

状态空间方法vs全驱系统方法（VI） ——方法论变革与理论技术创新

段广仁 哈尔滨工业大学 控制理论与制导技术研究中心
南方科技大学 控制科学技术中心

摘要 在科学史上，很多重大的科学发现都是伴随着某项重要数学工具的产生而产生的。相比之下，自然有这样的质疑：全驱系统方法，究竟提出了什么新的数学工具作为支撑？众所周知，控制理论发展史上最重要的几方面贡献，如 Lyapunov 方法、Pontryagin 极大值原理等，尽管它们本身可以被看作数学工具，但它们自身都不是伴随新数学工具的诞生而产生的。像状态空间方法这种方法论的变革也不是受到新数学工具的推动。作为控制理论发展史上的又一次方法论变革，全驱系统方法的产生也不以发现新的数学工具为前提。

关键词 非线性控制，状态空间方法，全驱系统方法，方法论变革，科学发现

0 一个问题引发的思考

本文的起因和观点是由下述关于全驱系统方法的质疑引发的。

问题：许多重大的科学创新往往都伴随着某种新数学工具的诞生，请问全驱系统方法的提出有什么新的数学工具做支撑？

自从全驱系统方法^[1-4]提出以来，笔者一直在大力推广这种方法，在多个国内外学术会议大会报告中介绍了这种方法，自然在国内外控制界产生一些反响。方法提出的来龙去脉很清楚，道

理也很简单，方法的优越性也展示得很明显。相信大多数学者都能够接受和认可，但也有一些学者认为这种方法论的改变并没有伴随实实在在的数学基础上的创新，没有提出深奥的数学结果来支撑，因而总觉得缺了点儿什么。而且可以想象，这一问题可能在很大程度上也代表了国内一批控制专家的声音。

毋庸置疑的是：全驱系统方法是建立在已有数学工具基础之上的，笔者想不到在提出全驱系统方法时究竟有什么大一点儿的数学工具上的创

新。这是一种理论体系的改变、方法论的变革，不一定伴随新数学工具的诞生。

如果有两种方法，其效果相同，但前者复杂、数学上深奥；后者简单、数学上浅显。请问是前者好，还是后者好？有时候我们会追求数学上的深度，但对于应用基础科学研究而言，既简单又能解决问题的方法才应该是更好的方法。

退一万步说，全驱系统方法中也存在许多非常困难的问题，但是在方法刚刚问世的初期，我们一方面对这些难题还认识不够，另一方面本着由浅入深的原则只能介绍一些基本的问题。相信在今后攻克全驱系统方法中的某些难题的时候，可能会有一些数学上工具性的结果出现。

虽然这个问题是针对全驱系统方法的，但它涉及对控制理论发展史的深入思考和总结。就控制理论而言，新的理论和方法是否经常伴随着新数学工具的产生？控制方法的创新与数学工具的创新之间是否具有必然性？这的确是个值得探讨的重要问题。

为了能更好地理解文中所涉及的一些事实和结论，还请读者尽量参考文献 [1-4] 和 / 或前阶段我们在《系统与控制纵横》上完成的“状态空间方法 vs 全驱系统方法”系列的前几篇学术杂文：

- (I) 从全局镇定问题看两种方法论，2021, 8(2): 33-44；
- (II) 从能控性问题看两种方法论，2022, 9(1): 13-24；
- (III) 从综合能力看两种方法论，2022, 9(1): 25-33；
- (IV) 线性系统理论的作用，2022, 9(2): 22-30；
- (V) 关于反馈线性化，2022, 9 (2) : 32-42。

1 许多科学发现确实伴随新的数学工具问世

历史上很多的科学发现，都是因为在相应时期数学上出现了新的强有力的数学工具。

大约十年前风靡一时的 LMI 方法为什么会出 现？那是因为凸优化问题得到了实质性的进展。人们提出了求解优化问题的内点法和椭圆算法^[5]。这是底层数学工具的突破。如果没有这种数学工具的出现，就没有 LMI 问题的最优解，也就没有国际控制界轰轰烈烈的 LMI 热潮。

提到 LMI 了，顺便多说两句。LMI 曾经热到了什么程度？以至于这一领域成为高被引论文的集中发源地；以至于这一领域的某些论文的引用率都已冲淡了原始的关于内点法论文的影响。

言归正传，再提一下中国科学院系统科学研究所程代展课题组的工作。他们在矩阵运算的半张量积方面做出了系统性的贡献^[6]，并据此研究了具有有限个状态取值的离散逻辑动态系统。这就是这方面的一个典型例子，新提出的数学工具就是半张量积理论，控制理论方面的科学创新是该类离散逻辑动态系统的控制方法。他的一篇重要论文^[7]获得了 Automatica 最佳论文奖，他这方面的工作也获得了 2014 年国家自然科学奖。程代展研究员的这一工作自然是很多人都欣赏和希望的创新模式。

类似地，再提一下笔者以前的工作。笔者以前的工作主要集中在控制系统的参数化设计上。这种参数化设计首先给出动态系统控制律的完全参数化表示，从而允许我们将控制系统的性能设计问题明确地转化为一个独立的优化问题来解决。但这种控制律的参数化表示也依赖一个数学工具，那就是 Sylvester 矩阵方程的参数化解。Sylvester 矩阵方程在许许多多的问题中都有着重要应用。由于它本质上是一个线性矩阵方程，其求解自然没有什么难度。但与众不同的是我们的工作给出了这类矩阵方程的解的全体，即其通解的一般的参数化表示，而且这

种参数化表示是解析的、完全的、显式的；另外这种参数化解还是统一的，因为它适用于许多推广情形，甚至包括方程中核心参数矩阵未知的情形^[8,9]。如果没有这一工具，就没有我们的控制律参数化表示，也就没有我们后来的控制系统参数化设计方法，当然也就没有我们的两个国家自然科学奖。所以笔者对本文开篇所提出的问题是充分理解的。

另外一种司空见惯的情况，就是科学家们的学术论文。很多情况下，为了获得论文中的主要结果，需要建立一些数学上的准备，这种准备常以引理的形式表述。这样的引理相对于那一篇论文来说，可能就是数学工具，但一般说来这种数学工具的应用面都很小，主要用来导出那一篇具体论文中的主要结果。当然，事情也可能有些例外，也可能有一些这样的引理应用面相对要大一些，从而构成一类或者几类问题的数学工具。比如，笔者和周彬、林宗利联合建立了一类特殊 Riccati 方程解的多个性质^[10-12]，并基于这些性质提出了输入受限控制系统的一系列设计方法。这一工具被很多人采用，其中包括国内一批著名学者以及 Saberi 等许多著名国际学者。

2 方法论变革未必以发现新数学工具为前提

上一节提及了几类数学工具，凸优化算法、半张量积、Sylvester 矩阵方程和一类特殊的 Riccati 矩阵方程。它们支撑了几类方法：LMI 方法、离散的逻辑动态系统控制方法、控制系统的参数化设计方法和输入受限控制系统设计方法。这些方法虽然看起来已经具有很大的影响面，但其影响都还局限在某一个领域内，与方法论的变革所带来的影响自然无法相提并论。然而方法论的变革却不一定以提出新的数学工具为前提，反倒是某些基于新提出的数学工具所完成的科学创新往往都是局部的、技术性的。

今天人工智能的第三次浪潮靠的是什么？这么

大的一个“学科”的产生是由什么数学工具引发的吗？深度学习算是数学工具上的新发现吗？众所周知，神经网络已经是一个很老的话题了，今天人工智能大火的原因相当大的成分归功于强大的计算能力的提高，而不是哪个新数学工具的出现！20 世纪 60 年代、80 年代的科学家就想不到增加神经网络的层数和深度吗？不是想不到，是受计算机能力的限制做不到！

我们还是回到控制理论发展史上的方法论变革来看看状态空间方法的产生过程。

1914 — 1918 年和 1939 — 1945 年的两次世界大战催生了古典自动调节原理。1932 年，H. Nyquist 的经典论文 *Regeneration Theory* 标志着基于频域方法的古典控制论的初步形成。1956 年钱学森的 *Engineering Cybernetics* 一书则对古典频域理论进行了系统总结和完善。之后，控制理论的创新一时间几乎停滞。

但很快，控制理论又得到了蓬勃发展，因为这一时期爆发式地出现了 Kalman 滤波、Bellman 动态规划和 Pontryagin 极大值原理等一大批里程碑式的结果。值得指出的是，所有这些结果都是建立在一阶微分方程描述的系统框架之上的。这种基于一阶系统框架的方法被 R. E. Kalman 于 1960 年正式命名为状态空间方法，它把控制理论从频域引向时域，从单变量引向多变量。

根据哈佛大学终身教授、美国工程院院士、中国科学院和工程院外籍院士、控制理论著名专家何毓琦 (Yu-Chi Ho) 先生的观点 (见图 1)，在 1950 年后期，古典控制理论已经陷入危机 (建议读者完整阅读何先生的博客，否则很难明白 “a similar situation” 和 “the last words” 所指的是什么)，但因 Kalman 等人及时引入了全新的状态空间方法，使得控制理论才再现生机。

从古典频域方法到状态空间方法，这是公认的

theoretical work in control. In fact, a similar situation existed towards the late 1950s. Given the text by Bode on feedback amplifiers, Truxal's text on adaptive control, and Newton-Gould-Kaiser's work on frequency domain approach to feedback controller design in stochastic environment, people and MIT thought the last words have been said until new aerospace problems arise and Kalman et al heralded in an entirely new approach. Same thing need to happen again. "Control is dead" until it is reborn like Lazarus by a Jesus miracle. In this sense, one can argue CONTROL is certainly not dead and now may be waiting for the "second coming" of another golden age of control. But chances are it won't be from extending the current mature theory.

图1 何毓琦先生博文片段1

方法论的变革。这种变革所带来的影响之大是控制理论发展史上任何一个单项的科学创新都无法比拟的。然而，状态空间方法的问世是源于 Kalman 当时提出了哪一项新的数学工具吗？或者是源于哪一项当时数学界出现的新数学工具吗？没有！

客观地说，状态空间方法最基础的数学工具就是微分方程，但那是早了一个多世纪就有的事情！

再往小了说，是线性微分方程的解吗。那也是早了一个世纪的事情！Euler 于 1750 年就给出了线性多变量一阶微分方程的解了。

如果我们非要从发现和提出新数学工具的视角再去看 Kalman 的开创性论文 *On the general theory of control systems*，也可能很失望，因为文中所用的基本上都是当时已有的数学工具。可尽管如此，在控制界内谁又敢对其当时的工作有半点儿藐视呢？

3 重大理论创新也未必要以发现新数学工具为前提

由上节可见，像状态空间方法这样的方法论的提出，并不需要以发现数学工具为前提。本节中我们退一步，看看重大理论创新的情形。

在第一节中，我们用事实说明一些重大的理论创新确实是伴随着新的数学工具出现的。但很多重要的科学创新不一定要以发现新数学工具为前提，而只是利用了已经长期存在的数学工具而已。

Lyapunov 方法几乎构成了今天整个控制理论的基石。它本身便是控制系统分析和设计不可或缺的工具。然而，Lyapunov 于 1892 年提出这一理论体系时提出了什么新的数学工具吗？在大一点儿的层面上说答案是否定的。

Pontryagin 极大值原理问世时又提出了什么新的数学工具吗？Pontryagin 极大值原理把变分法的适用域从开集拓广到闭集，从而提出了解决一般最优控制问题的思想方法。究其根本，其基础还是变分法，但变分法的出现可是远远早于极大值原理的。

Kalman 滤波提出时又有什么新的数学工具被提出吗？它所基于的随机过程理论和最小方差估计理论也都是早已存在的数学理论。

最后再看严反馈系统设计的反步法，它的提出又有什么新的数学工具支撑吗？众所周知，反步法中用得最多的，也是最基本的，其实就是复合函数的微分，那是牛顿-莱布尼茨时期的事情了。

上述这些可都是控制理论历史上重要到不能再重要的科学发现了。它们的问世并不需要同时期新的数学工具做支撑。它们的思想和方法已经足够重要了！！！！

最后再让我们看看著名的 Zames 小增益定理^[3]。

对于图 2 中的系统，假设每个子系统都是有限增益稳定的，即

$$\begin{aligned} \|y_1\| &\leq \gamma_1 \|e_1\| + \beta_1 \\ \|y_2\| &\leq \gamma_2 \|e_2\| + \beta_2 \end{aligned}$$

则容易得到

$$\begin{aligned} \|y_1\| &\leq \gamma_1 \|e_1\| + \beta_1 \\ &\leq \gamma_1 \|d_1\| + \gamma_1 \|y_2\| + \beta_1 \\ &\leq \gamma_1 \|d_1\| + \gamma_1 \gamma_2 \|d_2\| + \gamma_1 \gamma_2 \|y_1\| + \gamma_1 \beta_2 + \beta_1 \end{aligned}$$

从而有

$$\|y_1\| \leq \frac{1}{1 - \gamma_1 \gamma_2} (\gamma_1 \|d_1\| + \gamma_1 \gamma_2 \|d_2\| + \gamma_1 \beta_2 + \beta_1)$$

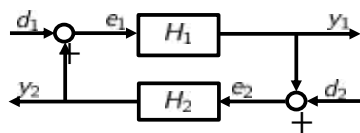


图2 关联系统

由此可得结论：如果增益的乘积小于1，即

$$\gamma_1 \cdot \gamma_2 < 1$$

那么关联系统有限增益稳定。这就是最原始的小增益定理。

由此可见，非线性控制理论中举足轻重的小增益定理，其证明过程就这么简单，连一个中学生都能完成，自然谈不上需要什么新的数学工具了。

漫漫历史长河中建立起来的数学领域，其各个分支为应用学科提供了坚实的理论基础。新的科学发现需要数学工具，但不是一定要发现新的数学工具为前提。许多数学方面的研究工作是超前的，早已放在那里在等着我们去用。伴随新发现的数学工具所提出的科学发现固然重要，但基于已有数学工具所提出的科学发现也可能更重要。

方法论的变革可以不以发现新的数学工具为前提，但其影响却是巨大的、深远的。它可能包含或者引发一系列的重大科学创新，以至于一批数学工具的诞生。

4 历史需要重演

在这组杂文中的第一篇，还有笔者所做的各个大会报告中，均提到了美国数学家 J. Casti、中国科学院院士高为炳先生、澳大利亚科学院院士 G. Goodwin，国际自控控制联合会前主席 Isodori，还有何毓琦先生对控制理论发展的观点，特别是2010年出现的“控制死亡论”（Control is dead）。

这些观点说明了一个事实：今天，基于状态空间方法的控制理论已经陷入困境。

为什么2010年会有人说控制将死？何毓琦先生给予了解释。他的核心观点是基于状态空间方法的控制理论已经成熟，很难再有较大的突破。他说：“任何一个应用科学领域都要经历三个发展阶段，即开创性阶段、理论发展阶段和成熟阶段。目前每个人都同意控制领域现在已经处于第三个阶段，即成熟阶段（见图3）”，同时他还对他的论点做了进一步的解释（请见其博文原文）。

Any applied scientific field typically go through three stages- breakthrough into a new problem area, building the theoretical foundation, and maturing of the field. I discussed this in more detail in http://www.sciencenet.cn/m/user_content.aspx?id=45898 Currently everyone agrees that the field of control is in this mature third stage. The framework and

图3 何毓琦先生博文片段2

他后面接着又说了图1中的那段话，指出与今天的“控制死亡论”类似的情况早在1950年后就发生过，当时古典控制理论陷入危机，但因为 Kalman 等人及时引入了全新的状态空间方法，使得控制理论再现生机。他紧接着说，历史需要重演（“Same thing need to happen again”）。意指今天我们需要一个类似于当年的状态空间方法一样的东西来挽救局面。对此，他采用圣经中的故事来打比方：“控制已死，要重生就要等待类似于耶稣使拉撒路复活的那种奇迹发生，或许是在等待另一个黄金时代的再次出现（见图4）”。

请问，有什么重大科学突破能够承接“起死回生”这么大的历史责任呢？恐怕一般的理论性和技术性结果都很难支撑，只有方法论的变革了。像当年状态空间方法那样从频域转到时域，从单变量转到多变量的变革，就是方法论的变革！

何先生接下来还有一句话，可谓斩钉截铁：“这种机会不会来自对现有成熟理论的拓展”。这句话是何寓意？笔者的理解是，基于状态空间方

theoretical work in control. In fact, a similar situation existed towards the late 1950s. Given the text by Bode on feedback amplifiers, Truxal's text on adaptive control, and Newton-Gould-Kaiser's work on frequency domain approach to feedback controller design in stochastic environment, people and MIT thought the last words have been said until new aerospace problems arise and Kalman et al heralded in an entirely new approach. Same thing need to happen again. "Control is dead" until it is reborn like Lazarus by a Jesus miracle. In this sense, one can argue CONTROL is certainly not dead and now may be waiting for the "second coming" of another golden age of control. But chances are it won't be from extending the current mature theory.

图4 何毓琦先生博文片段3

法框架下的研究没有什么机会，试图在状态空间方法框架下取得大的突破几乎是徒劳的。

那么，又有哪种方法真正摆脱了状态空间方法的束缚，又算得上方法论上的突破呢？

恐怕答案只有新近提出的全驱系统方法。因为已有的众多方法基本上都是状态空间方法框架之内的方法，都是基于状态空间模型展开的，但全驱系统方法却是在基础模型上的改变，是最底层的改变，不再依赖于状态空间模型。

这种方法论的改变直接决定了理论体系的改变，产生了较大影响。继我们提出全驱方法之后，已有包括美国、加拿大、英国、韩国、丹麦、新加坡和土耳其在内的全球 54 所高校的 88 个团队在该全新方向上公开发表了论文。于 2022 年发起的“全驱系统理论与应用”国际学术年会已经成功举办了三次，参会代表分别为 150 余人、430 余人和 610 余人，代表和论文来自中（港、台）、美、加、英、法、日、澳、荷兰、比利时、土耳其和新加坡。自 2023 届起，该会议论文集已进入 IEEE Xplore 数据库，并被 EI 检索，并被 EI 检索。

5 结束语

截至今天，控制理论发展史上出现了四次重大的方法论变革。

第一次是 1892 年，俄国著名数学家 A. M. Lyapunov 建立了控制系统稳定性的理论基础，把在此之前的系统

定量分析（响应分析）推广到系统定性分析（稳定性分析）上来。

第二次是两次世界大战期间，出现了控制系统的传递函数表示，进而产生了古典的频域调节原理，把控制理论从系统分析真正推广到系统设计。

第三次是 20 世纪 60 年代，状态空间方法的出现使得控制理论从频域理论推广到时域理论，从单变量系统推广到多变量系统。状态空间方法对于线性系统理论方面的贡献是有目共睹的，然而在处理动态系统的非线性问题、时变问题和时滞问题上，状态空间方法就显得捉襟见肘、力不从心了，自 20 世纪 80 年代以来便陷入了困境。

第四次方法论的变革可谓是今天全驱系统方法的出现，从状态空间模型转换到全驱系统模型，从线性系统控制真正推广到非线性系统控制。至于它能否引领控制理论的下一个黄金时代暂且另当别论。

解决问题很难，但很多情况下提出问题往往很容易。履行任务很难，但很多情况下提任务要求往往很容易。

长期以来，我们已经有了关于状态空间方法的许多认识。我们有能力把状态空间方法中的所有问题一股脑地加给全驱系统方法，从而发现很多问题全驱系统方法现在还没有答案，从而断定全驱系统方法不行。这显然是不公平的。如果从萌芽时期算起，状态空间方法已经有两百多年的历史。用两百多年积累的结果来要求一个年仅两、三岁的的新方法，这当然不合适。况且，我们今天已经欣喜地看到，全驱系统方法解决了许多状态空间方法解决不了和解决不好的问题，同时也解决了一大批控制应用问题。目前全驱



系统方法解决不了的问题也都是状态空间方法长期以来解决不了的问题。

可喜的是,至少今天我们已经看到了关于全驱系统方法足够充分的事实:一方面是在处理非线性、时变性和时滞特性方面所表现出的超强能力;另一方面,它把复杂的非线性问题转化成线性问题,让状态空间方法中最完善的部分,线性系统理论,真正有了用武之地。假以时日,会有更多状态空间方法解决不了的问题在全驱系统方法框架下得以解决。

全驱系统理论的发展还需要所有控制科学家和工程师的共同努力。衷心希望国内控制界人士和研究机构能够大力支持这一原创性理论的研究;衷心希望我国更多的年轻学者加盟到这一领域的研究中来,尽快做出一批具有原创性和颠覆性的成果,推动非线性控制理论的发展。

6 致谢

1. 感谢国家自然科学基金委的大力支持,感谢参加“高阶全驱系统理论与航天器控制技术”基础科学中心项目评审会和启动会的所有专家的大力支持;

2. 感谢东北大学刘腾飞教授提供的关于小增益定理的资料;

3. 感谢南京理工大学邹云教授和中科院自动化所谭民研究员提出的有益建议。

参考文献

- [1] 段广仁. 高阶系统方法, 自动化学报, 2020:
 - I. 全驱系统与参数化设计 [J]. 2020, 46(7): 1333–1345.
 - II. 能控性与全驱性 [J]. 2020, 46(8): 1571–1581.
 - III. 能观性与观测器设计 [J]. 2020, 46(9): 1885–1895.
- [2] Duan G R. "High-order fully actuated system approaches, Int. J. Syst. Sci.":
 - Part I. Models and basic procedure, 2020,52(2): 422–435.
 - Part II. Generalized strict-feedback systems, 2020,52(3): 437–454.
 - Part III. Robust control and high-order backstepping, 2020,52(5): 952–971.
 - Part IV. Adaptive control and high-order backstepping, 2020,52(5): 972–989.
 - Part V. Robust adaptive control, 2021,52(10),2129–2143.
 - Part VI. Disturbance attenuation and decoupling, 2021,52(10): 2161–2181.
 - Part VII. Controllability, stabilizability and parametric design, 2020,52(14): 3091–3114.
 - Part VIII. Optimal control with application in spacecraft attitude stabilization, 2022,53(12),54–73.
 - Part IX. Generalized PID control and model reference tracking, 2022, 53(3): 652–674.
 - Part X. Basics of discrete-time systems, Int. J. Syst. Sci., 2022, 53(4): 810–832..
- [3] Duan G R. Discrete-time delay systems, Sci. China-Inf. Sci., 2022:
 - Part 1. global fully actuated case, 65: 182201:1–182201:18.
 - Part 2. sub-fully actuated case, 65: 192201:1–192201:15.
- [4] Duan G R. Fully actuated system approaches for continuous-time delay systems Sci. China-Inf. Sci., 2023:

- Part 1. Systems with state delays only, 66(1): 112201:1–112201:30.
- Part 2. Systems with input delays, 66(2): 122101, 122201:1–122201:18.
- [5] Duan G R. LMIs in Control Systems: Analysis, Design and Applications, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [6] 程代展, 齐洪胜. 矩阵的半张量积——理论与应用 (第二版). 北京: 科学出版社, 2011.
- [7] Cheng D, Qi H. Controllability and observability of Boolean control networks. *Automatica*, 2009, 45(7): 1659–1667.
- [8] Duan G R, Generalized Sylvester Equations—Unified Parametric Solutions, CRC, 2015
- [9] 段广仁著, 于海华, 薛雨, 刘宏亮, 李彦江译, 广义Sylvester矩阵方程—统一参数化解, 科学出版社, 2020.
- [10] Bin Zhou, Guang–Ren Duan, On analytical approximation of the maximal invariant ellipsoids for linear systems with bounded controls, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(2): 346–353.
- [11] Bin Zhou, Guang–Ren Duan, Zongli Lin, A parametric Lyapunov equation approach to the design of low gain feedback, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(6): 1548–1554.
- [12] Xu Wang, Ali Saberi, Anton A. Stoorvogel, Peddapullaiah Sannuti. Simultaneous global external and internal stabilization of linear time–invariant discrete–time systems subject to actuator saturation. *Automatica*, 2012, 48: 699–711.
- [13] Games G. On the input–output stability of time–varying nonlinear feedback systems Part I: Conditions derived using concepts of loop gain, conicity, and positivity. *IEEE trans. Auto. Contr.*, 1966, 11(2).



【作者简介】段广仁, 中国科学院院士, 中国自动化学会会士, IEEE Fellow, IET Fellow; 1991 年任哈尔滨工业大学教授, 现为哈尔滨工业大学控制理论与制导技术研究中心名誉主任、南方科技大学控制理论与技术研究中心主任; 国家杰出青年基金获得者、长江学者、教育部长江学者创新团队项目负责人, 国家自然科学基金委创新群体、重大项目和基础科学中心项目负责人、国家某重大专项基础研究重大合同项目负责人。现(曾)任中央军委科技委国防科技专家、国务院学位委员会第八届控制科学与工程学科评议组召集人、国家 863 计划专家组成员、航天科技集团五院国防科技重点实验室第一、二届学术委员会委员、教育部科技委信息学部委员、中国自动化学会常务理事和国内外重要学术刊物编委等职。作为第一完成人获得国家自然科学二等奖 2 项, 另获第四届中国青年科技奖、中国自动化学会控制理论专业委员会杰出贡献奖和全国优秀科技工作者称号; 发表 SCI 论文 450 余篇, 出版英文著作 3 部, 出版的一部中文著作获得两项国家级图书奖励; 培养的博士生有 2 人论文入选全国优秀博士学位论文, 培养的博士生中已有学生成长为青年拔尖人才、国家优青、IEEE Fellow、长江学者、国家杰青和中国工程院院士。主要研究方向有控制系统的参数化设计、鲁棒控制、非线性控制和航天器控制等。