

# 自动化学科的理论前沿和应用拓展 ——我们的理解及工作<sup>1)</sup>

吴启迪

(同济大学电子与信息工程学院 上海 200092)

(E-mail: qidi@mail.tongji.edu.cn)

**摘要** 以同济大学控制理论与控制工程及相关学科近年来的发展思路和科研成果为依托,阐述了自动化学科的理论前沿和应用拓展的理解及相关工作,望能抛砖引玉.

**关键词** 自动化, 理论前沿, 应用拓展

**中图分类号** TP18

## ADVANCED THEORY RESEARCH AND APPLICATION FIELDS EXTENDING OF AUTOMATIC TECHNOLOGY IN TONGJI UNIVERSITY

WU Qi-Di

(*Electronics and Information Institute of Tongji University, Shanghai 200092*)

(E-mail: qidi@mail.tongji.edu.cn)

**Abstract** Advanced theory research and application fields extending of automation technology are discussed in this paper, which is based on the strategy of development and research achievements in corresponding study fields of Tongji university. We hope it can attract the interests from relative research fields.

**Key words** Automation, advanced theory research, application fields extending

## 1 引言

自动化领域的理论及应用研究,自20世纪40年代的经典控制理论,50年代的工程控制论,60年代的现代控制理论,70年代的大系统理论,直到80~90年代以来的复杂系统建模与控制,以及智能自动化等领域的相关研究,走过了一条与实际工业发展过程结合紧密、互相依存、互相促进的道路.随着各相关学科领域(包括物理、生物、化学、社会、经济等)理论研究的不断深化,在相关工业领域(尤其是军工、航天等领域)激烈国际竞争的推动下,

1) 国家自然科学基金(79970030,60104004)资助

收稿日期 2002-04-20 收修改稿日期 2002-07-31

在各典型时期工业实现手段不断的提升和拓展,尤其是当前计算机网络及通讯技术迅猛发展的冲击下,在智能化相关领域理论研究成果的激励下,自动化学科领域的理论及应用研究正处在一个史无前例的拓展进程之中,其研究领域的深度、广度是以往各工业时代所无法比拟的.尤其是在信息化时代到来之际,在信息化带动工业化的政策环境下,作为信息化与工业化相结合的重要纽带,自动化领域的相关研究中不仅要注意理论研究的新技术背景,还要注意应用拓展研究的时代特征.这是一个具有明显挑战性特征的新世纪,但同时正是我们的机遇所在.

在这样的时代特征环境下,自动化学科的理论前沿及应用拓展方向为何?对此问题的回答自然是仁者见仁,智者见智.我们的观点是,针对当代工业环境特征的自动化理论及应用研究,先不必过分地去追求理论的完美,也不要先去搞所谓的“框架性”、“符号性”研究,最先需要做的事情,是静下心来,面向典型的工业背景,合理地拓展控制理论,然后在实践成功的基础上,再进一步总结具有领域特征的控制理论及控制方法,从而为自动化学科的发展做一点实事.根据已有条件,在现阶段,我们拟将学科目标定位于有较明确应用目标的理论研究或具有挑战性、可能会导致新理论思维和新技术应用的典型实际问题研究.以下就从理论前沿的研究及应用领域拓展两个方面,结合同济大学的具体工作谈一谈我们对自动化学科发展的看法.请各位专家指正.

## 2 我们所关注的研究领域

### 2.1 智能控制

在目前对何为智能,何为智能自动化的讨论尚无定论的时候,我们认为,进行智能化领域的理论及应用研究,至少应持有以下观点.

1) 智能是多样的.智能的多样性,源于物质的多样性,这是世界存在和发展的首要的表现方式.只有在承认存在差别的前提下,才能去讨论各类智能的本体,才能总结出智能最根本的特征和存在方式.

2) 智能是发展的,并且是不断发展的.智能的发展特性源于世界的运动特征,它本身就是一个不断演化的概念.如果要智能向着我们所要求的方向发展,首先必须承认这一点,然后才能规划我们所做的工作.

3) 智能是有局限性的.这是在前两个观点的基础上的必然推论.世界上不存在十全十美的智能实现,任何智能控制模式,都有其特定的适用范围,是不能被无原则滥用的.

4) 智能是有层次的.这是所求解的问题本身所必然存在的层次性所决定的.

在以上四个基本观点指导下,我们进行了以下具体的智能控制理论研究工作.

在吴启迪教授所主持的基于生物智能模拟的智能控制研究方向中,我们对具有群体智能特征的智能实现模式给予了充分的关注.在此类智能实现模式中,模拟生物系统某类局部智能运行模式的智能个体,其能力相对于所求解的问题而言,完全是不具有全局性的求解功能的,对于每个智能个体,在其局部动态特征或运动决策功能中所具有的智能性,相对于智能体群所表现的智能特性而言,完全是具有层次性的等级差别的.每个智能个体在其解空间中的单独运动中所表现出的智能特性,如果离开了其他智能体的协同工作和具全局性指导特征的信息传递,是无法满足问题求解的需要的.因此,在此类基于智能体群的智能实现模

式下,对智能个体特性的合理定义、智能体间信息交互的模式设计和指导寻优方向的关键指导函数或指导参量设计,是至关重要且互相联系的三个方面,缺一不可.在此指导思想的基础上,我们首先在具有动态收敛特征的反馈式神经网络系统控制及辨识中加以应用.在此类神经网络模型中,其个体动态可以被看成为其能量函数(即前述指导参量)的分解运动模式,各个体间所采取的是全互联的连接方式,做到了信息的全局反馈.其能量函数可以和李亚普诺夫函数相类比,具有指导系统全局运动特性的功能.在研究结果中,我们将反馈式神经网络引入了考虑传感器特性的实际线性系统参数辨识,以及模型参考自适应和动态规划控制器的设计之中,取得了一定结果,发表于自动化学报、世界自动化大会、IEEECCA 会议等场合<sup>[1,2]</sup>.除了此项实现,我们还突破以上指导性设计模式,在以智能个体运动规律设计为主体的群体智能实现模式——蚁群算法的研究中运用了以上指导思想.在这种具有启发式群体智能寻优特征的智能算法设计中,其单蚁的运动规则设计及参数选择对寻优结果起决定性作用.在具有一定数量智能个体的群体信息量交互环境下,整个蚁群表现出了单蚁所无法完成的寻优动态,并从 TSP 问题求解等典型的离散空间问题求解拓展至连续空间中的非线性、多极值函数寻优以及线性系统的参数辨识问题求解之中,显示了该类算法有吸引力的寻优特征.在基于蚁群算法的群体智能寻优研究中,我们得到了管理学科和自动控制学科的三项国家自然科学基金资助,并取得了一定的结果.所有这些研究结果,均体现了大规模并行演化算法的涌现特征.同时,群体智能、演化计算等领域也是当前国际智能学科的前沿研究领域.如何将其引入智能自动化学科,并作出相应创新,是一个具有挑战性的研究方向.

在郑应平教授所主持的复杂系统行为及其涌现特性的研究方向中,按照钱学森先生所倡导的复杂巨系统的基本思路,进行了系统深入的实证性研究.尤其是根据当前的技术发展和社会急需,针对网络巨系统这样的研究对象,进行了系统的网络行为、品质评估、调度控制、信息安全等理论研究,并采用多人决策和博弈论的观点,对复杂系统进行了从上层管理调度到下层控制策略的系统性研究,还关注到了在网络用户环境下,大量用户的不合作行为特征环境中的网络调度及控制问题,尤其是其中的“社会悖论”问题及激励策略研究,取得了较为系统的研究成果,在国内外有一定影响<sup>[3,4]</sup>.最近还拟结合即将成立的网络化系统研究所的系列研究课题(见第 3 部分),结合具体的网络化系统研究对象,进行系统化的网络行为控制和优化研究,并利用研究所合理的成果转化机制,使成果尽快走向市场.在该方向课题组所从事的高等级科研项目中,包括了“863”、“973”、国家自然科学基金等系列研究项目,成果系统丰富.

在韩生廉教授所主持的技能模糊控制及遗传算法研究方向中,突破了常规的模糊控制系统研究框架,关注到了人的技能、技巧的模糊关系实现问题,从而拓宽了智能控制的研究范围.韩生廉教授师从绪方胜彦教授,与国际上少数学者同时起步研究这一问题,并将遗传算法引入了技能模糊控制方案设计和参数寻优.在遗传算法研究中,又将具有非随机操作特性和免疫机制引入其中,进一步提高了遗传操作的效率,并利用免疫——遗传融合算法,解决了典型的复杂生产调度和组合优化问题,所获系列成果发表于《控制与决策》等刊物,得到了较大范围的认同<sup>[5,6]</sup>.同时,该课题组还进行了模糊环境下的决策问题研究,提出了模糊决策问题解的存在性判别定理,相关的系列成果在日本的模糊系统学会杂志上公开发表.同时,该课题组还参与了国家自然科学基金和多项省部级科研项目的理论研究工作.

## 2.2 机器人控制及智能控制

在陈辉堂、蒋平教授所主持的机器人控制及智能控制研究方向中,以智能机器人为应用

对象,研究了智能机器人的知识获取、运动控制、远程控制及宏-微机器人等系列控制问题,并进行了系统性的实验研究,完成了三个不同种类、五个不同型号的机器人研制工作,在所涉及的理论研究领域获得了系列成果,在国际权威的《IEEE Trans. on Industrial Electronics》、《Int. J of Robotics》杂志,以及国内权威的《自动化学报》、《控制理论及应用》、《机器人》等学术刊物上发表了大量的系统性研究论文,造成了较大的学术影响<sup>[7,8]</sup>。同时,他们还采用 Lonworks 技术,进行了系统性的分布式智能控制技术应用研究,完成了北京中央电视塔、上海南浦大桥、洋浦大桥等标志性工程的灯光控制系统研制工作,并进行了智能化小区、流水线控制等应用前景广阔的系统开发研究,还结合同济大学的土建优势,进行了通用型网络控制的应用基础研究,取得了系列成果。

具体而言,在智能学习领域,该课题组针对典型的传感运动控制和运动学习问题,重点研究了基于神经计算模式和视觉信息的机器人行为模仿研究;在知识获取领域,课题组试图改变传统的机器人编程方式,建立在友好人机接口基础上的移动机器人行为能力学习框架,对高级技能和基本技能学习进行合理规划,建立非知识描述基础上的智能学习模式;在远程控制领域,课题组研究了基于 Internet 的低成本机器人远程控制系统,面向编程的异地化和试验环境的开放性,在解决 Internet 环境下的时延、数据丢失及状态预测等重要技术难题的基础上,将研制基于 Internet 的机器人遥操作系统;另外,为提高机器人的综合性能,在宏-微机器人的结构模式下,课题组将以多冗余自由度控制来实现运动受限情况下的运动灵活性,并在并行处理系统上进行控制器构造,从而解决其实时控制问题。由于该方向多年来有系列的国家自然科学基金项目、省部级项目和多项实际的应用开发项目支持,并有清晰的学科发展思路,故有望奠定在相关领域研究中的国际地位。

### 2.3 模式识别与并行分布系统

在蒋昌俊教授所主持的并行与分布式系统研究中,以 Petri 网为重要的理论工具,在模型级上进行了网络建模、分析及相关的模型计算工作,并提炼、发展了一种具有更为强劲计算能力的 PN 机模型,研究了它的建模理论和分析算法,并在 DEDES 和机群网络系统中得到了应用,研制了相关的软件平台。该方向在国际上较早地提出了网运算代数和合成建模的思想,并进行了分布式资源共享系统等问题的研究,其研究成果与 DEDES 研究中关于系统行为表达式及其分析方法的研究成果引起了国际同行的广泛兴趣。另外,该方向还在分布式智能控制系统、分布式实时数据库系统和网络计算等方向进行了系统性的面向工程实际的开发工作。由于在以上各领域所获的丰富成果,课题组在国内相关领域的研究中居于领先地位,在国际上也有一定的影响,先后得到了五项国家自然科学基金,并得到了国家“973”、“863”重点项目、“九五”、“十五”重点科技攻关项目等多个子项目,以及国家杰出青年科学基金的资助,所发表论文有 40 余次被三大检索收录<sup>[9,10]</sup>,获得了多项省部级科技进步奖,带头人蒋昌俊教授是中国自动化学会最年轻的理事之一,也是全国首届百篇优秀博士论文的获奖者。

在宣国荣教授所主持的模式识别与智能系统方向的理论研究中,在模式识别和特征选择研究中形成了自己的特色,在基于马氏距离的计算机视觉不变量研究和特征选择、基于 Chernoff 上界的特征选择和面向不同分布的线性判别函数迭代算法上形成了自己的特色,所获成果已应用于城市交通控制与诱导系统、自动选票机系统和汉语文语转换系统之中,得到了包括国家自然科学基金项目在内的多项高等级科研项目支持,成果大量发表于该领域

最高等级的学术期刊和国际模式识别会议等高等级场合<sup>[11,12]</sup>,并有相关成果获得了多项省部级科技进步奖。

在陈泳恩教授所主持的通信中的信息与控制技术研究方向中,在基于蓝牙技术的信息处理及标准建立、集成芯片设计中的软件开发及应用等方向有重要的系列国际合作研究成果<sup>[13]</sup>。同时,在生物信息的获取、处理和利用等方面也形成了自己的特色,成果居国内领先水平。另外,该方向在交通信号控制技术方面展开了面向铁路运行的计算机控制及容错技术、计算机控制信号设备安全软件技术、编组站调车自动控制、高速铁路微机联锁安全软件自动测试技术等特色方向研究,取得了系列成果,获得了多项省部级奖项,并已承接了国家安全部的重大项目。

## 2.4 系统工程

在此研究方向上,在吴启迪教授的主持下,同济结合了大量“863”/CIMS 主题的研究课题和 CIMS 推广应用项目,运用定性与定量相结合的多种系统科学方法,解决了多类规模大、结构复杂系统的最优估计、最优控制和最优管理问题,其研究领域与控制工程、计算机技术、信息技术、机械工程、管理工程等学科有大量的交叉,近年来成果丰富,共有 15 个项目通过了鉴定,其中有 7 个项目获得了国家科技进步二等奖和省部级科技进步二等奖、三等奖,科研经费充足。在相关领域的论文发表数量已超百篇,并形成了以下两个具体分工的特色研究方向。

其一为严隽薇、萧蕴诗教授所主持的智能生产系统研究方向。该方向以系统理论为基础,重点研究在工业企业中的系统工程技术,重点在复杂系统集成、并行工程、事务流程重建、企业资源规划、企业建模、生产系统规划调度、多目标决策和智能自动化等领域进行系统研究,为智能制造系统提供理论、方法和工具,并为企业提供有参考意义的系统技术和原型,为中国企业提供现代化的自动化技术服务<sup>[14]</sup>。该方向重点研究 CIMS 领域中的智能自动化及相关的系统工程技术,近五年来,已经完成了 19 项纵向课题,重点参与了“863”/CIMS 高科技领域攻关,以企业信息化为应用背景,以系统科学理论为基础,面向多个上海典型行业企业,取得了大量的科研成果,并获得了实际应用。

其二为张浩教授所主持的工业与制造系统研究方向。该方向针对工业与制造系统这一典型的复杂大系统,运用系统工程的理论和方法,进行了系统性的 CIMS 领域理论及应用研究工作<sup>[15]</sup>,并结合工业企业的自动化设备、工程设计、加工制造、生产管理、市场营销和经营决策等问题,面向国民经济主战场,进行各类具体的企业复杂系统开发,努力使企业实现综合自动化。该方向所取得的多项成果在上海名列前茅,获得了多项省部级奖项,参与了多项“863”/CIMS 项目,并系统参与了远程服务/远程工程系统的研究工作,与上海大众汽车公司等有良好的合作关系,其应用成果属国内首创,并具有良好的推广前景。

## 2.5 检测技术与自动化装置

在李同保院士所主持的智能测试理论与技术研究方向中,针对国际前沿的基于生命特征和智能特征的监测、控制系统研究,探索了新的技术途径,在超声、光声与控制检测技术等交叉学科领域范围内,开展了光、电、热、声之间的能量转换机理及新的智能化检测技术研究,结合现代的信息处理技术,实现媒质特征参量的智能数字监测与检测,从而服务于高智能的现代化工业自适应调节与控制过程。该方向在浓度流量检测、应力成像、智能仪器及现场检测通信技术等领域的研究中居国内领先地位,并有望在小口径流量检测、缺陷成像及遥

控通信方面取得突破性进展. 该方向近年来获得了多项省部级科技进步奖, 并发表了数十篇有影响的学术论文<sup>[16]</sup>.

在王磊等教授所主持的检测技术与自动化装置研究方向中, 在相关领域的核心技术, 包括智能检测技术、故障识别和模式识别、外标检测技术、电子鼻、电子舌技术以及流量检测标定技术等方向, 积极开展国际合作交流和联合攻关, 在外标检测设备、电子鼻、电子舌方向的研究中处世界先进水平. 在理论研究中, 结合智能理论及其在检测技术、模式识别、故障诊断以及流量标定中的应用, 瞄准国际发展趋势, 深入开展了大量基础理论研究, 取得了一批理论性成果, 并获得了国家自然科学基金的支持. 在实际的工程应用开发中, 也获得了多项专利性成果, 具有较大的推广价值.

### 3 同济所具有的特色研究机构

作为控制学科点的依托单位, 同济大学电子与信息学院的信息与控制系、计算机系、CIMS 中心、电气系等均有该学科领域的研究人员, 并大致在上节所述的各个方向形成了自己的特色. 在当今信息时代, 面对信息学科超常规发展的需求, 我们借助相关领域的专家, 特别是院士的力量, 开办或拟开办以下具有同济特色的研究机构, 欢迎社会各界与之合作, 共同发展.

#### 3.1 同济大学网络化系统研究所

为赶上近代信息科学技术的蓬勃发展趋势, 充分借助龚惠兴、李同保、戴冠中等专家的作用, 加强同济参与国内外信息科技重大计划与技术攻关计划的整体竞争力, 同济拟成立网络化系统研究所, 发展具同济特色的信息技术与自动控制核心方向. 该所在以下领域的课题组织中发挥重要作用.

a) 智能交通系统研究. 在 Telematics 系统框架下, 将各种最新的信息和通信技术加以集成, 在理论研究的基础上, 进行道路运输基本技术及其标准化研究, 从而充分发挥道路系统潜力, 降低污染, 增加效益. 现欧洲已有大规模成熟应用, 而中国尚未真正起步, 需要大力推动. 该领域研究也结合了同济大学交通工程方面的学科优势.

b) 国防科研中的若干相关课题, 包括各类未来武器装备及其核心技术、信息传感采集、作战模拟和信息安全策略研究, 以及相关系统中自组织、分形特征及其涌现行为的研究, 同样是具有很好应用前景的研究方向.

c) 在综合信息传感系统及其工业应用研究课题中, 该所也将关注系统的网络化实现方式, 从而为传感系统的集成化运行创造条件.

该所的骨干力量和学术委员会核心人员将包括: 龚惠兴院士、李同保院士、戴冠中教授, 以及吴启迪、郑应平、张浩、萧蕴诗、王磊、爻伟群、蒋昌俊等教授, 在创新计划的支持下, 主要从事网络环境下的系统建模、分析、控制、优化等方向的科学研究和应用开发, 并面向市场进行科研成果的转化工作. 该所在学术委员会指导下, 将设立远程信息控制、远程测试技术、远程信息服务和远程技术开发 4 个研究和应用开发方向, 并将联合申报各级各类重点项目, 按照产学研一体化的模式进行发展.

#### 3.2 同济大学半导体与信息技术研究所

该所是在中科院半导体所王守觉院士、梁骏吾院士和电子科技大学程星弼院士的支持

下筹建的,是一个集科研、教学、产业于一体的研究机构,任务是跟踪国际信息技术发展趋势,开展对新型半导体材料和器件、功率集成电路芯片、模糊逻辑和神经网络计算机及其半导体硬件实现,以及工业用净水处理等领域的研究和开发工作.由王守觉院士任所长.在各研究方向中,灵巧型功率集成电路技术的研究作为与离线功率应用、运动控制、电流调节、自动化电子设备等大范围的应用场合相关的核心技术,是半导体技术与自动化技术交叉的研究领域.另外,模式识别、模糊逻辑与神经网络理论的研究和实现也将为智能自动化领域的研究提供较好的成果借鉴.

### 3.3 社区信息化与智能建筑研究中心

同济大学的土木、建筑、城规等传统优势学科在国内外享有很高声誉.如何结合该领域的信息化发展需求,充分融合自动化、通信、计算机学科的发展优势,在传统优势学科基础上构筑同济自动化学科特色,正是该中心在学科发展上的任务所在.在上海城市发展信息中心、建设部智能推广中心、上海电信公司等单位的支持下,该中心挂靠信息学院,正积极参与信息、自动化以及智能建筑相关领域的研究方向开拓和相关的社会服务工作.陈辉堂、蒋平教授的梯队和吴启迪教授的梯队都涉及了该领域的工作.

## 4 结语

从以上介绍,我们可以得出一个结论,即同济大学已经摆脱了过去以土建类专业为主的学科布局结构,自动化、信息学科也从20世纪70年代以前所处的相对弱小的学术地位走向了如今的独立而又有特色的发展道路.这当然与政策环境、地理优势、各兄弟院校和学科点专家的大力支持是分不开的.同济现在已经拥有了控制科学与工程学科的博士后流动站,控制理论与控制工程学科已被列为上海市重点学科,下一步的发展需要申请一级学科的授予权.

总而言之,在自动化学科的理论及应用研究工作中,要取得突破性、开创性的学术进展,我们认为以下观点是不可缺的.

1) 辩证、全局的观点.学科进展从来就无法一蹴而就,但也不会青睐没有全局观念的研究者.在科研工作中,一定要亲身进入到具体的国际前沿学术交流环境之中,才有可能获得最新的成果借鉴.但同时如果一味采取跟踪的态度,不充分利用国内的学科优势,就永远也不会取得突破性的研究成果.在学术研究中,局部与整体、抽象与具体、当前与长远、前进与后退、跟踪与创新等永远是一对对共生的矛盾体,只有认识到这一点并加以自觉地应用与思考,才可能取得经得起历史检验的学术成果.

• 2) 系统、有序的观点.我们不仅要在学科的组成结构及学术交流制度(空间)的设置上进行合理安排,促进其交叉成果的取得,而且要从学科发展历史(时间)的角度出发,仔细规划学科内各相关领域的协作和制约关系,在学科的组织结构、运作程序和科研规范上保证其有序性,从而促进系统性科研成果的产生.

总之,国家的发展需要一支真正献身于自动化领域发展的队伍.淡泊名利、奋发有为是我们应取的态度.

## 参 考 文 献

- 1 Wang Lei, Wu Qi-Di. Linear system parameters' identification based on ant system algorithm. In: Proceedings of

- IEEE CCA/ISIC Conference, 2001, 401~406
- 2 Wang Lei, Wu Qi-di. Hopfield neural network based identification and control of induction motor drive system. In: Preprints of 14th IFAC World Congress, 1999, 279~289
  - 3 Zhao L N, Zheng Y P. Performance analysis of a certain type of multi-class queueing networks. *Studies in Informatics and Control*, 1999, **8**(3):233~241
  - 4 郑应平,赵丽娜,王利存. 可重入生产过程的 QBD 模型. 自动化学报, 2001, **28**(2):78~86
  - 5 韩生廉,胡国四. 技能模糊控制的一种设计方法. 控制与决策, 2000, **15**(1):31~34
  - 6 韩生廉. 人才选择的决策问题研究. 控制与决策, 1996, **11**(2):284~290
  - 7 Lin Jing, Cheng Hui-Tang, Jiang Ping *et al.* Curve tracking and reproduction by a robot with a vision system. *J. Robotic Systems*, 1999, **16**(10):457~464
  - 8 Jiang Ping, Chen Hui-Tang, Wang Yue-Juan, Lin Jing. A decomposed control system for vision-guided manipulators curve tracking. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 1999, **46**(3): 667~669
  - 9 Jiang C J. Testing of functions of complex systems based on synchronous composition nets. *Studied on Information Control*, 2000, (4):269~275
  - 10 Wang H Q, Jiang C J, Liao S Y. Behaviour relations in synthesis process of petri net models. *IEEE Trans. on Robotic & Autom.*, 2000,(4):245~249
  - 11 Xuan Guo-Rong. Maximum likelihood estimation based on feature for pixel clustering of color image. In: First International Conference on Color in Graphics and Image Processing. 2000,10
  - 12 Xuan Guo-Rong. Optimal Y-U-V model based on karhunen-loeve transformation. In: CGIP'2000,2000,10
  - 13 陈咏恩. 一种基于无平方根 QR 分解的流水 RLS 算法. 电子学报, 1999, **27**(10): 591~595
  - 14 吴启迪,严隽薇,张 浩. 柔性自动化的原理与实践. 北京:清华大学出版社,1997
  - 15 张 浩,乔 非. BPR 的原理方法与实施支持系统. 上海:上海科技文献出版社,2000
  - 16 李同保. 基于探测器的成像光谱仪绝对定标方法. 计量学报, 1998, **18**(1):3~8

**吴启迪** 1970年毕业于清华大学无线电系,1981年获清华大学精密仪器系自动控制专业硕士学位,1985年获瑞士联邦苏黎世理工学院电子工程系自动化专业博士学位. 现任同济大学校长、教授、博士生导师,科学技术研究院院长,国务院学位委员会委员,学科评审组成员,中国系统仿真学会副理事长,中国人工智能学会副理事长,中国自动化学会理事以及 IEEE 高级会员等. 长期从事控制理论与应用,自动化系统工程和计算机集成制造系统及智能自动化系统的理论与应用研究.