

关于反馈的作用及能力的认识

Understanding the Role and Capability of Feedback

(中国科学院系统科学研究所, 北京 100080) 郭 雷

摘要：首先简述对反馈作用的定性认识，接着介绍几种典型的反馈设计方法，最后介绍近几年在探索反馈机制的能力与局限方面所得到的某些定量认识。

关键词：动力系统；反馈；不确定性；稳定性；非线性；复杂性；鲁棒性；适应性

Abstract: In this paper, we will first briefly give some qualitative understanding of the role of feedback, then introduce several typical feedback design methods, and finally present some quantitative understanding about the capability and limits of the feedback mechanism, which are obtained in recent years.

Key words: dynamic systems ; feedback ; uncertainty ; stability ; non-linearity ; complexity ; robustness ; adaptability

一 反馈的作用

对世界上事物的发展变化，从量子系统，到工程系统，再到社会经济系统，如果人类都可以作出准确无误的预测，那么世界肯定是另外一番景象。现实世界中充满了各种未知因素、不确定因素和不可预测因素，而人们常常又不得不面对这些复杂因素，适时地作出各种决策，然后针对系统的实际运行情况来进一步不断调整和修正这些策略，这就是一个反馈和适应过程。从我国改革开放初期的“摸着石头过河”到近来常说的“与时俱进”，本质上都

收稿日期：2003 - 01 - 13

作者简介：郭雷（1961 - ），山东淄博人，中国科学院系统科学研究所所长，研究员，博士生导师，1982年毕业于山东大学数学系自动控制专业，1987年在中科院系统科学研究所控制论专业获硕士、博士学位，同年应邀赴澳大利亚国立大学做博士后研究，2001年当选为中国科学院院士，长期从事控制系统的理论研究。

是适应反馈过程。事实上，反馈无处不在。物种的进化、人类文明的进步、社会的发展、科学与技术的创新无不与自适应反馈有密切的关系。正如控制论创始人维纳在其著作^[1]中说明的，反馈普遍存在于动物和机器中，它实际上存在于一切有目的的行为中。

为什么需要反馈呢？这主要是客观实际系统的复杂性所致，也是人类能力的局限性与智能性的体现。客观世界具有多层次结构，并且它是各种事物相互联系、相互作用和相互影响的一个统一整体。为了使对某一具体问题的研究能够深入下去，且能给出可行的解决方案，我们不得

不将研究精力集中于一个适度大小的范围内，这就形成了针对这一具体问题的具体系统（严格来讲，通常是开放系统）。系统外部通常就称为环境，环境的变化通常当作扰动来处理。即使集中到这样一个系统内部，由于其多层次性、环境影响以及微观层次上各不同部分之间相互作用的复杂性，通常也无法根据第一原理（在理想实验条件下证实的基本科学定律）来写出描述动态系统实际发展变化的合适数学模型，故而必须再作进一步简化和抽象；在很多情况下由于系统机理很难弄清楚（不可能弄清），作这种简化和抽象也困难，还必须依靠系统辨识或统计方法来处理（这样做的建模精度也有限）。因此，在对复杂系统内部结构描述的模型中存在不确定性是必然的。不仅如此，这些不确定性还可能随着系统动态的演化和环境的影响也在不断变化。

由于我们的控制或决策方案无法全部或精确的考虑与预测这些系统内部和外部实际存在的不确定性及其变化，因此实际系统运行的行为和我们所期望的行为之间一定存在偏差，而反馈可以根据这个偏差

些信息可分为先验信息和后验信息。先验信息是系统运行前对它的了解(包括结构、环境、经验等),而后验信息是系统运行过程中系统的状态所显示出的信息。正是后验信息直接或间接地增进了对系统不确定性的进一步了解,从而可以利用反馈手段来进一步减少不确定性因素对系统性能的影响。当然,获得后验信息往往需要传感技术、通讯技术和信息处理技术。在随机和不确定性环境下,信号滤波同系统建模问题一样,也包括在控制论的主要研究内容之中。

下面为叙述方便与简单起见,设 $\{u_t, t \geq 0\}$ 是动态控制系统的离散(或采样)的 l -维输入序列,相应的 m -维输出序列记为 $\{y_t, t \geq 0\}$ 。在任一时刻 $t \geq 0$, 我们说系统的输入 u_t 是一反馈信号,在数学上是指存在某一个从 $(t+1) \times m$ 维欧氏空间 $R^{(t+1)m}$ 到 l 维空间 R^l 的可测映射: $h_t(\cdot): R^{(t+1)m} \rightarrow R^l$ 使 $u_t = h_t(y_0, y_1, \dots, y_t)$, 即 u_t 是到 t 时刻为止,已观测到的信息 $\{y_0, y_1, \dots, y_t\}$ 的某一个“变换”(定常或时变,线性或非线性)。所有时刻的反馈信号构成一个反馈规律 $u = \{u_t, t = 0, 1, \dots\}$ 。进一步,反馈机制可定义为所有可能反馈规律所构成的集合:

$$U = \{u \mid u \text{ 是任意反馈规律}\}$$

显然,反馈机制 U 的这一定义相当广泛。对一个实际的不确定性动态系统,如何选取合适的“信息变换”(或映射)序列 $h_t(\cdot), t=0, 1, \dots$, 而构成一个有效的反馈规律 $u = \{u_t, t \geq 0\}$, 是一个并不简单(甚至相当困难)的基本理论和实际问题。这涉及到对具有不确定性的被控对象,可以通过反馈来改变什么,以及如何去改变的基本问题。几十年来控制科学的发展,对这一问题提供了一系列相当深刻和丰富的理论成果。进一步的基本问题是,如何定量理解整个反馈机制 U 的最大能力(而不仅仅局限于某一特定反馈规律)。换言之,不仅要从理论上说明 U 能够做什么,还要说明 U 不可能做什么(不可能性定理)。显然,这一理解对认识和处理广泛存在的复杂系统控制问题,对设计新型的高效反馈规律都有重要意义。但对这一问题的认识,目前成果很少,故下文将重点提及。

最近几年在定量探索反馈机制的最大能力和局限的过程中,对一些最基本的不确定性控制系统,发现并证明了反馈机制最大能力的临界值^{[1][12]},并建立了几个关于反馈能力的“不可能性定理”。特别地:

对一类基本的参数化不确定非线性随机系统,发现反馈机制的能力依赖于系统本身非线性动态的非线性增长的程度(记为 b)和未知参数的个数。特别

地,在单参数不确定性控制系统中,反馈机制可以对付的非线性增长程度的临界值为 $b=4$ 。当 $b < 4$ 时,一定可以构造反馈控制使系统稳定并达到性能最优;当 $b \geq 4$ 时,任何反馈控制都不能使系统稳定。对一类基本的非参数不确定系统,反馈机制对付不确定性的最大能力可以用某赋范函数空间中,以 $r = \frac{3}{2} + \sqrt{2}$ 为半径的球 $S(r)$ 来完整刻画。换言之,当 $r < \frac{3}{2} + \sqrt{2}$ 时,一定可以构造出仅依赖于观测信息的一个反馈控制规律,使在球 $S(r)$ 内的所有不确定性系统都能被这个反馈规律所镇定;但当 $r \geq \frac{3}{2} + \sqrt{2}$ 时,任何反馈规律都不能镇定球 $S(r)$ 内的所有系统。此外,对具有采样反馈的连续时间非参数不确定系统和具有隐 Markov 跳变的随机时变线性系统,也发现并建立了关于反馈机制能力的“不可能性定理”。给出了反馈能力与采样频率和系统结构复杂性之间的初步关系。当然,这些定量结果只是对反馈机制最大能力的初步探索与认识,还有大量困难的问题等待解决。

四 结语

通过本文的认识可以看出,反馈在系统与控制领域是一个核心概念。系统与控制科学对中国的发展还具有特殊的意义。中国人口众多、幅员辽阔,但耕地面积和自然资源却相对贫乏。系统控制科学在有效利用资源,保护生态环境和保障社会、经济和人口等系统健康发展方面,有着丰富的命题。中国是发展中国家,工业基础薄弱,控制科学在改造传统工业,提高产品竞争力,增强国防实力等方面有着巨大的潜力和广阔的背景。

参考文献:

- [1] Wiener, N., Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine, MIT Press, 1948.

(下转 15 页)

提高了保护系统的可靠性。自动时 PLC 控制继电器，手动时通过继电器回路来切换。

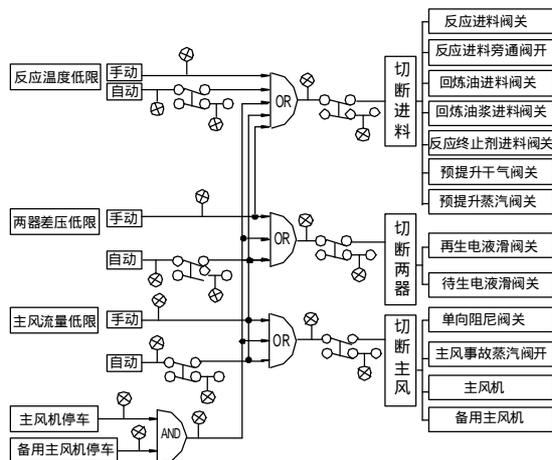


图 2 自保联锁主逻辑关系图

为避免误操作，操作面板上设有一个公用双重命令键。在任何按键操作时必须同时按下公用双重命令键和相应的操作键，该项操作才有效，这样便增加了系统的安全可靠性。

手动键相当于应急手操器，某自保参数在输入切除后，该项就由全自动方式变为半自动方式，由操作人员应急使用。手动键只有在输出复位之后操作才有效，各手动键之间仍然具有各输出之间的联锁关系。

当面板上有输入报警时，显示发光二极管变红色，此报警不受输入切除影响。

3 软件设计

PLC 系统的软件组成依据是逻辑关系图，各部分控制程序都是根据其工作原理所完成的功能以梯形图方式编写，算法和实现方法直观、简明。PLC 与打印机之间通信由 LAD 或 STL 指令来控制，通讯口这种操作模式称为自由端口模式，在该模式下用程序定义波特率、每个字节位数、奇偶校验和通讯协议。本应用程序用 MOV B 16#9, SMB30 初始化自由端口 0、9600 波特率、每个字节 8 位数、无校验、自由端口协议，利用 XMT 指令发送数据，且用 SM4.5 监视发送状态。

4 结语

催化裂化自保—联锁系统经过改造后，完全符合生产控制要求，运行良好。它满足了工艺要求，具有运行稳定，可靠性高，程序修改灵活，操作方便等特点，同时为装置长周期运行起到了非常重要的作用。如果将 S7-200 PLC 增加若干块扩展卡，将全套装置仪表的模拟量、开关量全都输入其中，并由 PLC 来完

成整套装置自动控制，从而实现无表盘的 CRT 操作，整个控制过程将更加可靠、经济，并大大减轻操作人员的劳动强度，也便于和其它装置一起组成大型 DCS。实践证明，这套自保—联锁系统，在重油催化裂化反应—再生器上的应用是成功的。

参考文献：

[1] S7-200 可编程序控制器[Z]. 西门子(中国)有限公司.
 [2] SIEMENS Step 7 梯形逻辑参考手册[Z]. 语句表参考手册.
 [3] 何衍庆,等. 可编程序控制器原理及应用技巧[M]. 化学工业出版社, 2001.

(上接 3 页)

[2] Maxwell, J. C., "On Governors", Proc. Royal Soc. London, Vol. 16, pp.270-283,1868.
 [3] Tsien, H. S. Engineering Cybernetics, New York: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1954.
 [4] Black, H. S., "Stabilized Feedback Amplifiers", Bell Syst. Tech. J., 1934, 13:1-18.
 [5] Åström, K. J. and B. Wittenmark, Adaptive Control, Addison-Wesley, Reading, MA, 2nd ed., 1995.
 [6] Kalman, R.E., Contributions to the theory of optima control, Bol.Soc.Mat.Mexicana. 1960, Vol. 5, 102-119.
 [7] Bellman, R., Dynamic Programming, New Jersey: Princeton Univ. Press, 1957.
 [8] Pontryagin, L. S., V. G. Boltyansky, R. V. Gamkrelidze, and E. F. Mishchenko, The Mathematical Theory of Optimal Processes, New York: Wiley, 1962.
 [9] Zames, G., Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations, weighted seminorms and approximate inverses, IEEE Trans. Auto. Contr. 1981, 23, 301-320.
 [10] Åström, K. J., et al.(Eds.), Control of Complex Systems, Springer, 2001.
 [11] Guo, L., On critical stability of discrete-time adaptive nonlinear control, IEEE Trans. Automatic Control, 1997, 42(11), 1488-1499.
 [12] Xie, L. L., and L. Guo, How much uncertainty can be dealt with by feedback ?, IEEE Trans. on Automatic Control, 2000, 45(12), 2203-2217.