

注重控制科学的方法论研究¹⁾

席裕庚

(上海交通大学自动化研究所 上海 200030)

(E-mail: ygxi@mail.sjtu.edu.cn)

摘要 通过对控制理论中解决复杂问题的若干典型例子的剖析,揭示了方法论思想在处理控制系统复杂性中的重要作用,指出了控制中的方法论思想是一种具有结构性的高层智能,它应在智能控制中占据重要的地位,同时也指出了通过复杂系统控制的研究发掘这类高层智能的重要性.

关键词 方法论,复杂系统,智能控制

中图分类号 TP242

PAYING ATTENTION TO THE RESEARCH ON METHODOLOGIES IN CONTROL SCIENCE

XI Yu-Geng

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(E-mail: ygxi@mail.sjtu.edu.cn)

Abstract In this paper the importance of methodologies in handling the complexities of control systems has been demonstrated through some typical examples of solving complex problems in control theory. We point out that the methodology in control is a kind of structural high level intelligence, which should play an important role in intelligent control. The importance to discover such high level intelligence through the research on complex control systems is also pointed out.

Key words Methodology, complex systems, intelligent control

1 引言

当前,信息科学与信息产业的发展迅猛异常,高性能计算机的出现和信息基础设施的建设,使人们获取信息和处理信息的能力大大提高,对生产力的发展乃至人类的社会生活都产生了巨大影响.今天,人们已不难获取和处理大量的信息,这固然意味着人们能做更多的事,但是用什么办法去处理信息以更好地满足经济建设和社会发展的要求,才是人们改造世界

1) 国家自然科学基金重点项目(69934020)、国家“973”计划(G19980304)资助

收稿日期 2002-04-17 收修改稿日期 2002-07-19

的最终目的. 自动控制作为一门以信息处理手段实现预定目标的科学与技术, 在当今的信息化社会中, 正在起着越来越关键的作用. 这种作用在计算机、网络给人类生活带来巨大惊喜的今天, 并未被人们充分认识. 正如国际自动控制联合会主席 Albertos 教授所说: “自动化学科是幕后、隐藏起来的学科, 要了解自动控制在生活中应用的重要性, 要让自动化、智能化的新概念深植人们脑中”(第三届亚洲控制会议记者访谈). 事实上, 世界范围内提出的以信息化改造和提升传统产业, 就是通过网络获取的信息和利用计算机处理信息的能力, 用自动控制中系统和优化的思想去解决传统产业中面临的种种难题, 以达到提高产量质量、降低能耗的目的. 而在航空航天、交通、环保、农业乃至社会、经济、金融等广泛领域, 当人们大量地占有信息后, 自然也需要应用控制的思想和方法指导对信息的有效处理, 以便把事情做得更好. 可以说, 在当今社会中, 控制科学和技术起着相当于人脑的作用, 正面临着社会信息化飞速发展所带来的空前挑战和机遇.

控制学科是信息科学的组成部分, 但它与通信、计算机等其它学科相比, 更具有基础性, 因为它研究的是如何通过有效的信息处理, 更好地实现我们的目标. 控制的理论和方法不是针对某一类具体对象的, 而具有广泛的适用性, 这已为制造、电力、核工程、航空航天等广泛领域中自动控制所发挥的作用所证实. 控制学科的优势在于它的方法论思想对其它学科广泛的指导意义, 方法论作为控制科学最本质的层次, 始终蕴育并指导着新的控制理论和技术的产生和发展, 因而是控制中原始创新的源泉. 例如, 控制论的核心“反馈”就是一种概念和方法; 而用系统工程方法解决大规模工程设计问题、用分解协调方法解决大系统的复杂关联问题、用自适应方法解决对象参数不确定变化问题等, 均是典型的例子. 掌握了这些方法论, 我们不但能解决所提出的具体问题, 而且可向更广阔的领域延伸, 甚至可以开辟出新的研究领域. 要迎接当前社会信息化带来的挑战, 控制界不能仅仅满足于在原有的控制理论上做精细化的工作, 而应更多地从社会发展和经济建设的各种需求中提炼出共性问题, 探索解决这些问题的方法论思想, 研究实现这些方法思想的具体算法和相应理论, 并进一步与具体领域的问题相结合予以实现. 这种以实际需求驱动、以方法论为指导、紧密结合各领域具体问题的基础性研究, 将为原始创新提供广阔的空间.

本文通过对控制科学中解决复杂问题的若干典型例子的剖析, 揭示了方法论思想在处理控制系统复杂性中的重要作用, 指出了控制中的方法论思想是一种具有结构性的高层智能, 它理应在智能控制中占据重要的地位, 同时也指出了通过复杂系统控制的研究发掘这类高层智能的重要性.

2 用标准结构对高维大系统模型简化

高维大系统是一类具有空间复杂性的系统, 这类系统的分析、设计与控制在原理上可以沿用传统的控制理论, 但在实际上却因高维性引起的巨大计算量而不可行. 大系统的模型简化旨在通过降低动态系统的维数减少系统分析、设计与实时控制的困难. 模型简化虽然以降低维数为目标, 但必须以保持系统的某些动态特性为前提. 大系统模型简化的研究已有很长历史, 出现了以集结法、摄动法为主的时域降阶方法和各种频域降阶方法, 虽然这些方法有着不同的表达形式, 但其中不少都有相同的机理^[1].

模态集结法以保留系统的主要模态为目的,为此,它首先通过模态变换将原状态方程变换为 Jordan 型,这种形式最直观地对系统的所有模态进行了分离,排出了主次,在此基础上,只需取出该方程中相应于主要模态的一部分,就可得到简化模型.

链集结法则以保留系统最直接可观测的状态为目的,其做法是将状态方程变换为广义 Hessenberg 型,在变换后的新状态中,每一局部状态只受到其相邻状态的影响,而系统输出正是其第一部分的状态.这样,系统的全部状态就被划分为一系列子状态,后面的子状态必须首先影响前面的子状态,通过一系列链才能最终影响输出.一经变换成这种形式,模型简化只需以适当手段舍去后面的状态即可.

在频域简化中,若要保留系统的低频特性,可把传递函数在 $s=0$ 处展为幂级数,幂级数的各项因子随着 $s(j\omega)$ 幂指数的升高在低频时的作用逐次减弱,特定的连分式也可使其展开后的系数相对于未展开部分在 $s=0$ 处总是主导的.这样,就产生了 Pade 展开和连分式降阶法.若要保持系统的稳定性,则可首先将传递函数展成以稳定性 Routh 系数组成基本环节的 α - β 连分式,适当截断后,因 Routh 系数保持不变,稳定系统降阶后仍保持稳定,这就构成了 Routh 降阶.

可以看出,上述模型简化方法都有共同的方法机理,即针对简化目的,首先对系统的状态方程或传递函数进行规则的变换,这种变换虽然只是一种等价变换,并未涉及到简化,但通过变换得到的系统表达式已具有某种与简化目的相适应的特定结构,已把我们所关心的系统主要特性直接、有序地表达在标准结构中.在此基础上,只须在适当部位截断或匹配,就可得到原系统的简化模型.显然,这里的要点并不在简化,而是首先针对简化目的寻找对应于系统特征的标准结构.在这种标准结构下,模型简化只是举手之劳,见图 1.

这一方法机理不仅是上述模型简化方法的指导思想,而且还可用来处理其它问题.例如系统的快慢时标分离,就是通过把系统描绘成奇异摄动系统的形式,用摄动方法不断削弱快状态中的慢模态,然后再通过变换不断削弱慢状态中的快模态,达到快、慢模态的分离.在整个迭代过程中,我们始终采用了同样的标准结构,它虽然未涉及到模型简化,但也贯穿了同样的结构思想.

3 用分解-协调处理关联复杂性

分解-协调原理是大系统理论的重要组成部分,它用于克服系统中复杂关联所带来的求解困难.实际上,它广泛适用于所有关联系统,只是对高维关联大系统更有必要而已.例如,对于动态大系统最优控制问题,通过将大系统分解为子系统和对关联项作出适当的假设,可以把大规模整体最优问题简化为求解多个小规模子最优问题,从而大大降低了计算的复杂性,而通过上层协调,又可逐步使解接近原最优解.模型协调法、目标协调法等都是著名的分解-协调算法,见图 2.

大系统理论是建立在成熟的控制理论基础上的,上述算法都有其控制理论中的具体

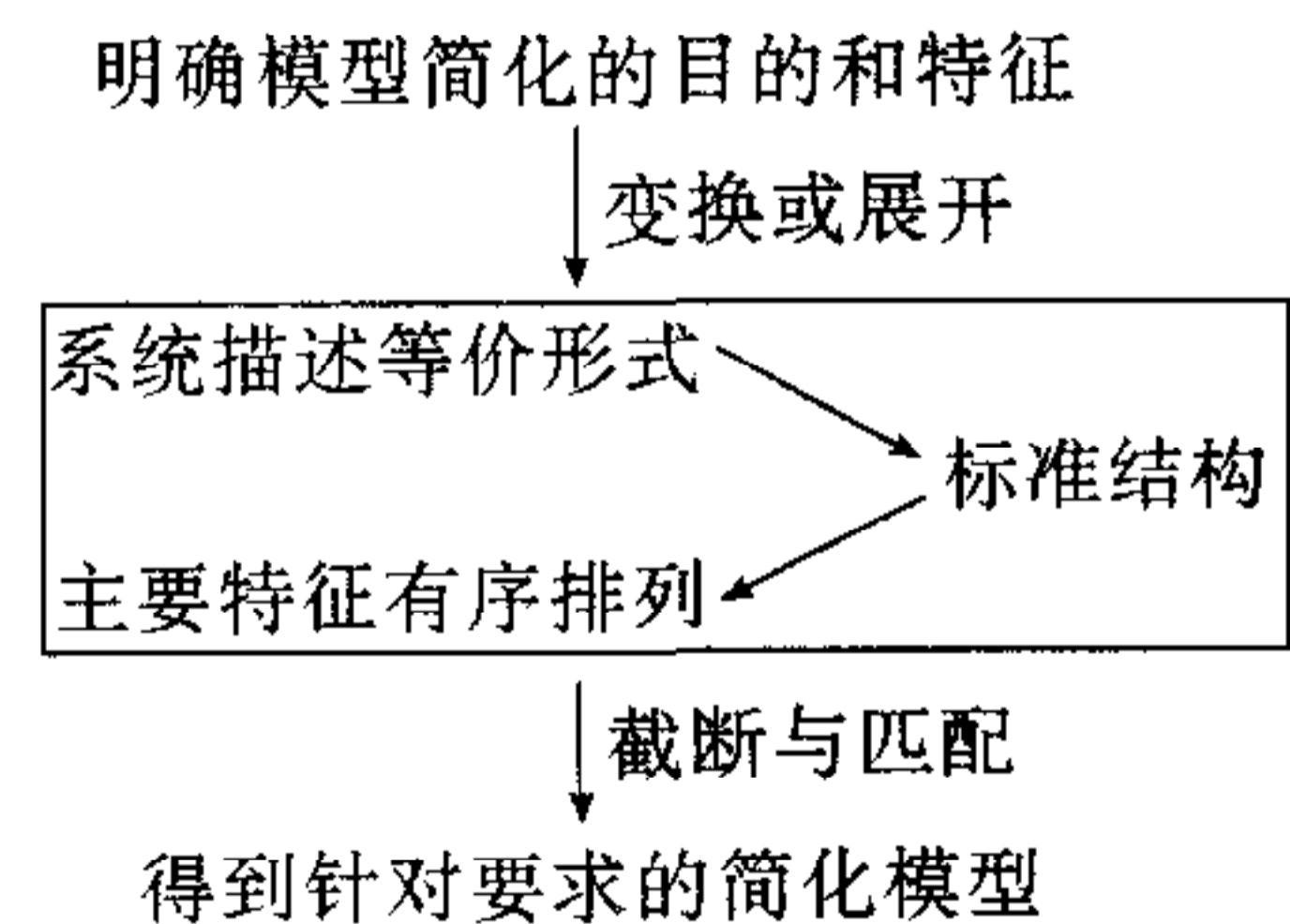


图 1 大系统模型简化的一类方法机理

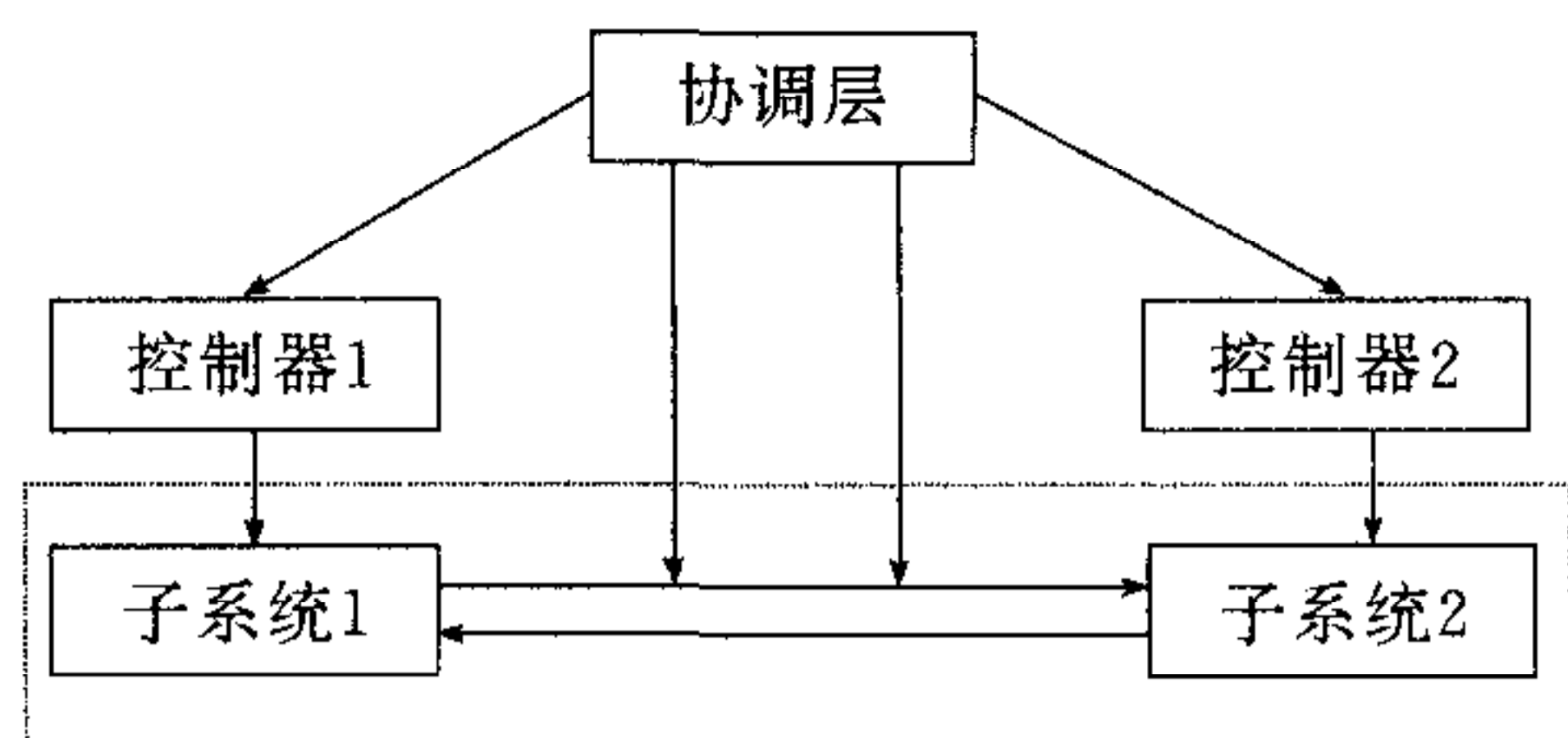


图 2 解决关联复杂性的分解-协调方法

描述和理论基础,它们在降低问题求解的空间(维数)复杂性方面,体现出独特的优点,但实际上,这些算法中蕴含的分解-协调原理是一种具有一般意义的方法论思想,即如何通过相对固定系统中复杂的关联来降低问题求解的复杂性,同时又如何使关联摆脱相对固定使问题回复.这种思想并不局限于仅仅处理空间的关联复杂性.大系统理论的发展已证实了它的普适性,例如,对于离散时滞系统的 Tamura 两级算法以时间方向分解取代了空间分解,这是因为这类系统的状态在时间方向上的关联要比空间关联更难于处理.对于非线性系统的预估迭代算法则更是摆脱了时间、空间的分解概念,而是把非线性项作为线性系统的附加复杂关联项,通过对其相对固定使问题求解得到简化.当然,在发展每一种算法时,都会涉及到一系列具体的理论问题,但至少说明了这一方法并非必须以通常理解的空间分解-协调方式出现.

大系统理论的研究者已经给出了系统分解-协调的两种具体方法机理:非现实分解与关联平衡原理,以及现实分解与关联预估原理.前者立足于将关联切断,成为不同子系统无因果关系的独立输入与输出,并以两者最终平衡(相等)为协调的准则;后者则将关联输入输出看作因果关系,在求解问题时以输入为因,输出为果.在协调时以输出为因,输入为果,体现了预估迭代的思想,这两种方法机理都可以用结构框图描述,但又在较抽象的层次上,并不用具体的算式表达,甚至只用语言来描绘其实施过程,但一旦应用于具体系统,就可形成各种递阶控制算法,它不仅适用于静态大系统,而且适用于动态大系统,不仅适用于空间关联的系统,而且还适用于时间方向关联的系统,甚至非线性关联系统.

大系统理论的研究者已经给出了系统分解-协调的两种具体方法机理:非现实分解与关联平衡原理,以及现实分解与关联预估原理.前者立足于将关联切断,成为不同子系统无因果关系的独立输入与输出,并以两者最终平衡(相等)为协调的准则;后者则将关联输入输出看作因果关系,在求解问题时以输入为因,输出为果.在协调时以输出为因,输入为果,体现了预估迭代的思想,这两种方法机理都可以用结构框图描述,但又在较抽象的层次上,并不用具体的算式表达,甚至只用语言来描绘其实施过程,但一旦应用于具体系统,就可形成各种递阶控制算法,它不仅适用于静态大系统,而且适用于动态大系统,不仅适用于空间关联的系统,而且还适用于时间方向关联的系统,甚至非线性关联系统.

4 以滚动优化实现不确定环境下的控制与决策

预测控制是 20 世纪 70 年代产生于工业过程控制领域的一类新型控制算法,它在炼油、化工、电力、轻工、医药等广泛领域的过程控制中得到了成功的应用,被公认为是为数不多的有效的先进控制策略之一.预测控制成功的关键在于其原理适应了复杂工业环境中信息不确定性的特点.事实上,传统的控制理论已提供了足够有力的手段去寻求模型、环境精确已知时的最优解,但当这一假设前提不成立时,我们是否可以从追求最优的完美理论往后退一些,去寻找方法机理上的改变途径呢?在预测控制的例子中,这种“回归”使人们重新发现了朴素的思想.由于不确定性的存在,预测控制通过滚动优化并结合实时信息的反馈校正,使每一时刻的优化建立在过程实际的基础上,从而顾及了动态环境的变化和过程的不确定性.正是用这种反复进行的有限优化代替了一次全局优化的结果,使预测控制在过程中实现了优化和反馈的合理结合和对信息的充分利用.这体现了人们在信息不确定、不完全、环境多变的复杂情况下进行优化控制的一种思想方法.实际上,早在 1978 年,预测控制的创始人之一 Richalet 就在预测控制的经典论文^[2]中,专门论述了预测控制的方法论,指出其基本思想在某种程度上十分类似于人类在利用外部世界在人内部形成的模型时所进行的操作.

当预测控制算法中蕴含的方法机理被人们清楚地认识到后,不仅为预测控制本身提供了广阔的发展余地,而且对于不确定环境下以优化为目标的其它动态决策问题,也提供了一

种新的思路. 它启发我们通过滚动而有限的局部决策取代一次性的全局决策, 来换取对于环境中不可预料因素的适应性. 文献[3]已深入剖析了预测控制的方法论思想, 并将其推广到动态不确定环境下包括规划、调度、决策、监控等在内的广义控制问题, 提出了场景预测、滚动窗口优化、反馈初始化三条广义原理. 在此原理指导下, 文献[4, 5]分别研究了 Job Shop 滚动调度问题和移动机器人滚动路径规划问题, 见图 3. 预测控制原理的广义化不仅为求解相应领域的问题提出了新的思路和算法, 而且由于这些问题的求解有共同的方法思想, 预测控制理论研究中的相关成果还可从方法上为研究滚动规划、滚动调度中可达性、收敛性、次优性等提供借鉴. 此外, 这种滚动优化的思想还可推广应用到离散事件动态系统监控、信息网络实时优化等其它领域. 事实表明, 这种滚动优化的方法是控制论中优化和反馈机制的合理结合, 对处理信息不完全、环境不确定的复杂动态优化问题有着特殊的针对性.

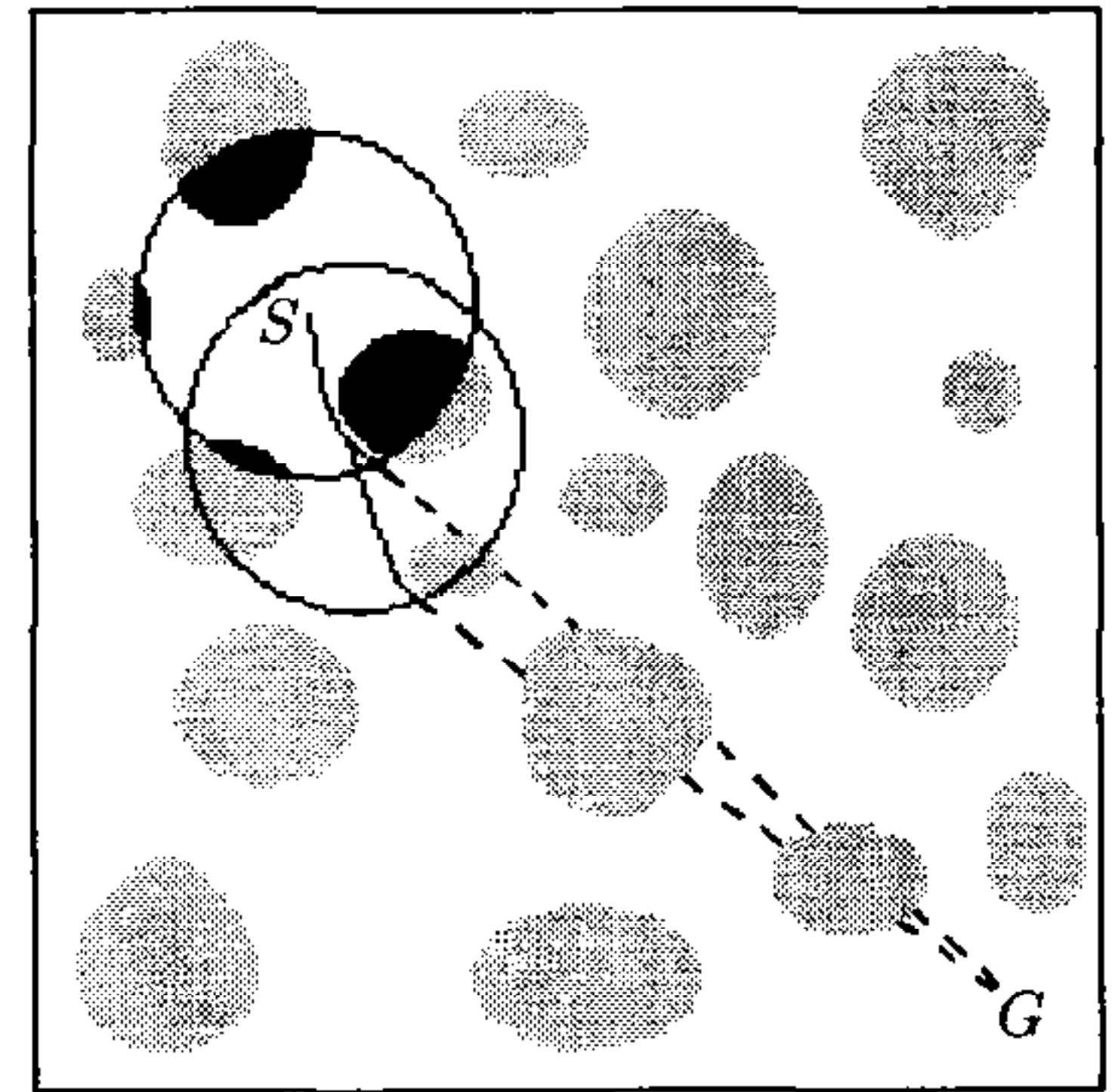


图 3 机器人的滚动路径规划

5 方法论与智能控制和复杂系统控制的关系

在现有的控制理论中, 类似上述例子的方法论思想还可举出很多, 如针对对象参数时变的自适应控制、用简单非线性逼近复杂非线性的神经网络等等. 从这些例子均可看出, 控制理论发展的许多成果虽然常常以具体的算法形式表现出来, 但在更深层次上是由各种高层智能驱动的. 这些高层智能脱离了具体算法和工具, 但反映出算法的机理和结构. 如果说面临的问题是“*What to do*”, 算法是“*How to do*”, 那么它们解决的是“*Why to do*”的问题, 因而带有更强的结构性和普适性, 并在描述上更为抽象, 它们不但有助于理解原有的算法, 而且有可能嵌入新的工具或推广到同类性质的新问题, 衍生出各种新的算法, 从而提供了在一定程度上创新的基础, 这就像一棵树上的分支一样, 一方面连接着代表一般哲学和控制论的主干, 一方面又结合着各种工具和应用环境, 展现出更细的分支和果实, 如图 4 所示. 对于控

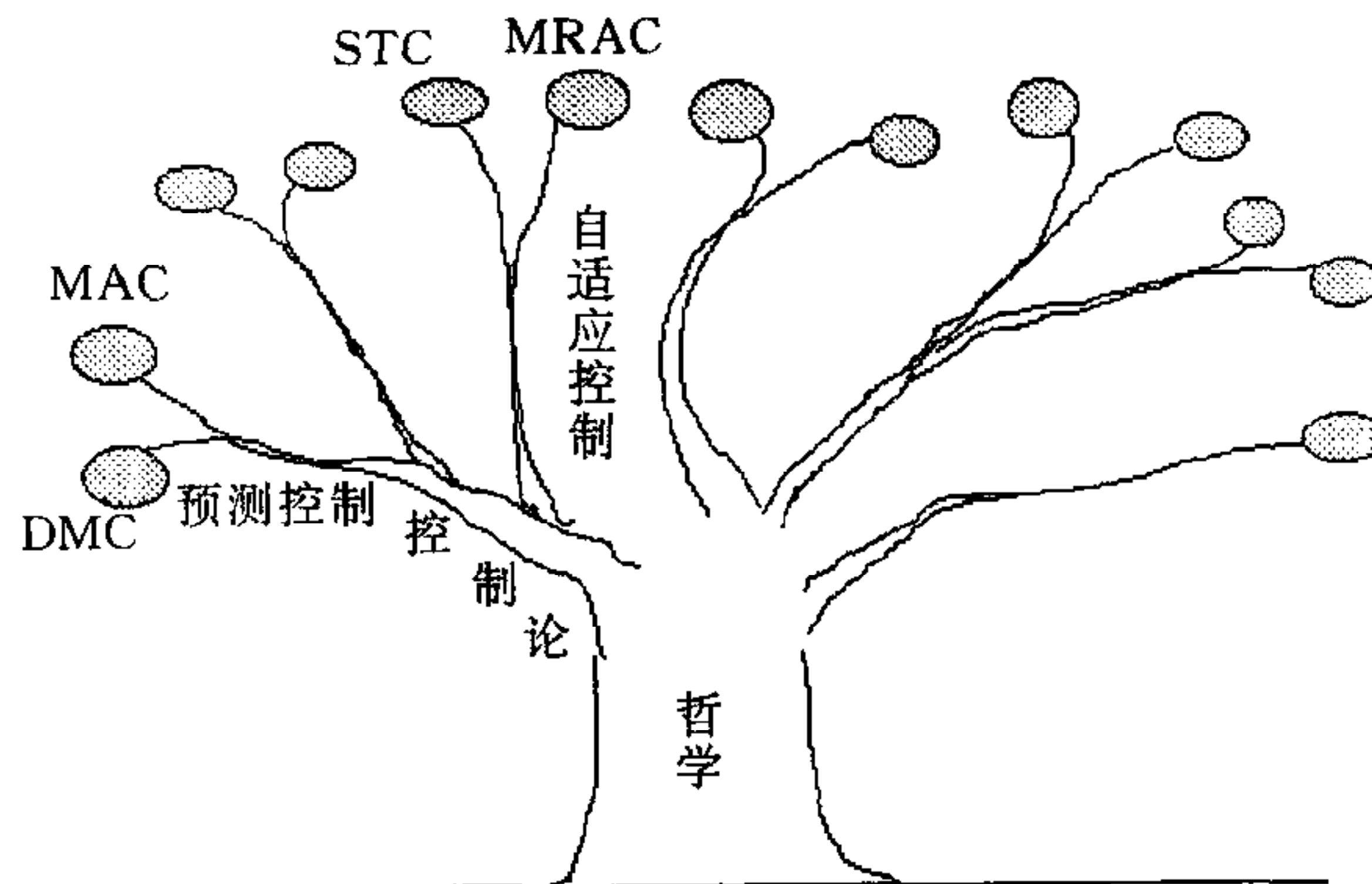


图 4 控制科学的结构层次

制科学来说,停留在主干上是远远不够的,必须不断深入到各种果实,才能为应用服务.但同时应该指出的是,仅仅注意各种果实,而不去注意为这些果实提供营养的分支,也是不够的.当我们深入到某些果实之后,是否还应该回溯到连接它的分支,看看在这一分支上是否可能结出新的果实.这样,控制科学才能保持旺盛的生命力.

控制理论已经经历了公认的两代的发展,对于今天仍十分热门的智能控制理论的地位,至今尚无定论.但是至少有一点可以肯定,作为新一代控制理论,它无论在研究工具和研究内容上,都应有别于前两代控制理论,而不应在同一层次上仅仅用不同的工具去研究同样的问题.现代控制理论之所以被认为是第二代控制理论,主要在于它打破了经典控制理论的“黑箱”,深入到系统内部建立了“状态”概念.“状态”虽然比输入输出抽象,但它更能有效地刻划系统的各种性质,从而使人们对系统的认识更为透彻和深刻.在这个意义上看,新一代控制理论也应比传统控制理论具有更高层的智能,应在现有控制理论基础上向控制论的一般原理更接近一个层次,同时能指导和覆盖现有的控制理论和方法.因此,我们认为智能控制应该充分重视方法论这类高层智能的研究,注意从现有的控制理论中去发掘其中蕴含的方法论思想,并逐步建立起研究它们的理论体系.只有这样,才能不断充实和提高智能控制理论,推动其向新一代控制理论发展.

另一方面,控制方法论的研究与复杂系统控制的研究也是紧密相关的.20世纪90年代以来,控制界面对社会大生产的发展及科学技术的进步,提出了复杂系统的控制问题,并开展了卓有成效的研究,在许多分支领域取得了相当丰富的研究成果.但是,目前在复杂系统控制的研究中,对控制机制或方法论的研究还没有得到足够的重视.事实上,在复杂系统的控制问题中,各种特有的复杂性迫使我们更多地思考解决问题的新方法和新结构,这比常规系统的控制有更多的机会去发现或激发出带有方法论特征的智能思想,因此,复杂系统控制的研究将有力地推动控制方法论的研究.但是,复杂系统控制理论的研究若是不注意提炼和发展那些针对特定复杂性的有效方法,不是在融会贯通的基础上用它们去探索解决问题新的途径,那就很难得到具有较高原创性的成果.因此,复杂系统的控制问题首先要解决处理复杂性的方法论.这种方法论研究不是抽象的、哲学意义上的,而是控制领域中针对特定的信息环境和任务要求所提出,并能通过具体的技术规范 and 算法予以实现,最终用来解决各类现实的控制问题的.从方法论角度来研究复杂系统的控制问题,就是针对某类特定的复杂性,提出或从已有的具体成功算法中挖掘出解决此类问题的“聪明”办法,以此改善原有算法并解决那些面临同样复杂性的其它类型的问题.可以预料,控制方法论和复杂系统控制问题的这种互动作用,必将有力地推动两者的发展.

如果把控制方法论的研究理解为针对控制问题特定复杂性探索解决的方法与结构,那么目前的困难在于,尚没有一种统一和公认的工具来描述它们.尽管如此,在当前活跃的控制领域中,我们还是看到了苗头,例如,在 DEDES 的研究中,采用形式化语言描述监控过程;采用 Petri 网描述动态系统等,都已经脱离了应用传统数学方程的建模概念,而在面向大规模生产过程的 CIMS 研究中,刻划系统结构的各种方框图、流程图更成为描述系统必不可少的模型.一组精心编制的投影片虽然只摘取了论文的部分内容,但有时它对听众的启发远远胜过听作者将全文阅读一遍,这些都表明,刻划方法、结构的各种有效工具都在蕴育之中,虽然它们现在还不那么明朗.

6 结语

控制科学是一门研究如何通过有效的信息处理实现人们期望目标的科学,它的优势就在于解决各种特定复杂性的方法论思想对于其它学科的广泛指导意义. 本文通过若干实例分析,指出了从现有控制理论中提炼、发现这类方法论思想的重要性以及进一步用它们发展创新的可能性,从而指出了控制科学方法论研究的重要性. 同时我们认为,智能控制必须把研究控制方法论,即处理各类复杂性的智能思维模式作为其向新一代控制理论发展的重要内容,复杂系统控制的研究与控制方法论的研究是紧密相关、互动发展的.

参 考 文 献

- 1 席裕庚. 动态大系统方法导论,北京:国防工业出版社,1988
- 2 Richalet J *et al.* Model predictive heuristic control, applicaions to industrial processes. *Automatica*, 1987, **14**(5):413~428
- 3 席裕庚. 动态不确定环境下广义控制问题的预测控制. *控制理论与应用*, 2000, **17**(5):665~670
- 4 Fang Jian, Xi Yu-Geng. A rolling horizon job shop rescheduling strategy in the dynamic environment. *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 1997, **13**(3):227~232
- 5 张纯刚,席裕庚. 全局环境未知时基于滚动窗口的机器人路径规划. *中国科学(E辑)*, 2001, **31**(1):51~58

席裕庚 1984年于德国慕尼黑工业大学获博士学位,现为上海交通大学教授,博士生导师. 研究方向为预测控制理论、机器人路径规划与控制等.