

基于TRIZ理论的 自动控制领域科研创新技法初探

刘作军 河北工业大学控制科学与工程学院

创新是目前我国各专业领域科技研究的核心追求。但长期以来，科技创新主要依靠科研人员的经验、灵感、摸索或集思广益的“头脑风暴”等方式，缺少有效方法的引导。很多科研人员并不了解或不认可“创新是有方法的”。实际上，创新是有方法的。但普通的组合创新、移植创新、改进创新等方法缺少系统性和规范化，难以引导出高水平的原始创新。相比之下，前苏联创新大师、发明家阿奇舒勒创立的“发明问题解决理论TRIZ^[1]”（注：TRIZ是俄文转换成拉丁文的词头缩写），被国际上广泛认为是一种应用最广、最有效的理论化创新技法。

目前，国内外应用TRIZ理论最为广泛的是机械设计领域^[4-7]，收到了良好的效果。相比而言，自动控制领域的学者接触这一理论的却非常少，以“TRIZ”为检索词在IEEE Transaction中检索，只有2篇^[2,3]，在国内自动控制领域的重要期刊中同样鲜有提及。TRIZ理论在自动控制领域中应用比较成功的例子有：Chienyi Huang应用TRIZ解决印刷线路板的工艺问题^[2]；鲁麒等将TRIZ应用于深

度知识获取^[8]；周燕辉等尝试了TRIZ理论在液压挖掘机控制系统中的应用^[9]。其他一些TRIZ应用则多停留在浅层次上的控制技术问题上，所取得成果的创新性都不够突出^[10-14]。在将TRIZ理论等创新技法与自动控制领域进行深入结合方面，上海理工大学控制科学与工程学科博士刘歌群在其管理学科博士后工作期间，曾经做了一定的有益尝试^[15,16]。本文作者出版了国内第一部将TRIZ理论应用于自动控制领域的专著^[17]。

一、创新技法与TRIZ理论

传统的创新技法有头脑风暴法、奥斯本检核表法、5W1H法、和田十二法、缺点列举法、希望点列举法、主体添加法、二元坐标法、组合法、仿生法、移植法等数十种^[4]，这些方法虽然各有特点，但整体上都缺乏系统性，创新思路的引导作用或依赖于科研人员的灵感等偶然因素，或采取穷举探索而效率低下，所获得的创新方案通常只能解决局部的技术问题，难以获得高水平的原始创新成果。随着科技创新需求的日渐重要，一些针对整体问题的系统化创新技法逐步成型，目前

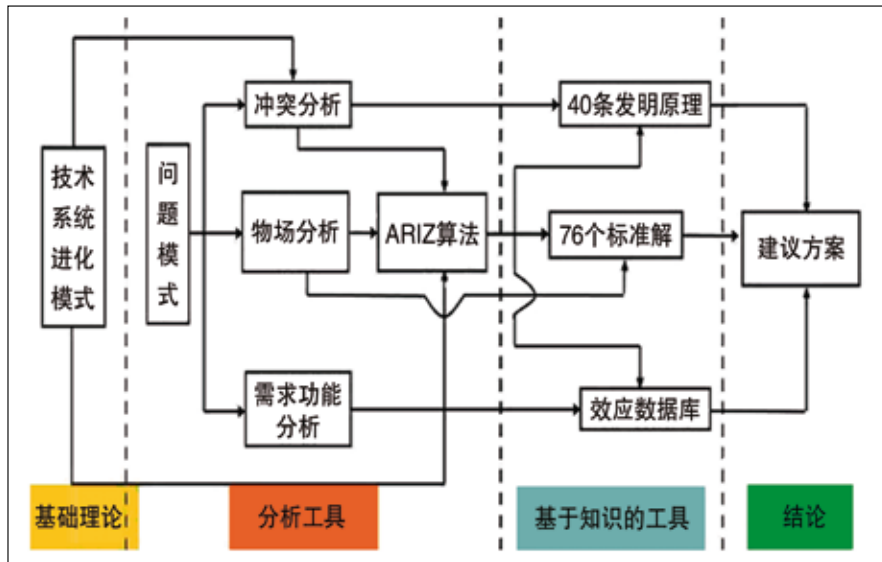


图1 TRIZ理论体系

被普遍认可的除了前面提及的前苏联阿奇舒勒提出的TRIZ理论之外，还有美国MIT的Suh提出的公理设计理论、德国帕尔（Pahl）和拜茨（Beitz）提出的系统化设计P&B方法^[4,17]。公理设计理论从功能独立性、信息量最少化角度入手，尝试用最简单的物理元素或设计参数，通过用户需求、功能需求、技术载体、过程参数四个环节中的域映射，逐步实现所有功能需求。系统设计P&B方法的主要思想是将总功能分解为多个子功能，对每个子功能分别优化设计，再通过能量、物料、信号实现整体的衔接统一。这两种方法相较于传统方法虽然具有一定的系统性，但在实现过程中，都因为存在功能分解环节而破坏了整体的系统性，在控制上表现为信息利用的不充分、滞后延迟影响的加剧等；此外，这两种方法在思路引导上也仍然离不开传统的思维方式，因此其应用效果和影响力并不突出，其应用领域也局限于机械装置研发设计。

相比而言，TRIZ理论是一种兼顾整体系统和

组成单元的创新思维引导方法。阿奇舒勒和他的团队研究分析了世界各地的250万份高水平专利，从中总结并揭示了创新发明的在三条内在规律：其一，问题及其解在不同的工业部门或科学领域重复出现；其二，技术进化模式在不同的工业部门或科学领域重复出现；其三，发明经常采用其他不

相关领域中所存在的效应。根据这三条规律，阿奇舒勒提炼出了问题共性的解决模式，并综合多学科领域的原理和法则，建立起TRIZ理论体系^[1,4]。TRIZ的主要内容包括39个通用工程参数构成的冲突矩阵、40条发明原理、物场模型与76个标准解，以及发明问题解决算法ARIZ等，如图1所示。对TRIZ理论的灵活使用，使创新走出了盲目的、高成本的试错探索和灵光一现的偶然，能够显著提高创新科研的成功率。

TRIZ理论在包括霍尼韦尔、丰田、宝马汽车、三星电子、波音等在内的众多知名企业都有广泛应用，解决了大量工程问题，催生出多项创新产品，经济效益巨大。TRIZ理论在我国也受到了较为广泛的重视，先后成立了全国TRIZ研究会等学术组织，组织了国家技术创新技法专业委员会，设立了国家级的技术创新技法研究中心。

TRIZ理论适用于所有学科和行业，可以为不同专业领域的问题提供多种启发引导性的研究思路，所获得的解决方案也会涉及到各个不同的专业领域^[1,4,17]。从哲学的意义上讲，TRIZ是一种具有共性特征的创新理论。但是，针对自动控制领

表1 创新成果的水平分级

级别	发明的水平	比例	知识来源	对应专利	试验次数
5	新发现	0.06%	全人类知识	通常不具备专利属性	1,000,000
4	新原理	0.24%	科学原理	发明	100,000
3	根本性的改善	4.3%	多学科知识	实用新型、发明	1000
2	少量的改善	27.1%	学科内知识	实用新型	100
1	简单的改变	68.3%	个人知识	外观或不足申请	10

域中的特性科研问题，TRIZ理论并没有给出有针对性的解决思路；另一方面，任何工程系统都离不开控制，虽然TRIZ理论中的很多理念和方法都与控制相关，但并没有发挥出自动控制的深层优势。因此，有必要将TRIZ理论与自动控制科学领域的理论和技术做更加深入、有针对性的结合，以最大限度地发挥出二者的优势，促进自动控制学科与其他学科的协同创新。

二、创新成果的等级

TRIZ将创新成果按水平的高低划分为五个等级^[4]，如表1所示。创新成果的级别越高，所需的知识经验越多，科研投入越大，成果数量也越少，其所包含的科学意义和商业价值也相对最高。

一项四级以上的创新成果，必然会催生一个新的产业，并随之摧垮一个旧有产业。比如数码相机的发明，为日本松下、韩国三星带来了新机遇，却导致美国柯达的出局。王选发明的汉字激光照排技术，淘汰了大量的传统铅字印刷机。在工业4.0时代，如果不以危机意识抓住机遇，以创新科技实施产业升级，终将会被市场所淘汰。我国多数企业的产品升级仍主要停留在三级以下的水平上，技术附加值低，竞争力差。由于缺少高级别创新成果，一些企业不得不购买国外专利或者代工生产，失去了大量的利润。

2.1 五级创新

五级创新通常都是改变世界、名留史册的

重大发明和发现，多为与技术或工程几乎无关的“纯科学”成就，例如：X射线、光电效应等。这些科学成就扩展了科学的边界，提供了通往新资源的路径，其机理在转化应用后，可以广泛地被用于新技术系统的设计，为其下一级的四级创新奠定了理论上的基础。

维纳创立的控制论、图灵等提出的人工智能理论可以归为控制学科的五级创新成果，这些成果均源于自然科学多项成就的积淀升华，需要深入的研究探索和实践，大师级人物的知识、灵感或者一些偶然机遇在其中发挥了重要的作用。

2.2 四级创新

四级创新以五级创新的原理为基础，尤其强调首次将某个科学原理或效应用于工程技术领域，进而诞生出一种新功能/原理的组合，例如：医学X光透视机、太阳能电池的发明等。相对于医学X光透视机而言，其后发明的基于X光的探伤仪和安检仪则只能归于三级创新。

钱学森提出的工程控制论、傅京孙提出的智能控制，都源于五级创新成果的工程应用。因此，控制领域的学者应关注Science、Nature等国际顶级科技期刊中所报导的自然科学最新前沿成果，思考其在控制领域中的交叉点。

2.3 三级创新

三级创新是为了特定的目的，将已知的功能/原理组合应用于新场合，替代已有的功能/原理组

合,实现技术跨越,例如将机床改为数控、汽车手排变速箱改为自动变速箱、有线电话改为无线电话等。如果说四级创新的关键在于最新科学理论的最早应用,那么三级创新的关键就在于最新工程技术的最早应用、组合与拓展。

控制学科中相关的三级创新成果有数控机床、可编程控制器、智能建筑等,此级别的创新成果多源于学科交叉。对最新控制算法的改进优化、开创性地将网络或无线传感等前沿先进技术应用到某一新的工程领域,都可以归于此级别的创新成果。因此,控制领域的学者应关注 Automatica、IEEE Transaction 等一流期刊或国际科技新闻中所报导本领域科技成果,并关注其他学科的最新科技成果,及时将控制学科与其他学科进行最新成果的交叉协作。

2.4 二级创新

二级创新多基于已存在三级创新成果的推广应用,通常并不改变系统的基本原理,而是通过修改、提升子系统质量和性能,从而达到对系统部件或结构的定性改进。

在我国的控制领域,多数硕士研究生学位论文都属于这个范畴。通过将自动化学报、电工技术学报等期刊中近期发表的前沿理论技术进行调整后具体应用,或在实际工程中应用西门子等工控公司的最新装备进行二次开发等。

2.5 一级创新

最低的一级创新只涉及到外观、参数上的简单改变,例如控制参数的调整、所用元件型号的改变等,通常只需要几次修改即可完成,其所涉及的理论技术知识多源于教材或者产品应用手册。此类创新成果的水平相对很低,只能是科技小制作、小实验、小设计的类别。

三、自动控制与TRIZ发明原理

3.1 TRIZ的通用工程参数与发明原理

TRIZ理论将各种技术装置或系统的参数总结抽象后,归类为(1)运动物体的重量、(2)静止物体的重量、(3)运动物体的长度、(4)静止物体的长度、(5)运动物体的面积、(6)静止物体的面积、(7)运动物体的体积、(8)静止物体的体积、(9)速度、(10)力、(11)应力或压力、(12)形状、(13)结构稳定性、(14)强度、(15)运动物体作用时间、(16)静止物体作用时间、(17)温度、(18)光照度、(19)运动物体的能耗、(20)静止物体的能耗、(21)功率、(22)能量损失、(23)物质损失、(24)信息损失、(25)时间损失、(26)物质或事物的数量、(27)可靠性、(28)测量精度、(29)制造精度、(30)物体外部有害因素作用的敏感性、(31)物体产生的有害因素、(32)可制造性、(33)可操作性、(34)可维修性、(35)适应性及多用性、(36)装置的复杂性、(37)监控与测试的困难程度、(38)自动化程度、(39)生产率。共计39个通用工程参数。39个参数指标之间会在不同的应用系统中产生不同的矛盾冲突,解决这些矛盾冲突,即可实现原系统的改进和优化,获得创新成果。

通过分析众多先进科研成果中解决不同工程参数间技术冲突的方式方法,TRIZ理论总结出了40条发明原理,包括:(1)分割与切割、(2)分离与分开、(3)局部质量、(4)不对称、(5)合并、(6)通用、(7)嵌套、(8)质量补偿、(9)预加反作用、(10)预加作用、(11)预防、(12)等势性、(13)反向功能、(14)、类球面、(15)动态化、(16)不完全达到或超过的作用、(17)维数变化、(18)利用机械振动、(19)周期性作用、(20)持续有效作用、(21)、急速动作、(22)变有害为有益、(23)反馈原理、(24)利用中介质、

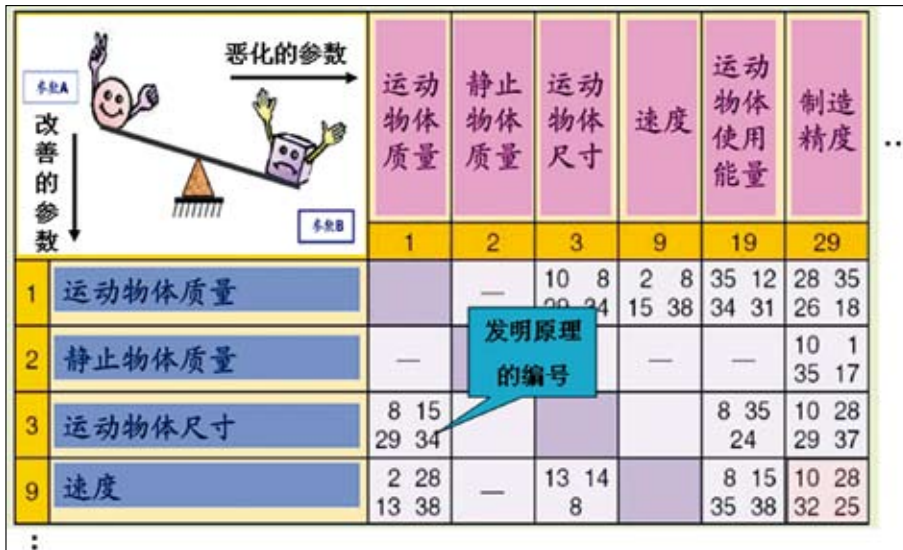


图2 TRIZ冲突矩阵与发明原理检索(局部)

(25)自服务、(26)复制、(27)廉价易耗品代替、(28)机械系统替代、(29)应用气动和液压结构、(30)采用柔性壳体或薄膜、(31)应用多孔材料、(32)颜色变化、(33)同质性、(34)、抛弃和修复、(35)、参数变化、(36)、应用相变过程、(37)应用热膨胀、(38)应用强力氧化剂、(39)应用惰性环境、(40)应用复合材料。在工程参数之间的矛盾所构成的冲突矩阵中，给出了相关3-4条最可能的发明原理，如图2所示^[4]。这些冲突矩阵表里的发明原理，例如：分割、组合、周期性作用、事先防范等，能够有效地引导问题的解决思路，根据这些发明原理的思路提示，结合不同的专业知识，就可以高效率地获得解决方案，进而避免了摸索过程中“走弯路”的问题。

3.2 控制系统的指标与原理解

对于自动控制系统，常规的性能参数主要包括：稳定性、控制精度、调节时间、抗干扰、能量消耗等，这几个参数与TRIZ理论总结的39个参数之间是存在特定联系的，例如：物体重量与稳

定性和调节时间之间、力与调节时间之间等等。因此控制系统中的矛盾问题，是在一定程度上与39个通用参数之间的矛盾问题相互转化的。本文提出如下的一种关联矩阵来描述这两个领域参数指标之间的关联关系，如表2所示。

其中，+1表示正相关，表示两个参数指标的

增减是一致的；-1表示负相关，表示增减趋势相反；0表示不相关或者正负相关性不定。这样，一方面可以把具体工程参数之间的矛盾问题转换为控制参数指标的矛盾问题，进而应用控制的方法解决矛盾；另一方面，还可以把控制领域参数指标间的矛盾问题，通过系统分析还原到39个工程参数之间的矛盾问题，应用冲突矩阵引导问题解决的思路。

同样，控制领域的各种理论算法和技术与TRIZ理论总结的40条发明原理之间也是存在相关联系的，比如模块化电路可以对应于分割原理，两种算法的结合对应于组合原理，迭代学习控制对应于周期性作用原理，过载保护电路对应于预防原理等。

参照TRIZ理论总结的通用工程参数、冲突矩阵和发明原理，在控制领域也应该归纳总结出一套类似的参数指标体系、冲突矩阵和相应控制策略，将控制领域分散的经验、方法和研发思路集中在一个系统化的框架之中，以利于本领域各类问题的解决。

因此，在控制领域的问题中应用TRIZ的冲突

表2 TRIZ通用工程参数与控制性能指标的相关性

	1	...	9	...	28	...	39
	运动物 体重量	...	速度	...	测量精度	...	生产率
稳定性	+1	...	-1	...	+1	...	+1
精度	0	...	-1	...	+1	...	0
调节时间	+1	...	-1	...	0	...	-1
抗干扰	+1	...	0	...	-1	...	0
能耗	+1	...	-1	...	0	...	+1
...

矩阵和发明原理，可以高效地引导出解决问题的创新性思路。这些思路既可能引导出自动控制领域内的解决方案，也可能引导出来自其他学科知识的解决方案。例如第38-40条发明原理中应用强氧化剂、惰性环境、用复合材料的方法，可以有效提示控制领域的科研人员在遇到控制方法难以克服的困难时，尝试应用其他学科中的方法，通过学科交叉获得创新成果。

四、自动控制与TRIZ的标准解

4.1 TRIZ物场模型与标准解

TRIZ理论认为所有的功能都可分解为两种物质及一种场，即一种功能由两种物质S1和S2及一种场F的三元件组成。物质本身是不能实现某种作用的，只有同某种“场”发生联系后才会产生对另一物质的作用或承受相应的反作用。温度场、机械场、声场、引力场、磁场、电场等，都是场的具体存在形式。各种装置单元都是功能的一种实现，因此，可用物场分析各种装置单元的功能，这种分析方法是TRIZ的工具之一。

TRIZ把功能定义为物质S2通过场F作用于物质S1，产生的输出。所谓有用功能，是指系统的

输出与系统的输入之间的正常的、期望存在的作用或效应。但实际系统中，也存在着待解决的功能不完善、过度或者有害的情况。通过物场模型中显现的问题，可以有针对性的地采取“标准解”措施进行解决。TRIZ总结了76个标准解，并分为如下5类：不改变或仅少量改变已有系统、改变已有系统、系统传递、检查与测量、简化与改善策略。

4.2 基于反馈调节的物场模型

TRIZ的物场模型是建立在功能分解的基础上的，这种分解在清晰定位单元功能的同时，不可避免地牺牲了整套装置的全局系统性；此外，物场模型及其对应的标准解以强调功能作用的有效实现为主，其技术手段涵盖机械、物理、化学、控制等各个专业领域。相对而言，控制理论则强调从全局进行系统分析，尤其注重信息反馈和分析的作用，其技术手段主要是通过算法对电能为主要控制量的输出调节。

维纳提出的控制论分析了人和生物体中能量和信息的闭环流动机理，而阿奇舒勒的TRIZ理论中则更多地突出了受能量场效应影响的两个物质间的功能作用。如果能够将控制系统方块图的系

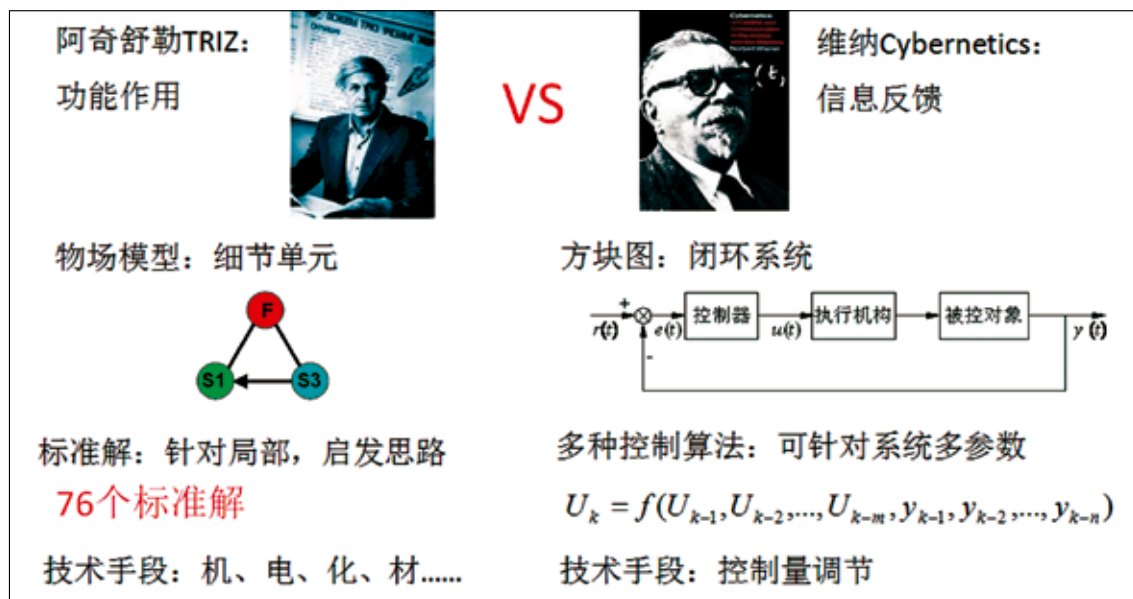


图3 TRIZ标准解与控制理论对比

统化优点结合在物场模型之中, 将能实现系统与单元、全局与局部、信息反馈调节与功能实现的有机统一, 产生更具先进性的创新成果。

五、结论

TRIZ理论被视为一种创新方法的哲学, 其内涵博大精深。本文仅初步介绍和分析了TRIZ中的创新级别、冲突矩阵与发明原理、物场模型与标准解等在控制领域中应用的结合点, 更深入的分析将会进一步提升TRIZ理论对控制领域创新的推动作用。除此之外, TRIZ理论还包含有进化法则、ARIZ算法、九屏幕法等内容, 这些理念方法同样对控制领域的科技创新具有引导启发作用, 需要进行全面的探索和总结。

参考文献

- [1] 阿奇舒勒. 创新算法[M]. 谭培波, 茹海燕译. 武汉: 华中科出版社, 2008.
- [2] Chienyi Huang, Yuehhsun Lin, Peifang Tsai. Developing a Rework Process for Underfilled Electronics Components via Integration of TRIZ and Cluster Analysis [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2015, 5(3): 422 - 438.
- [3] Ming Kaan Low, T. Lamvik, K. Walsh, O. Myklebust. Manufacturing a green service: engaging the TRIZ model of innovation [J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing. 2001, 24(1): 10 - 17.
- [4] 檀润华. TRIZ及应用技术创新过程与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [5] Noe Vargas Hernandez, Linda C. Schmidt, Gul E. Okudan. Systematic Ideation Effectiveness Study of TRIZ [J]. Journal of Mechanical Design. 2013, 135(10): 101009-101009-10.

- [6] 于振环, 刘顺安, 张娜. 基于TRIZ理论提高车辆转弯工况下的稳定性[J]. 吉林大学学报(工学版). 2014, 44(2): 325-329
- [7] 邵云飞, 杜欣, 唐小我. 基于6 σ /QFD/TRIZ集成的产品创新设计方法[J]. 系统工程. 2011, 29(4): 77-83.
- [8] 鲁麒, 任工昌, 陈红柳. 面向TRIZ理论的深度知识获取及应用研究[J]. 情报杂志. 2013, 32(8): 145-149.
- [9] 周燕辉, 彭光良, 夏翔, 康春兰. TRIZ理论在液压挖掘机控制系统中的应用[J]. 机床与液压. 2008, 36(12): 122-123.
- [10] M. Babu Prasad, M. Sudha. Product design using theory of innovation and problem solving (TRIZ) technology for induction machine [A]. Proc. of the 7th ISCO. 2013, 6: 44-48.
- [11] 尚万, 赵武, 罗纯静, 王晨. 基于AD和TRIZ的空间机器人手爪创新设计[J]. 制造业自动化. 2014, 36(7): 19-22.
- [12] Li Li, David Li, Yuanhua Yang. The Design and Application of Synergetic Innovation System for Manufacturing Enterprise Based on TRIZ [A]. Proc. of ICIII 2011. 2011, 8. Vol.2: 74 - 77.
- [13] 郑义兵, 任工昌. 基于TRIZ进化理论的继电保护装置创新研究[J]. 电力系统保护与控制. 2011, 39(2): 83-87.
- [14] Gao Changqing, Guo Leiming, Gao Fenglan. Innovation design of medical equipment based on TRIZ [J]. Technology and Health Care. 2015, 23 (S2): 269-276.
- [15] 刘歌群. 利用创新技法指导控制策略创新初探[J]. 控制工程. 2009, 17(s1): 167-171.
- [16] 刘歌群. 物质-场分析法在控制策略创新设计中的应用[J]. 机械设计与研究. 2010, 26(03): 7-11.
- [17] 刘作军. 控制科学与工程创新技法[M]. 北京: 中国电力出版社. 2015.12.



【作者简介】刘作军, 1971年生, 河北工业大学控制科学与工程学院副院长, 教授, 博士生导师。1994年获河北工业大学工业自动化专业工学学士, 2000年获南开大学英语专业文学第二学士, 河北工业大学控制理论与控制工程专业工学硕士, 2005年获南开大学控制理论与控制工程专业工学博士。曾在新加坡南洋理工大学、美国凯斯西储大学进行访问学者学习。