

# “人-机结合”的综合集成研讨体系

郑楠<sup>1,2</sup> 章颂<sup>1,2</sup> 戴汝为<sup>1,2</sup>

**摘要** “综合集成研讨体系”属于系统科学的基础理论层次,是开放的复杂巨系统的方法论,同时也是思维科学的一项应用技术,属于思维科学的工程应用层次,是系统科学与思维科学交叉发展产生的原创性成果.文中从系统科学和思维科学两方面阐述综合集成研讨体系提出的理论背景.从思维与智能的进化角度,提出人-机结合的三个层次.从思维科学的视角,探究了“综合集成研讨厅”平台提升思维能力、实现“人-机智能”增强的途径,试图对复杂问题求解和人-机融合智能共进有所启示.综合集成研讨体系对群体思维、机器智能和知识体系综合运用,激发个体思维→个体智慧→群体智慧→社会智慧的演进过程.从思维科学、信息科学与技术、网络技术结合的智能科学,到体现人文科学与自然科学相互交叉与融合的社会智能科学,这一历程中渗透着钱学森前瞻性的科学思想与博大精深的智慧.

**关键词** 综合集成研讨体系(HWME), 思维科学, 复杂系统, 人-机结合, 群体思维

**引用格式** 郑楠,章颂,戴汝为.“人-机结合”的综合集成研讨体系.模式识别与人工智能, 2022, 35(9): 767-773.

**DOI** 10.16451/j.cnki.issn1003-6059.202209001

**中图法分类号** TP 399

## Hall for Workshop of Metasynthetic Engineering Based on Man-Machine Integration

ZHENG Nan<sup>1,2</sup>, ZHANG Song<sup>1,2</sup>, DAI Ruwei<sup>1,2</sup>

**ABSTRACT** Hall for workshop of metasynthetic engineering (HWME) belongs to the basic theoretical level of system science, which is a methodology of open complex giant systems (OCGSs). It is also an application technology of noetic science, which belongs to the engineering application level of noetic science, and is an original result of the cross development of system science and noetic science. This paper expounds the theoretical background of HWME from the aspects of system science and noetic science. From the perspective of the evolution of noetic and intelligence, three levels of man-machine integration are proposed. From the perspective of noetic science, this paper explores the ways to improve the thinking ability of HWME and realize the enhancement of human-machine intelligence, and tries to enlighten the complex problem solving and man-machine integration intelligence. Group thinking, machine intelligence and knowledge system are applied in HWME to stimulate the evolution process of individual thinking → individual wisdom → group wisdom → social wisdom. From the intelligent science

Sciences( No.XDA27000000)

本文责任编辑 吴飞

Recommended by Associate Editor WU Fei

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

2.中国科学院大学 人工智能学院 北京 100049

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

2.School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

收稿日期:2022-06-28;录用日期:2022-09-05

Manuscript received June 28, 2022;

accepted September 5, 2022

中国科学院自动化研究所基础科研项目( No.Y9J2FZ0801)、  
中国科学院战略性先导科技专项项目( No.XDA27000000)

资助

Supported by the Research and Development Fund of Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences( No.Y9J2FZ0801),  
The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of

that combines noetic science, information science and technology, and network technology to the social intelligent science that reflects the intersection and integration of humanities and natural science, Mr. Qian Xuesen's forward-looking scientific thoughts and broad and profound wisdom permeate this process.

**Key Words** Hall for Workshop of Metasynthetic Engineering (HWME), Noetic Science, Complex System, Man-Machine Integration, Group Thinking

**Citation** ZHENG N, ZHANG S, DAI R W. Hall for Workshop of Metasynthetic Engineering Based on Man-Machine Integration. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2022, 35(9): 767–773.

近年来,随着以机器学习,尤其是深度学习为代表的人工智能的快速发展和应用,这类数据驱动的方法与技术在大规模工程化应用方面取得不错成果,如人脸识别、机器翻译等。然而,数据增长带来的“智能提升”逐渐下降。与此同时,作为智能主体的人工智能系统与“人”之间的交互关系变得日益广泛和复杂。因此,越来越多的学者开始关注增强智能<sup>[1]</sup>、混合智能<sup>[2]</sup>、人机协作<sup>[3–4]</sup>,试图探索智能的新范式。

增强智能以提升某些智能主体的智力水平或问题求解能力为目标,早期侧重于增强人类智能<sup>[5]</sup>。随着人工智能的出现,通过人类认知增强人工智能能力的路线<sup>[6]</sup>也被纳入这一领域。从智能增强的研究对象出发,可把增强智能划分为三种类型:面向机器的增强智能、面向人的增强智能和面向“人-机”系统的增强智能。当下,研究者们更关注前两种类型的增强智能研究,在各领域也取得长足进展。而第三种类型的典型代表是“人-机结合”的综合集成研讨体系<sup>[7]</sup>。

“人-机结合”的综合集成研讨体系源于系统复杂性研究,是钱学森等在研究整合系统、思维、智能等学科理论的基础上,于 20 世纪 90 年代初提出的“处理开放的复杂巨系统的方法论”<sup>[8]</sup>。该理论旨在指导人们处理复杂问题时,通过“人-机结合”、“群体研讨”的方式,最大限度集成有关的经验与知识,通过群体成员之间的互相激发和对相关资源的集体研究加工处理,实现群体智慧的涌现,获得对复杂问题更深入准确的认知,进而指导复杂问题的求解<sup>[9]</sup>。

应用综合集成研讨体系求解复杂问题时面临的最大挑战是如何把与复杂问题求解相关的各类专家(包括领域专家和计算机/人工智能专家)引入传统的以计算机为主导的智能系统中,从而打破系统的静态性和封闭性,使人、机均处于问题求解和智能增

强回路中。“人-机”系统也会随问题求解阶段和状态的不同而持续调整和演化。

本研究团队经过近 40 年的持续研究,使人-机结合的综合集成研讨体系在理论、方法和应用方面均取得重大进展,成为增强智能、混合智能、群体智能外化和涌现的场所,为进一步观察、研究这些行为提供理论和应用基础。与此同时,团队提炼处理复杂问题的可操作智能工程平台的技术路线,在宏观经济决策、军事战略决策、水域治理等涉及国计民生的重大领域获得成功应用。

## 1 综合集成研讨体系

### 1.1 综合集成研讨体系是处理开放的复杂巨系统问题的方法论

复杂系统的研究对象小到原子夸克,大到宇宙星球。一般认为复杂系统具有适应性、不确定性和涌现性<sup>[10–11]</sup>,这些特征使传统的建模和预测方法在面对复杂系统时基本束手无策。其根本原因是由于复杂系统各组成单元之间的相互作用具有非线性且受偶然性支配,其宏观性质和动力学演化往往存在混沌现象,因此使用数学描述并预测其行为具有极大的困难和挑战。为此,20 世纪 80 年代后期,钱学森总结“两弹一星”等复杂系统工程经验,提出“开放的复杂巨系统”概念和理论方法<sup>[8]</sup>。20 世纪 90 年代初,钱学森等在“开放的复杂巨系统”的概念基础上,提出“定性定量相结合的综合集成法”,随后的研究又发展为“从定性到定量的综合集成法”,并在 1992 年提出“以人为主,人-机结合,从定性到定量的综合集成研讨体系”,之后随着互联网的兴起和发展,又提出“基于信息空间的综合集成研讨体系”<sup>[12–13]</sup>。

综合集成研讨体系的核心思想是通过考虑经验、直觉、想象、记忆、遗忘等一系列的认知模式,使

用模型方式表达“只可意会不可言传”的隐性知识,融合规划推理等显性知识和经验直觉等隐性知识,实现复杂系统的认知建模.从定性到定量的综合集成法,并不是把一个定性的认识或指标和定量的认识或指标糅合起来形成一个结论,而是以专家的经验性假设(猜想)为依据,在此基础上,基于数据和资料建立模型,通过模型的测算验证专家的假设是否正确.如果不正确,调整模型或修正假设,重新建模计算.综合集成法的实质是基于系统科学的理论基础,指导人们在处理复杂问题时,有机结合专家的智慧、计算机的高性能和各种数据、信息,结合各种学科的科学理论和人的经验知识,构成一个统一的、人-机结合的智能问题求解系统.

## 1.2 思维科学是综合集成研讨体系的理论基础

从人工智能的角度上分析,人工智能从功能应用上可分为计算智能、感知智能和认知智能三个层次<sup>[14]</sup>.目前绝大部分人工智能的工作,都是“人”怎么充分应用计算机的能力,目标还是定量计算.计算智能在很多方面已超越人类,感知智能也取得重大进展<sup>[6,15]</sup>.如何让计算机像真正的专家一样,能针对复杂问题提出猜想、假设及思路,目前是难以做到的.认知智能因其综合性更强,更接近人类智能,研究难度更大,长期以来一直进展缓慢,是目前具有挑战性的研究领域之一.近年来,以深度神经网络为代表的人工智能理论与方法发展迅速,但仍无法突破莫拉维克悖论,获得人类的认知能力.因此,启发人工智能走向认知智能,成为迫切需求,“人-机结合”的综合集成法为实现认知智能指明新的方向.

要研究人工智能、智能机,首先要模拟人的智能,清楚人的思维规律.因此,钱学森认为思维科学是研究人工智能的基础学科.思维科学是研究人类各种思维形态的本质、基本形式及其规律,以便人机结合、以人为主体地高速解决认识与改造客观世界中的实际问题,逐步减轻人的脑力劳动的新兴科学技术<sup>[16]</sup>.思维学(钱学森提出现代科学技术体系,按照当时的学科分为11大部门,思维科学是其中一个部门,并将每个部门分为三个层次:基础理论层次、技术科学层次、应用技术层次.)作为思维科学的基础理论层次,是建立在对思维基本形态认识的基础上.思维学包含抽象思维学、形象思维学、创造性思维学和社会思维学<sup>[17]</sup>.社会思维学是研究群体思维活动的本质、基本形式及规律的思维学.群体思维活动在人类历史上早已存在,长期发挥重要作用,只是未被重视.本团队运用钱学森关于思维科学的观点,发挥

形象思维泛化的作用,将社会思维学的研究应用于综合集成研讨体系,在群体思维启发与激活方面发挥重要作用,提升人-机系统解决复杂问题的能力.

## 2 人-机结合的三个层次

综合集成研讨体系的核心是人-机结合,从思维与智能的进化角度将人-机结合划分为三个演变层次.第一个层次是初等结合,第二个层次是人机协同,第三个层次是人机融合智能共进.

图1展示人-机结合的三个层次,这是三个递进的发展阶段,描述人-机系统不断发展的内在本质.三个层次分别对应于思维学的三个层次:逻辑思维、形象思维、创造性思维与社会思维,以及人工智能的三个发展阶段——计算智能、感知智能、认知智能.

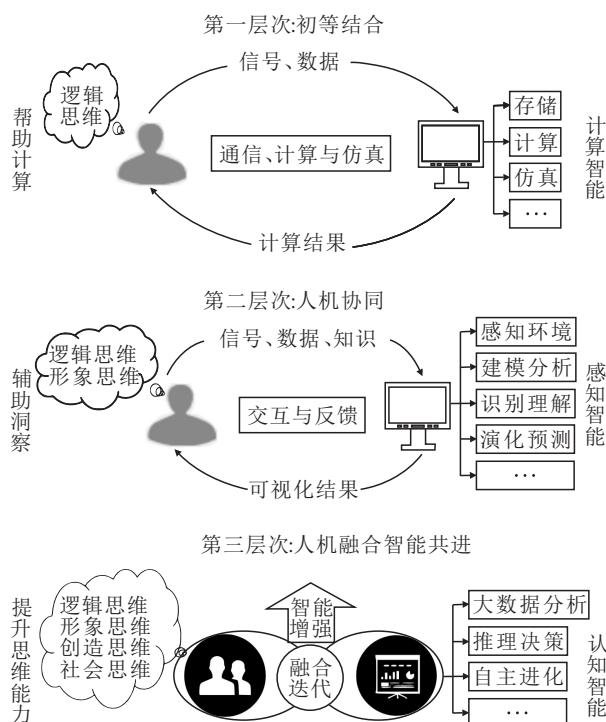


图1 人-机结合的三个层次

Fig.1 Three levels of man-machine integration

### 2.1 初等结合

人和计算机各有所长.人的经验在解决问题时具有不可忽视的作用.人擅长在复杂情景下制定计划、做出决策,但却不擅长进行大量的数据计算与处理.计算机擅长高效的数据处理,但对定性的信息处理能力较差,难以对复杂问题做出基本判断.因此,



初等结合方法借鉴人机互补的思想,将能形式化、可重复计算的工作尽量让计算机完成,一些复杂、难以形式化的工作,需要靠人直接或间接参与,构成人-机结合系统.例如,人把已知的算法、软件功能等赋予计算机,使计算机拥有用于解决特定问题的逻辑推理能力.可见,初等结合方法的核心是将计算机作为人的逻辑思想外化的载体,利用计算机强大的计算能力,解决实际问题,实现计算智能.

## 2.2 人机协同

人和计算机除了功能互补之外,还可通过交互与反馈互相感知理解.在这种交互反馈的环境中,人与机器就像人与人之间协作一样,因此,该种人机结合方式又被称为人机协同.在人机协同中,一方面,人会参与模型的训练、调整和测试.例如:对数据进行人工标注,对模型进行人工调整,测试和验证模型等.另一方面,将人的知识传授给机器,使机器具有学习知识的能力,让算法变得更聪明、可靠、准确,机器学习算法就是典型案例.通过上述两种方式,人将自己定性的认识,即结合抽象思维和逻辑思维层面的认知赋予计算机,使计算机具备对特定问题的定性和定量判断的功能,即感知智能.以图像识别为例,机器学习的特征提取、学习计算能解决对未知图像的识别问题.通过图像理解、语音识别、语言翻译、运动控制等方式,感知智能赋予计算机能听说、会读写的能力.计算机通过数据可视化、统计分析等信息反馈方式辅助人们洞察难以发现的规律和知识等,增强人的视觉、听觉、触觉等感知能力.

## 2.3 人机融合智能共进

随着算力、数据、算法等要素逐渐齐备,先进的算法结构不断涌现,成熟的人工智能技术逐渐向代码库、平台和系统发展,实现产业和商业层面的落地应用,推动人工智能发展迈向新阶段,人机融合智能共进成为必然趋势,并将对复杂系统的演化和涌现等产生新的影响.在这一层次中,人向机器传授学习方法,即关于学习方法的学习,计算机不但会学习,还知道如何学习,创造新的学习方法,例如 Alpha-Code 能自己实现编程并解决问题<sup>[18]</sup>.认知智能的核心任务是如何将人的创造思维外化并赋予计算机,用于解决计算机能思考、推理、决策的问题.

从人对机器的智能增强角度出发,类脑智能借鉴脑神经和认知科学研究<sup>[19]</sup>,增加空间复杂度以保留计算单元之间的结构相关性,构造基于神经形态工程的高速、新型计算架构.从机器对人的智能增强角度,利用超大规模数据计算与推理将成为提升人

的洞察和思维能力的有效途径<sup>[20]</sup>.在人-机系统中,通过大模型实现任务的泛化性表征与学习,实现模型的符号化输出到可解释性方案的转换,从决策大模型生成新的认知.对人进行认知心理建模,有效表达思维和心理状态,提升人对复杂问题的深入洞察与认知理解.以前,人类普遍陷在个体的局限思维中,如今计算机可帮助人类洞察世界、提升思维能力与水平,这是人类信息时代前所未有的进步与发展.随着人-机系统的持续调整与发展演化,通过人与机在不同层次上的协作、双向启发和激荡、反馈迭代,人的思维能力随之提升,机器的智能水平随之增强,最终实现人机融合智能共进.

# 3 综合集成研讨厅是思维科学的应用技术

“思维科学的任务就是从思维的角度找出思维能力的途径并付诸实施.从研制的从定性到定量的综合集成研讨厅体系就是完成思维科学这一任务的一个建议<sup>[21]</sup>(1992年3月23日致戴汝为同志:综合集成研讨厅体系就是完成思维科学这一任务的一个建议.).”钱学森的这一论述明确指出综合集成研讨厅不仅仅是用于解决复杂问题的,其核心是在解决问题的过程中探索思维的形成、思维能力的提升等.把研讨厅作为对思维能力提升的平台,这是对方法论的重大创新.从思维科学的视角出发,综合集成研讨厅是思维观察、激活与群体智慧涌现的场所.在研讨过程中,实现对假设、猜想、初始方案的论证与检验,提升整个人-机系统的思维能力,达到超越每个个体成员的智慧水平,并同时展现达到这一水平的思维过程.可见,实现综合集成研讨厅的关键在于展现思维过程、提升思维能力,而非仅做出决策或结论.这是综合集成研讨厅与会议系统、决策支持系统、科研辅助系统的本质区别.

综合集成研讨厅中的“人-机结合”体现在建立人与智能体的协同工作环境与情景,促进人机融合智能共进;设计从定性到定量的指标体系规范,通过实时动态建模、系统工作流程与调度机制等实现途径将专家头脑中的定性、不全面的感性认识逐步上升为对全局的定量认识,将个体智慧上升为群体智慧.设计科学的研讨形式和研讨流程,将分散化思维进行合理整合,激发群体思维螺旋上升.在这一过程中,观察思维能力是如何出现的,提供工具促进思维

能力的提升,最后得到一个更深刻、更准确的认识,重点包括如下几方面研究内容:

### 3.1 个体思维的展现与外化

了解个体如何思考才能展现思考过程,提高思维能力.对一个观点的准确判定,仅依赖表面的指标是不够的,应外化它的推理体系、依据,才能准确评价,进而有机会进行改进.思维过程的展现有几个关键要素:核心假设是什么,从假设进行推理的理论依据是什么,推理的过程是什么,过程是否经过外界检验.其中,外界检验可以是客观世界的检验、可以是历史数据或已论证过的观点的检验等.研讨厅从提高个体思维出发,需要覆盖思维全过程,提供一套思维展现和外化的工具,如图2所示.

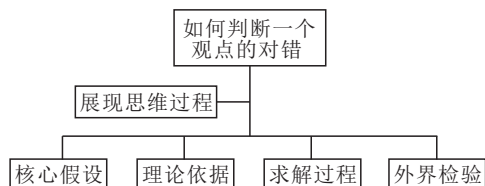


图2 个体思维展现与外化

Fig.2 Display and externalization of individual thinking

### 3.2 领域/学科范式提炼

范式是一种公认的理论体系或理论框架,是研究者们共同接受的一组假说、理论、准则和方法的总和,某种程度上可以说是科学家的共同信念<sup>[22]</sup>。不同的学科有各自的学科范式,即求解问题的思路,即针对什么问题,按照什么方式建立假设等。提炼学科范式,置入研讨厅里,有利于思维外化并做成工具。在调用工具的过程中,可对局部进行修改或调整,便于展现个体思维。

### 3.3 群智涌现

在研讨厅体系中专家群体是一个重要的组成部分,对拟解决问题的设想的提出、研讨、建模及最终的决策都起着重要作用。Warfield 等<sup>[23]</sup>关于组织行为中群体思维模式的理论,总结三种普遍的不良群体思维行为——依赖性思维、僵化思维和发散思维,揭示面对复杂问题时,群体往往难以取得良好结果的原因,指出应该建立连接思维的群体思维模式。为了凸显连接思维模式,本团队从激发专家活跃度的角度出发,引用五项修炼,加入深度汇谈等群体讨论的机制和工具<sup>[24]</sup>,启发专家对复杂问题产生新的认识,激发群体智能。综合集成研讨厅中群智涌现的设计过程如图3所示。

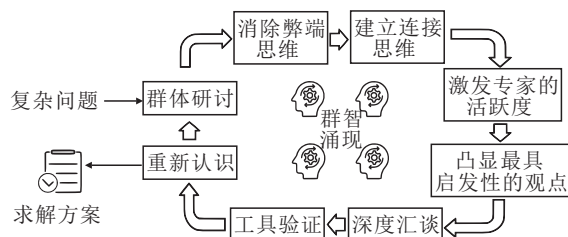


图 3 群智涌现过程

Fig.3 Emergence process of swarm intelligence

### 3.4 洞察与建模工具

个体思维、群体思维的激发需要计算机的支持,如辅助专家洞察与建模。洞察包括数据、案例及其可视化的分析。机器建模包括逻辑建模、统计建模和动态建模。这里需要解决三类基本问题:如何从无到有地构建一个模型,现在机器学习解决部分问题,如短期现场建模;当模型的表现不尽人意或达不到应用目标时,如何对模型的结构进行调整或重建,使模型能更准确地建模或预测;面对复杂问题建模时,如何将局部模型合成整体、综合的模型,有效处理复杂问题,辅助专家更好地认识复杂系统及其相互作用的机制。

### 3.5 广义专家交互

群体本身,无论是专家个体还是智能体,都可进行扩展,这里称为广义专家.广义专家包括软硬件专家系统,也包括网络专家.通过搜集文献库和各平台的资料,爬取网络资源,经过知识抽取和融合,提炼重要观点,引入研讨厅.研讨厅体系除了汇集古今中外专家的智慧,还具有动态性,能随时吸收互联网上广大网民的智慧成果.广义专家的交互加速数据到信息、信息到知识、知识到智慧的转换,在形式上呈现为信息-知识-智慧的螺旋式上升.其实质是利用涌现的社会智慧处理复杂动态问题,即“集大成得智慧”.

### 3.6 人机融合智能演进系统平台

实现综合集成研讨体系实质是针对与开放的复杂巨系统相关的某类问题,构建人机融合智能演进系统平台。该平台一方面需要集合智能技术,包括不同的建模技术、机器学习技术等;另一方面需要结合思维工程,把人、机器、人-机整体作为工程系统看待,展现思维过程,提升思维能力,激发人-机系统的智能。此外,平台集成个体、群体思维的支持工具、流程组织工具、研讨工具等,用于完成思维科学的任务。

综上所述,综合集成研讨体系是研究开放的复

杂巨系统问题的方法论,同时综合集成研讨厅也是研究思维科学的实践技术平台.它具有如下特点<sup>[9]</sup>: 1) 强调以“以人为本、人-机结合”的混合智能处理极其复杂的问题; 2) 强调智能生成、增强与涌现的开放性和动态性; 3) 强调“人”与“机”在多个层次上的互补、交互和集成; 4) 强调人、机、群体智能的互相激发与增强.

## 4 结束语

综合集成研讨体系既是系统科学的研究成果,也是思维科学的研究成果,是科学方法论发展史上的革命性变革.这是钱学森后期对现代科学与技术发展的最重大贡献,意义和影响深远.综合集成研讨体系始终以提升思维能力为目的,核心是在解决问题的过程中,细化、科学化对问题涉及的各种知识、理论并加强对这些知识和理论的理解,通过群体研讨的方式,激发群体智能涌现,提升人们对问题的认知程度.其目的不仅是得到复杂问题求解的方案,更重要的是探究如何生成方案的一般性规律,推动智能科学的发展.综合集成研讨体系既重视人的能力,也重视机器、设备、工具的重要作用.在解决问题的过程中,人和机发挥各自的长处,实现人机融合智能共进.综合集成研讨体系最终的落实需要以信息技术作为载体的可操作人机融合共进智能平台,作为观察并提高思维的场所,不断梳理思维模式和研究领域的学科范式,促进综合集成研讨体系持续的发展,形成领域的知识生产和服务体系.

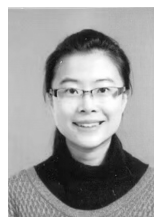
## 参 考 文 献

- [1] KOVARIK C, LEE I, KO J, *et al.* Commentary: Position Statement on Augmented Intelligence (Aul). *Journal of the American Academy of Dermatology*, 2019, 81(4): 998-1000.
- [2] DELLERMANN D, EBEL P, SÖLLNER M, *et al.* Hybrid Intelligence. *Business and Information Systems Engineering*, 2019, 61(5): 637-643.
- [3] KANTOSALO A, TOIVONEN H. Modes for Creative Human-Computer Collaboration: Alternating and Task-Divided Co-creativity // *Proc of the 7th International Conference on Computational Creativity*. Washington, USA: IEEE, 2016: 77-84.
- [4] MCCAFFREY T, SPECTOR L. An Approach to Human-Machine Collaboration in Innovation. *Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, 2018, 32(1): 1-15.
- [5] ENGELBART D C. Augmenting Human Intellect: A Conceptual Framework [C/OL]. [2022-05-21]. <https://www.dougenelbart.org/content/view/138>.
- [6] SILVER D, HUANG A, MADDISON C J, *et al.* Mastering the Game of Go with Deep Neural Networks and Tree Search. *Nature*, 2016, 529(7587): 484-489.
- [7] 戴汝为.从定性到定量的综合集成法的形成与现代发展. *自然杂志*, 2009, 31(6): 311-314, 326.  
(DAI R W. The Proposal and Recent Development of Metasynthetic Method (M) from Qualitative to Quantitative. *Chinese Journal of Nature*, 2009, 31(6): 311-314, 326.)
- [8] 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.  
(QIAN X S, YU J Y, DAI R W. A New Field of Science-Open Complex Giant System and Its Methodology. *Chinese Journal of Nature*, 1990, 13(1): 3-10.)
- [9] 王丹力,郑楠,刘成林.综合集成研讨厅体系起源、发展现状与趋势. *自动化学报*, 2021, 47(8): 1822-1839.  
(WANG D L, ZHENG N, LIU C L. Hall for Workshop of Metasynthetic Engineering: The Origin, Development Status and Future. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(8): 1822-1839.)
- [10] KNEBEL D, AYALI A, GUERSHON M, *et al.* Intra-Versus Inter-group Variance in Collective Behavior. *Science Advances*, 2019, 5(1). DOI: 10.1126/sciadv.aav0695.
- [11] CULHA U, DAVIDSON Z S, MASTRANGELI M, *et al.* Statistical Reprogramming of Macroscopic Self-Assembly with Dynamic Boundaries. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(21): 11306-11313.
- [12] 戴汝为,李耀东.基于综合集成的研讨厅体系与系统复杂性. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(4): 1-24.  
(DAI R W, LI Y D. Researches on Hall for Workshop of Metasynthetic Engineering and System Complexity. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(4): 1-24.)
- [13] 戴汝为.“再谈开放的复杂巨系统”一文的影响. *模式识别与人工智能*, 2001, 14(2): 129-134.  
(DAI R W. The Influence of Qian's Talk on "Open Complex Giant Systems". *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2001, 14(2): 129-134.)
- [14] JACKSON P C. Introduction to Artificial Intelligence. 3rd Edition. New York, USA: Dover Publications, 2019.
- [15] SILVER D, HUBERT T, SCHRITTWIESER J, *et al.* Mastering Chess and Shogi by Self-Play with a General Reinforcement Learning Algorithm [C/OL]. [2022-05-21]. <https://arxiv.org/pdf/1712.01815.pdf>.
- [16] 卢明森.钱学森与思维科学. *中国工程科学*, 2002, 4(2): 8-15.  
(LU M S. Qian Xuesen and Noetic Science. *Engineering Science*, 2002, 4(2): 8-15.)
- [17] 卢明森.钱学森对思维科学的卓越贡献——纪念钱学森院士归国 60 周年 // 钱学森研究 (第 1 辑). 上海: 上海交通大学出版社, 2016: 91-109.  
(LU M S. Qian Xuesen's Outstanding Contribution to Noetic Science-In Memory of the 60th Anniversary of the Return of Academician Qian Xuesen // *Qian Xuesen's Research (Volume 1)*. Shanghai:



- hai, China: Shanghai Jiao Tong University Press, 2016: 91 – 109.)
- [18] ZHU W J. Model Checking for AlphaCode-Generated Programs // Proc of the 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing. Washington, USA: IEEE, 2022: 794 – 798.
- [19] ZHANG T L, CHENG X, JIA S C, *et al.* Self-Backpropagation of Synaptic Modifications Elevates the Efficiency of Spiking and Artificial Neural Networks. *Science Advances*, 2021, 7(43). DOI: 10.1126/sciadv.abh0146.
- [20] ZHANG Y H, QU P, JI Y, *et al.* A System Hierarchy for Brain-Inspired Computing. *Nature*, 2020, 586(7829): 378–384.
- [21] 赵光武. 钱学森给戴汝为的信 // 赵光武. 思维科学研究. 北京: 中国人民大学出版社, 1999: 605.  
(ZHAO G W. Letter from Qian Xuesen to Dai Ruwei // ZHAO G W. Noetic Science Research. Beijing, China: Renmin University Press, 1999: 605.)
- [22] KUHN T S. The Structure of Scientific Revolutions. Chicago, USA: University of Chicago Press, 1996.
- [23] WARFIELD J N. Spreadthink; Explaining Ineffective Groups. *Systems Research*, 1995, 12(1): 5–14.
- [24] 戴汝为, 李耀东, 李秋丹. 社会智能与综合集成系统. 北京: 人民邮电出版社, 2013.  
(DAI R W, LI Y D, LI Q D. Social Intelligence and Metasynthetic System. Beijing, China: Posts and Telecom Press, 2013.)

## 作者简介



郑楠(通信作者), 博士, 副研究员, 主要研究方向为复杂系统、综合集成、数据挖掘、机器学习. E-mail: nan.zheng@ia.ac.cn.

(ZHENG Nan (Corresponding author), Ph.D., associate professor. Her research interests include complex systems, metasynthesis, data mining and machine learning.)



章颂, 博士研究生, 主要研究方向为复杂系统、综合集成、数据挖掘、机器学习. E-mail: zhangsong2022@ia.ac.cn.

(ZHANG Song, Ph.D. candidate. His research interests include complex systems, metasynthesis, data mining and machine learning.)



戴汝为, 研究员. 主要研究方向为复杂系统、综合集成、模式识别. E-mail: ruwei.dai@ia.ac.cn.

(DAI Ruwei, professor. His research interests include complex systems, metasynthesis and pattern recognition.)