



系统控制漫谈

控制科学漫谈 —— 基本思路 and 观点

席裕庚 上海交通大学

按：这些年来，笔者在控制领域的各种交流活动中，学习到不少人们表达控制问题的清晰思路，但同时也遇到过在动因、内容、结果方面逻辑不清、难以理解的交流表达。无论正面还是反面，都给人以启发，令笔者深感控制论的基本思路 and 观点对于准确理解、分析和解决控制问题的重要性。本文就这方面的一些思考与大家交流，不当之处，期待大家批评指正。

1. 解决控制问题的思路

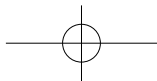
疫情期间，人们常说社区的保安成了哲学家，他们遇人必问：“你是谁？”“你从哪里来？”“你到哪里去？”，这些问题确实是人生哲学的终极思考。在我们控制领域，有没有一些对于控制哲学的类似思考呢？

控制科学是对实际问题提炼其信息特征后应用抽象的一般工具（如数学、逻辑）开展研究的科学，问题的现实性和工具的抽象性常常并存于控制问题中。这种双重性需要我们有一种“身临其境”的思维方式，就是从考虑控制问题的一开始就把“我”放进去，逐一思考下面这些控制的“终极”问题：

我在哪里？即我们（虚拟）站在什么位置、

以什么视角观察对象的什么内容？当我们面临实际生产过程时（图1左），首先需要明确自己站在哪一层，关注的是什么属性，是在装置或设备层关注物料从输入到输出的数量、属性变化，还是在信息处理层关注过程物理量（如温度、压力、速度等）的变化，或是在经济管理层关注该过程在一段时间内的投入产出。而当我们面对着控制系统的方框图开展研究时（图1右），同样应该首先明确我们在方框图中什么位置，哪些方框是我们面临的客体系统（对象或已控制的对象），哪些方框是我们准备描述或设计的。

我要做什么？即我们面临的系统要解决什么问题、控制的目标是什么？对这一问题的回答不应该停留在概念层面上，而要把概念延伸为具体



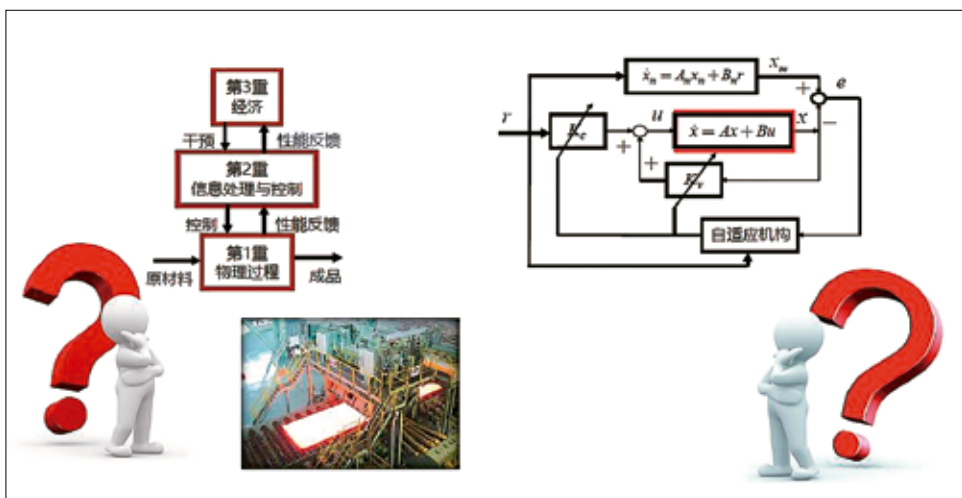


图1 我在哪里?

的目标。例如仅仅说我希望使过程在工作点稳定运行是不够的，还要接着问：在工作点稳定运行是什么意思，是通过哪些变量、要满足什么要求来体现的，这种追问一直要到所提出的要求落实到对某些被控量给出具体的定量描述的要求才能停止。

我知道什么? 即在我们面临的系统中能获得什么信息，这些信息中哪些与控制目标中的变量有关？哪些信息是参数信息？哪些是变量信息？哪些信息可事先知道（离线获得），哪些信息需要在过程中以一定的时间频度获得（在线信息）。

我能做什么? 即在我们面临的系统中通过哪些物理单元可以改变与控制目标相关的被控量？这些单元是通过哪些输入变量施加到系统中、以何种定量方式影响被控量的变化？这些输入量自身受到什么限制？如何描述？

我怎么做? 即如何设计这些施加的输入量使被控量的变化达到期望的要求？如何检验控制设计是否达到了原定的目标？

在这些问题中最重要的是“我在哪里”，这是考虑控制问题的基本定位，只有定位明确了才能准确描述问题、分析系统和设计控制。例如在多

智能体协作问题中，虽然对象都是独立智能体组成的系统，都打着“多智能体协作”的大旗，但面向多智能体群体设计信息受限的智能体协议（控制律）、研究群体的“涌现”行为，与面向异构智能体、设计不同的控制律以实现整体目标，定位是不同的。它们分别从整体论和还原论的思路出发，体现了研究者位于不同层面的视角。

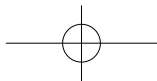
“身临其境”地进入控制的层面、思考控制的具体目标，观察控制的信息环境和可执行能力，分析被控系统自身的因果链和变化规律，最后设计控制单元、实现被控系统按目标需要的改变，是贯穿整个控制过程的“供应链”，可以使控制问题从提出到解决的全过程既能利用抽象、严密的数学逻辑工具，又能紧密联系真实和丰富的物理世界。

2. 系统的观点

所谓系统的观点，就是关注系统的整体构成和相互关系，通过系统的结构框架从宏观上把握其结构特点，理解控制系统的设计思想。

控制与系统的关系

控制与系统相伴相随。控制是针对系统的，



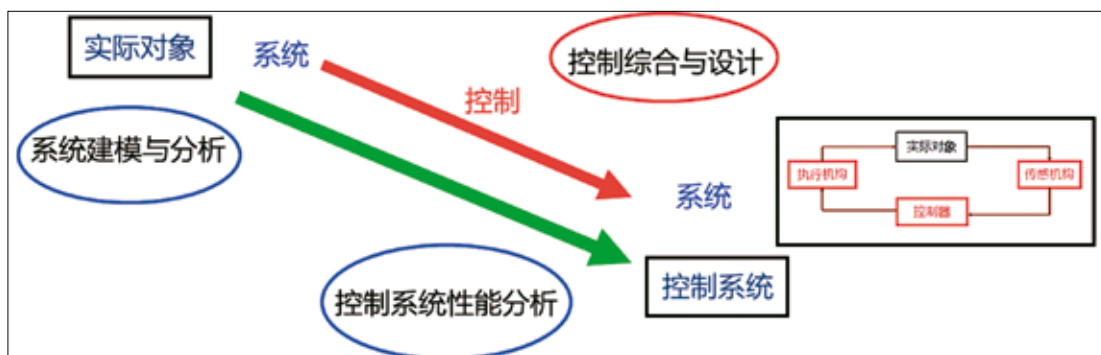


图2 系统与控制相伴相随

控制实施后构成的也是系统，为此，我们常用“被控对象”和“控制系统”这两个不同的称谓加以区分。其实，控制就是要把系统（对象）改变为符合要求的新系统（控制系统），系统是控制的出发点和结果，而控制是系统实现目的性的途径，见图2。

鉴于这种关系，系统更强调对事物本身的认识和理解，特别关注各类不同系统的普适性共同规律，如系统建模与分析、控制系统性能分析，而控制更强调事物的改变，特别关注针对不同系统实现特定目标的通用方法，如控制综合与设计。

通过结构分析把握物理系统的特点和全局性规律

在分析具体的控制问题时，首先需要从宏观上对系统的结构和信息进行梳理，把握系统的整体结构特点。特别是对于组成单元多、关联复杂的系统，通过结构分析，可以理清其各组成单元相互的关联关系，看清哪些单元是相互影响的，哪些单元受到另一些单元的影响，根据不同的结构特点，在分析和设计控制系统时可采取有针对性的策略，例如互不关联的单元可以分别独立处理，单向关联的单元可以顺次处理，从而降低分析与设计的复杂度。

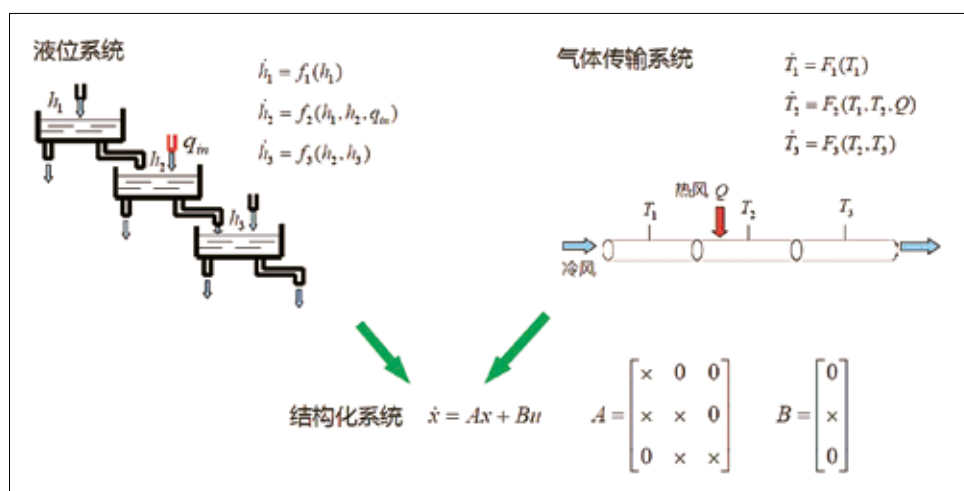


图3 不同物理系统的相同结构化表示

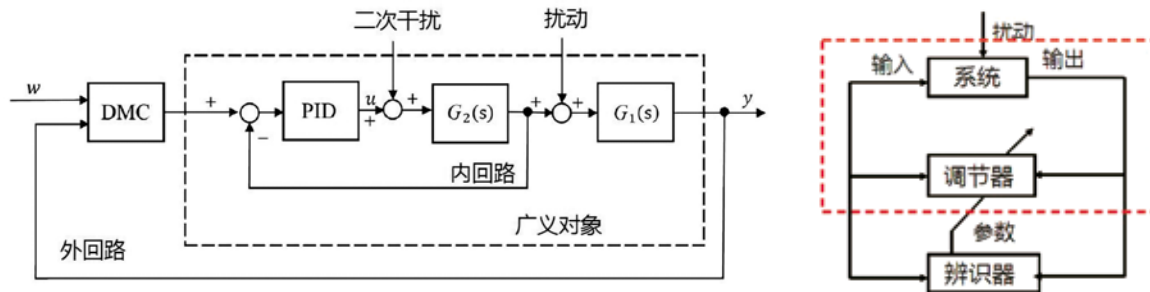


图4 串级控制（左）与自校正控制（右）的结构框图

结合动态因果性的系统结构分析，还可以帮助我们解决控制系统设计中一些全局性的问题，例如对于系统结构可控性和结构可观性的分析，可以针对不同物理系统在结构上的共性特点研究其在本质上（即不考虑参数特殊性）是否可控可观，见图3，并进而给出控制系统中传感器和执行器的合理配置方案。近年来在复杂网络牵制控制研究中结构可控性发挥的重要作用也正说明了系统越复杂，对系统结构宏观分析的意义就越大。

根据系统的控制结构理解控制设计的核心思想

控制系统的结构框架往往反映出所采用的控制思想，例如开环控制和闭环控制是两种不同的控制结构，闭环控制虽然比开环控制只增加了一条反馈信息通道，却催生了整个反馈控制理论。图4左面的串级控制结构是先进过程控制的常用方法，体现了把过程中间变量反馈形成副回路克服二次干扰、用被控量反馈形成主回路实现跟踪的独特思想。图4右面的自校正控制是在原有的反馈控制基础上，增加了系统辨识和控制器参数校正，形成了新的控制结构，推动了自适应控制理论的发展。此外，如递阶控制、分布式控制等新的控制方法，也首先是体现在其特定的控制和信息结构中。用系统的观点从宏观上观察控制系统的结构，既有助于理解已有控制设计的核心思

想，也可启发我们针对问题的需要提出新的控制思想，设计出更有效的控制结构。

3. 动态因果性的观点

在控制论中，我们主要关心具有因果性的动态系统，静态关系只是作为其特殊的状态出现，控制论研究的问题必定与系统随着时间的演化过程相关。

动态系统因果性是控制设计的基础

动态因果性着眼于观察物理量的因果关系，例如熟知的牛顿第二定律 $F=ma$ ，从物理学角度看是力与质量、加速度的关系，但从动态因果性的观点来看，可理解为：

$$\dot{x} = v$$

$$\dot{v} = F / m$$

它表示力引起物体速度的改变，而速度的变化又引起位置的变化。

在对动态系统进行控制设计时，首先要明确

— 控制目标变量的变化是有原因的，只有改变其原因才能实现控制目标。

— 原因量中有些可以人为加以改变（可控），有些不能人为改变（不可控）。

— 动态系统的因果关系不但有先后的逻辑次序，而且是动态变化的过程。

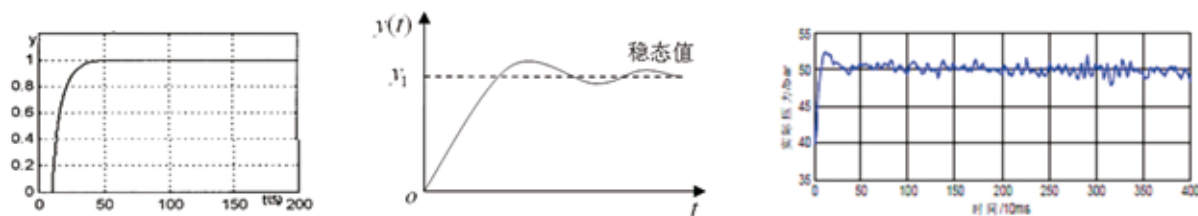


图5 动态因果性的限制决定了控制不能尽善尽美

— 控制的任务是根据对结果的要求, 研究其原因应如何改变并加以实施。

用动态因果性的观点考虑控制设计, 可以比作是设计脚本、展开场景 (Scenario), 就是从因果链的源头开始, 分析当对可控原因量的动态变化做出某种设计后, 结果量会如何动态演化, 直至最后与控制目标有关的结果量会如何动态演化, 能否达到控制的目标, 这是从信息角度对被控对象内部动态演化机制与过程的深度思考。

动态因果性决定了控制不能随心所欲

控制所面临的客体对象是一个按照自身规律动态变化的对象, 控制不是去改造客体对象自身的演变规律 (这可能是其他工程学科中改进工艺、设备、器件等的任务), 而是针对已经存在的客体对象, 采用信息手段改变其输入, 使对象按我们所要求的方式演化

由于受到因果律的制约, 我们对控制结果的期望不能随心所欲, 例如图 5 中

— 对象自身的因果律无法改变, 如滞后。

— 控制的算法和实施的物理条件受到限制, 无法抵消对象的因果性关系, 如简单的控制律可能难以消除系统的固有振荡。

— 不可控原因可能是不可知或不确定的, 对结果会产生不期望的影响, 如随机扰动。

所以, 无论何时, 不要设法去实现违反动态因果律的目标, 如果在仿真中出现了消除这些“瑕

疵”的好结果, 那一定是仿真程序出了错。

4. 反馈的观点

反馈概念广泛存在, 控制论中的反馈是对生物、机器、社会领域中这一普遍原理的总结和提炼, 反馈首先需要获取与控制目的的相关的量的实际信息, 但它不是单纯的信息获取, 更重要的是要进行反馈信息的加工, 设计控制达到期望的目的。反馈已成为控制论的基本原理和核心概念。

反馈是控制论原理实践性的体现

反馈是实际系统信息向控制者的传递。之所以需要反馈, 是因为实际系统存在着种种不可知因素和不确定性。依靠先验信息的控制设计, 不论这种设计多么优秀, 结果多么完美, 都只存在于设计者的头脑之中, 而将此设计“落地”时, 实施结果却往往偏离理想情况。反馈为我们提供了系统的实时信息, 可以使我们发现这种偏离, 并把控制设计调整到系统最新实际状况的基础上。反馈的前提是要有必要的检测手段获取系统的实际信息。根据时间标度的不同, 可以实现不同频繁度的反馈。

反馈传递的信息成为控制设计的依据, 从而形成了从结果到原因 (期望的状态到应施加的输入) 的逻辑因果链, 它与物理系统的因果链一起构成了闭环的控制系统 (图 6)。



图6 对象的物理因果链和反馈的逻辑因果链组成了闭环控制系统

真反馈还是假反馈

判断反馈能否克服不确定性，首先需要观察是否存在从某些对象实时信息到控制器输入的通道，即反馈信息是否实时来源于客体对象，而不取决于其是否表达为状态、输出等。例如，仅仅来源于模型的状态“反馈”仍然只是设计者头脑中的虚拟“反馈”，在对象存在不确定性时，不能

真正起到发现偏差、纠正偏差的作用，见图7左图。当然在信息无法获取时，有时也会用模型或历史数据推演的信息进行反馈，但它不能与真实对象构成闭环，无法消除不确定性的影响。

有了反馈，并不意味着我们就完全“脚踏实地”了。反馈信息取自何处，决定了反馈对消除不确定性影响的程度。例如在自主小车行驶过程中，我们可以通过码盘计数器计算其到达的位置，确定其离目标点还有多少距离（图7右图）。但因为这一反馈信号只取自小车的驱动部分，当小车行驶在不平坦路面时，很可能由于车轮打滑等原因导致其实际移动距离和码盘计数距离不一致，使这一反馈信息得到的结果不够可靠。所以，反馈信息应尽可能直接取自我们所关心的物理量。当然，这取决于是否有有效的检测手段。

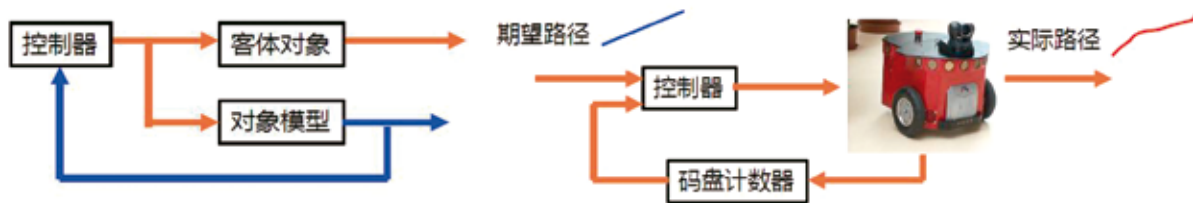


图7 头脑中的“虚拟”反馈（左）与非目标信息的反馈（右）

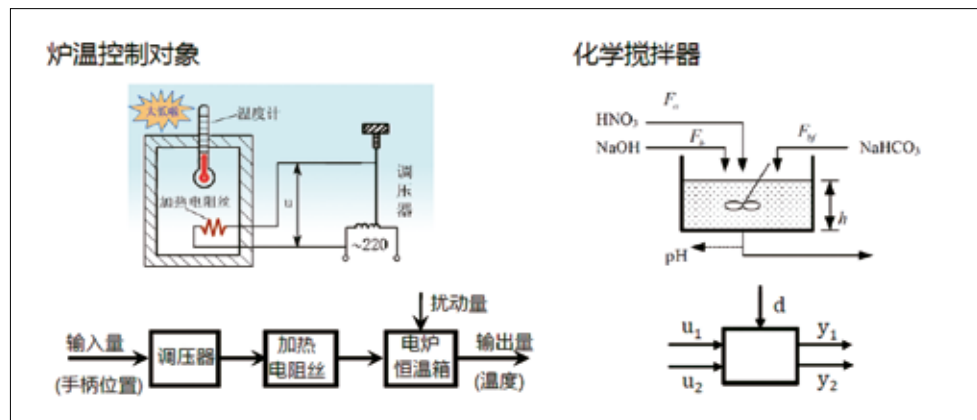


图8 物理系统的信息描述

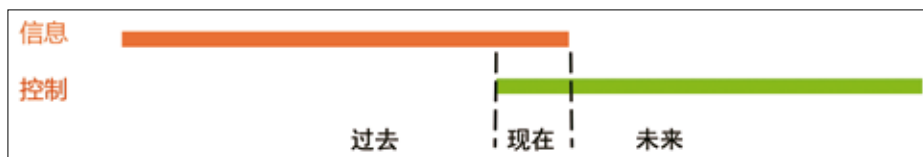


图9 信息与控制的关系

5. 信息的观点

控制是利用信息手段改造系统的行为。控制系统的分析和设计过程都是通过信息来表达和理解的。

关注信息特征而非物理特征

控制论从信息的角度观察对象，需要把物理对象的物质流、能量流转化为信息流加以研究。在控制系统的方框图中，关心的是变量的信息特征及影响关系，而不是其物理特征。图8是两个物理系统的信息流表示，在右图所示的化学搅拌器中，虽然显示的是流入搅拌器的不同化学物质，但实际上作为控制系统输入输出考虑的是这些化学物品的流量以及它们对搅拌器液位高度和pH值的影响。

控制和信息的关系

控制是根据过去(包括现在)的信息对未来(包括现在)进行控制。图9给出了控制与信息的关系。

由图9可知，在任一时刻，我们可以用当前信息确定当前的控制，最简单的反馈控制如比例控制，就是只利用当前偏差信息计算当前控制量。但如果我们充分利用过去(包括当前)的信息，控制的方案就会丰富得多，简单的如完全的PID控制，复杂的如利用过去信息辨识建模后各种基于模型的控制，它们不但可以确定当前控制，甚至还可以计算未来控制，如自适应控制与预测控制等。但是不论哪一种控制算法，在计算当前控制时，决不能出现将来的实际信息，例如在PID控制中不能用 $e(k+1)$ 计算 $u(k)$ ，因为这需要知道

下一时刻的实际输出 $y(k+1)$ ，显然是违反因果律的。

明确信息是否可知、如何获得及是否实时

控制论关心的是与控制目的有关的那些信息，控制论中利用的信息并不局限于物理量的直接测量数据，可以是对数据加工后得到的包括模型、统计规律、规则等在内的广义信息。面对控制系统，要分清楚哪些信息是可以直接获得的，哪些是需要加工后才能得到的，哪些是无法预知的。例如在城市排水系统中，储水池的水位可以实时测量，地面用户的排水情况可测，但是为随机量，可以根据日常统计规律进行预报；而降水情况虽然也可测，但无法准确预知，只能依靠气象预报进行短期粗略估计。

控制系统是一个动态演化过程，与时间密切相关，所以信息可分为先验信息和实时信息两类，这直接影响到控制器的工作方式。例如路口交通信号灯的控制，利用先验信息的做法是根据日交通流规律按时间段调整，而利用实时信息的做法是根据感应线圈或摄像头实测的交通流量实时调整。

6. 优化的观点

控制的目的是要把未做成的事做成，把已做成的事做好，优化的概念在控制科学中占有重要的地位。在技术层面上，以传统数学规划为基础的优化技术已普遍应用于控制论系统，如系统辨识中的参数估计、随机信号滤波中的状态估计；在方法层面上，控制论面向动态系统的特征催生

了动态优化的理论和方法——最优控制。随着经济和社会的发展，人们已不满足于把事情做成，而是希望把事情做得更好，优化已成为更多控制论系统的目标，如生产节能降耗、降低环境污染、改善交通状况、实时生产调度、物流运输、最优路径规划、人口最优控制、最优投资决策等等。

优化不是来自数学，而是来自用户对控制系统的实际要求

控制中的所有优化问题，不论其数学表达多么完美，归根结底都反映了对控制系统的实际要求。以控制中常用的二次性能优化指标为例，它反映了我们希望系统状态镇定（状态二次项越小越好）或输出量紧密跟踪期望值（输出误差二次项越小越好），同时又不希望花费代价（控制量或控制增量二次项越小越好）。因此，控制中的优化问题不是天然存在的，而是根据实际要求形成的。

因此，面临控制问题时，在还未开始优化前，应该根据用户对控制系统性能的期望，首先列出对控制系统的所有实际要求。除了上面所述的镇定或跟踪、耗费能量少以外，还可包括诸如把系统输出控制在一个给定的区间内、希望输出响应时间不小于给定值、希望输出超调不大于给定值等等，而且需要了解在诸多要求中，哪些对用户来说是最重要的，从而确定对不同要求满足的优先级。

优化的性能指标与约束是根据实际要求规范的

优化和约束形影不离。所有的优化问题都是受到约束的，除了系统动力学行为的约束（模型约束）外，实际系统中的变量往往还受到物理约束（如水位高度受限、阀门开度受限等等）和安全约束（如反应器压力不能超过阈值等等）。在优化问题中的约束，是必须满足的。约束也可以视为对控制系统的要求，而且是必须满足的要求。

这样，我们就面临着一系列对控制系统的要

求，包括上面所述的必须满足的系统动力学要求、物理要求和安全要求，以及用户对系统性能提出的具有不同优先级的要求。控制的任务，就是用控制变量的有限自由度，按照这些要求的重要性去逐步满足它们。其中，必须满足的要求和优先级最高的期望要求可以列为优化问题的约束，如果有可行解，其余优先级较低的要求就可通过加权方式构成优化问题的性能指标，如果没有可行解，则需要把其中优先级相对低的部分期望要求移出约束条件，转入到性能指标中去，见图10。用这样的思路提出面向实际要求的优化，而不是套入某种数学模式的优化，是控制论中考虑优化的本意。

优化需要模型，但不能只依赖模型

优化控制利用模型对系统未来的动态行为进行预测，在此基础上实现未来有限时域或无穷时域的优化，是具有前瞻性的控制。但如果只依据模型进行开环优化，由于实际中存在诸多不确定性，实际实施时所得到的结果可能不是理想最



图10 按照用户要求优先级得出的优化问题规范

优，甚至偏离甚大。与此相反，反馈控制可以不要模型，其优点是能充分利用实际信息克服不确定性的影响，但因为它是偏差出现后后发制人的反应，缺乏前瞻性，所以达不到优化的目的。如果把这两种机制合理结合起来，实现闭环优化控制，就可以兼顾优化的前瞻性和反馈的实时性，

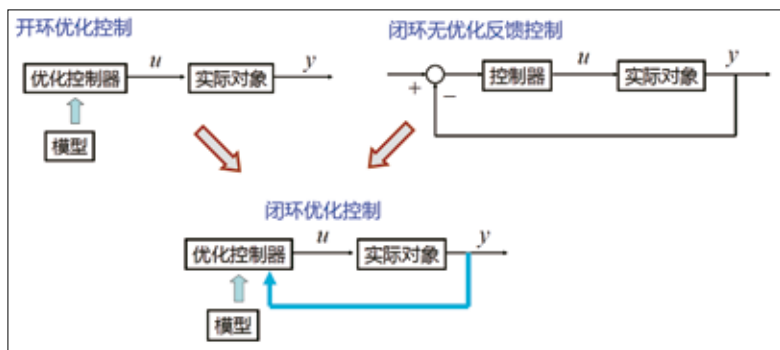
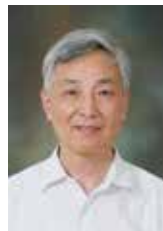


图11 兼顾优化与反馈的闭环优化控制

实现有效互补,见图11。预测控制中滚动时域优化与反馈校正原理的应用,正是这种结合的范例。

7. 结束语

以上对解决控制问题的思考方式谈了浅显的体会,对控制论的一些基本观点做了若干注释。由于篇幅所限,不能进一步具体展开,所述内容也属随感,并非是对这些观点的全面总结。这些看起来人人皆知的大白话并不是枯燥的教条,例如在实践中,我们确实可以用关于控制“身临其境”的一系列提问来审阅被评审的材料,指导学生写论文、做交流报告,更可以把控制论基本观点的诸多思考融入到解决具体问题的过程中。因此,如果我们能有意识地把这些道理与控制问题相关的具体工作结合起来,加强“身临其境”,在分析、设计的过程中多想想控制论的基本观点,就必定会丰富和完善这些基本道理的内涵,不断提升我们解决控制问题的能力。



【作者简介】席裕庚,1984年在德国慕尼黑工业大学控制技术研究所获工学博士学位,现为上海交通大学电子信息与电气工程学院自动化系讲席教授。主要从事预测控制理论与应用、大系统控制与优化等方面的研究。在国内外学术刊物发表论文300余篇,出版《Predictive Control—Fundamentals and Developments》、《预测控制》、《动态大系统方法导论》等著作,获国家自然科学二等奖等多项科技奖励与荣誉称号。曾任IFAC大规模复杂系统技术委员会(TC5.4)副主席、亚洲控制协会(ACA)主席、中国自动化学会副理事长等职和Control Engineering Practice、Int J. of Humanoid Robotics、自动化学报、控制理论与应用等期刊的编委。现为亚洲控制协会顾问委员会成员、中国自动化学会特聘顾问、控制理论专业委员会顾问委员。