analysis and Design of Multivariable Control Systems. Beijing: Chinese Petrochemical Press, 1997
- 11 Wang Q G, Lee T H, Lin C. Relay Feedback: Analysis, Identification and Control. London: Springer-Verlag, 2003
- 12 Zhu Y C. Multivariable System Identification for Process Control. New York: Pergamon, 2001

- 13 Wang Y G, Cai W J, Ge M. Decentralized relay-based multivariable process identification in the frequency domain. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, **48**(5): 872~877
- 14 Li S Y, Cai W J, Mei H, Xiong Q. Robust decentralized parameter identification for two-input two-output process from closed-loop step responses. *Control Engineering Practice*, 2005, **13**(4): 519~531
- 15 Tsien H S. Engineering Cybernetics. New York: McGraw Hill Book Company, 1954
- 16 Bristol E H. On a new measure of interaction for multivariable process control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1966, **11**(1): 133~134
- 17 Shinskey F G. Process Control System, fourth ed. New York: McGraw Hill Book Company, 1996
- 18 Salgado M E, Conley A. MIMO interaction measure and controller structure selection. *International Journal of Control*, 2004, **77**(4): 367~383
- 19 Lee J, Edgar T F. Dynamic interaction measures for decentralized control of multivariable processes. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 2004, **43**(2): 283~287
- 20 Huang H P, Ohshima M, Hashimoto L. Dynamic interaction and multiloop control system design. *Journal of Process Control*, 1994, **4**(1): 15~22
- 21 Jensen N, Fisher D G, Shah S L. Interaction analysis in multivariable control systems. *AIChE Journal*, 1986, **32**(6): 959~970
- 22 Seborg D E, Edgar T F, Mellichamp D A. Process Dynamic and Control, second ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004
- 23 Åström K J, Johansson K H, Wang Q G. Design of decoupled PI controllers for two-by-two systems. *IEE Proceedings-Control Theory & Applications*, 2002, **149**(1): 74~81
- 24 Chen D, Seborg D E. Design of decentralized PI control systems based on Nyquist stability analysis. *Journal of Process Control*, 2003, **13**(1): 27~39
- 25 Chen D, Seborg D E. Multiloop PI/PID controller design based on Gershgorin bands. *IEE Proceedings-Control Theory & Applications*, 2003, **149**(1): 68~73
- 26 Campo P J, Morari M. Achievable closed-loop properties of systems under decentralized control: Conditions involving the steady-state gain. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, **39**(5): 932~943
- 27 Liu T, Zhang W D, Gu D Y. Analytical multiloop PI/PID controller design for two-by-two processes with time delays. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 2005, **44**(6): 1832~1841
- 28 Zhang Y, Wang Q G, Åström K J. Dominant pole placement for multi-loop control systems. *Automatica*, 2002, **38**(7): 1213~1220
- 29 Cha S, Chun D, Lee J. Two-step IMC-PID method for multiloop control system design. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 2002, **41**(12): 3037~3041
- 30 Chien I L, Huang H P, Yang J C. A simple multiloop tuning method for PID controllers with no proportional kick. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 1999, **38**(4): 1456~1468
- 31 Jung J, Choi J Y, Lee J. One-parameter method for a multiloop control system design. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 1999, **38**(4): 1580~1588
- 32 Lee J, Cho W, Edgar T F. Multiloop PI controller tuning for interacting multivariable processes. *Computers & Chemical Engineering*, 1998, **22**(11): 1711~1723
- 33 Wang Q G, Lee T H, Zhang Y. Multiloop version of the modified Ziegler-Nichols method for two input two output processes. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 1998, **37**(12): 4725~4733
- 34 Ho W K, Lee T H, Gan O P. Tuning of multiloop proportional-integral-derivative controllers based on gain and phase margin specification. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 1997, **36**(6): 2231~2238
- 35 Halevi Y, Palmor Z J, Efrati T. Automatic tuning of decentralized PID controllers for MIMO processes. *Journal of Process Control*, 1997, **7**(2): 119~128
- 36 Loh A P, Vasnani V U. Describing function matrix for multivariable systems and its use in multiloop PI design. *Journal of Process Control*, 1994, **4**(3): 115~120
- 37 Skogestad S, Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. New York: John Wiley & Sons, 1996
- 38 Morari M, Zafriou E. Robust Process Control. Englewood Cliffs, New York: Prentice Hall, 1989
- 39 Cui H, Jacobsen E W. Performance limitations in decentralized control. *Journal of Process Control*, 2002, **12**(4): 485~494
- 40 Wallter M, Wallter J B, Wallter K V. Decoupling revisited. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 2003, **42**(20): 4575~4577

- 41 Gilbert A F, Yousef A, Natarajan K, Deighton S. Tuning of PI controllers with one-way decoupling in 2×2 MIMO systems based on finite frequency response data. *Journal of Process Control*, 2003, **13**(6): 553~567
- 42 Wang Q G, Huang B, Guo X. Auto-tuning of TITO decoupling controllers from step tests. *ISA Transactions*, 2000, **39**(4): 407~418
- 43 Perng M H, Ju J S. Optimally decoupled robust control MIMO plants with multiple delays. *IEEE Proceedings—Control Theory & Applications*, 1994, **141**(1): 49~56
- 44 Sun X, Sun Y X. Basis weight and moisture content analysis for papermaking process. *Control Theory & Applications*, 2000, **18**(suppl): 121~124
- 45 Guo Q D, Tang G P. Research on synchrodrive technology based on decoupling control. *Control & Decision*, 2001, **16**(1): 72~75
- 46 Chen S P, Sun Y X. Lower-order robust decoupler design. *Acta Automatica Sinica*, 1998, **24**(4): 543~547
- 47 Chen S P, Sun Y X, Zhou C H. Robust decoupling of multivariable process. *Acta Automatica Sinica*, 1995, **21**(2): 214~220
- 48 Wang Q G. Decoupling Control. Berlin: Springer-Verlag, 2003
- 49 Pomerleau D, Pomerleau A. Guide lines for the tuning and the evaluation of decentralized and decoupling controllers for processes with recirculation. *ISA Transactions*, 2001, **40**(4): 341~351
- 50 Choi J Y, Lee J, Jung J H. et al. Sequential loop identification of multivariable process models. *Computers & Chemical Engineering*, 2000, **24**(2): 809~814
- 51 Toh W H, Rangaiah G P. A methodology for autotuning of multivariable systems. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 2002, **41**(18): 4605~4615
- 52 Shen S H, Yu C C. Use of relay-feedback test for automatic tuning of multivariable systems. *AIChE Journal*, 1994, **40**(4): 627~646
- 53 Loh A P, Hang C C, Quek C K, Vasnani V U. Autotuning of multiloop proportional-integral controllers using relay feedback. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 1993, **32**(6): 1102~1107
- 54 Yeung L F, Yang W K, Ng W H Y, Bryant G F. Sequential design of MIMO systems with parametric uncertainties. *IEEE Proceedings—Control Theory & Applications*, 2002, **149**(6): 511~519
- 55 Shiu S J, Hwang S H. Sequential design method for multivariable decoupling and multiloop PID controllers. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 1998, **37**(1): 107~119
- 56 Morten H, Skogestad S. Sequential design of decentralized controllers. *Automatica*, 1994, **30**(10): 1601~1607
- 57 Chiu M S, Arkun Y. A methodology for sequential design of robust decentralized control systems. *Automatica*, 1992, **28**(5): 997~1001
- 58 Havre K, Skogestad S. Effect of RHP zeros and poles on the sensitivity functions in multivariable systems. *Journal of Process Control*, 1998, **8**(3): 155~164
- 59 Holt B R, Morari M. Design of resilient processing plants-VI. The effect of right-half-plane zeros on dynamic resilience. *Chemical Engineering Science*, 1985, **40**(1): 59~74
- 60 Holt B R, Morari M. Design of resilient processing plants-V. The effect of deadtime on dynamic resilience. *Chemical Engineering Science*, 1985, **40**(7): 1229~1237
- 61 Morari M, Zafriou E, Holt B R. Design of resilient processing plants. New characterization of the effect of RHP zeros. *Chemical Engineering Science*, 1987, **42**(10): 2425~2428
- 62 Wang Q G, Zhang Y, Chiu M S. Non-interacting control design for multivariable industrial processes. *Journal of Process Control*, 2003, **13**(3): 253~265
- 63 Wang Q G, Hang C C, Zou B. Frequency response approach to autotuning of multivariable controllers. *Chemical Engineering Research and Design Transactions of the Institute of Chemical Engineers, Part A*, 1997, **75**(A8): 797~806
- 64 Zhang W D, Sun Y X, Xu X M. Multivariable Dahlin controller design. *Acta Automatica Sinica*, 1998, **24**(1): 64~72
- 65 Liu T, Zhang W D, Gu D Y. Decoupling control design for multivariable processes with time delays. *Acta Automatica Sinica*, 2005, **31**(6): 881~889
- 66 Morari M, Lee J H. Model predictive control: Past, present and future. *Computers & Chemical Engineering*, 1999, **23**(4): 667~682
- 67 Xi Y G. Predictive Control. Beijing: National Defence Industry Press, 1993
- 68 Hu X B, Chen W H. Model predictive control for constrained systems with uncertain state-delays. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2004, **14**(17): 1421~1432

- 69 Rodrigues M A, Odloak D. Robust MPC for systems with output feedback and input saturation. *Journal of Process Control*, 2005, **15**(7): 837~846
- 70 Li N, Li S Y, Xi Y G. Multiple model predictive control for MIMO systems. *Acta Automatica Sinica*, 2003, **29**(4): 516~523
- 71 Wang Q G, Zhang Y, Chiu M S. Decoupling internal model control for multivariable systems with multiple time delays. *Chemical Engineering Science*, 2002, **57**(1): 115~124
- 72 Jerome N F, Ray W H. Model-predictive control of linear multivariable systems having time delays and right-half-plane zeros. *Chemical Engineering Science*, 1992, **47**(4): 763~785
- 73 Wang Q G, Hang C C, Yang X P. IMC-based controller design for MIMO systems. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1993, **35**(12): 1231~1243
- 74 Dong J, Brosilow C B. Design of robust multivariable PID controllers *via* IMC. In: Proceedings of the American Control Conference, Albuquerque, NM, USA: IEEE Press, 1997. **5**: 3380~3384
- 75 Wang Q G, Zou B, Zhang Y. Decoupling Smith predictor design for multivariable systems with multiple time delays. *Chemical Engineering Research and Design Transactions of the Institute of Chemical Engineers, Part A*, 2000, **78**(4): 565~572
- 76 Xue F Z, Pang G Z, Hu J H. Multivariable control for beer fermentation temperature. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(1): 150~154
- 77 Desbiens A, Pomerleau A, Hodouin D. Frequency based tuning of SISO controllers for two-by-two processes. *IEEE Proceedings—Control Theory & Applications*, 1996, **143**(1): 25~32
- 78 Jerome N F, Ray W H. High-performance multivariable control strategies for systems having time delays. *AIChE Journal*, 1986, **32**(6): 914~931
- 79 Watanabe K, Ishiyama Y, Ito M. Modified Smith predictor control for multivariable systems with delays and unmeasurable step disturbances. *International Journal of Control*, 1983, **37**(5): 959~973
- 80 Ogunnaike B A, Ray W H. Multivariable controller design for linear systems having multiple time delays. *AIChE Journal*, 1979, **25**(6): 1043~1056
- 81 Amparo N R, Julio E N, Carlos B, Camacho E F. A Smith predictive based MPC in a solar air conditioning plant. *Journal of Process Control*, 2005, **15**(1): 1~10
- 82 Maciejowski J M. Robustness of multivariable Smith predictor. *Journal of Process Control*, 1994, **4**(1): 29~32
- 83 Zhou K, Doyle J, Glover K. Essentials of Robust Control. New York: Prentice Hall, 1998
- 84 Pang G Z, Sun L H, Liu J, Xue F Z. Robust stability for multivariable system with time delays. *Acta Automatica Sinica*, 1997, **23**(1): 99~102
- 85 Lundström P, Skogestad S. Two-degree-of-freedom controller design for an ill-conditioned distillation process using μ -synthesis. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, **7**(1): 12~21
- 86 Prempain E, Bergeon B. A multivariable two-degree-of-freedom control methodology. *Automatica*, 1998, **34**(12): 1601~1606
- 87 Limebeer D J N, Kasenally E M, Perkins J D. On the design of robust two-degree-of-freedom controllers. *Automatica*, 1993, **29**(1): 157~168
- 88 Yaesh I, Shake U. Two-degree-of-freedom H_∞ optimization of multivariable feedback systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1991, **36**(11): 1272~1276
- 89 Ogunnaike B A, Ray W H. Process Dynamics, Modelling and Control. Oxford, England: Oxford University Press, 1994
- 90 Lee T K, Shen J, Chiu M S. Independent design of robust partially decentralized controllers. *Journal of Process Control*, 2001, **11**(4): 419~428
- 91 Robert G, Ramon C C. Digital repetitive plug-in controller for odd-harmonic periodic references and disturbances. *Automatica*, 2005, **41**(1): 153~157
- 92 Lee J H, Natarajan S, Lee K S. A model-based predictive control approach to repetitive control of continuous processes with periodic operations. *Journal of Process Control*, 2001, **11**(2): 195~207
- 93 Moon J H, Lee M N, Chung M J. Repetitive control for the track-following servo system of an optical disk drive. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, **6**(5): 663~670
- 94 Liu T, Zhang W D, Gu D Y. Analytical design of two-degree-of-freedom control scheme for open-loop unstable processes with time delay. *Journal of Process Control*, 2005, **15**(5): 559~572
- 95 Loh E J, Chiu M S. Robust decentralized controller design for unstable systems. *Automatica*, 1997, **52**(14): 2299~2311

- 96 Georgiou A, Georgakis C, Luyben W L. Control of a multivariable open-loop unstable process. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 1989, **28**(10): 1481~1489
- 97 Wang Q G, Bi Q, Yang X P. High-performance conversions between continuous- and discrete-time systems. *Signal Processing*, 2001, **81**(9): 1865~1877
- 98 Zhang Y, Shieh L S, Akujuobi C M, Ali W H. Digital PID controller design for delayed multivariable systems. *Asian Journal of Control*, 2004, **6**(4): 483~495

刘 涛 博士研究生. 研究方向为工业过程鲁棒控制理论与应用, 时滞系统.

(**LIU Tao** Ph.D. candidate. His research interests include robust control theory and application for industrial process and time delay systems.)

张卫东 教授, 博士生导师. 研究方向为过程控制理论, 鲁棒控制理论与应用, 系统辨识.

(**ZHANG Wei-Dong** Professor. His research interests include process control theory, robust control theory and application, and system identification.)

顾诞英 博士研究生. 研究方向为过程鲁棒控制理论, 闭环系统辨识和建模.

(**GU Dan-Ying** Ph.D. candidate. Her research interests include process robust control theory and closed-loop system identification and modeling.)

蔡云泽 讲师, 研究方向为时滞系统的鲁棒控制、鲁棒滤波理论以及小波滤波.

(**CAI Yun-Ze** Lecturer. Her research interests include the theory of robust control for delay systems, robust filtering, and wavelet denoising.)