

分布式工程系统的优化控制

李少远 上海交通大学自动化系

随着技术实现手段的不断发展，控制系统正在由集中式控制向着分布式模式转变，本文将根据工业过程控制的特点和进一步的需求，对近年来在分布式系统预测控制取得的新进展进行综述，并对预测控制进一步的发展需求进行分析，介绍了欧盟正在进行的第七框架对于大系统分布式预测控制的研究内容。

1. 控制模式已由集中式向分布式转变

控制系统理论由最初的处理单输入单输出(SISO)系统，发展到能够处理较为复杂的多输入多输出(MIMO)系统，在这一过程中，控制器的设计方法也由基本的PID控制，不断提出并发展了针对系统特征的控制方法，如多变量解耦控制、自适应控制、模型预测控制、鲁棒控制和智能控制等。在处理系统结构与信息的基本策略方面，与实际系统的控制技术不无关系，从最初的DDZ单元式仪表，到工业控制计算机在工业系统中的应用，基本采用的是信息集中到控制器设计集中的策略。自20世纪70年代在大系统理论研究中提出了分层递阶结构，在底层回路采用实时控制，上层则由稳态模型优化计算下层的设定值，由此在实际工业系统中出现DCS控制技术，并在实际系统中得到广泛应用，其中在优化层采用模型预测

控制算法的为主。

回归实际被控系统的本质，任何实际系统都是由多个环节按照工艺流程相互连接而构成的，由于信息采集和控制器设计技术的限制，控制系统的结构与算法设计的基本策略也受到了很大的局限，基本上都是采用信息集中采集和利用的策略。由于现有的技术已经实现了信号传感、执行机构以及控制计算可以很好地对于局部子系统进行控制，控制模式正在从原有的集中式向着分布式模式转变，系统结构的复杂性的提高，以及工业生产过程的上述新特点，对现有的控制理论和方法提出了新的挑战。

2. 分布式系统预测控制算法

随着现代工业生产的发展，DCS、现场总线等技术的广泛应用和信息网络的建立，控制系统的结构越来越复杂，在炼钢、轧钢、炼油、发

电、造纸、化工等生产过程中,系统由许多局部子系统组成,在子系统之间,不但有物质、能量的流通,而且有大量的信息流通,子系统之间存在着复杂的关联。系统的外部环境和内部干扰是多变的、不确定的。同时对生产过程的优化目标提出了越来越高的要求,除了对单个生产装置或局部子系统实现优化控制外,追求整个系统的全局优化已是提高产品质量和降低成本的关键。传统的控制理论和方法一般将这类控制系统看作是一个多输入多输出的系统,用多变量系统的控制来概括,但是随着系统维数的不断增加,子系统之间关联复杂性的不断加强,采用传统的控制理论和方法已经不能满足现代工业生产实时性发展的需要。

2.1 分散控制结构

与集中控制相对的是分散控制,可以看出这是一种单级多目标的控制。其特点是:每个控制器仅获得大系统的一部分测量信息(子系统的信息),也只施加一部分的控制(对该子系统控制)。这种信息结构称为非经典的,每个控制器的地位是平等的,相互独立地进行工作。值得指出的是,在工业过程中对压力、温度等每个参数单独实施的闭环反馈控制,就属于这种控制方法,即把每个控制回路看成是完全独立的,而把外界的影响、关联等看作扰动而设法加以抑制。实际上各个子系统是互相关联着的,因此在关联紧密的大工业过程的控制中,有时会出现几个参数甚至整个过程的动态特性不好的现象。学者们认为分散控制的大系统缺乏稳定性,由于非经典信息结构的缺陷,一般只能得到次优控制(suboptimal control)。

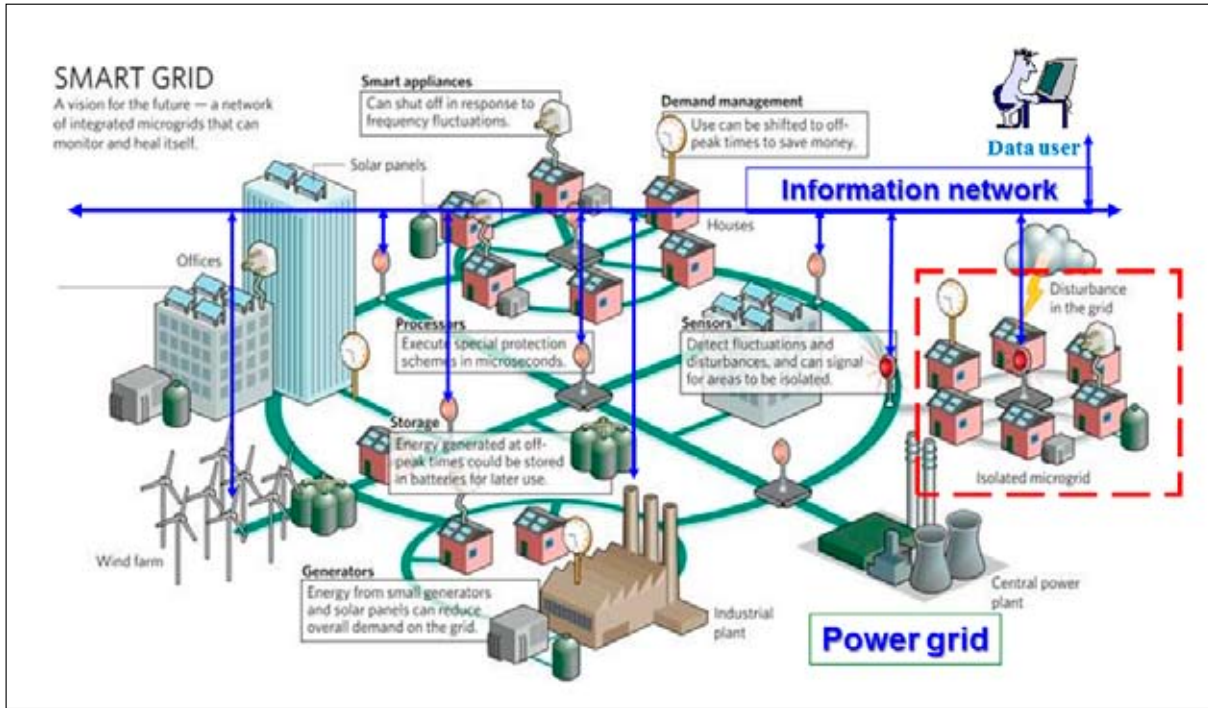
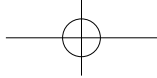
2.2 递阶控制结构

递阶控制主要包含多级和多层两种结构

形式。递阶控制是多级结构形式(multilevel structure)。这里每级都有控制器,递阶排列呈金字塔形。习惯上将高级的控制器称作决策单元,同一级的决策单元是平等的,它们相互独立并平行地工作,并且只接收各自上一级决策单元的指令;而上一级决策单元也不逾越下一级决策单元,直接干预更下一级的工作。对于最高层决策单元(称作协调器),它间接拥有大系统的全部信息,因此这种信息结构称为经典的。

在大工业过程中,计算机在线稳态优化控制常用的就是递阶控制结构。这样的递阶结构可分为三层:下层是实际过程(层),中间是直接控制层,上层是优化层。而优化层本身又是一个两级结构,由局部决策单元级(下级)和协调器(上级)组成。下层只受相应的上层直接控制,而同层或同级横向之间没有信息交换。

对于稳态工业大系统而言,稳态的工况决定着它的生产效益。例如,在设计大工业过程时总是将它的稳态工况处于效益最优的工况点,这称为最优稳态工况。稳态大工业过程的特点是:工况的短暂波动、偶发的外界扰动在子过程控制器的作用下很快回到原来的工况点或其附近。控制器设定点的变动和外界扰动引起的暂态进程与整个生产周期相比是很短的,稳态工况是影响生产效益的决定因素。工业过程稳态优化控制的目的是为了克服环境变化、各种原材料和触媒剂成分变化等因素形成的慢扰动,使工业过程运行于最优工况之下,以达到增加产量、减少消耗、提高产品质量的目的。稳态优化控制就是要在各种慢扰动作用下,在大工业过程的工况偏离最优点时,寻找甚至搜索这个最优工况点,并通过改变子过程控制器的设定点将大工业过程重新置于最优工况点。



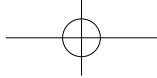
2.3 分布式控制结构

递阶控制系统对各系统的控制作用是按照一定优先和从属关系安排的决策单元来实现的，其立足点是离线优化设计，主要解决的是大系统高维性带来的计算上的困难。在现代工业生产环境中，由于DCS、现场总线的广泛应用和信息网络的建立，控制作为一种信息处理手段，已不限于集中式的控制，而更多地为分布式控制所取代。因此，大系统的分布式控制应运而生，其立足点是在线反馈控制，实现的方式是信息分散化、控制分散化。在分布式控制系统中，子系统之间可以进行有限的信息交换，这样不但可以减少信息处理量，快速地实现反馈控制，而且使得控制的可靠性、灵活性都有所改善。

3. 工程优化控制的展望

实际上，随着科技、经济和社会的发展，各应用领域对约束优化控制的需求日益增长，根据

对近年来在Automatica、IEEE Trans. on Control Systems technology、Control Engineering Practice、Journal of Process Control等刊物上大量预测控制文献的查阅，可以清楚地看到，一方面，人们对预测控制解决在线约束优化控制寄予很高的期望，试图用它解决各自领域中更多更复杂的问题，另一方面，工业预测控制算法的不足和现有约束预测控制理论的局限，又使人们在解决这些问题时不能简单地应用已有的理论或算法，必须研究克服其不足的新思路和新方法。这种需求和现状的矛盾，构成了近年来预测控制理论和算法发展的强大动力，从近阶段开展的研究和技术需求来看，可以大致归结为以下几个方面：(1) 数据驱动的预测控制器设计与系统性能评估；(2) 网络信息模式下分布式系统的预测控制；(3) 预测控制的快速算法与快过程的应用。欧盟也于2008年9月启动了针对工业系统预测控制的第七



框架“Hierarchical and Distributed Model Predictive Control of Large-Scale Systems” (<http://www.ict-hd-mpc.eu>), 结合工业系统特点的预测控制理论研究和技术开发一定能在经济和社会进步中发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 万百五, 黄正良. 大工业过程计算机在线稳态优化控制. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 李少远. 全局工况系统预测控制及其应用. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] Eduardo Camponogara, Dong Jia, Bruce H Krogh, and Sarosh Talukdar. Distributed model predictive control. IEEE Control Systems Magazine, 2002, 22(1): 44-52.
- [4] Katebi M R, Johnson M A. Predictive control design for large-scale systems. Automatica, 33(3): 421-425.
- [5] Shaoyuan Li, Yan Zhang, Quanmin Zhu. Nash-optimization enhanced distributed model predictive control applied to the shell benchmark problem. Information Sciences, 2005, 170(2-4): 329-349.
- [6] Yi Zheng, Shaoyuan Li, Ning Li. Distributed model predictive control over network information exchange for large-scale systems. Control Engineering Practice, 2011, 19: 757-769.
- [7] Riccardo Scattolini. Architectures for distributed and hierarchical Model Predictive Control - A Review. Journal of Process Control, 2009, 19: 723-731.
- [8] Christofides P D, Scattolini R, Peña D M and Liu J F. Distributed model predictive control: A tutorial review and future research directions. Computers & Chemical Engineering, 2013, 51(5): 21-41.
- [9] Hierarchical and distributed model predictive control of large-scale systems, <http://www.ict-hd-mpc.eu>

