

大规模工业过程的稳态递阶控制综述¹⁾

万百五 林杰

(西安交通大学系统工程研究所)

摘 要

连续运行的大规模工业过程或加工过程,其递阶控制理论有三个发展阶段:静态多级优化、稳态递阶优化、系统优化及参数估计的综合方法等。本文评述了这三方面的主要成就并对今后的重要研究方向提出了展望。

关键词——大规模工业过程,稳态优化,递阶控制。

一、前 言

大规模工业过程 (Large Scale Industrial Processes) 指的是,化工、石油、轻工业、制药等由多个子过程组成的连续生产过程或完全重复的加工过程。这类生产过程都处于长期连续运行之中。但是,环境变化、触媒老化以及原材料成份的变动等常常形成慢扰动。最优控制的目的就在于利用递阶控制方法克服慢扰动,使大规模工业过程处于某种最优工况,以达到增加产量、减少原材料消耗、节约能耗和提高产品质量等目标。

因为是大规模工业过程,最优控制有必要按它的车间、装置、功能或地理位置,分解成一些互相关联的子过程来进行。通常它的递阶控制,具有直接控制层和优化控制层的多层结构^[1,2],并在结成递阶的小型或微型计算机组上进行递阶控制的两级分解-协调优化计算。

分解-协调算法起源于1960年 Dantzig-Wolfe 对于线性规划的分解算法。按本质来说,大工业过程的静态递阶控制,数学上就是对一个大型数学规划问题的分解求解。早期的研究称为静态 (Static) 多级系统理论,总结在 Mesarović 等的著名著作“递阶多级系统理论”^[3] 以及 Lasdon、Brosilow 和 Schoeffler 等人的论著中^[4]。后来 Singh 和 Titli 等对此又作了发展,他们1978年的著作“大系统的分解、优化和控制”中的第四章“非线性规划中的分解-协调方法”是迄七十年代为止的一个较全面的介绍^[4]。

以 Findeisen 为首的波兰学派,将这方面研究与化工过程的计算机在线控制紧密结合起来,提出了稳态递阶控制 (Steady-state Hierarchical Control)。为了克服模型和实际过程的不一致性,他们引用了全局和局部反馈,即所谓迭代协调^[5],并得出一个次优解。

在英国伦敦 City University, 以 Roberts 为首的研究组提出了系统优化与参数估

本文于1988年6月23日收到。

1) 中国科学院科学基金资助的课题。

计的综合方法 (Integrated System Optimization and Parameter Estimation, 简称 ISOPE), 可以在模型与实际过程存在差异的情况下, 求得生产过程的最优设定点(解)。最近六、七年来, ISOPE 方法有很大的发展^[5-7], 并是最有前途的方法之一。

以下分三节综述这三方面的成就及其应用。第六节叙述新的研究方向、尚待解决的问题和作者的评论。

二、静态多级优化^[4-17]

大工业过程的多级系统理论所作的突出改进, 就是能对子过程间的关联作恰当的处理^[8]。按照 Mesarović 的意思, 协调是高一级的控制任务(由协调器完成)。协调器通过改变协调变量力图平衡子过程间的关联, 以达到全局最优。所采用的基本协调方法有两种: 模型协调法和目标协调法, 文[2]详细作了介绍和评价。

协调算法的收敛性研究, 是基于 Lyapunov 直接法。基本思想是将协调器的迭代方程近似为微分方程。这样迭代过程的收敛性问题就蜕化为微分方程的稳定性问题。对于子过程中的等式和不等式约束, 分别要用 Lagrange 乘子和 Kuhn-Tucker 乘子计入在 Lagrange 函数中。在目标协调法中两个乘子一齐作为协调变量。有些实际问题中, 总目标函数不可分解为诸子过程目标函数之和。Titli 等用增广协调向量或伪变量的方法来解决。同样的思路可以用于子模型中出现不可分的情况^[4]。

文[4]介绍了静态多级优化应用于管理方面的有趣例子, 如库存积累、水电站的管理等。综述[8]指出, 多级静态最优化技术所研究的上述问题, 有的已饶有兴趣地应用于化学工程或复杂工厂。文[9]报道, 法国一个生产硫磺的联合企业采用静态递阶控制技术达到优化生产。国内文[10]对大型合成氨装置采用分解-协调方法进行静态优化, 经现场参数调整表明, 可以降低消耗, 提高经济效益。

在实际工业过程的控制中很少如理论所要求的那样, 采用二次型目标函数。相反, 例如在文[10, 12, 13]研究化工厂或催化裂解厂的分解中由于要求达到利润最高、损耗最小等经济目标, 其目标函数常常是线性或非凸的。因此在文[11, 12]中应用模型协调法即可行法进行协调。但是在不少实际工业过程中, 由于难以满足可行法的较强的适用性条件, 因而有必要对目标函数进行凸化处理, 然后采用目标协调法求解。这将在下节中详加讨论。

三、稳态递阶控制

由于较精确的工业过程模型不易求得, 而且模型一般随控制器设定点的变动而变化, 因此, 波兰学派提出, 优化算法中采用模型求得的解是开环优化解。这个解未必能使真实工业过程处于最优工况, 相反会造成违反约束。他们提出应该从实际过程提取关联变量的稳态信息并反馈至上一层的协调器(全局反馈)或局部决策单元(局部反馈), 用来修正基于模型得出的最优解, 使之接近实际最优解, 这称为“闭环控制”^[1, 2]。波兰学者对于两种基本的协调方法和混合法进行了严密的研究, 特别对于解的存在性、迭代的收敛性和适

用性条件等都作了严格的数学论证,包括使用泛函分析等数学工具。文[1]汇集了他们

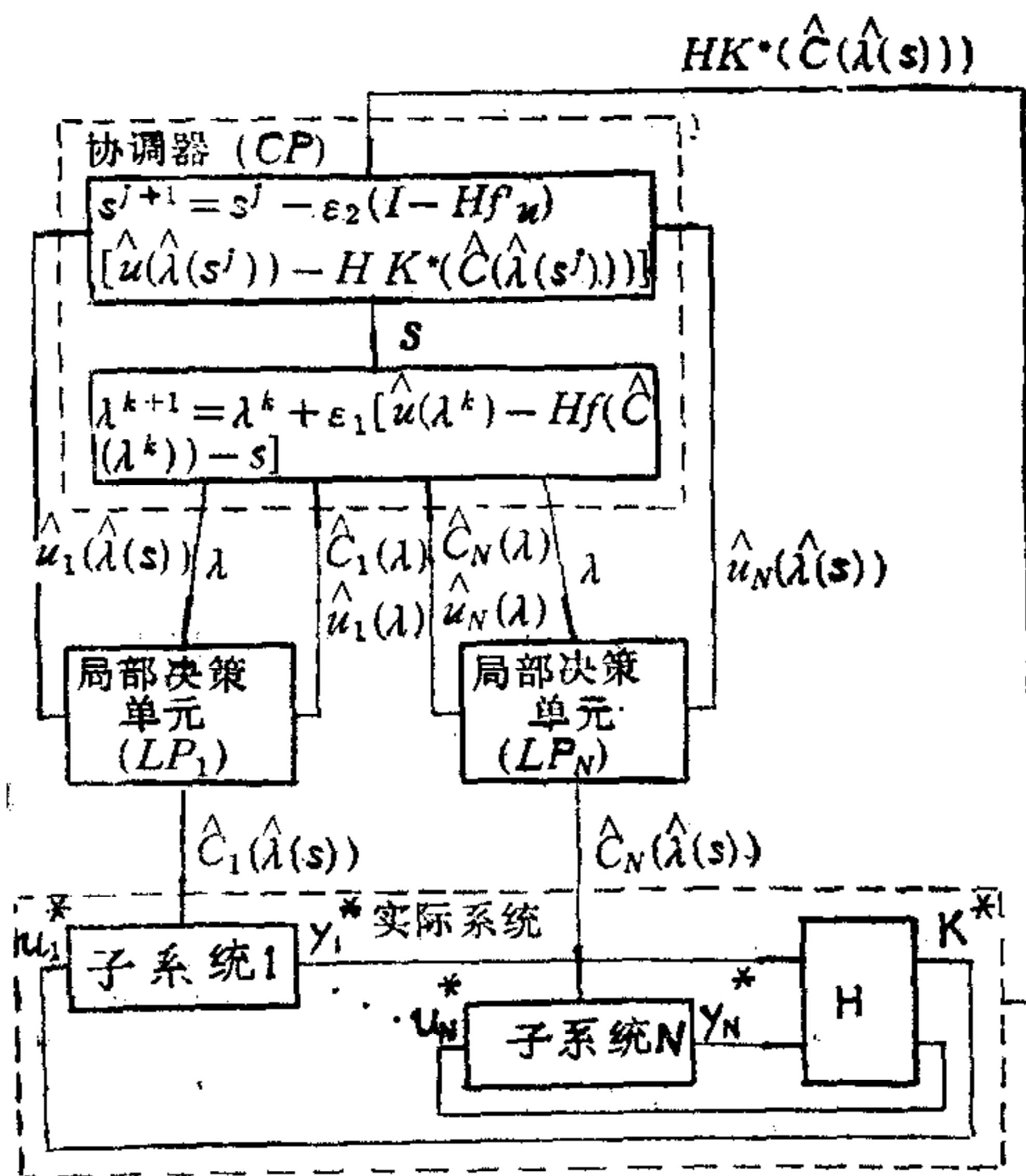


图1 双迭代的信息结构(型式1)

重视。图1是一种型式。双迭代的思路在于,尽可能地将关联平衡的迭代从在线运算变为离线运算,以增加离线迭代次数为代价,来减少算法的在线迭代次数。在文[15]的三个例子的算法中,只要求调节器设定点改变10次左右,即可达到次优解。

2) 非凸或线性目标函数问题引起了注意。由于目标协调法在求解过程中需要于鞍点附近在对偶问题和原问题间不断进行迭代,所以要求所求解的问题是严格凸的。波兰Tatjewski提出另一种双迭代环带反馈的增广关联平衡法来求解非凸问题^[16]。

西安交通大学系统工程研究所的递阶控制研究小组,环绕线性目标函数问题作了一系列工作。文[10]采用OPBM协调方法,并证明了迭代的收敛性,其优点是完全可分解,并可引用全局反馈来改善控制的性能。文[19]将问题凸化再进行分解,并采用梯度偏移和部分对偶的概念,使问题分解为三级。每一级都用二级收敛的算法进行优化协调,收敛速度很快。文[20]提出了目标函数的序列凸化方法(SCM),使问题严格凸化并完全可分,其迭代收敛性可通过罚系数 ρ 任意调节。论文并给出了收敛性的充分条件。文[21]提出了二次等价性原理,将问题等价为一个具有可分目标、严格凸的二次问题。在此基础上提出了点凸化技术(PCT),它并不需要进行系列凸化,因此大大缩短计算时间。

3) 波兰Findeisen等人对于一些工业过程如何分解和协调进行了深入的应用研究,如在氧化铝生产中铵明矾过程的两级递阶控制^[22],甜菜制糖厂的递阶控制等^[23]。其他这方面的类似研究有对化工过程的可行法递阶控制^[11]、发酵及蒸馏过程的递阶控制等^[24]。

四、系统优化与参数估计的综合方法 (ISOPE)

稳态递阶控制的难点在于,实际过程的输入-输出特性是未知的。Findeisen等人提出的次优算法的主要缺点在于,一般很难准确估计次优解偏离最优的程度,而且次优解的

1979年以前的成果,作者在文[2]中曾作了介绍。但自综述[2]问世五年来,应强调指出:

1) 全局反馈被认为可用以修正总目标函数中由于模型与实际过程差异所造成的控制失误;而局部反馈则被认为可用以修正各局部决策单元由于该差异所造成的控制失误。文[14]表明,在三种协调方法中同时引用两种反馈能使目标函数非常接近实际最优值,是否能达到真正最优则尚待理论证明。但是这些算法都有一个重要缺点:它需要多次从实际过程测量稳态关联输出并修正设定点。这必然造成对于实际工业生产过程干扰过多。因此,优化过程中设定点的变动次数已经成为衡量一个算法有效性的指标之一。

双迭代思想^[15]适应了这种需要,引起国内外

次优程度往往依赖于初始点的选取。Roberts 在参数估计与系统优化两步法的基础上首先提出了 ISOPE 方法^[27]。此法的优点在于，它可在模型与实际过程完全不一致的情况下求得系统真实的最优解。它的基本思想在于通过引入修正乘子 λ 的方法将模型优化与参数估计分离开来，其信息结构如图 2 所示。此后 Brdyś, Chen 等人又成功地将 ISOPE 方法推广应用到大工业过程的稳态递阶最优控制中，并通过大量的数字仿真和理论分析对各种不同的信息结构做了深入的研究^[5,6,25]。

由 ISOPE 算法的机理可知，当算法做在线迭代时，需不断地估计模型参数，计算修正乘子。由于要用摄动法求取实际过程的导数，因此为求得最优解往往需要多次改变控制器的设定点，以获取所需的稳态信息。由于大工业过程的暂态过程较长，所以如何减少控制器设定点的变动次数就成为设计稳态最优控制方法所遵循的重要准则。

Brdyś 和 Roberts 将 Shao 提出的双迭代策略^[6]引入 ISOPE 方法，以增加离线迭代运算为代价，大大减少了算法的在线迭代次数。由于离线运算时间与在线迭代相比微不足道，所以双迭代思想的引入使 ISOPE 方法向实用迈进了一步。尽管如此，它仍存在一些弱点，比如它的在线迭代效率取决于模型与实际间差异的大小，以及它的可应用条件较严格^[26,6]等。

Lin 等人在双迭代 ISOPE 法的基础上提出了双模型法^[26]。此法保留了双迭代结构，但在内迭代环采用了一个自适应模型替代原有的固定模型，从而基本上克服了双迭代法的上述缺点^[26]。

在稳态递阶控制中，具有输出关联不等式约束的系统是很常见的。由于理论分析的困难，大多数 ISOPE 方法都避免讨论这类问题。Lin 等人提出了一种新修正乘子法来处理这类问题^[7]，并将其成功地推广到递阶 ISOPE 算法中^[26,29]，从而使具有输出关联不等式约束的问题首次得到了解决。

在大工业过程稳态控制中，非凸问题是很普遍的。Brdyś 等人将增广 Lagrange 技术应用用于 ISOPE 方法，使问题得以凸化进而可用 ISOPE 方法求解^[28]。有趣的是，如果用增广的 ISOPE 方法求解凸问题，可进一步提高算法的效率，降低算法对于迭代增益系数的灵敏度。因此，研究增广 ISOPE 方法的目的在于凸化问题，也在于进一步提高算法的效率，增强鲁棒性。

迄今为止，ISOPE 方法的应用研究还仅限于在实验装置(如加热炉，氟里昂蒸发器)上进行算法验证^[28]。由于 ISOPE 方法需求取实际过程对于设定点的导数，因此抗干扰能力较差。此外，由于采用了摄动方法求导，所以算法的调整时间较长。如何从根本上克服 ISOPE 方法的上述缺点，是目前稳态递阶最优控制研究中的一个重要课题。

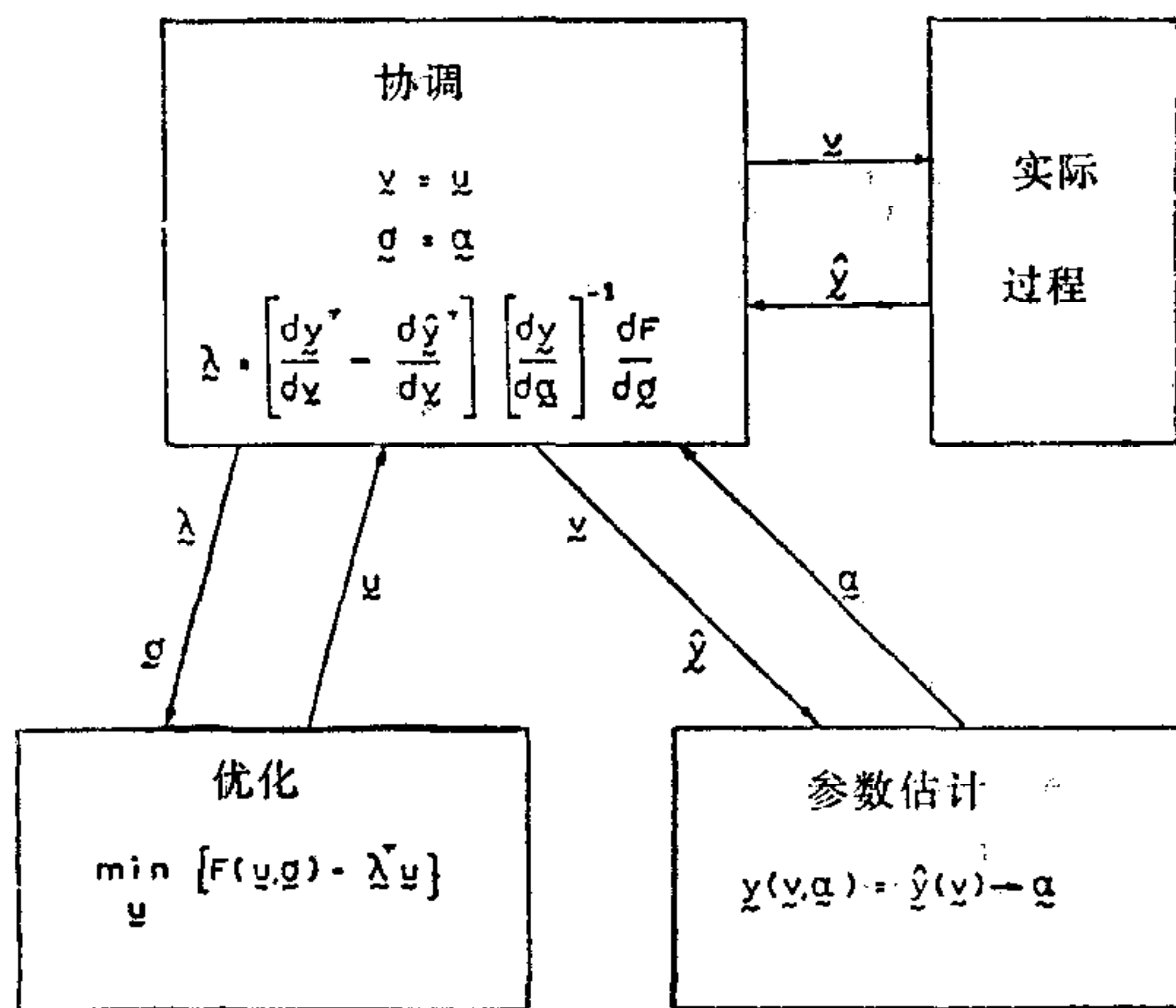


图 2 ISOPE 的修正两步法

五、结 束 语

递阶控制思想的提出已有卅多年了。在有些工业过程中已成功地应用了这一成果。但是应该指出，象波兰学派的闭环控制和英国学者提出的 ISOPE 方法等还有待工业界予以接受。其原因包括工业不景气、投资风险等。常规仪表控制虽然不能得到最优工况，但既可靠而又便宜。另一方面，从大工业过程稳态递阶控制本身而言，在理论上还有应改善之处，在实践上还缺少示范。因此当前需要进行探索性研究的新课题有：

(1) 对非凸目标函数问题，寻找设定点变动次数更少的最优控制方法，包括探索不用导数的 ISOPE 方法。

(2) 引用反馈时，要等待实际系统的过渡过程结束后才能进行测量。如何利用这个动态过程求取修改模型的信息，借以减少或取消求取导数时必要的摄动，这是一个很不同于以前思路的研究方法。

(3) 实际工业过程中常常伴随着噪声，因此随机噪声出现在关联变量上时，反馈或参数、导数的估计将如何进行；协调方法和算法如何调整，才能保证最(次)优控制。这是很重要的研究方向。

(4) 对大规模工业过程实行递阶智能控制，充分利用对工业过程的知识 and 专家经验来协助修正模型，借以减少摄动和设定点的变动次数，并实行启发式优化。

(5) 运用象预测控制、模糊控制等这样一类新的控制方法于大工业过程递阶控制中，并采用启发式或其它的优化或次优方法。

(6) 由于大工业过程的控制往往具有多目标，因此多目标稳态递阶控制也是一个重要的研究课题，其中当然要结合分解与协调的方法。

(7) 开展应用研究。象文[10]这样的论文，国内还是第一篇。研究如何将大工业过程分解、建立数学模型、确定目标函数、探讨协调方法，并进行仿真研究；其后还在工厂中进行参数的现场实际调整。这种研究为多微机组在线稳态递阶控制的实现提供理论分析和依据。只有完成这一步，才谈得上以后的实现。

(8) 开展实验研究。在实验室建立 2-输入 2-输出对象，如氟里昂蒸发器、冷热水混合装置等，用微机组实现在线稳态递阶控制，摸索并积累实现在线递阶控制的经验，包括考验各种协调算法、防止违反约束、事故处理故障诊断和提高可靠性等。

以上这些探索性方向，有的国内已有人开始进行研究。同时在国内一些工业过程中，正在广泛研究采用微型计算机控制。有的甚至正在考虑将微机联网并增加上位机以达到管理、监测的功能。这实际上是为实现递阶控制准备了物质基础。因此实现递阶控制的前景是光明的。也只有出现大规模工业过程递阶控制的更多实例之后，才能在实践中发现新问题、揭露新矛盾来推动大系统这一现代控制理论的分支更向前进。

参 考 文 献

- [1] Findeisen, W., Bailey, F., Brdyš, M., Malinowski K. et al., Control and Coordination in Hierarchical Systems, John Wiley & Sons, London, 1980.

- [2] 万百五, 大系统理论研究中的波兰 Findeisen 学派, 自动化学报, **10**(1984), 173—181.
- [3] Mesarović, M. D., Macko, D. and Takahara, Y., *Theory of Hierarchical, Multilevel Systems*, Academic Press, New York, 1970.
- [4] Singh, M. G. and Titli, A., *Systems: Decomposition, Optimization and Control*, Pergamon Press, 1978.
- [5] Chen, S., Brdyš, M. and Roberts, P. D., An Integrated System Optimization and Parameter Estimation Technique for Hierarchical Control of Steady-State Systems, *Int. J. of Systems Sci.*, **17**(1986), 1209—1228.
- [6] Brdyš, M. and Roberts, P. D., Hierarchical Single and Double Iteration Techniques for Optimizing Control of Large Scale Industrial Processes; Derivation, Applicability and Convergence, *Control* **85**, IEE Conference, Publications, No. 252, 1985, 89—94.
- [7] Lin J., Chen S. and Roberts, P. D., A Modified Algorithm for Steady State Integrated System Optimization and Parameter Estimation, *IEE Proceedings*, **135**, Pt. D, No. 2, March, 1988.
- [8] Mahmoud, M., Multilevel Systems Control and Applications: A Survey, *IEEE Trans. on SMC*, **SMC-7**, No. 3 (1977), 125—142.
- [9] Grateloup, G., Blandin, P. and Titli, A., *La Commande Hierarchisee. ses Principes Generaux et son Application a un Complexe de Production de Soufre*, Journées, Modélisation et Optimization des Procédés Chimiques, May, 1977.
- [10] 黄道, 蒋慰孙, 合成氨系统优化的一类新方法, 华东化工学院学报, **13**(1987), 491—498.
- [11] Tazaki, E., Shindo, A. and Umeda, T., Decentralized Optimization of a Chemical Process by a Feasible Method, *Automatica*, **8**(1972), 543—554.
- [12] Roberts, P. D., Hierarchical Control and Decomposition of a Chemical Plant, *Int. J. of Systems Sci.*, **10**(1979), 207—223.
- [13] Brosilov, C. and Nunez, E., Multilevel Optimization Applied to a Catalytic Cracking Plant, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **40**, June, 1968.
- [14] 万百五, Roberts, P. D., 稳态大系统递阶控制技术的一些改进, (I) 直接法, (II) 价格法, (III) 混合法, 西安交通大学学报, **17** No. 2, No. 3, 1983.
- [15] Shao, F. Q. and Roberts, P. D., A Price Correction Mechanism With Global Feedback for Hierarchical Control of Steady State Systems, *Large Scale Systems*, No. 4, 1983, 67—80.
- [16] Tatjewski, P., On-line Hierarchical Control of Steady-State Systems Using the Augmented Interaction Balance Method With Feedback, *Large Scale systems*, No. 8, 1985, 1—18.
- [17] Schoeffler, J. D., Static Multilevel Systems, In D. A. Wismer, ed., *Optimization Methods for Large Scale Systems*, McGraw-Hill, New York, 1971.
- [18] Zeng J. C., Wan B. W. and Wang W. Y., A Decomposition-Coordination Algorithm for Large Scale Linear Programming Problems, Preprint of 4th IFAC/IFORS Symposium on Large Scale Systems, Theory and Applications, August, Zurich, Switzerland, 1986.
- [19] 刘智勇, 林杰, 万百五, 线性稳态大系统优化的梯度偏移三级协调算法研究, 系统工程学报, 1987 年第二期, 46—57.
- [20] Lin J. and Wan B. W., Sequential Convexifying Method (SCM) With Application to Optimization and Control, Preprint of 10th IFAC World Congress, August, Munich, F. R. G. 1987.
- [21] Lin J. and Wan B. W., Quadratic Equivalence Principle and Point Convexifying Technique in Optimization and Control of Linear Steady-state Systems, *Large scale Systems*, **11**(1986), No. 1.
- [22] Findeisen, W. et al., Two-level Optimization of the Ammonium Alum Processes in the Aluminium Oxide Production, Proceedings of 5th IFAC World Congress, Part I, Paris, France, June, 1972.
- [23] Findeisen, W. et al., Multilevel Optimization and Dynamic Coordination of Mass Flows in a Beet Sugar Plant, *Automatica*, **6**(1970), 581—589.
- [24] Singh M. G. et al., Large Scale Systems Applications, Preprint of 9th IFAC World Congress, Budapest, Hungary, July 2—6, 1984.
- [25] Brdyš, M., and Roberts, P. D., Optimal Structure for Steady State Adaptive Optimizing Control of Large Scale Industrial Processes, *Int. J. Systems Sci.*, **17**(1986), 1449—1474.
- [26] Lin J., Hendawy, Z. M. and Roberts, P. D., New Model-Based Double Loop Iterative Strategy for Integrated System Optimization and Parameter Estimation of Large Scale Industrial Processes, *Int. J. of Control*, **47**(1988), 753—773.
- [27] Roberts, P. D., An Algorithm for Steady-State System Optimization and Parameter Estimation, *Int. J. Systems Sci.*, **10**(1979), 719—734.
- [28] Brdyš, M., Ellis, J. E. and Roberts, P. D., Augmented Integrated System Optimization and Parameter Estimation Technique; Derivation, Optimality and Convergence, *IEE Proceedings*, Vol. 134, Pt. D. No. 3,

1987.

- [29] Lin J., Hendawy, Z. M. and Roberts, P. D., Extension of Integrated System Optimization and Parameter Estimation to Hierarchical Control of Steady State Systems With Output Dependent Constraints, *Int. J. of Control*, 47, (1988), 413—431.

STEADY-STATE HIERARCHICAL CONTROL OF LARGE-SCALE INDUSTRIAL PROCESSES: A SURVEY

WAN BAIWU LIN JIE

(Xi'an Jiaotong University)

ABSTRACT

Large scale industrial processes operate mostly in steady-state manner. In the development of hierarchical control of these processes there are three stages: viz. static multilevel optimization, steady-state hierarchical optimization and integrated system optimization and parameter estimation technique. This paper surveys the main achievements in these three stages, and gives the perspective of future developments.

Key words ——Large scale industrial processes; steady-state optimisation; hierarchical control.