

浅谈工程控制的信息问题

高志强

(克利夫兰州立大学先进控制中心, 克利夫兰, 俄亥俄 44115 美国)

摘要 工程控制论 (engineering cybernetics) 研究的不仅仅是控制, 更是信息与控制的交叉. 信息与控制密切相关, 包括信息的选择和提取, 等等. 从信息的角度思考控制可以开拓思路, 重新梳理“反馈”和“扰动”等工程控制的基本概念, 深刻理解前人的发明创造和学术思想. 韩京清先生二十七年前在本刊开创性地提出, 在控制器的设计中用局部的过程信息取代全局的模型信息, 从而解除控制理论中对模型的依赖, 为控制理论的发展开辟了新的方向. 工程实践表明, 信息的选择和品质是关键问题, 特别是扰动信息. 以自抗扰控制为代表的二元设计, 通过扰动概念的拓展和被控对象的去扰, 为通用工业控制器的设计和标准化提供了新的路径, 也为基于信息的工程控制论的发展提供了借鉴. 从古代的指南车到现代的《工程控制论》和《自抗扰控制技术》, 从人文到科技, 从东方到西方, 一个以信息为主线、以抗扰为核心的控制思想, 不断地启发和鼓励我们: 温故知新, 自强不息.

关键词 控制论, 工程控制论, 信息, 反馈, 扰动, 总扰动, 扩张状态, 前馈, 二元设计.

MR(2000) 主题分类号 93C99

ON THE PROBLEM OF INFORMATION IN ENGINEERING CYBERNETICS

GAO Zhiqiang

(Center for Advanced Control Technologies, Cleveland State University,
Cleveland, Ohio 44115 U.S.A.)

Abstract Engineering cybernetics is not just about control, but more so about the interplay between information and control. Our understanding of the basic concepts such as feedback and disturbance deepens with a critical reflection on how critical information is recognized and obtained in the context of control design, so does our understanding of the past inventions and design principles. Prof. Jingqing Han, a pioneer, initiated the debate with an article in this journal 27 years ago. Sharing

收稿日期: 2016-04-27.

编委: 孙振东.

deep concerns regarding the premise on the accurate mathematical model in control theory with Prof. H.S. Tsien, who raised the problem of disturbance and uncertainties in control, Prof. Han made the crucial leap from the model-based design to the information-based design. The ensuing dualistic paradigm of controller-rejector design, with active disturbance rejection control as but one embodiment, provides both a framework and a new technological basis for the renewal and standardization of general purpose industrial control technologies, as well as a path back to the original vision of engineering cybernetics from Prof. Tsien. From the south-pointing chariot to engineering cybernetics, from PID to active disturbance rejection control, from humanity to science and technology, from east to west, an information-centric conceptualization of control has persisted over centuries and is coming to fruition.

Keywords Cybernetics, engineering cybernetics, information, feedback, disturbance, total disturbance, extended state, feedforward, dualistic design.

1 引言

控制论 (cybernetics) 是在二战后控制理论 (古典控制理论) 蓬勃发展之际创立的. 它的创始人维纳在二战时参与了火炮控制, 战后又与生物学家合作, 研究动物和机器控制的共性问题, 感悟到信息与控制的紧密关联. 《控制论》一书^[1] 开辟了控制和信息交叉研究的新领域. 钱学森先生的《工程控制论》(engineering cybernetics)^[2] 一书, 指出工程控制论是一门工程科学, 要在工程实践中找共性问题, 提取设计理念, 建立基本概念, 指导工程实践. 几十年来工程技术, 特别是信息技术, 发展迅速. Cyber 早已成为信息和网络的同义词. 信息物理系统 (cyber-physical systems) 也已成为控制领域的研究热点. 但是我们在研究中对控制论的信息问题还要更加关注, 因为它与通讯理论特别是信息论的问题有本质不同. 信息的选择、提取、品质和使用等问题是控制工程特有的问题, 也是控制论要研究的本质问题.

反馈是工程控制的基本概念, 一般指被控量信息的获取和传输. 随着技术的发展, 控制系统内可以得到的信息早已远远不止被控量. 在控制器的设计中怎样合理地选择信息就成为一个需要注意的问题, 这在过去却很少讨论. 在古典和现代控制理论中, 被控对象的输入、输出和模型都已给定, 控制设计就是根据它们建立反馈机制, 产生控制量, 用的是狭义的输出反馈.

其实钱学森先生早就意识到工程控制中特有的信息问题. 《工程控制论》中有三个观点令人深思: 1) 基于传递函数的设计方法过于复杂, 不适合工程实际的需要; 2) 被控对象不仅有外扰还有内扰, 工程控制的基本问题是要使系统能够在扰动影响下稳定运行; 3) 控制器的设计要摆脱对模型的依赖, 依靠的是在恶劣的工作环境中对系统持续地测量和感知^[2]. 这三个方面和起来, 反映了钱学森先生对工程控制的问题和前提的把握. 以飞机机翼结冰为例, 他指出控制器需要实时地提取在线信息而不能依赖模型信息. 至于具体要提取什么信息以及怎样使用这些信息, 则是工程控制论的研究中不可回避的问题.

工程中的被控量信息大都由传感器获得, 要控制什么就测什么, 比如蒸汽机用飞锤装置测量转速. 但是也有例外. 比如中国古代的指南车, 被控量 (指向) 就不能直接量测. 指南车的奇妙之处在于它对扰动信息 (即车向的变化) 的实时捕捉, 并根据扰动信息适当地纠正车顶

木人的指向,使它能够“手南常指”^[3].指南车的发明说明,自动控制并非一定要依赖被控量的反馈信息;它也可以通过扰动信息的反馈实现.指南车和飞锤控制器反映的是两个截然不同,又相辅相成的设计原理.它们的关键之处都是信息的提取,即物理过程的信息化.后来苏联学者提出的不变性原理和双通道设计^[4],我国学者创立的自抗扰控制^[5],以及活跃在各个领域的各种抗扰方法^[6-9],都是指南车原理的体现.在大数据时代,如何从数据中提取信息早已成为一个热门的话题.基于数据驱动的控制理念也已应运而生^[10].数据是信息的载体,数据驱动的实质不也是信息驱动吗?由此可见,控制工程中的信息问题是本质性的问题.

2 信息问题初探

控制论研究的不是大自然,不是物质和能量本身,而是动态系统的组成和其中各个部分之间的关系,特别是它们之间的信息交换.它应该能够指导我们通过建立新的或者改变旧的信息通道,提高控制系统的性能,加深对控制原理的理解.值得注意的是,自动控制的历史虽然久远,人们对它工作原理的理解却一直未能深入.直到20世纪30年代,贝尔实验室的通讯工程师为了解决放大器的失真问题,建立了负反馈的概念和机制以及相应的反馈系统理论,才为日后控制理论的建立打下基础.但是反馈系统理论不能等同于控制理论.反馈的概念本意是指放大器中一条新的从输出到输入的信息通道,走向与原信号相反.这个反馈概念是狭义的,满足了通讯工程的需要.可是控制工程的情况更复杂,信号更丰富,走向更多.所以我们更要考虑控制系统中信息的多样性和控制问题本身的特性.下面再举例说明.

2.1 实例

指南车说明,自动控制并不一定依靠被控量的信息反馈.那么它应该依靠什么信息?这个信息又是怎么得到和使用的?工程中我们可以看到很多有关的例子,比如机电系统的位置控制.被控对象的输入是电机的电压,可用的信息除了位置信号之外,还有速度和电流信号.人们在工程实践中发现,这些信息的合理利用会带来很多好处.比如常用的串级控制方法,由内到外,由快到慢地根据物理特性,逐级地建立反馈控制回路.这里每个回路的物理意义和参数的单位都非常清楚.内环的带宽比外环一般高一个数量级左右.内环的建立大大地简化了外环的设计,也使整个系统的设计井井有条.位置环的控制器根据位置误差给出速度指令;速度环的控制器根据速度误差给出电流指令;最后电流环的控制器根据电流误差给出施加到电机端口的电压值.串级控制设计在工业中用途广泛,行之有效^[11],是工程师们善于利用信息的范例.串级控制的原理还以各种形式出现在过程控制中,这里就不一一列举了.

不难看出,控制系统设计的巧妙往往在于信息的选择和使用.工程控制中的发明创造大都也是在这方面有独到之处,这也说明信息是控制的关键.

2.2 本质

瓦特的发明带来了工业革命,改变了世界,也激发了人们的好奇心.对自动控制系统的研究一开始就吸引了Maxwell和Routh等著名学者.他们用物理学的方法,借助微分方程等数学工具,研究系统的振动与数学模型参数之间的关系.但是在工程问题的解决,基本原理的提炼,特别是理论对工程实践的指导等方面,在历史上很长一段时期都比较欠缺.这个状况一直持续到20世纪初^[12].钱学森先生以他过人的洞察力,文简意赅地阐明了瓦特原理,

牢牢地抓住了蒸汽机与负载间扭矩的平衡这个本质问题^[2]。他指出速度偏差的根源是扭矩的失衡, 反馈控制的实质是通过控制量的修正达到平衡的恢复。其实对本质问题的把握不仅仅是技术问题, 也是文化问题。在中国文化中我们能够找到很多借鉴。

反馈控制回路中的周而复始, 循环反复, 有如“枢始得环中以应无穷”(《庄子·齐物论》), 体现了古人以不变应万变, 无为而无不为之智慧。过程控制中的温度、压力、流量等控制问题, 虽然形式不同, 本质是能量或者质量的平衡。对此工程师们早已有所感悟, 比如 60 年代出现的动态能量平衡法^[13,14]。通过反馈达到平衡的思想在中国文化中比比皆是, 比如黄帝内经的“实则泻之, 虚则补之, 无问其病, 以平为期”之说; 孟子的“无过无不及”之说, 等等。不管是工程, 健康还是社会, 一个共同目标是平衡; 不管用什么方法建立和恢复平衡, 依靠的都是信息, 都需要先知道系统到底是“实”还是“虚”, 是“过”还是“不及”。没有信息就没有平衡, 也就没有控制。所以控制离不开信息。

2.3 信息化与基于信息的控制

信息在工程控制中既是技术问题, 也是科学问题。以稳定性和最优性为核心的控制理论, 从反馈入手, 给工程控制带来严谨, 为日后的研究提供了工具。当然这还不够。我们还需要换一个角度, 从信息入手, 研究工程控制的核心问题。与放大器中狭义的反馈概念不同的是, 工程控制的问题是跨行业的, 情况更复杂, 不确定性的范围更大。所以钱学森会说, 这样的问题是不能依靠建模解决的, 需要在运行中对系统进行持续不断的感知和测量 (continuous sensing and measuring)^[2]。也就是说要不断地提取系统的动态信息。至于提取什么信息? 怎样提取? 还需要进一步思考。这显然是控制科学的本质问题之一, 需要我们对控制理论的基本概念反复推敲, 包括反馈。

物理过程的信息化不仅仅局限于工程系统, 就连单细胞这个生命的最小单元中都有信息化 (signaling) 功能。生命正是依靠这种与环境的信息交流, 趋利避害, 得以生存。所谓信息化首先要有某一个消息 (message) 和消息的载体, 比如蒸汽机的转速和飞锤的运动; 其次是这个消息在时间和空间上的起始点和目的地, 表示它在时空中的运动。也正是消息的这个运动, 它的产生、输送和接收, 构成了物理过程的信息化。信息化和基于信息所采取的行动, 形成了所谓控制, 使系统能够稳定运行, 即使它的内部和外部都存在不确定性。控制论所研究的对象正是系统驾驭本身和环境的应变能力, 是物理过程的信息化与控制机制的融合, 也是信息与行动的互动。

所以控制论也可理解为基于信息的控制科学, 描述的是动物与机器所共有的通讯与控制功能的交叉。由于这个交叉机制并不在传统控制理论范畴之内, 这才需要建立一门新的科学。所以控制论虽然包含控制理论, 却远远不止是控制理论。

3 信息的形式与提取

在工程控制技术的早期, 信息来源有限, 形式单一, 人们对它还缺乏意识, 更缺乏深入的讨论。随着传感器技术和观测器技术的发展, 信息的来源越来越多, 信息反馈的形式也丰富起来。信息的形式和提取问题也就随之而来。

3.1 误差反馈

误差反馈是控制系统最常用的信息形式. PID 控制器就是根据被控量与指令间的误差以及它的积分和微分产生控制量的. 蒸汽机的机理要满足物理学的定律, 可是它的特性的改变则完全是工程问题, 也是信息问题. 具体地说, 瓦特的控制装置发明包括两个环节: 1) 通过飞锤提取速度信息; 2) 根据速度信息调整进汽阀门和蒸汽机输出的能量. 前者通过信息通道的建立把一个封闭的能量转换过程 (蒸汽机) 信息化, 成为“信息物理系统”, 使基于信息的控制成为可能; 后者完成了因果关系的改造: 从物理过程中得到的信息, 反过来作用于物理过程, 使得蒸汽机中力和速度的关系变得循环往复, 互相依赖. 这是人类通过物理过程的信息化有意识地改造系统变量之间的关系的范例.

当然, 基于误差的反馈控制也有天然的缺陷. 振动就是其中之一, 是工程研究的焦点. 但是这个研究不能忽视信息的性质, 特别是信息提取技术 (传感器) 的限制. 比如在热工系统中能量平衡的建立. 由于测量手段的限制, 控制量的计算只能通过平衡的表象, 比如温度, 间接地得到. 由于误差信息是平衡的间接表象, 在时间和相位上都可能滞后. 由此引起的控制行为的滞后是造成振动的主要原因. 许多像振动这样棘手的工程问题, 都可以从信息的角度思考.

3.2 串级控制的信息特征

前面提到的串级控制, 原理就是利用多个信息通道的建立, 综合利用丰富的信息资源, 提高控制系统的品质, 并简化控制设计和参数整定. 它的设计物理意义明确, 信号之间的超前滞后关系一目了然, 为克服误差信息的滞后提供了有效的途径. 以运动控制为例, 根据信息的相位特性, 串级控制的方法是按照次序对电流, 速度和位置, 从里到外依次闭环. 电流的相位分别超前速度和位置 90° 和 180° , 带宽也分别比速度环和位置环大一个和两个数量级. 同理, 速度超前位置 90° , 速度环带宽高于位置环一个数量级.

串级控制的本质是利用多个过程变量, 逐级改造系统动态. 最后得到的控制量是根据多个信息而不是一个信息生成的, 大大减小了位置信息滞后的影响. 串级控制的缺点是多个传感器的使用, 增加了成本和复杂性. 但是如果利用下面介绍的状态观测器, 实时地从系统的输入输出信号中提取所需的过程变量, 可以减小对传感器的依赖. 总之, 随着信息技术的发展, 像串级控制这些在工程中行之有效、用途广泛的技术, 既可以保持它特有的直观性, 又能够获得新的发展空间. 状态的观测技术就是一例.

3.3 状态观测器

现代控制理论为信息的提取提供了一套全新的工具: 状态观测器. 这在古典控制论没有, 至今工业应用也比较有限, 不在大多数工程师的视野之内. 状态观测器根据系统的输入和输出信号, 实时地估计系统内的全部状态变量, 为控制器提供了前所未有的丰富信息, 特别是一些不便直接测量但是又十分重要的状态信息, 比如输出的各阶导数.

状态观测器的设计原理与瓦特原理异曲同工, 从概念上来说并不难理解, 依靠的也是误差反馈. 今天使用的状态观测器就像与被控对象并联的计算机仿真, 它根据被控对象的数学模型和输入输出信号, 通过解微分方程实时地计算各个状态变量. 当然, 由于模型的不准确等原因, 状态观测器计算出来的输出和实际系统的输出会不一样, 它们的误差可以实时获取, 并用来对状态观测进行实时地修正, 从而保证状态估计误差的收敛. 简单地说, 这就是状态

观测器的基本原理.

随着下面介绍的扰动概念的拓展和扩张状态概念的提出, 状态观测器的形式和应用都出现了跳跃式的发展. 这不但解决了模型前提的老问题, 还为非线性系统的线性化和物理过程的无扰化提供了新的工具.

3.4 扰动信息的获取

扰动是工程控制的核心问题, 对它的研究历史悠久. 早在 19 世纪初法国学者 Poncelet 就看出蒸汽机振动的原因是飞锤控制机制的滞后. 对此他提出直接测量扭矩并通过扭矩的变化调整进汽量的方案^[15], 被后人称为不变性原理. 这个设计理念一百多年后被当时的苏联学者采纳, 建立了著名的不变性理论, 并在 60 年代到达顶峰^[16,17]. 苏联学者继承了 Poncelet 的思想, 旗帜鲜明地提出工程控制系统的本质问题是不变性, 即如何使被控量不受扰动的影响. 而解决这个问题的关键是在扰动和控制器之间建立一条信息的快速通道, 用控制量迅速抵消扰动, 使被控量保持不变. 这就是双通道原理^[16], 前提是扰动量的实时测量. 输出的不变性还可以通过反馈的高增益实现, 不用测量扰动, 比如滑模控制原理, 是不变性理论的另一个分支. 双通道原理则避免了高增益的限制, 因此更加实用.

扰动问题的解决在中国历史悠久. 万百五先生曾经指出 Poncelet 和苏联学者的不变性原理与中国古代的指南车一脉相承^[4]. 据说指南车的发明始于黄帝(公元前 2698–2599 年), 史料记载至少可以追溯到东汉时代^[3]. 它的奇妙之处也在于扰动信息的获取, 也就是车向变化的测量. 指南车的基本原理也是根据扰动信息生成消除扰动的控制量. 指南车控制机制的功能是去扰, 即被控对象的无扰化, 下面还会讨论.

状态观测器的出现为扰动信息的获取开辟了新的路径. 美国学者 Johnson 70 年代第一次系统地使用这个工具估计外扰^[18,19], 原理是把扰动也看成动态系统的状态, 根据它的模型建立观测器. 几十年来, 扰动的观测问题受到了众多学者的关注, 并在近年来成为研究的热点^[20,21]. 更重要的是, 扰动概念的拓展使控制系统的设计突破了模型限制, 意义重大, 我们下面单独讨论.

4 从基于模型到基于信息的飞跃

工程控制论从它诞生起就面临着理论上的模型问题和工程上的扰动和参数整定问题. 钱学森先生曾经一再指出, 控制系统的设计不能依赖物理过程的数学模型. 他以机翼结冰时的飞行控制为例, 说明当系统的动态发生大幅度变化时, 控制器的功能变得异常重要. 可是恰恰在这个关键时刻, 基于原有模型设计的控制器却力不从心^[2]. 关肇直先生也很关注控制理论中的模型问题. 从方法上他提倡“经典的与现代的控制理论各有优缺点, 在设计中应当把两种方法结合起来使用.”对于理论的工程化他说“要真正用于实际, 应当敢于简化, 善于简化, 使最终设计的系统简单可靠.”^[22].

几十年来许多学者试图在现代控制理论的框架内解决模型问题, 提出了自适应和鲁棒控制等方法; 也有不少学者试图在现代控制理论的框架外寻找答案, 提出了神经网络、模糊逻辑和迭代学习等手段. 但是不管是用什么工具描述被控对象, 不管是辨识还是学习, 其结果都还离“敢于简化, 善于简化”和“简单可靠”的实际要求相距甚远. 这是不是因为模型问题的实质还不清楚?

宋健先生曾经说: 评估一个理论, 要看它的前提和命题是否符合工程设计, 是否抓住了主要矛盾^[23]. 工程控制的知行合一关键究竟在哪? 是不是因为我们没有抓住主要矛盾, 忽略了信息问题? 对此韩京清先生有独特的见解. 韩京清先生是 60 年代初控制理论研究室在中国科学院数学研究所成立时的第一批成员之一. 他从 60 年代到 80 年代, 相继在最优控制, 线性系统理论, 制导理论和人口理论等方面做出过显著贡献, 也为改革开放后中国控制界的人才培养做出了无私的贡献^[24]. 1989 年, 韩京清先生正式地提出对模型前提的质疑^[25].

4.1 信息问题的提出

韩京清先生在制导研究中领悟到, 控制器所需要的信息并不一定要从数学模型中来, 比如下面这个运动控制问题

$$\begin{cases} \dot{x} = v, \\ \dot{v} = a(t) + u(t), \end{cases} \quad (4.1)$$

其中 $u(t)$ 是控制量, $a(t)$ 是所谓的“固有加速度”, 是许多非线性效应的随时变化量. 这里, 通常不把 $a(t)$ 写成状态变量的非线性函数. 有时为了提高精度, 对 $a(t)$ 作出适当估计是必要的, 但不一定要知道 a 与状态变量之间的非线性函数关系本身. 他还说在这里我们并不太关心非线性对象的全局形态. 我们关心的焦点是如何根据一个过程的实时信息来搞好这个过程的控制问题. 这是导引理论提供给我们的主要思想方法^[25].

韩京清先生继续说: “根据系统对信号的某些响应特征或过程的某些实时信息来确定控制好一个过程的控制律, 是与靠系统的数学模型去找控制律的方法完全不同的思考方式. 这种思考方式, 相对于模型论方法, 可以称为控制理论中的“控制论方法””.

由此可见, 韩京清先生对模型问题的回答是用实时的和局部的过程信息取代描述系统全局动态的数学模型. 也就是说模型前提可以被信息前提取代. 至于怎样提取过程信息则是数年后才解决的问题.

4.2 扰动概念的拓展

韩京清先生基于局部信息的控制理念是从 89 年到 99 年逐步成熟的^[25-28], 这与他在 70 年代末和 80 年代初线性系统理论和抗扰问题的研究密切相关^[29-31]. 上面说的“固有加速度”后来被总扰动的概念代替, 指的是等效于输入通道扰动的被控对象所有不确定性的总和. 或者说系统内外所有对输出产生影响的不确定性都可以等效为被控对象输入端的未知量, 它们的总和就是总扰动. 有了这个概念被控对象就可以分为两个部分: 一个是它的标准型^[29], 另一个是总扰动. 标准型描述的是被控对象的理想模型, 不存在扰动, 也并不一定是实际对象的近似. 而总扰动描述的是实际对象与其标准型的动态之差, 这与传统意义上的扰动概念有所不同.

扰动的概念在控制理论中一般指系统中独立于状态的并产生不良影响的物理量, 是造成跟踪误差的原因之一. 但是总扰动则不同: 它可以不是具体的物理量, 也可以是系统状态的函数. 就像导引系统中的“固有加速度”, 它可以是系统其它状态变量的非线性函数, 可以是时变的, 可以受到外力的影响, 还可以是完全未知的. 它甚至可以包含控制器执行机构的非线性. 总之, 以 (4.1) 式为例, 系统的加速度分为两个部分: 一部分是由控制量产生的, 另一部分是系统固有而且基本未知的. 后者对应的就是总扰动, 它是虚拟意义的扰动, 是传统的

扰动概念的拓展.

韩京清早在 1979 年提出积分器串联型不光是线性也是非线性反馈系统的标准型^[29]. 标准型和总扰动概念的提出启发我们重新思考工程控制中最基本的概念, 包括模型, 扰动和反馈, 并为控制系统的设计建立一个全新的框架. 我们下面讨论总扰动的实时估计.

4.3 总扰动的实时估计

钱学森先生 1954 年提出内扰和外扰的问题时还不存在扰动观测的概念, 也还没有状态观测器. 但是他敏锐地意识到, 独立于模型的控制律要从其它地方得到信息, 比如持续检测和感知 (continuous sensing and measuring) 的概念和方法^[2]. 韩京清先生 1995 年提出的“扩张状态观测器” (ESO)^[26]正是这样一种机制, 是他在大量仿真实验中总结出来的规律和概念. 这要把系统的非线性动态看成总扰动的一部分, 从而把非线性被控对象的状态方程写成线性形式, 便于状态观测器的建立. 作为一个控制理论工作者, 这需要相当的勇气. 因为在控制理论中, 线性和非线性系统的控制是两个截然不同的领域. 韩京清先生认为这个分离是人为的, 是不必要的. 通过扩张状态, 韩京清先生巧妙地把困难重重的非线性系统的辨识问题转化为线性系统的状态观测问题, 大大简化了控制器设计.

其实早在 20 世纪 70 和 80 年代就有学者们借用现代控制理论的状态空间法研究扰动的观测问题, 并依此提出了一些基于扰动观测器的控制方法. 这些方法在很多地方都有相似之处^[20,21]. ESO 的突破在于状态概念的本身. 传统意义的扰动都是实体的, 有具体的物理意义的, 并且独立于系统状态的; 而 ESO 估计的却可以是虚拟的、与系统的其它状态相关的总扰动. 用 ESO 估计总扰动是个大胆的设计, 工程实践一而再, 再而三地证明了它的合理性. 理论分析的跟进则是在工程的成功案例的激励下开展起来的, 是近些年的事儿^[32-36]. 通过对总扰动的估计和消除, 系统的不确定性可以大大减小, 甚至接近于一个理想的无扰对象. 这既解决了理论中的模型前提问题, 也大大降低了工程中参数调整的难度. ESO 的成功还说明很多不同形式的扰动观测器都有观测和消除总扰动的功能, 只不过以前可能没有完全意识到^[37]. ESO 还可以跟大多数现有的观测器设计结合, 解决它们对模型的依赖并改进它们的抗扰性能^[38].

综上所述, 从 1989 年到 1999 年韩京清先生用了十年时间完成了从模型前提到信息前提的突破, 为钱学森先生对模型前提的质疑和内扰外扰的问题首次做出了回答, 同时也为工程控制技术的发展开辟了一个新的途径: 自抗扰控制. 值得注意的是, 任何一个控制器的功能强弱都与它依赖的信息的质量有关.

5 信息的品质

控制系统中信息的种类, 多少和好坏等问题都需要认真研究. 除了上面谈到的误差, 状态和扰动等实时信息, 控制系统使用的还有离线信息. 模型信息就是其中一种, 与工程中说的前馈控制密切相关, 与实时信息相辅相成. 信息的质量与控制系统的功能息息相关, 下面分别讨论.

5.1 “前 馈”

控制系统所获得的信息的多少和质量决定控制问题的难易. 一个信息丰富的控制器, 眼

观六路耳听八方,比信息贫乏的控制器功能应该更强.显然,控制器的设计不仅仅是稳定性和优化的问题.在传统的输出和误差信息之外,控制系统里面常常还有很多信息可以利用,可以使控制器的功能更强,可以让控制器的设计更简单.除了上面提到的扰动信息和串级控制中多个系统变量的利用之外,工程上常用的还有所谓的前馈控制,又称开环控制.它使用的是另外一种类型的信息:离线信息.

所谓前馈控制就是根据指令和被控对象的模型,直接计算相应的控制量,避免反馈中的测量噪声和滞后的影响,在工程中用途广泛.开环控制依赖的是通过辨识或者经验得到的模型信息,在工业应用中经常以图表的形式出现.钱学森描述反馈控制时也注意到控制量的一部分可以根据物理过程的知识计算得来^[2].这也是信息的一种,只不过不是实时的.不管是通过迭代学习还是建模,这种信息的获取可以帮助降低系统对实时信息反馈的依赖,改善控制系统的品质.

离线和在线信息在使用中相辅相成,就像职业运动员,反复训练,不断完善和丰富动作的离线模型,建立能够快速调用的肌肉记忆.在比赛中他们要根据实时信息对动作进行适当的调整,以达到预期的效果.控制系统前馈和反馈的组合也是这个道理.前馈是工程用语,并不十分严格.比如把扰动信息的实时反馈称为前馈,把基于扰动反馈的控制系统称为开环控制,等等,这里暂且不论.所谓前馈控制的本质是用离线信息弥补在线信息的不足.这是为什么在一个采样速率高,噪声小,实时反馈信息丰富的控制系统中往往不需要精心建立前馈.相反,控制系统得到的实时信息越是贫乏,信息质量越低,控制器就越要依赖离线信息.因此,控制系统的设计方案在很大程度上取决于信息的质量.

5.2 信息的实时性

蒸汽机的振动问题也是信息的实时性问题,源于速度传感器(飞锤)的滞后.这是因为飞锤本身也是个传动系统,从蒸汽机速度的变化到飞锤位置的改变需要时间.由于速度信息不能及时地传递给控制器,造成控制行为滞后,并由此产生振荡.因此,传感器的实时性是保证控制系统品质的一个主要因素.同理类推,如果测量信号因为噪声的原因需要滤波,滤波器的相位滞后也可能成为信息传递的瓶颈,同样会影响信息传递的实时性.

由此可见,控制系统中信息的实时性是一个本质特性.特别是当系统存在大时滞时,信息反馈的实时性大大下降,控制系统的品质也必然随之下降.道理就是信息量的不足很难用控制手段弥补.采样频率低,噪声大,时间延迟等工程上常见的问题其实性质是一样的:信息的短缺造成控制问题难度的升高.

前面说过,实时信息的短缺可以用离线(模型)信息弥补,过程控制就是个例子.特别是对于基于状态观测器的设计方案,过程变量的延迟造成观测器输入在时间上错位,很容易造成不稳定.这使控制系统设计的难度大大升高.人们在工程实践中发现的一个有效对策是预测控制.本质是用离线信息,即模型信息,来弥补实时信息的不足,也是数学模型的一个有效用途.在工程中有时候也会不惜成本地给物理过程建模,做预测控制,克服时滞问题,就是这个道理.所以工业控制并非都是无模型的.是否需要为被控对象建立一个详细的数学模型是根据反馈信息的品质决定的.所以建模在工程控制中有它的作用,不能一概否定.

除了噪声和延迟,信息的实时性还受到采样速率的限制,常常造成系统带宽的瓶颈.比如在汽车内燃机的控制中,采样频率常常受到发动机转速的限制.这时就要充分地利用系统

内的各种信息, 包括模型信息, 扰动信息和其它相关变量的实时信息^[39]. 信息的实时性对控制系统有关键性的作用, 这也反映在信息的选择上.

5.3 信息的选择

控制问题的合理解决取决于我们对问题的研究和理解. 古人说: “物有本末, 事有终始, 知所先后, 则近道矣.” 好的设计应该自然而然, 四两拨千斤. 这要求我们对问题的理解入木三分. 所谓“本末”、“终始”和“先后”则是研究问题、认识问题的关键所在, 其中抓住信息的特性尤为重要. 以 (4.1) 式的被控对象为例, 一般控制器使用的信息为输入 $u(t)$ 和输出 $x(t)$ 信号. 而解决问题的关键是固有加速度 $a(t)$. 所谓模型前提就是首先辨识 $a(t)$ 并把它写成状态的函数, 然后再根据它设计控制器. 工程实践表明不知道 $a(t)$ 也不要紧, 利用误差反馈也能克服它. 韩京清先生的独到之处是把 $a(t)$ 看成物理过程的局部信息, 不管它与位置和速度变量是什么样的函数关系, 不管它是否受到外界和内部扰动的影响, 只要我们能够快速准确对它进行估计, 我们就可以用控制量与它相消, 使控制问题大大地简化. 因此, 控制器的设计问题也是信息的选择问题.

由于被控对象的多样性和复杂性, 各种各样的扰动不一定都能够用控制量直接抵消. 但是从它们对输出的影响看, 总可以等效看成与控制量在同一个信息通道的未知量, 即韩京清说的总扰动. 因此不管具体扰动的形式是什么, 它对输出量的影响可以通过提取总扰动的信息来降低, 抗扰可以在扰动还没有来得及对输出产生很大影响之前完成, 这与古人“上医治未病”的说法异曲同工, 关键的是控制行为的超前, 防患于未然.

这从系统的幅频特性和信息的相位特性也很容易理解: 控制行为的超前是降低振动、减小误差的有效手段; 它并不一定要通过超前滞后网络来实现. 信息超前的手段更为彻底, 更为自然. 比如 (4.1) 式的固有加速度 $a(t)$ 在相位上超前它的位置信息 $x(t)$ 180° , 形成相位上的“知所先后”, 是解决问题的关键. 从前面说的串联控制的广泛使用中我们也可以看到相位的重要性. 比如在位置控制中使用超前 90° 的速度信息和超前 180° 的电流信息, 通过逐级闭环, 系统地改善系统的幅频特性. 信息的来源越多, 对它的特性的理解, 分类和选择越重要. 一个系统内通常会有某些关键的物理量, 比如上述的固有加速度和热工系统内的热量, 等等, 与被控变量之间存在因果关系. 这就是前面说的本末关系. 抓住了本质, 问题就可以迎刃而解.

在时间上, 误差的产生和它的根源也有先来后到. 这就是前面说的“事有终始”. 基于误差的控制策略一般是被动的, 只能在误差出现之后对它进行纠正, 属于控制器的初级形式. 随着对控制问题认识的加深和对物理过程因果关系的理解, 我们通常会在被控变量的上游找到影响它的扰动. 合理利用这样的扰动信息, 控制行为就可以变得更加主动. 控制器的高级形式体现在它综合地提取和使用扰动信息的能力.

当然, 信息反馈的初级和高级形式可以结合使用, 形成一个广义的串级控制. 扩张状态观测器的使用可以为控制器提供大量的信息, 包括被控输出变量的各阶微分和总扰动, 构成了一个多级信息反馈控制结构. 也许这就是控制器的一定之规, 用来应付物理过程的千变万化. 可以说信息的选择决定了控制器的形式. 下面举例讨论抗扰控制的二元结构.

6 基于扰动信息的二元控制设计

以上的讨论说明信息问题, 包括信息的选择, 形式, 提取, 择优等等, 与控制设计密切相关. 我们还特别讨论了扰动概念的拓展和扩张状态的观测. 基于扰动观测的抗扰控制一般可以用图 1 所示的二元设计框架描述. 自抗扰控制就是一例. 作为 PID 之外的另一个通用控制器, 它的建立基于以下几个原则

- 1) 不依赖物理过程的数学模型;
- 2) 不放弃微分方程和状态方程等数学工具;
- 3) 控制器的结构简单直观;
- 4) 控制器参数的物理意义明确, 便于整定.

其中去扰和控制是两个基本独立的部分. 去扰器的功能是把被控对象改造成理想的无扰对象, 消除内扰和外扰对输出的影响, 使被控对象的千变万化转化为无扰对象的一定之规. 无扰化后的控制器设计大大简化, 控制器本身和它的参数整定都可以很方便地标准化, 从而满足通用控制器设计工程化的要求.

在基于扰动信息的二元设计中, 被控对象的观念也有所不同. 在传统设计中控制器的结构和参数都是根据某一个被控对象的量体裁衣, 一一对应; 在这里的二元设计中则不同: 不管具体的被控对象如何多变, 控制器的设计是固定不变的, 因为它控制的是事先选取的被控对象的标准型, 即无扰对象. 而实际对象即使千变万化, 通过去扰后, 可以非常接近无扰对象. 这样我们就不要再量体裁衣式地根据每一个对象的模型设计不同的控制器. 下面我们首先介绍去扰器的工作原理.

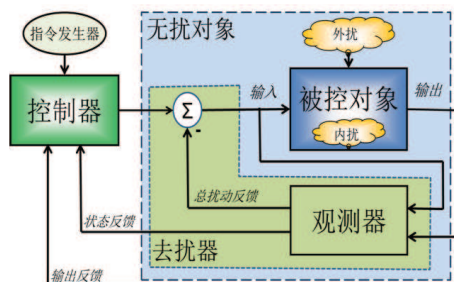


图 1 基于扰动信息的二元控制设计

(Figure 1 Disturbance information based dualistic design)

6.1 去 扰

去扰解决的是一个似乎不可调和的矛盾: 物理过程中大量的不确定性和控制器有限的工作范围. 所谓去扰, 首先要通过传感器, 滤波器和观测器等手段实时地获取扰动信息, 然后用控制量将其抵消, 使系统进入无扰状态, 使系统的输出不受扰动的影响. 这与前面说的不变性原理设计目标是一致的, 只不过扰动的概念是广义的.

去扰是指扰动对输出的影响而言, 并不是要把系统内的每个扰动都一一去除. 要消去的是所有扰动对被控对象输出影响的总和等效在被控对象输入端的总扰动; 去扰就是要估计和消除这个总扰动, 是广义的抗扰, 目的是被控对象的无扰化. 这种抗扰不依赖于系统的动

态模型, 通过实时地提取系统内部和外部的不确定性的信息改造系统, 使系统的动态品质保持不变, 实现了系统输入输出之间动态关系的“不变性”, 是系统动态改造的高级形式。

在过去几十年里国内外有不少学者从不同的角度, 针对不同的问题, 采用不同的方法进行了抗扰研究。近年来抗扰领域已经成为控制研究的热点^[20,21]。这些工作在方法上各有千秋, 解决的问题, 复杂性和实用价值都有所不同, 但是最终目的都是去扰, 或者建立基于去扰的控制机制, 都可以用二元设计的理念, 综合地讨论和研究, 同时也提出了一系列新的研究方向和问题, 比如系统的动态和扰动信息的综合利用问题^[39], 根据扰动信息的复合分层精细抗干扰问题^[40], 等等。我们需要承前启后, 继续建立和完善工程控制的理论体系, 指导工程技术的发展。

被控对象的无扰化是根据钱学森、关肇直和韩京清等学者的学术思想总结提出的。他们站在控制科学的制高点为我们指路。他们的质疑精神和开创精神都是我们要学习的, 特别是他们在科学研究中对共性问题的提炼。对于控制理论的模型前提, 过去一些学者试图在控制理论的框架内对它们进行弥补, 产生了诸如自适应控制与鲁棒控制等分支; 另一些学者试图在控制理论的框架之外找到答案, 建立了诸如模糊控制, 神经网络和数据驱动等研究方向。这些工作现在都可以在二元控制的框架中统一起来。如果工程控制的本质问题是系统的不确定性, 那么无扰化就是解决问题的关键所在。抗扰控制的各个分支都可以在无扰化的前提下, 在理念和方法上统一起来, 成为一个新的理论体系, 为工程控制的进一步发展提供方向和动力。

控制理论中的很多词汇, 比如“扰动”和“抗扰”已经用得很久了, 比较容易误解。我们在这里启用“去扰”这个词汇来表示我们对被控对象的改造, 意思是把各种对输出有不利影响的因素先去掉。目的是大大简化控制器的设计和参数整定, 并使其标准化。韩京清先生提出的扩张状态观测器就是一个这样的去扰手段, 经过简化和参数化之后, 已经在工程中成为一个简单、有效、直观的工具。

6.2 控制

PID 控制器在工业控制中的长盛不衰对我们很有启示。它说明工业中的通用控制器不仅要形式简单和统一, 还要能够对各种截然不同的物理过程应付自如。如果控制器的设计基于某一个物理过程的数学模型, 那么它就很难满足这些要求, 很难成为工业控制的通解, 也不易于标准化。另一方面, PID 控制器存在明显的缺陷, 也给我们的研究提出了具有工程意义的课题, 特别是它的抗扰和参数整定问题^[41,42]。二元设计为这些问题的解决和控制器的标准化提供了一个新的框架。去扰后的物理过程, 可以近似地看为它的某一个标准工作状态, 即标准型。标准型的具体形式应该根据问题的类型适当选取。最常见的是积分器串联型

$$y^{(n)} = u_0, \quad (6.1)$$

这里 y 和 u_0 分别是无扰对象的输出和输入, n 是系统的阶数。相对于 (6.1) 式的控制器设计选择很多, 包括广义的 PD 控制器

$$u_0 = \sum_{m=0}^{n-1} k_m e^{(m)} + r^{(n)}, \quad e = r - y, \quad (6.2)$$

这里 r 为指令, e 为跟踪误差, $k_m, m = 0, 1, \dots, n-1$, 为控制器的参数, 可以通过极点配置等方法, 为满足各项设计指标选定。广义 PD 控制器的特点是简单实用, 便于标准化, 它对应的

闭环系统为

$$y^{(n)} = \sum_{m=0}^{n-1} k_m e^{(m)} + r^{(n)}, \quad e = r - y. \quad (6.3)$$

当然对于不同类型的物理过程, 控制设计的要求也不同, 比如快速性, 精确性, 鲁棒性和性价比等. 因此无扰对象的标准型和控制器的选择, 不一定套用 (6.2) 式和 (6.3) 式. 工业控制中的另外一个重要课题是控制器的参数整定. 下面专门讨论.

6.3 参数整定

参数整定是工程控制的一个重要问题. 这里面有一个往往不受重视的观念问题: 控制器的参数应该由谁, 根据什么决定?

工程中的参数整定是在各种互相矛盾的设计要求中求取折中, 是具体的, 多方面的, 经验性的. 折中也是工程设计的共同特点, 它的好坏很难用一个简单的数学公式来表示. 所以我们建议在二元设计中把参数优化的最终选择留给用户, 即控制器的使用者. 我们的任务是要让控制器参数的物理意义明确, 便于整定. 这对状态观测器的参数尤其重要, 需要我们设法用工程的语言描述它的物理意义. 关肇直先生关于“经典的与现代的控制理论各有优缺点, 在设计中应当把两种方法结合起来使用”的建议非常到位. 自抗扰控制技术的工程化就是遵循了这个道理.

韩京清先生开创自抗扰控制时, 为了提高控制器的能力, 在去扰和控制机制中都采取了非线性增益, 取得了良好的效果, 但是也带来了工程实现的问题. 原因是它的结构相对复杂, 调试参数多而且不够直观. 为了打破了这个局面, 我们采用了线性增益, 并且通过观测器和控制器的参数化, 把参数整定简化为调整观测器和控制器的带宽 ω_o 和 ω_c 的问题^[43], 把控制器和观测器的参数与工程师熟悉的带宽语言挂钩. 自抗扰控制的线性化和参数化实现的是关先生提出的状态空间法和频域法的结合, 也说明在简化中, 牺牲一点灵活性和性能是值得的.

自抗扰控制的线性化和参数化还使对它的分析更加方便. 比如自抗扰控制的频域分析显示了它对被控对象某些参数在大范围变化的不敏感性, 也使得其独特的品质一览无余^[33]; 基于线性化和参数化的时域分析建立了控制器参数与误差的数学关系, 使自抗扰控制技术的论证更加严谨^[34-36]. 反过来, 频域和时域分析也为参数整定提供了依据.

7 结束语

控制论 (cybernetics) 是维纳先生创立的一门信息与控制的交叉学科, 是控制理论的前身, 也反映了信息问题在控制中的重要性. 工程控制论 (engineering cybernetics) 是钱学森先生创立的一门工程科学, 为的是抽象和深化工程中的设计原理并为工程实践提供指导, 反映了他对理论上的模型前提问题和工程中内扰、外扰问题的深切关注. 自抗扰控制是韩京清先生创立的工业控制技术, 也是一个独特的思考方式. 他提出了总扰动和扩张状态等基本概念, 以被控对象的去扰为核心, 实现了控制器的设计从基于模型到基于实时信息的飞跃. 生活在信息化社会的今天, 几乎所有工程系统都早已信息化. 从信息的角度研究控制早已势在必行, 控制技术和理论的发展又出现了新天地. 历史上几乎所有工程控制的重大发明都与信息的提取和使用有关. 几十年来争论不休的模型前提问题以及工程控制界的理论联系实际

问题原来也是信息问题. 不管是烽火台、消息树还是飞锤装置, 不管是人类社会还是物理系统, 有了信息才有行动, 有了信息才有控制. 所以控制问题首先是信息问题, 控制理论也应该是某种意义上的信息理论. 从古代的指南车到现代的《工程控制论》和《自抗扰控制技术》, 从人文到科技, 一个具有华夏文化特点的控制思想一直走着一条与众不同的路径. 让我们满怀信心, 继续走自己的路.

参 考 文 献

- [1] Wiener N. *Cybnetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Boston: MIT Press, 1948.
- [2] Tsien H S. *Engineering Cybernetics*. NewYork: McGraw-Hill, 1954.
- [3] 刘仙洲. 中国机械工程发明史. 北京: 科学出版社, 1962.
(Liu X J. *History of Chinese Mechanical Engineering Inventions*. Beijing: Science Press, 1962.)
- [4] 万百五. 我国古代自动装置的原理分析及其成就的探讨. *自动化学报*, 1965, 4 : 57–65.
(Wan B W. On certain automatic equipments in ancient China — A discussion of their principles and achievements. *Acta Automatica Sinica*, 1965, 4 : 57–65.)
- [5] 韩京清. 自抗扰控制技术 — 估计补偿不确定因素的控制技术. 北京: 国防工业出版社, 2008.
(Han J Q. *Active Disturbance Rejection Control Technique — The Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties*. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
- [6] Xia Y, Fu M. *Compound control Methodology for Flight Vehicles*. Berlin Heidelberg: Springer, 2013.
- [7] Guo L, Cao S. *Anti-Disturbance Control for Systems with Multiple Disturbances*. CRC Press, 2013.
- [8] Li S H, Yang J, Chen W H, et al. *Disturbance Observer-Based Control: Methods and Applications*. CRC Press, 2014.
- [9] Zhong Q C, Normey-Rico J E. Control of integral processes with dead-time. Part I: Disturbance observer-based 2 DOF control scheme. *IEE Proceedings on Control Theory and Applications*, 2002, 149(4): 285–290.
- [10] Hou Z, Jin S. *Model Free Adaptive Control: Theory and Applications*. CRC Press, 2013.
- [11] 刘维. 自动调节系统的工程设计方法. 北京: 机械工业出版社, 2011.
(Liu W. *The Design Method of Automatic Regulating System in Engineering*. Beijing: China Machine Press, 2011.)
- [12] Trinks W. *Govenors and Governing of Prime Movers*, New York: D. Van Nostrand Company, 1919.
- [13] Bachofer Jr J L C, Whitten D R. Direct energy balance control at portland power station, *ISA J.*, 1963, 10(10): 45.
- [14] Friedlander G D. Computer-controlled power systems, Part I — Boiler-turbine unit controls, *IEEE Spectrum*, 1965, 60–81.
- [15] Poncelet J V. *Cours de Mecanique Appliquee aux Machines*. 4th Edition, Ed. by Kretz M. Paris: Gauthier-Villars, 1874.

- [16] Petrov B N. The invariance principle and the conditions for its application during the calculation of linear and non linear systems, 1st Congress of IFAC, Moscow, USSR, Thornton Butterworth, Ltd., London, England, 1961, 117–126.
- [17] 胡保生. 扰动调节. 上海: 上海科学技术出版社, 1963.
(Hu B S. Disturbance Adjusting. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1963.)
- [18] Johnson C D. Accomodation of external disturbances in linear regulator and servomechanism problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1971, **16**(6): 63–64.
- [19] Johnson C D. Modern control theory: Practical importance and present impotence. *Transactions of the First Naval Weapons Center Symposiums on Application of Control Theory to Modern Weapon Systems*, 1973, AD 763373: 1–27.
- [20] Radke A, Gao Z. A survey of state and disturbance observers for practitioners. The 2006 American Control Conference, 2006, 1–6.
- [21] Chen W, Yang J, Guo L, et al. Disturbance observer-based control and related methods: An overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **63**(2): 1083–1095.
- [22] 关肇直. 现代控制理论中的某些问题 (I). 自动化学报, 1980: 006.
(Guang Z Z. Certain Issues in Modern control theory (I). *Acta Automatica Sinica*, 1980: 006.)
- [23] 钱学森, 宋健. 工程控制论 (修订版). 北京: 科学出版社, 1981.
(Qian X S, Song J. Engineering Cybernetics. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1981.)
- [24] 中国科学院系统控制重点实验室. 自抗扰控制技术资料选编, 2013.
(The Key Laboratory of Systems and Control, Chinese Academy of Sciences. Anthology on Active Disturbance Rejection Control, 2013)
- [25] 韩京清. 控制理论 - 模型论还是控制论. 系统科学与数学, 1989, **9**(4): 328–335.
(Han J Q. Control theory: Model approach or control approach. *System Science and Mathematics*, 1989, **9**(4): 328–335.)
- [26] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用. 控制与决策, 1998, **13**(1): 18–23.
(Han J Q. Auto-disturbance rejection control and its applications. *Control and Decision*, 1998, **13**(1): 18–23.)
- [27] 韩京清. 控制系统的鲁棒性与 Godel 不完备性定理. 控制理论与应用, 1999, **16**(Suppl.): 149–155.
(Han J Q. The robustness of control system and Godel ‘Incompleteness theorem’. *Control Theory & Applications*, 1999, **16**(Suppl.): 149–155.)
- [28] Han J. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(3): 900–906.
- [29] 韩京清. 线性系统的结构与反馈系统计算. 1979 全国控制理论及其应用论文集, 北京: 科学出版社, 1981, 43–55.
(Han J Q. Structure of linear control systems and the feedback system computation. Proceedings of National Control Theory and Applications, Beijing: Science Press, 1981, 43–55.)
- [30] 韩京清. 线性控制系统的能抗干性. 自动化学报, 1981, **7**(1): 13–24.
(Han J Q. The disturbance-resistibility of linear control systems. *Acta Automatica Sinica*, 1981, **7**(1): 13–24.)
- [31] 王世林, 许可康, 韩京清. 干扰解耦问题. 自动化学报, 1982, **8**(4): 291–298.
(Wang S L, Xu K K, Han J Q. Disturbance decoupling problem. *Acta Automatica Sinica*, 1982, **8**(4): 291–298.)
- [32] Zheng Q, Gao L Q, Gao Z. On stability analysis of active disturbance rejection control for nonlinear time-varying plants with unknown dynamics. The 46th IEEE Conference on Decision and Control, 2007, 3501–3506.
- [33] Tian G, Gao Z. Frequency response analysis of active disturbance rejection based control system. The 16th IEEE International Conference on Control Applications, 2007, 1595–1599.
- [34] Zhou W, Shao S, Gao Z. A stability study of the active disturbance rejection control problem by a singular perturbation approach. *Applied Mathematical Sciences*, 2009, **3**(10): 491–508.

-
- [35] Zheng Q, Gao L Q, Gao Z. On validation of extended state observer through analysis and experimentation. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2012, **134**(2): 024505–024510.
 - [36] Guo B Z, Zhao Z L. On convergence of the nonlinear active disturbance rejection control for MIMO systems, *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2013, **51**(2): 1727–1757.
 - [37] Xue W, Huang Y. Comparison of the DOB based control, a special kind of PID control and ADRC. The 2011 American Control Conference, 2011, 4373–4379.
 - [38] Xue W, Gao Z. On the augmentation of Luenberger observer-based state feedback design for better robustness and disturbance rejection. The 2015 American Control Conference, 2015, 3937–3943.
 - [39] Xie H, Song K, Yang S, et al. On decoupling control of the VGT-EGR system in diesel engines: A new framework, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, **99**: 1–9.
 - [40] Guo L, Cao S. Anti-disturbance control theory for systems with multiple disturbances: A survey. *ISA Transactions*, 2014, **53**(4): 846–849.
 - [41] O'Dwyer A. PI and PID controller tuning rules: An overview and personal perspective. The IET Irish Signals and Systems Conference, 2006, 161–166.
 - [42] O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. London, U.K.: Imperial College Press, 2003.
 - [43] Gao Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning. The 2003 American Control Conference, 2003, 4989–4996.