

信息时代反馈机理的演化进展

王乐一 美国韦恩州立大学

赵平 中国济南大学



学，感知系统对环境反馈引入的适应性进化等等。从方法论角度，它强调系统间信息的通讯、关联、协调，以及自学习、自适应功能。而这些功能的实现均依赖于信息的提取、传输、处理，和决策的反馈途径。

在此后十多年的发展中，反馈机制逐步被人们所

接受。当1961年维纳的“控制论”专著再版时，反馈机理已成共识且反馈控制理论的一些基本框架也已成型。此后，广义“控制论”的发展逐渐集中于反馈控制数学理论的发展。

反馈是控制论的一个关键机理。自然界里，反馈、自学习、自适应、自调节是众多生物系统发展进化的推动机制。作为一个理论系统的发展，1948年以反馈机理为基础的“Cybernetics”（通常译为“控制论”）在诺伯特·维纳（Norbert Wiener）的名著《控制论：关于在动物或机器中控制或通讯的科学》^[1]中被首次明确提出。维纳的“控制论”是在广义上定位的，其范围涉及物理、生物、神经、天体、智能、计算机。就应用领域而言，涵盖确定性及随机性系统，从简单的机械反馈结构，基本的电路及电子系统，天体有规律的调节、变化，直到生物，医

学，感知系统对环境反馈引入的适应性进化等等。从方法论角度，它强调系统间信息的通讯、关联、协调，以及自学习、自适应功能。而这些功能的实现均依赖于信息的提取、传输、处理，和决策的反馈途径。

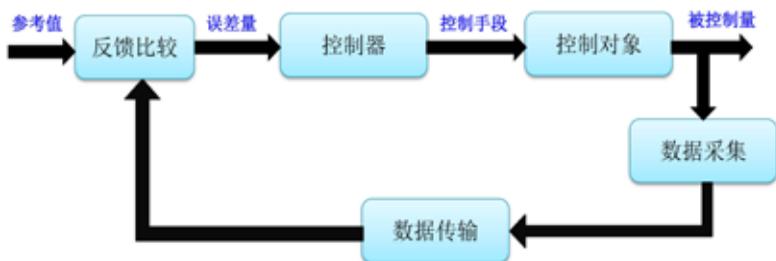
在此后十多年的发展中，反馈机制逐步被人们所接受。当1961年维纳的“控制论”专著再版时，反馈机理已成共识且反馈控制理论的一些基本框架也已成型。此后，广义“控制论”的发展逐渐集中于反馈控制数学理论的发展。

由于中文翻译选择了“控制论”，“Cybernetics”的深广原意渐渐淡化。现在“控制论”大概总会被翻译成“Control Theory”，且常常狭义地想到“反馈系统自动控制的数学理论”。另外，计算机、通讯、网络系统突飞猛进的发展也将“Cybernetics”从名词“控制论”变成了形容词“赛博”，意为“与计算机网络及信息技术相关的”（甚至把“控制”都拿掉

了!)。

我们讲到信息时代,也许大家就会想到近十多年来互联网导致的信息革命。但实际上,维纳“控制论”时代本来就是一个信息时代。维纳“控制论”的酝酿发展是和冯·诺依曼(John von Neumann)的计算机理论^[2,3],香农(Claude Elwood Shannon)的信息论^[4,5]的发展合作同步的,并与当时生物系统、神经生理、人工智能的进展密切相关。不过,当年的信息时代是以一批科学界精英的思维实验为特征的,而今天的信息时代已是信息无处不在了。

1. 反馈控制理论的早期发展



反馈控制系统是基于“负反馈”的基本结构。直观上讲,反馈系统的控制器根据被控制量与控制目标的误差来对控制手段进行调节,使被控制量向控制目标逼近。举例来说,早期蒸汽机的飞轮调速控制就是根据实际转速与标定转速的差异来调节蒸汽流量,最终使转速稳定在标定转速的附近。这个简单的增益控制系统至今仍在电网发电机调频中应用。日常生活中,淋浴水温的调节也是基于反馈控制,人以皮肤作为传感器来测量水温,并以此为依据来调节冷热水流量,从而达到个人喜欢的水温。

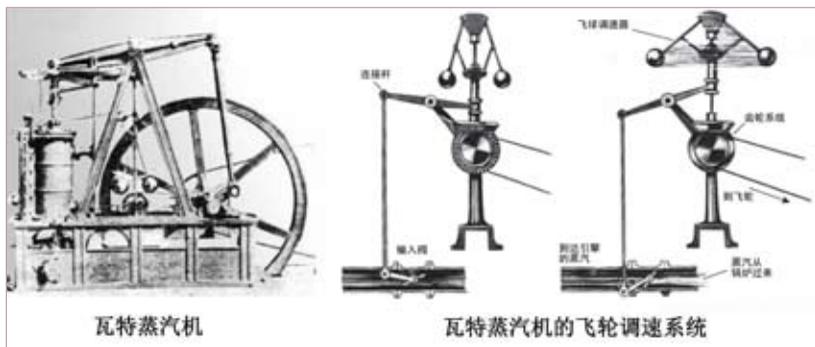
尽管上述的反馈机理直观上看是正确的,但其对系统的干涉与调节也可能是“成事不足,败事有余”。比如,一个初学开车者上了大路,车行方向稍有偏差,就猛转方向盘,结果车就撞上街沿了。

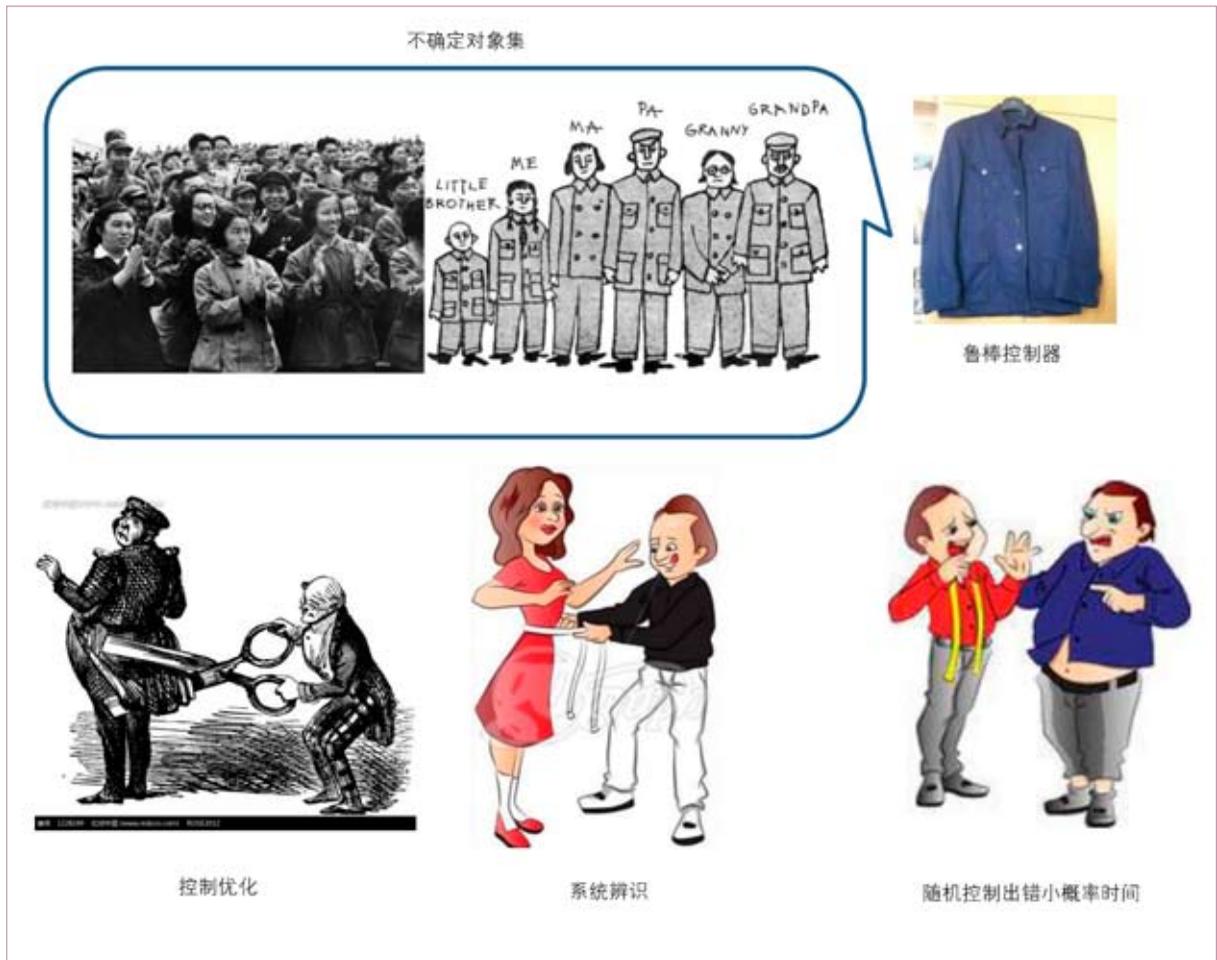
因此,只有合理地设计反馈控制器才会达到预期的效果。早期,反馈控制器的结构很简单,设计过程也比较直观,它们不求优化,但求可靠。用现在的术语来讲就是追求闭环系统的鲁棒性。这样的控制器对控制对象的模型精度要求不高,能包容不同类型的系统(线性系统、非线性系统、时变系统)及系统不确定性。由手动控制

经验引入的“PID”控制器经历了时间的考验,至今仍然主导工业过程、交通工具、医疗仪器、家用设备的控制应用。

从这些直观的理解和设计方法起步,反馈理论的深入发展是控制理论进步的主要标志。与PID控制应用同期的理论发展,十分

注重系统面对不确定环境的可靠性。我们可以注意到20世纪60年代前后反馈理论的发展总是和“鲁棒性”相关,尽管“鲁棒性”一词是很久以后才引入控制领域的。当年反馈理论的研究致力于一些非常本质的问题:反馈系统的数学描述必须满足哪些条件?在什么条件下反馈系统才能保





证稳定？反馈系统有多少稳定裕度？其中，“必须”、“保证”、“裕度”就直接含有“鲁棒”的意义。

比如，伯德（Hendrik Wade Bode）20世纪在30-40年代发明了反馈系统的频域方法。他在伯德图上所引入的反馈系统的增益余量和相位余量^[6]，显然就是鲁棒控制的前身。后来，George Zames（在1960年前，他是维纳和李郁荣在麻省理工学院的博士生）在20世纪60年代初提出的小增益定理（Small Gain Theorem）和扇区判据（Sector Criterion），成了早期鲁棒控制的奠基性成果^[7]。

2. 反馈控制理论的分支细化

自20世纪60年代之后，反馈理论的发展开始细化、分块、深入、数学化。在此后的50多年间，控制理论有了长足的发展，其代表性的进展包括60-70年代的最优控制、计算机控制，70-80年代的鲁棒控制、自适应控制、随机控制、非线性控制、模糊控制、系统辨识、状态估计，等等。此外，对反馈的能力及极限也有了进一步的理解。尽管都以反馈控制为目的，但系统的建模、辨识、估计、稳定性、优化等分支日趋专业化。

控制理论分支的深入数学化也令其变得高深、难学，给人以望而却步的印象。但实际上这些分支探讨的问题和基本思想还是比较浅显的。例如，排在“衣食住行”首位的“衣”就可作为控制方法应用的范例。

对服装行业来说，衣服是要设计的“控制器”，而“控制对象”是高矮不一、胖瘦不同、体型不齐的人群。所以“对象复杂性”很高。为了减少“系统复杂性”，服装行业引入有限个标准化的“对象模型”，并以专用码（大号，10M，7W，等等）对其编号（“模型结构与参数”），在此基础上做出假体模具（不考虑巴黎时装展上的真人模特）。当然，模型只是一种“近似”，这自然引入“模型误差”。大多数人会有偏差（“不确定性”）。这就要求按假体模具设计的衣服有一定的容余量（“稳定余量”或“鲁棒性”）。

这里存在“模型精度”与“模型复杂性”的权衡问题。若要更精确地应对人体的不同，必然需要更多的模型，从而会增加衣服设计的复杂性和费用。这是控制方法中的“复杂性理论”。

“鲁棒性”强的衣服（“控制器”）可以达到以不变应万变的效果。比如“文革”中的毛式中山装几亿人穿，再加上号码偏大以保证可以多年不换，这可能是“鲁棒性”最强的“控制器”了。但对衣服比较挑剔的，大多数还是采取“自适应控制”原理。这其中又分为两大策略：第一种是先测量身高体宽（“系统辨识和参数估计”），然后以此为据来挑衣服（“控制器自适应”）。因为有系统辨识作为中间步骤，这是“间接型的自适应控制”。第二种是不量身高体宽，直接试衣，这是“直接型的自适应控制”。

试衣后的困难往往是犹豫不决，大号、中号都不是完美选择。此时可用的控制策略有三种。

“最优控制”策略是挑衣服与人体之间误差最小的。“随机最优控制”策略是根据现场心情挑衣服，当然这结果有随机性。当时觉得是最佳选择，一旦回家后心情变了，就会造成退货。“模糊控制”策略先对每种选择加个权（“绝对不挑小号”、“50%程度可选中号”、“70%感觉可选大号”，等等），经综合后作出决定。当然，最好的衣服只能量体裁衣专门缝制了。这大概算是“自适应控制”里最花钱的策略了。

讲到这里，我们还要对“模型”再解释几句。服装设计师用的假体模具是控制里讲的“成比例的实体模型”。当我们用一组数据来定义人的体型，那是“数学模型”。现在用计算机三维图像来做服装设计，是控制里的“计算机模拟试验”。但设计的服装是否真好，还要真人试试，也就是控制里的“实验验证”。

3. 随机系统与确定性系统之争

20世纪80-90年代，确定性系统(deterministic system)与随机系统(stochastic system)相互纠结，曾经有一段并行运作的时期。确定性系统是鲁棒控制研究的主体，其系统或信号的不确定性(uncertainty)可用一个集合来描述。控制的鲁棒性要求设计的系统对于集合中“所有的系统或信号”都能稳定并满足性能指标要求。而对于这“100%”的鲁棒性要求，从随机系统角度看就实在太保守了。随机系统的主要特点是：

- (1) 小概率事件的重要性是相对可以忽略的；
- (2) 系统与信号的主体统计特性可以用适当意义上的“平均”特性来替代。反过来说，假如一个实际系统的动态特征并非随时间随机变化，那么它的出现并无机会及概率可言。从这个意义上讲，如果一个控制器不能保证(100%)鲁棒的话，对某个系统来说控制器的设计可能就是100%失败的。谁能接受一个飞机控制系统有1%的概率



出错呢?

那么确定性与随机性是否有关联呢?可以肯定地说,它们是紧密相关的。举一个例子来说,日本地震很多,自然建筑防震要求至关重要。用鲁棒性要求来说,就是建筑质量必须100%承受7级地震。按随机指标,则要求抗震成功率需达到99%。如果某一地区7级以上地震的概率是1%,那么这两个指标是一样的。换言之,对实际系统而言,由于人们对一个系统了解的不完善,任何一个“鲁棒设计”都有失败的风险。而一个随机现象的分布和概率意义上的性能指标经常对应了一个“鲁棒设计”的稳定与性能界限。

20世纪80-90年代这两个学派间的一些纠结,从今天的网络系统角度来看,实际上变成了相辅相成的方法。

4. 信息时代对反馈系统理论的新挑战

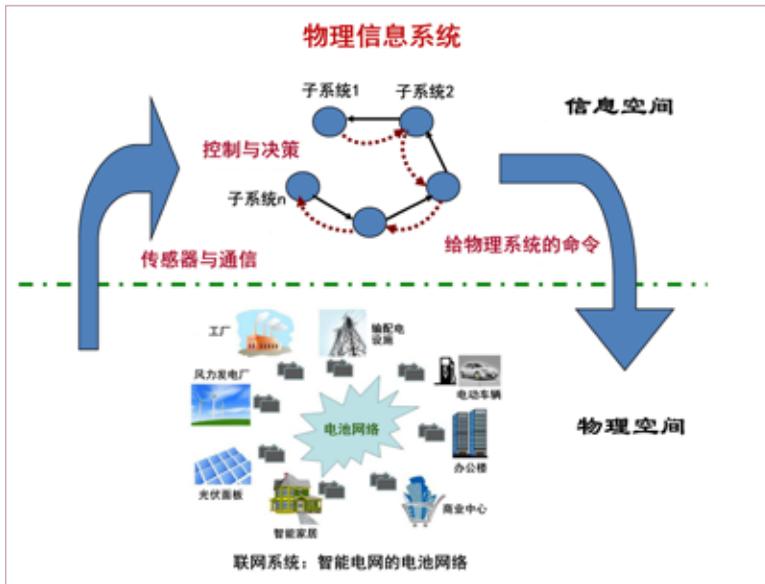
近十多年来,新型系统层出不穷,交通、能源、医学、社会系统的发展使得系统的概念发生了实质性的跳变。从互联网到云计算和物联网(Internet of Things),从网络控制到大数据,从新能源到智能电网,从量子控制到大规模的经济、基因、生物系统,都在驱动控制论向新的深度和广度发展。控制论不可避免地必须打破单个

或小群体反馈结构下的稳定、鲁棒、优化控制的框架,而归元并强化到信息、网络、通信、计算、控制一体化的研究上去。之所以称为“归元”,因为这一一体化的思想本来就是维纳、冯·诺依曼、香农的主体思想和“Cybernetics”的初衷。“强化”是因为理论、系统、应用的发展已远远超过

20世纪60年代的环境了。从这个意义上讲,也许“Cybernetics”应该有一个更适合的、超越“控制论”的翻译。当然,这只能由真正的“控制论”专家来考虑了。

信息时代确实对控制的发展和 innovation 提出了相当严峻的挑战。传统反馈系统对信息交流要求连贯、同步、可靠、完整。而信息时代的网络系统打破了这种框架下的所有特点。在此罗列几个控制发展需要尽快突破的关键难点。

(一) 通信系统是网络系统重要的子系统,通讯系统中信号的传递是随机的。当把一个基本上是确定性的控制对象与通信系统连接,随机性随即被引入到系统中来。就现今的无线通信而言,由通信能量、带宽、信道干扰引入的不确定性主要由数据丢包、时滞、数据传输速率等引起。而这些都是随机现象。一个通信系统在传输一个信号前,首先要对其进行编码。信息码主要包括三个部分:网络地址、数据、纠错码。其中的纠错码使接收方以高概率判断出传输出错。收到的信号可能是: $\hat{y}_k = y_k$ (传输正确); $\hat{y}_k = y_{k-\tau_k}$ (传输正确但有随机时延); 掉包(传输失败); 误判造成的错码(小概率大误差事件)。由此,通信系统会对控制系统带来哪些



变化呢?

(1) 噪音的类型变了。传统的噪音模型是叠加型的: $\hat{y}_k = y_k + d_k$ 。噪音一般是零均值, 可相关, 但方差有限的。在传统噪音统计特性基础上发展出了维纳滤波^[8]、卡尔曼滤波^[9]、随机微分方程、随机最优控制、灵敏度优化等研究方法。这些方法的共同特点是在某种意义上对信号取平均。但通信系统的模式却改变了这一基本假设。这种不确定性的模式不能直接用信号平均的方法来处理。

(2) 信号接收到的时间由确定的变为随机的。传统的离散系统是建立在均时采样基础上的。当采样点随机出现时, 包括系统建模、系统辨识、状态估计、反馈控制、最优控制在内的传统控制设计方法必须更新。当采样周期不固定时, 定常系统采样后就成了时变系统, 可控可观的系统可能成了不可控或不可观的, 可辨识的系统可能成了不可辨识的, 稳定的系统可能成了不稳定的, 等等。由于这些变化, 一大批建立在线性定常系统上强有力的控制算法都不能直接使用了, 比如最优控制中的线性二次型算法、鲁棒控

制中的 H_∞ 、 L_1 和 μ 算法、系统辨识中的线性最小二乘法、维纳滤波等。

(二) 网络系统中不同信道的信息是随机非同步传输的, 网络中的控制子系统通常是非同步运行的。而传统多变量系统的控制、稳定性分析、性能指标优化多以同步运行为基本要求。若把随机信道考虑进去, 网络系统的可控、可观、可辨识性以及控制算法都需重新研究。

(三) 网络系统中的信息数量巨大, 分布不均, 类型多样, 变化

迅速。信息的实时传输共享必须考虑有限通信资源的耗费。怎样提取有用信息, 压缩数据, 限用局部信息来减少信息传输对计算机网络的压力早已是计算机领域的核心问题。目前, 已有大量的有效算法, 并形成了“大数据”研究领域。但对反馈控制仍然是新的挑战。具体来讲, 传统控制算法绝大部分是集中型的。而分布式网络控制的关键是分布式、多机、非同步、并行、模块式控制算法的发展。只有解决控制算法模块化和非同步协调问题才能使反馈机理与计算机网络发展接轨, 实现控制算法的分布式云计算、数据共享和交叉复用。

5. 结束语

反馈机理在新的信息时代将会有更深入、更广泛的突破。近年提出的“Cyber-Physical Systems”(CPS, 常译为“信息物理系统”)概念就将“反馈”作为系统间互联的一个核心因素。

在一个CPS系统里, 物理子系统内有传统意义上的控制反馈, 子系统间有信息交流的协调

反馈, 控制系统与通信系统间有性能指标合作的反馈, 子系统与全局系统有信息结构的反馈, 系统资源的管理有系统复杂性与系统性能和可靠性间的反馈。反馈控制在传统意义下是一个相当成熟、已过中年的领域, 而在新的CPS框架下仍是学步儿童, 前途无量。

参考文献

- [1] Wiener N. *Cybernetics, or, Control and Communication in the Animal and the Machine*. Paris: (Hermann & Cie) & Camb. Mass. (MIT Press), 1948 2nd Ed, 1961.
- [2] van Neumann J. First Draft of a Report on the EDVAC, 1945.
- [3] Taub A H, ed. *Collected Works of John von Neumann*. Pergamon Press, 1963.
- [4] Shannon C E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 1948, 27: 379-423 and 623-656.
- [5] Shannon C E. Communication in the presence of noise, *Proc. Institute of Radio Engineers*. 1949, 37(1): 10-21.
- [6] Bode H W. *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*. Van Nostrand, 1945.
- [7] Zames G. *Nonlinear operators for systems analysis*. Sc.D. dissertation, MIT, Cambridge, 1960.
- [8] Wiener N. *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*. New York: Wiley, 1949.
- [9] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*. 1960, 82: 35-45.