

平行控制: 数据驱动的计算控制方法

王飞跃¹

摘要 本文简述平行控制的理念、概念及基本方法与应用, 主要强调虚实互动的平行扩展方式与同时计算的并行划分方式的不同之处. 平行控制方法是 ACP 理论在控制领域中的具体应用, 其核心是利用人工系统进行建模和表示、通过计算实验进行分析和评估、最后借助平行执行实现对复杂系统的控制和管理. 这一控制方法是反馈控制, 特别是自适应控制方法向复杂系统问题扩展的自然结果, 是一种迈向数据驱动控制和计算控制的必然且有效途径.

关键词 平行控制, 复杂系统, ACP 方法, 自适应控制, 计算控制, 数据驱动

引用格式 王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法. 自动化学报, 2013, 39(4): 293–302

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.00293

Parallel Control: A Method for Data-Driven and Computational Control

WANG Fei-Yue¹

Abstract This paper introduces the concept, architecture, process and application of a new data-driven and computational control approach, called parallel control. The emphasis here is to illustrate the difference between the proposed system expansion scheme for parallel control through cyber-physical-social interaction and the traditional divide-and-conquer method for parallel computing through concurrent task execution. The theory of parallel control comes directly from the ACP approach, where artificial systems are used for modeling and representation, computational experiments are utilized for analysis and evaluation, and parallel execution are conducted for control and management of complex systems. Parallel control can be considered as the extension of feedback control, especially adaptive control, for dealing with problems involved with both engineering and social complexities. Case studies of this new control approach in transportation, production, and social management are presented and discussed.

Key words Parallel control, complex systems, ACP approach, adaptive control, computational control, data-driven

Citation Fei-Yue Wang. Parallel control: a method for data-driven and computational control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 293–302

何谓平行控制? 为什么要研究发展平行控制?

首先, 虽然平行控制 (Parallel control) 与并行计算 (Parallel computing) 在英文里都被冠以 Parallel, 然而, 平行控制之 “Parallel”, 非指并行计算之 “Parallel”, 而是指虚实之间的平行互动, 是指实际物理过程与人工计算过程之间的平行交互, 即 Physical vs. Cyber 系统之间的 Parallel^[1–6].

如图 1 所示, 平行控制之 Parallel 是将实际问题向虚空间扩充 (Expand) 之后, 通过虚实互动完成控制任务的一种解决问题的方式; 而并行计算之 Parallel 是将实际问题划分 (Divide) 成许多子问题

之后, 同时进行计算的一种解决问题的方式. 简言之, 平行控制就是通过虚实互动的方式来完成任务的一种控制方法, 是在大数据和数据驱动的基础上, 迈向计算控制科学的一种途径. 显然, 在平行控制中, 我们既可以采用并行计算的手段, 也可以采用串行计算的技术, 但对于真正复杂系统的平行控制, 一般必须利用并行计算.

为何平行? 首先是时代的需求, 因为现实的各类系统变得越来越复杂, 相应的工程复杂性或社会复杂性越来越高, 而且工程复杂性与社会复杂性之间的交互程度也越来越强, 主要表现在^[7–8]:

工程系统愈加复杂. 例如, 大型生产中过程控制系统 (Process control systems, PCS)、制造执行系统 (Manufacturing execution systems, MES) 和企业资源规划 (Enterprise resource planning, ERP) 集成程度的不断提高, 不可避免地导致复杂性的不断增加.

工程系统的社会化. 安全、低碳、环保、以人为本等越来越多的要求, 使得传统的工程领域必须越来越多地考虑社会与人的因素, 从而不可避免地引

收稿日期 2013-01-14 录用日期 2013-01-30
Manuscript received January 14, 2013; accepted January 30, 2013

国家自然科学基金委员会重点项目 (71232006, 61233001) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (71232006, 61233001)

本文为黄琳院士约稿

Recommended by Academician HUANG Lin

1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190

1. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

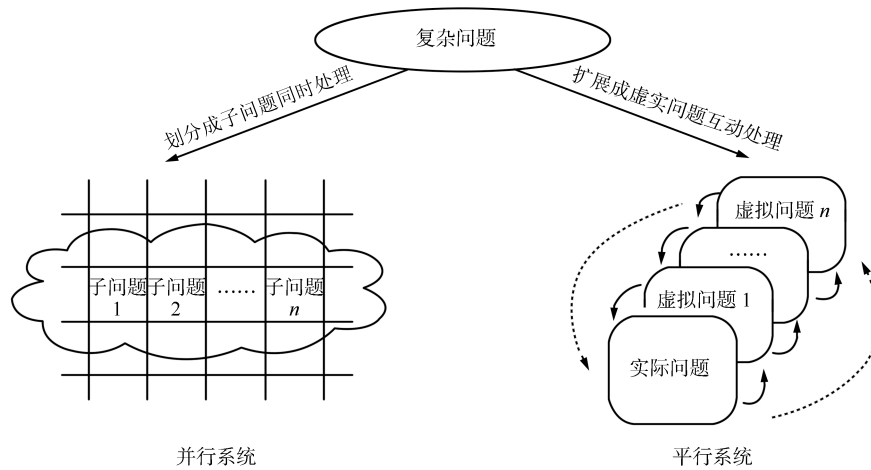


图 1 并行与平行的差别

Fig. 1 Difference of parallelism in parallel control and parallel computing

入许多社会复杂性因素。

社会系统的工程化。对于国家事务和社会服务水平的量化、实时、高效、开放等越来越高的要求,迫使传统的社会领域必须越来越多地考虑工程和实施的因素,不可避免地考虑许多工程复杂性的因素。

社会系统愈加复杂。新媒体、开放、和谐社会、科学发展观,实际上导致了社会动力学和人类动力学的动态程度越来越高、影响范围越来越大、反应速度越来越快,使社会系统呈“量子化”、“全局化”和“光速化”的趋势,也不可避免地增加了社会问题的复杂性。

表面上,这些复杂化现象是网络化的结果,但实质上,它们是虚拟化或人工化,即 Cybernization 的结果,进而产生了虚实互动之平行化的基础。

其次,目前正在兴起的许多社会和工程基础设施与新技术为实现平行控制等平行系统方法提供了有力的支持,例如^[6,9]:

大趋势:互联网、物联网、万维学、Web N.0、大数据、...

新技术:云计算、语义网、社会网、wiki、CPS、CPSS、...

这些趋势和技术的特色是广域且深度的互通、实时且海量的大数据信息。显然,任何一门技术学科应在实质上反映并适应社会与技术的这些时代发展,继而提高其效益。作为一门重要的技术学科,如果控制学科不考虑并利用这些新的社会和技术因素,我们的未来在哪里?

因此,面对目前日益复杂的系统,面对深刻变化的社会,不基于来自网络的海量数据、不面对大数据的背景、不利用先进的大型计算的控制理论和方法,很难成为解决复杂系统问题的一种可行且有效的基础和途径。平行控制就是试图以大数据为基础、以

数据为驱动,通过虚实互动的平行方式来控制管理复杂系统的一种计算控制方法,是一个满足时代社会需求和技术发展的产物^[10]。

1 复杂系统和复杂性研究的虚实结合思路

1990年,钱学森、于景元、戴汝为共同发表了《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》^[11],以“综合集成”的思路开创了复杂系统研究的新局面。1999年,美国《科学》杂志组织了“复杂系统”的专刊,提出了复杂性科学是21世纪的科学之观点^[12]。然而,这么多年过去了,实事求是地讲,除了针对一些有解析模型的特殊系统外,至今研究者对复杂系统和复杂性并没有形成共识,更谈不上普适的解决方法。

奥地利理论生物学家贝塔朗菲是上世纪初最早提出系统科学的人之一。虽然已进入21世纪,但相关学科并没有多少进步,观点却越来越多。限于篇幅,我们无法在此对各种复杂系统和复杂性科学的学术观点与方法进行评述,只能从本文所讨论的问题角度,说明我们的相关观点与认识^[1-10]。

我们认为,复杂性的科学必须跳出传统的科学观念。传统的科学最初是牛顿的体系,是确定性的。在随之而来的量子力学中,确定性就无法保证了,但是还有概率论。然而,在复杂系统中,我们连概率性的描述也无法做到,只能限在可能性层面。简单地讲,牛顿力学是关于确定性的科学,量子力学是关于概率性的科学,而复杂系统是关于可能性的科学,必须考虑“默顿系统”及相应的“默顿定律”的特性。基本上,复杂系统应当包含两个特征:“不可分”与“不可知”,即^[8]:

不可分特征。相对于任何有限资源,在本质上,一个复杂系统的整体行为不可能通过对其部分行为的独立分析而完全确定。

不可知特征. 相对于任何有限资源, 在本质上, 一个复杂系统的整体行为不可能预先在大范围内(如时间、空间等)完全确定。

所谓“不可分”就是不能按照传统的方式一直分下去, 最后还原出来整个复杂系统的行为, 即还原论方法, 对此大家认识比较一致。但“不可知”可能会有许多不同看法, 既然“不可知”, 还研究什么? 其实, “不可分”了也无法研究复杂系统, 因为现在除了“分”之外, 我们并没有其他的研究手段!

矛盾吗? 实际上, 复杂性问题的实质就是矛盾! 研究复杂系统要面临许多矛盾, 如, 要对不能建模的系统进行建模、要对不能分析的东西进行分析、要对不能预测的事情进行预测, 等等, 这都是表面上的矛盾, 反映的是有限资源与无限需求之间永恒且本质性的矛盾。解决的核心是“对立统一”的思想: 对立是矛盾, 问题是如何进行“统一”? 找到了如何统一的方法, 也就找到了解决复杂系统问题的途径。我们认为, “知必虚而解”就是通向“统一”的一种思路和途径^[13-14]。

何谓“知必虚而解”? 对“虚”可有各种各样的理解。比如现代量子力学的创始人之一波恩在《我的一生和我的哲学观》^[15]中, 提出要把主观性的倾向融入科学领域, 这就是虚的一部分, 就是社会学心理学的知识。其实科学的发展本身就是“虚”出来的, 整个科学体系都是通过形式化、理论化“虚”出来的。对于复杂系统, 必须要进一步的“虚”, 要把人和社会的行为、心理加进来。最重要的是, 还要加入虚拟的网络空间及其升华 Cyberspace, 否则, 许多复杂系统的问题就“无解”。

四百年前, 虚数的提出使得简单的“ $x^2 + 1 = 0$ ”和其他的代数方程有了“解”, 也为后来量子力学和相对论的建立铺平了道路。时至今日, 虚数早已不“虚”, 已经实实在在地成为数的一半, 与实数一起组成复数, 形成新的复数空间(图 2(a))。我们认为, 就像方程要有解需要虚数的概念及其开拓的新空间一样, 复杂系统要有“解”, 也必须引入相应的“虚数”才可以, 即“知必虚而解”, 这就是我们求解复杂问题的基本想法^[8, 13-14]。

但何为复杂系统的“虚数”? 这一“虚数”又如何能够引入解决复杂性科学的“新空间”? 对此目前并没有明确的答案, 但我们认为, 今天的网络空间和正在兴起的 Cyberspace 可以回答这些问题, 至少可以成为这一“虚数”和相应“新空间”的载体。我们的基本认识是: 未来的生活空间将从过去的物理空间(Physical spaces)翻番扩展到包含正在兴起的虚拟空间(Cyberspaces, 也可称为计算空间或人工空间、赛博空间或网间)的复杂空间(Complex spaces), 如图 2(b)所示, 即^[13]:

复杂空间 = 物理空间(50%) + 虚拟空间(50%)

显然, 如何利用这一认识, 特别是已经存在的网上资源和新的社交、学习、工作与生活方式, 具体地构造求解复杂问题的“虚数”和“新空间”, 无论在研究或技术上都是一项巨大的挑战。平行控制所基于的 ACP 方法, 正是沿此思路的一种尝试。

2 ACP 方法的基本概念

何谓 ACP 方法? ACP 方法又如何能够成为利用“复杂空间”求解复杂系统问题的工具?

所谓 ACP, 是指人工社会(Artificial societies)、计算实验(Computational experiments)、平行执行(Parallel execution)之有机组合, 即^[1-2, 16]:

ACP = Artificial societies + Computational experiments + Parallel execution

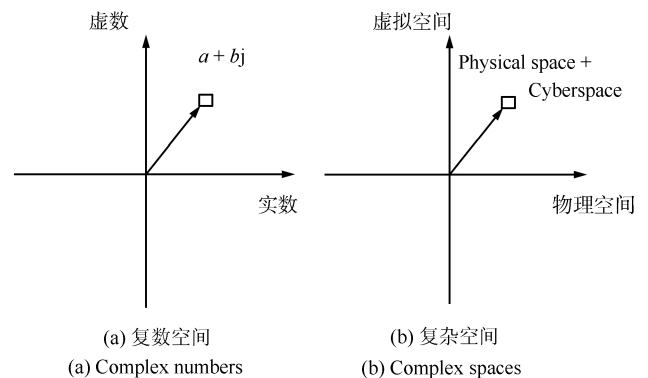


图 2 复数空间与复杂空间

Fig. 2 Complex numbers and complex spaces

ACP 方法的理念就是通过这一组合, 将人工的虚拟空间 Cyberspace 变成我们解决复杂问题的新的另一半空间, 同自然的物理空间一起构成求解“复杂系统方程”之完整的“复杂空间”。而新兴的“互联网”、“云计算”、“物联网”等技术, 正是支撑 ACP 方法的核心技术。从本质上讲, ACP 的核心就是把复杂系统“虚”的和“软”的部分建立起来, 通过可定量、可实施的计算化、实时化, 使之“硬化”, 真正地用于解决实际的复杂问题^[17]。

简言之, ACP 由“三步曲”组成: 第一步, 利用人工社会或人工系统对复杂系统进行建模; 一定意义上, 可以把人工社会看成是科学“游戏”, 就是用类似计算机“游戏”的技术来建模; 第二步, 利用计算实验对复杂系统进行分析 and 评估; 一旦有了针对性的人工社会, 我们就可以把人的行为、社会的行为放到计算机里面, 把计算机变成一个实验室, 进

行“计算实验”，通过“实验”来分析复杂系统的行为，评估其可能的后果；第三步，将实际社会与人工社会并举，通过实际与人工之间的虚实互动，以平行执行的方式对复杂系统的运行进行有效地控制和管理。

首先，人工社会或人工系统可以看成是传统的数学或解析建模之扩展，计算实验是仿真模拟的升华，而平行执行就是自适应控制（包括内模控制、预测控制、自适应动态规划 ADP 等^[18]）的进一步推广。其实，许多学者都有类似于 ACP 的想法，至少有部分的想法，许多学者 ACP 的三步已经走了差不多一步半，但要解决真正的复杂系统问题，必须三步一起有机结合完整地走完才可以。

一定意义上，ACP 方法解决了复杂系统“科学解决方案”的科学“悖论”问题。对于多数复杂系统，由于问题太复杂，根本无法实验，尤其是在解决方案实施前做实验，只好不管三七二十一实施了再说。然而科学的解决方案，至少要具备两条：一是可以实验，二是能够重复其实验结果。实际上，对于涉及人与社会的复杂系统，无法进行实验的问题十分突出，一是经济方面的原因，成本太高；二是法律方面的原因，做了违法；三是道德方面的原因，不能拿别人的利益甚至生命开玩笑；四是本质性的原因，在科学上就无法做这个实验，许多实验条件再试就不一样了，怎么进行重复实验？更无法重复结果，故必然导致“科学解决方案”之“科学悖论”。

所以，我们只能退而求其次，做“计算实验”，让硬的解析知识“软”一点，让软的体验知识“硬”一点，如此把计算机变成社会“实验室”，做不了“硬”实验，就用“软”实验替代；有真可仿时，做“仿真实验”，无真可仿时，就做“计算实验”，而且如此实验的过程可控、可观、可重复。这样，就能满足最起码的“可实验，可重复”之科学要求，一定程度上破解了复杂系统之“科学悖论”。

ACP 方法是在钱学森、于景元、戴汝为提出的综合集成科学思想和综合研讨厅体系技术的基础上^[11]，把信息、心理、仿真、决策融为一体，以可计算、可操作、可实现的方式为研究复杂性和控制与管理复杂系统提供了一个思路及方法。ACP 想法，还受到爱沃瑞特 (Hugh Everett III) 关于量子力学的“多重世界”或“平行世界”解释以及波普关于现实的三个世界之理论的深刻影响^[13, 19-20]。

基于 ACP 方法，我们已长期地围绕着国家安全、社会稳定、复杂生产等领域开展了社会计算、平行管理、平行控制等研发和组织工作^[21-25]，并在此基础上，开始了从实践到理论的深化工作。在本文中，我们重点讨论 ACP 方法在解决以工程复杂性问题为主的自动化平行控制方面的应用。

3 平行控制的基本框架和原则

在 ACP 方法的基础上，平行控制可定义为通过虚实系统互动的执行方式来完成一种控制方法；其特征是以数据为驱动，采用人工系统为建模工具，利用计算实验对系统行为进行分析和评估。平行控制是一种利用从定性到定量的知识转化，面向大数据，以计算为主要手段的控制与管理复杂系统的方法。

平行控制核心思想为：针对复杂系统，构造其实际系统与人工系统并行互动的平行系统，目标是使实际系统趋向人工系统，而非人工系统逼近实际系统，进而借助人工系统使复杂问题简单化，以此实现复杂系统的控制与管理。

图 3 给出利用平行系统进行平行互动的基本框架。在此框架之下，可有三种主要的工作模式，即：1) 学习与培训，此时以人工系统为主，且人工系统与实际系统可有很大的差别，而且不必平行运作；2) 实验与评估，此时以计算实验为主，人工系统与实际系统须有相应的交互，以此可以对各种各样的解决方案进行不同程度的测试，对其效果进行评判和预估；3) 控制与管理，此时以平行执行为主，人工系统与实际系统应当可以实时地平行互动，相互借鉴，以此完成对复杂系统的有效控制与管理。必须指出的是，一个实际系统可与多个人工系统互动，例如，根据需要，一个实际系统可同时或分时地与影像人工系统、理想人工系统、试验人工系统、应急人工系统、优化人工系统、评价人工系统、培训人工系统、学习人工系统等平行交互（见图 4）。

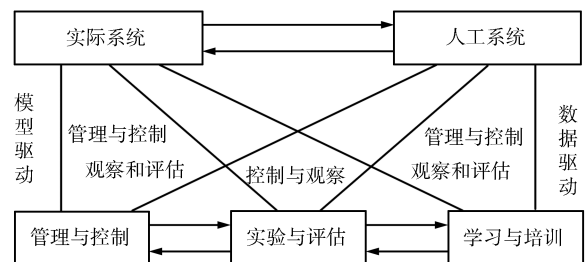


图 3 平行系统运行的基本框架与模式

Fig. 3 Basic framework and processes for execution of parallel systems

将平行系统之平行互动的框架嵌入经典控制系统的基本框架（见图 5(a)），即形成平行控制的基本框架，如图 5(c) 所示。

从经典控制到平行控制，中间有一个自然的过渡，就是自适应控制（也包括内模控制），如图 5(b) 所示。实际上，即使在经典控制中，也隐含着人工系统和平行执行的思想。然而，由于多数情况下经典控

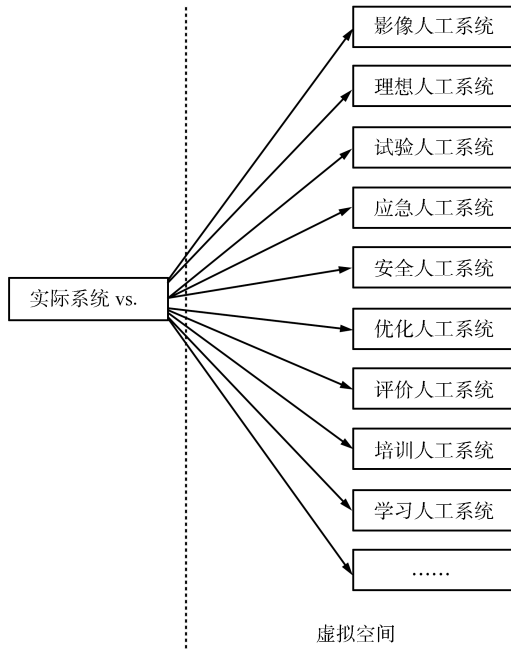


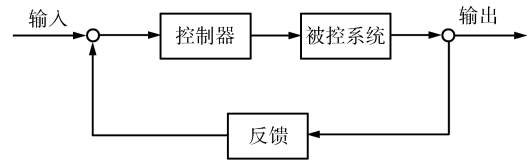
图 4 虚实互动的一对多映射

Fig. 4 One-to-many mapping for cyber-physical-social interaction

制所涉及的系统没有自主行为的能力,其所对应的“人工系统”可由微分或差分等解析方程来描述,而且逼近的精度也很高,可作为实际系统用于分析,直接融入计算控制量的公式之中;此时,由于实际与人工几乎等价,故没有必要再分离出独立的人工系统和平行执行部分.当难以甚至无法得到实际系统的解析模型时,就出现了以参考模型 (Reference models) 及内模 (Internal models) 为“人工系统”(图 5 (b)) 的自适应控制及内模控制方法;此时,实际、“人工”、控制之间的“平行执行”已从经典控制时的隐式变成显式,但所处理的仍是没有自主行为的系统.在控制复杂系统时,特别是包含自主行为元素(如操作员、管理者等)的复杂系统时,我们已几乎无法建立可以逼近实际系统的模型,因此只能利用独立的人工系统,使实际与人工系统相互趋近,但往往以实际趋向人工为目标,而非以人工逼近实际为目的;此时,人工系统、计算实验、平行系统成为独立组成部分,ACP 得到充分利用,原本单一的控制也升华为多功能、多模式的控制甚至管理系统或“管理器”.

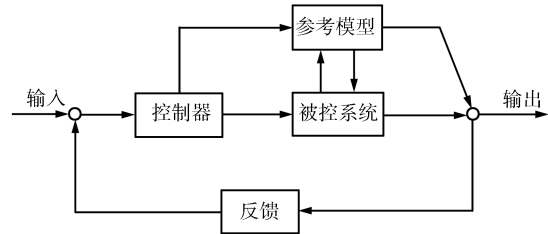
图 6 给出控制方法与系统复杂性的关系示意图.简言之,对于简单系统,以频域分析为主的经典控制方法足矣,有时可以利用物理实验的手段进行检验;对于一般系统或普通的大型系统,以状态变量为主的现代控制方法也能够胜任控制任务,需要时可以利用物理实验和计算机仿真的手段进一步验证;对

于其他规模系统和一些复杂系统,可以采用以计算智能为主的智能控制方法,必要时需利用计算机仿真及仿真实验的手段进行深入分析;对于复杂系统,



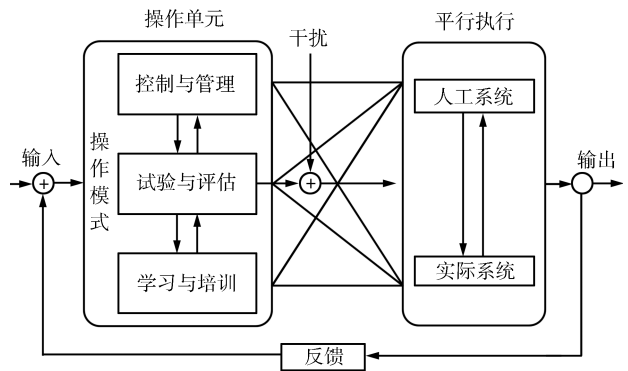
(a) 经典控制系统

(a) Classical control systems



(b) 自适应控制系统

(b) Adaptive control systems



(c) 平行控制系统

(c) Parallel control systems

图 5 经典控制、自适应控制和并行控制的基本框架
Fig. 5 Basic framework for classical, adaptive, and parallel control

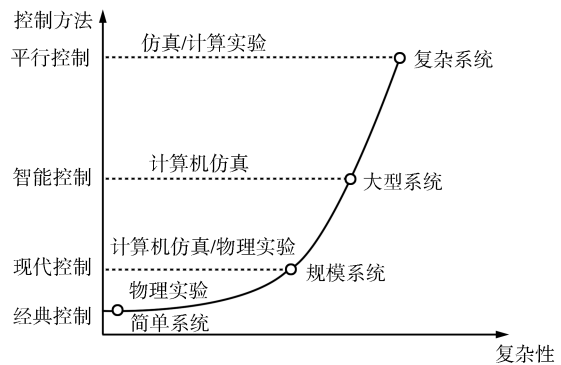


图 6 控制的方式与系统复杂性

Fig. 6 Systems complexity and modes of control

特别是具有自主行为能力的复杂系统,我们认为应当采用以计算实验为核心手段的平行控制方法.相对于其他控制方法,平行控制的特色首先表现在其必须依靠数据驱动,特别是来自 Web 和 Cyberspace 实时海量数据驱动的本性.只有在此基础之上,我们才能现实地进行各种有实际意义的人工系统构建过程和程序,例如:以数据为驱动,面向特定问题或情景的人与社会模型、行为与心理的计算等等.更为重要的是,利用 Web 及 Cyberspace 海量且丰富的数据,还有正在兴起的物联网与云计算技术,我们将可以构建服务于各种各样特殊用途、“活”的人工社会或系统,存于、运行于、动漫式的可视化于 Cyberspace,并导致其结构和行为的演化独立于系统的原设计者,使之真正不同于计算机仿真.一定意义上,数据驱动使得信息成为“喂养”、“培育”人工社会或人工系统的“粮食”,如同用于医药试验的动物一样,使之成为研究复杂系统的“试验动物”.

其次,平行控制方法不但能够完成对物理过程之控制算法的分析,还可以进行对复杂系统之管理规则的评估.针对物理过程的各种控制算法,我们有许多有效且成熟的解析方法来分析其性能,如经典的根轨迹法、Bode 图;现代的状态法,一般的李亚普诺夫方程、能量方法等.然而,针对社会过程的各种“控制算法”,即管理规则,我们有什么类似的解析或计算方法来“分析”其性能?迄今,文献里没有.因此多数时候我们只能靠实践,以“事后诸葛亮”的方式进行评价,提供反馈.少数时候,我们还可以利用“仿真”来分析评估,其实无真可仿.这是因为社会过程需要人的行为模型,问题是难以或不可能建立人之行为的“真实”模型,故而只能“人工”建之.

我们可以通过两个极端情景来进一步阐明常规控制方法与平行控制方法之间的差别.

先考虑简单物理过程的常规控制,其中的解析建模是为了使模型系统逼近实际过程,进而可以根据模型来计算可以实现过程目标的控制行动,因此模型“依附”于实际.再考虑复杂社会系统的平行控制,其中的人工社会是为了使实际系统趋近人工过程,进而可以根据目标来制定如何影响实际系统的管控措施,因此人工“独立”于实际.当然,此处的“依附”和“独立”都不是绝对的,其程度随系统复杂性的变化而变化.换言之,常规控制中的解析模型是控制之模型,而平行控制中的人工社会是目标之社会.对于处于简单物理系统和复杂社会系统之间的系统,其相应的人工系统将介于解析模型与人工社会之间.

至此,我们可以进一步明确**平行控制的基本原则**:在“不断探索和改善”的原则下,结合从定性到

定量的综合集成思想和分布并行的高性能计算技术,利用人工系统、计算实验、平行执行等理论和方法,建立复杂系统控制与管理的理论和方法体系.

这一思路与基于经验的“摸着石头过河”解决复杂社会问题的方法异曲同工,是控制论中反馈原理的直接扩展,我们的任务是使其科学化、综合化和系统化,进而实时在线地在“不断探索和改善”的原则指导下,“随物联云计算上天”,利用 Cyberspace 的资源和效率,寻求对复杂系统的有效控制与管理.

4 研究与应用现状

目前,我们从两个角度考虑复杂系统的控制与决策问题:一个角度是社会复杂性,一个角度是工程复杂性.当工程复杂性较高的时候,我们采用平行控制方法,以控制为主;当工程复杂性与社会复杂性参半的时候,我们采用平行管理方法,人机结合;当社会复杂性较高的时候,我们就以社会计算方法为主,综合集成从定性到定量来分析解决问题.总而言之,我们处理复杂性问题的核心思想与基础方法就是 ACP,如何使其理论更加完善,应用更加广泛,将是一项长期而重要的科研工作^[17-18, 25].

围绕着基于 ACP 的平行控制研发,中国科学院复杂系统管理与控制国家重点实验室已开展了十余年研发和应用工作.2005 年,由中国科学院院长特别基金启动了 ACP 和平行管理的基础研究,同时开展了在国民安全和复杂生产中进行应用示范的研发工作^[22-24].2008 年,中国科学院成立了社会计算与平行管理研究中心.在此期间,针对人工系统、计算实验、平行执行等问题,我们发展了以语言动力学(Linguistic dynamic systems, LDS)^[26]、自适应动态规划(Adaptive dynamic programming, ADP)和基于代理的控制(Agent-based control, ABC)为主的平行控制理论和方法^[25],并在社会经济和国家安全等重要领域的应用中取得了显著的成效,简述如下.

4.1 城市综合交通问题

智能交通是平行控制最早的应用领域.为什么?表面上有两个原因:首先是数据问题,交通的数据“垄断”是个突出的问题,研究人员往往无法从有关部门获取相关数据,但又没有经费、时间和资源自己做实验,以致“巧妇难为无米之炊”,很难开展大规模、具有实质意义的交通研究;其次是因果问题,目前使用的交通管理与控制系统都是基于已经发生过的交通数据进行决策的,知“果”但不知“因”,导致治“表”却无法治“里”,就是治标不治本,根本谈不上智能交通,更无法从根本上解决交通拥堵问题.我们认为 ACP 是解决这两个问题的有效方法,

因为交通问题是一个物理过程与社会过程交叉参半的混合过程, 交通现象多是“涌现”出来的, 具有典型的复杂系统特征. 数据问题可通过人工交通系统 (Artificial transportation systems, ATS) 建模来解决, 而因果问题可通过计算实验 C 和平行执行 P 来分析和利用, 从而在一定程度上既可治“表”又可治“里”. 相关文献请见 [1, 9, 22].

比如, ATS 可以根据区域的人口、商店的位置、企业的上下班时间、学校的放学时间等算出“人工世界”的“人工交通”流量, 作为实际交通情况的参考基础, 从而为“虚实”互动对实际交通进行平行管控提供基础. 有了 ATS, 计算机就可以作为交通的“社会实验室”, 对各种各样的交通行为和现象进行“试验”, 探本溯源, 进而标本兼治.

我们在 2006 年开发了第一代的城市交通的平行管理与控制系统 PtMS 1.0, 2008 年开发了第二代 PTMS 2.0, 2009 年完成第三代 PtMS 3.0, 由针对 ATS 的 TransWorld、学习与培训的 OTSt、进行交通试验分析的 DynaCAS、基于代理进行平行管理与控制的 aDAPTS 组成 (如图 7), 并在一些城市得到了实践, 初步取得了较好的效果. 2010 年亚运会期间, 完成第四代 PtMS 4.0 并在广州的出租车和快速公交的管理和运营中得到成功的应用. 利用 ACP 方法, 我们希望将来可以综合考虑人口、行为、气候及突发事件等因素, 利用新的云计算和物联网传感技术, 可以像预报天气一样预报交通情况; 同时, ACP 还应提供如何改进现有交通状况和管理方式的建议, 特别是提前考虑当人口和车辆增加之后需要采取哪些措施等等, 而不是等到严重堵塞之后再行动.

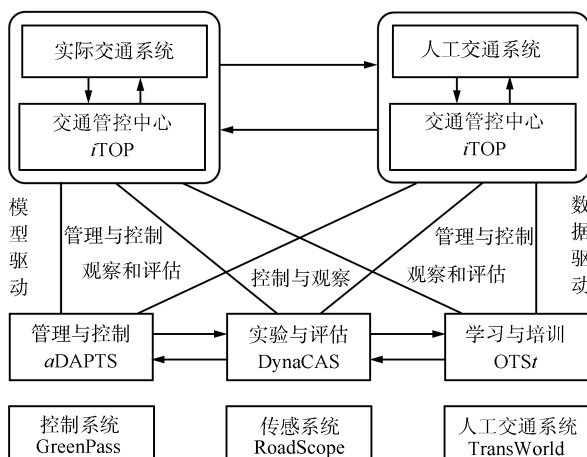


图 7 平行智能交通控制系统 PtMS

Fig. 7 Parallel traffic control systems for ITS: PtMS

4.2 乙烯的长周期安全生产问题

在我国, 大型乙烯生产设备曾经每年要检修一

次; 虽然现在可实现每 3~4 年检修一次, 但发达国家是每 5~6 年检修一次. 每次检修, 平均直接经济损失就是 5 亿人民币左右, 此外还有严重的环境污染和安全问题. 我国乙烯生产规模发展迅猛, 大型生产已从 80 年代的 30 万吨增加到今天的 100 万吨, 因此, 如何延长乙烯安全生产的周期, 具有重大的经济和社会意义.

要想延长乙烯生产的周期, 除设备本身的问题外, 关键就是知道其生产管理制度的有效性和可靠性. 对于生产过程中控制算法的有效性和稳定性, 我们有成熟的解析方法来证明. 然而, 对管理制度, 我们却没有, 因为它不但管设备, 而且管人, 问题是我们只有较为精确的物理化学过程的模型, 却没有相应的人与社会的模型, 因此无法评估一套管理制度的有效性和可靠性. ACP 方法正是为此目的发展出来的, 而平行控制就是其实现手段.

我们选择了中石化茂名公司作为试点, 因为它目前是最大的石化生产工厂, 有一套完整的管理制度, 还曾经创下了乙烯 79 个月连续安全生产的亚洲第一、世界第三的纪录, 而且当时正在进行 100 万吨乙烯的扩产工程. 从 2005 年起, 我们做了一个面向管理的人工乙烯生产系统, 在此基础上对管理制度进行计算实验, 最终通过虚实结合对乙烯生产进行平行控制和管理, 如图 8. 以化工车间为单元, 我们设计研发了二个产品系统: 平行培训 PTS 和平行评估 PES 系统, 以及一个平行管理 PMS 的原型系统. 整个平行系统与传统的生产管理系统不一样, 是以面向管理的科学游戏思路构建的. 一个新员工进入工作岗位之前先要参加 PTS 的培训, 培训合格后才可上岗, 如此获得的岗位知识和技能要比以前单纯上课得到的扎实深刻. 平行评估系统 PES 就是分析工人上班的效率, 这在以前是无法量化进行的. 通过 PES, 工人哪天被奖被罚多少分什么程度上完成其本职工作, 这个月的工资是多少, 都可以计算或统计出来. 以前, 这只能靠车间主任和班组长们来评判, 有时工人不认可, 产生过很多社会矛盾. PES 系统上线之后, 每天节省了管理人员将近一小时的开会时间; 工人也高兴, 因为现在自己每天干了什么事和为什么被奖罚都清清楚楚. 一个员工适合其岗位的程度也能“算”出来, 此外, 个人和班组谁先进谁落后也一目了然. 工人和管理者的体会就是“现在没法偷懒了”, 因为 PES 全程记录, 并在不断地进行计算实验和分析. 原理其实很简单, 就是把人的行为、人的心理放到 PTS、PES 和 PMS 里面, 以此进行计算实验, 最后实现虚实互动的平行管理. 我们的系统上线使用后, 一年就取得了纯增加利润 1 亿多元的显著效益.

现在大型生产管理都是采用企业资源规划 ERP

软件系统, 强调的都只是工程复杂性. 平行管理系统 PMS 把社会复杂性也放了进来, 希望能够形成一个更好的、更有效的企业管理系统, 真正实现复杂生产的信息化、工业化. 将来, 希望工厂都能通过 PMS, 在实施之前“试验”一下自己制定的战略正确与否、效果如何. 而且, 将来游戏工程师会成为一种标准的职业, 就和软件工程师一样, 专门通过 PMS 来设计、试验各种管理制度和运营策略; 如果没有 PMS 和相应的游戏工程师, 公司将无法高效利用其资源.

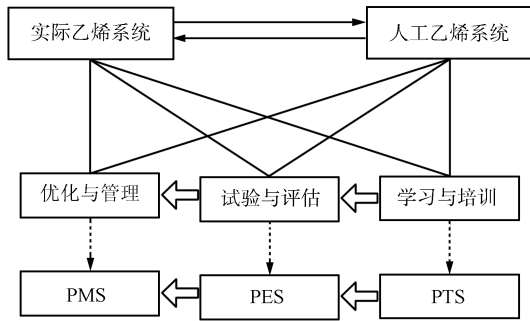


图 8 乙烯生产平行管理系统

Fig. 8 Parallel control for management of ethylene production

4.3 面向安全的社会计算与管理问题

美国的“国家万维别动部队 (National cyber range, NCR)”计划致力于建立大规模的人与社会行为的模型, 还要求模型的准确度达到 80%, 尽管很多人认为这不可能实现, 也是没有意义的. 仔细研究 NCR 计划的内容, 实质上就是军事化的社会计算和平行系统, 不过只实施了 ACP 的一半, 即一个 A 加半个 C, 但没有 P, 至少公开的部分没有嵌入、实时化之 P 的想法.

关键是当世界上其他人还在争论“预测不可预测”之事可能不可能、可做不可做、有没有科学方法的时候, 美国已经将其作为一个工程项目实施了. NCR 公开的经费是 300 亿美元, 是美国有史以来第二次如此大张旗鼓地由国会直接授权总统去执行: 第一次是受苏联卫星刺激后的阿波罗登月计划, 第二次就是 NCR, 号称“电子曼哈顿计划”, 目标是要打赢“网上太空竞赛”. 阿波罗登月计划使美国赢得冷战, 也催生了互联网, 意义非凡, 此次 NCR 的真正意义是什么? 显然, 不单单是什么“数字靶场”.

自 2004 年起, 我们提出开展社会计算的研究^[27-28], 工作的重点是围绕开源信息开展的天盾计划, 主要包括天网、天眼、天鹰三个工程, 构建相应的平行系统, 目标是为国家反恐和社会稳定提供决策支持 (见图 9). 简言之, 天网工程就是通过对不同领域的开源信息进行深度搜索, 利用各类的“社

会传感器网络”为“培育生长”各种人工社会或组织提供“粮食”. 例如, 我们可以有一个“人工基地组织”, 内有“人工”的本拉登, 真的本拉登有什么喜好, 对什么敏感, 都可以输到“人工本拉登”身上. 这个人工的拉登会自己到网上搜信息, 自己的状态随之变化. 我们也可以“制造”出一个事件, 看“人工基地组织”怎么反应, 这就是计算实验, 是天眼工程的任务. 一旦出了事或执行任务, 可通过把人工组织之情况跟实际组织和过程之情况并行起来, 按制定的方案展开, 看它们怎么互动, 从而为决策和实施者提供支持, 这就是平行执行, 也是天鹰工程的重要部分. 在天鹰工程中, 各种各样的软件按专门组织的编制设置, 形成相应的兵种. 根据 2012 年在美国首都华盛顿举办的 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics 专家专题讨论会上的信息, 目前包括美国 FBI 在内的国外机构也正在从事类似的研发.

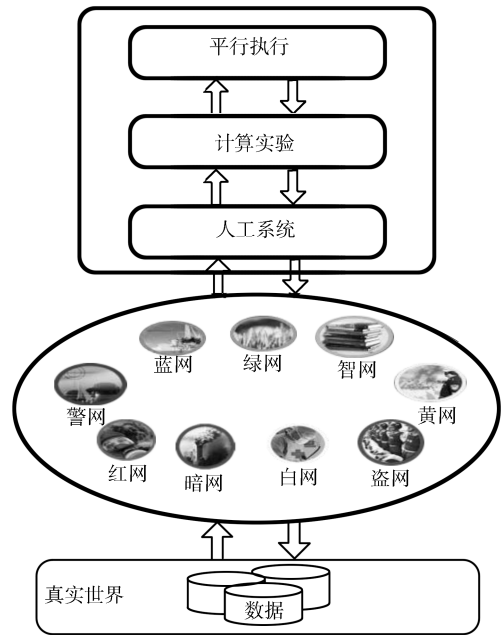


图 9 基于开源情报的社会计算与平行控制

Fig. 9 Open-source-intelligence-based social computing and parallel control

5 展望

从大自然获取科学知识, 到从实验室获取科学知识, 再到从课堂获取科学知识, 人类经历了数千年的漫长过程; 知识的获取与表示形式, 也从亲历试验为主转为以逻辑或数学推导为主. 因特网和 Cyberspace 的兴起, 已经并且还将进一步对知识的传统获取与表示方式造成冲击. 通过人工社会 (或人工系统) 及相应的科学动漫可视化获取和表现知识可

能将是这类冲击的主要手段之一, 而构建模块化、工具化、平台化的人工系统或许会成为一个新的产业, 这就提出虚实互动的平行控制方法之主要动机和考量。

同时, 面对目前大数据、物联网、云计算等“Cyberization”的现实背景, 控制理论与工程必须进一步加快向计算化、网络化、智能化方面的发展与深化。平行控制是有效利用“Cyberization”之可能方式, 更是实现 Control 2.0+ 和计算控制的可行途径。通过平行控制的方式, 我们可以更方便地在工程控制、经济控制、社会控制或管理之间搭建相互借鉴的桥梁, 实现从工程控制到社会管理的统一, 从而进一步开拓控制的研究与应用范围。

从理念到应用, 平行控制已经历了十余年的过程, 但这一方法仍然处于初始发展阶段, 相应的理论研究也刚刚起步, 其有效性和实用性还必须经过更加深入的检验。平行控制的普及, 有待完备的算法、工具、系统和平台的建立和使用, 涉及多学科、跨学科的综合交叉融合, 将是一项长期而艰巨的工作。

致谢

本文内容是在 2009 年 9 月中国国际战略研究基金会关于平行系统的特邀报告和 2009 年 11 月中国自动化年会上关于平行控制的大会报告之基础上, 结合 2011 年 9 月北京大学“控制学科发展战略研讨会”上关于平行控制的报告, 整理而成。

References

- 1 Wang Fei-Yue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and Decision*, 2004, **19**(5): 485–489
(王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. 控制与决策, 2004, **19**(5): 485–489)
- 2 Wang Fei-Yue. New mechanisms for control and management of complex systems: research and development. *Project to the President's Foundation for Special Projects, Chinese Academy of Sciences*. Beijing, China, 2005
(王飞跃. 复杂系统的控制与管理机制研究及其应用. 中国科学院院长基金特别支持项目立项书. 2005)
- 3 Wang F Y, Wong P K. Intelligent Systems and Technology for Integrative and Predictive Medicine: An ACP Approach. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*. 4, 2, Article 32 (March 2013), 1–6
- 4 Wang F Y. Toward a paradigm shift in social computing: the ACP approach. *IEEE Intelligent Systems*, 2007, **22**(5): 65–67
- 5 Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 630–638
- 6 Wang F Y. The emergence of intelligent enterprises: from CPS to CPSS. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, **25**(4): 85–88
- 7 Wang Fei-Yue. Direction and strategy for research and development of the complex systems and intelligence science. *Research and Exploration in Laboratory*, 2004, **23**(5): 74–76
(王飞跃. 复杂系统与智能科学的研究方向和发展策略. 实验室研究与探索, 2004, **23**(5): 74–76)
- 8 Wang Fei-Yue. Computational theory and method on complex system. *China Basic Science*, 2004, **6**(5): 3–10
(王飞跃. 关于复杂系统研究的计算理论与方法. 中国基础科学, 2004, **6**(5): 3–10)
- 9 Wang F Y. Toward a revolution in transportation operations: AI for complex systems. *IEEE Intelligent Systems*, 2008, **23**(6): 8–13
- 10 Wang Fei-Yue. Parallel control: from model-based engineering cybernetics to data-driven social management. *Complexity and Intelligence*, 2008
(王飞跃. 平行控制: 从基于模型的工程控制到数据驱动的社会管理. 复杂性与智能化, 2008)
- 11 Qian Xue-Sen, Yu Jing-Yuan, Dai Ru-Wei. A new discipline of science—the study of open complex giant system and its methodology. *Chinese Journal of Nature*, 1990, **13**(1): 3–10
(钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志, 1990, **13**(1): 3–10)
- 12 Gallagher R, Appenzeller T. Beyond reductionism. *Science*, 1999, **284**(5411): 79
- 13 Wang F Y. Moving towards complex intelligence? *IEEE Intelligent Systems*, 2009, **24**(4): 2–4
- 14 Wang F Y. Old verse, new idea: why artificial is real. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, **25**(5): 2–3
- 15 Max Born. *My Life and My Views*. New York: Charles Scribner's Sons, 1968
(M. 波恩著, 李宝恒译. 我的一生和我的观点. 北京: 商务印书馆, 1979)
- 16 Wang Fei-Yue. On the modeling, analysis, control and management of complex systems. *Complex Systems and complexity science*, 2006, **3**(2): 26–34
(王飞跃. 关于复杂系统的建模、分析、控制和管理. 复杂性科学, 2006, **3**(2): 26–34)
- 17 Wang Fei-Yue. The future world and complexity, special report, China foundation for international strategic studies,

2009. *Development of Science and Strategic Studies*. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2012
(王飞跃. 2009 年中国国际战略研究基金会“未来世界的复杂性”报告, 科学发展与战略研究. 北京: 知识产权出版社, 2012)
- 18 Wang F Y, Jin N, Liu D R, Wei Q L. Adaptive dynamic programming for finite-horizon optimal control of discrete-time nonlinear systems with ϵ -Error bound. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2011, **22**(1): 24–36
- 19 Everett H. The Theory of the Universal Wavefunction [Ph. D. dissertation], Princeton University, Princeton, 1973. 1–140
- 20 Karl Popper. *The Open Society and Its Enemies*. New York: Routledge, 1945
(卡尔·波普尔著, 陆衡等译. 开放社会及其敌人. 北京: 中国社会科学出版社, 1999)
- 21 Wang Fei-Yue. Study on cyber-enabled social movement organizations based on social computing and parallel systems. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2011, **33**(1): 8–12
(王飞跃. 基于社会计算和平行系统的动态网民群体研究. 上海理工大学学报, 2011, **33**(1): 8–12)
- 22 Wang Fei-Yue, Li Le-Fei, Huang Xing, Zou Yu-Min. An investigation of fundamental theory of long period continuous production with effectiveness, safety and energy saving. *Computers and Applied Chemistry*, 2007, **24**(12): 1711–1713
(王飞跃, 李乐飞, 黄星, 邹余敏. 关于长周期连续安全节能有效生产基础理论的探讨. 计算机与应用化学, 2007, **24**(12): 1711–1713)
- 23 Cheng Chang-Jian, Cui Feng, Li Le-Fei, Xiong Gang, Zou Yu-Min, Liao Chang-Yong. Parallel management systems for complex productions systems: methods and cases. *Complex Systems and Complexity Science*, 2010, **7**(1): 24–32
(程长建, 崔峰, 李乐飞, 熊刚, 邹余敏, 廖昌勇. 复杂生产系统的平行管理方法与案例. 复杂系统与复杂性科学, 2010, **7**(1): 24–32)
- 24 Shen Xiao-Wei, Wang Fei-Yue, Cheng Chang-Jian, Liu Xi-Wei. Application of clustering analysis to team management. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(4): 563–569
(沈小伟, 王飞跃, 程长建, 刘希未. 聚类分析方法在企业班组管理中的应用. 自动化学报, 2012, **38**(4): 563–569)
- 25 Wang Fei-Yue, Liu De-Rong, Xiong Gang, Cheng Chang-Jian, Zhao Dong-Bin. Parallel control theory of complex systems and applications. *Complex Systems and Complexity Science*, 2012, (3): 1–12
(王飞跃, 刘德荣, 熊刚, 程长建, 赵冬斌. 复杂系统的平行控制理论及应用. 复杂系统与复杂性科学, 2012, (3): 1–12)
- 26 Wang Fei-Yue. Fundamental issues in research of computing with words and linguistic dynamic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2005, **31**(6): 844–852
(王飞跃. 词计算和语言动力学系统的基本问题和研究. 自动化学报, 2005, **31**(6): 844–852)
- 27 Wang F Y. Social computing: concepts, contents, and methods. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 2004, **9**(2): 91–96
- 28 Wang Fei-Yue, Li Xiaochen, Mao Wenji, Wang Tao. *Social Computing: Methods and Applications*. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2012
(王飞跃, 李晓晨, 毛文吉, 王涛. 社会计算的基本方法与应用. 杭州: 浙江大学出版社, 2012)



王飞跃 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员. 主要研究方向为智能系统和复杂系统的建模, 分析与控制.

E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn

(WANG Fei-Yue Professor at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers modeling, analysis, and control of intelligent systems and complex systems.)