

21世纪控制论的发展态势: 纪念控制论创立70周年(1948–2018)(评论)

万百五[†]

(西安交通大学 系统工程研究所, 陕西 西安 710049)

摘要: 论文认同控制论应定位为技术科学. 它的核心部分(基本原理或核心理念)和它的各分支是一个整体. 并认为控制论的发展必定是波浪式. 据此才能对控制论现今发展态势作出正确的估计和评价. 论文汇总核心部分的14个基本原理或核心理念; 核心部分和分支相辅相成地发展. 在两者发展的基础上, 控制论定义会再更新. 最后论文列举出控制论各分支的研究热点.

关键词: 控制论; 诺伯特·维纳; 控制论定位; 钱学森; 基本原理; 整体性; 物理学; 当代控制论; 认知控制; 心理控制; 帅搏客学

引用格式: 万百五. 21世纪控制论的发展态势: 纪念控制论创立70周年(1948–2018)(评论). 控制理论与应用, 2018, 35(1): 1–12

中图分类号: T811 文献标识码: A

Development trend of cybernetics in the 21st century (review): To commemorate the 70 anniversary of the cybernetics since founding (1948–2018)

WAN Bai-wu[†]

(Systems Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: This paper holds that cybernetics should be positioned as technological science. Its core part (fundamental principles or core ideas) and various branches should be considered as a whole. The development of cybernetics is bound to be wavy. On this basis the development trend for Cybernetic today can correctly be estimated and evaluated. The paper summarizes 14 fundamental principles or core ideas for the core part of cybernetics. The core part and the branches develop complementarily. On the basis of development of both the definition of cybernetics will be renewed. Finally, the paper enumerates some research hotspots for branches of cybernetics.

Key words: cybernetics; Norbert Wiener; position of cybernetics; Qian Xuesen; fundamental principles; wholeness; physics; contemporary cybernetics; cognitive control; psychological control; cyborgology

Citation: WAN Baiwu. Development trend of cybernetics in the 21st century (review): To commemorate the 70 anniversary of the cybernetics since founding (1948–2018). *Control Theory & Applications*, 2018, 35(1): 1–12

…… 要把控制论的一切分支作为整体(as a whole), ……

——诺伯特·维纳:《My connection with Cybernetics. Its origin and its future》

控制论这一门20世纪前半叶从自动控制技术成长起来的新科学也是技术科学.

——钱学森:《系统科学、思维科学与人体科学》

迄今已经举办过4个以“诺伯特·维纳(或控制论)在21世纪”作为会议名称的关于控制论的学术会议了. 它们是, 美国IEEE主办的2014年6月在波士顿和2016年在墨尔本举行的“诺伯特·维纳在21世纪IEEE会

议”、2001年1月在日本东京举行“控制论在21世纪: 控制理论中的信息和复杂性讨论会”, 以及2005年11月在捷克布尔诺(Brno)由布尔诺工业大学举办的“控制论在21世纪讨论会”. 4个会议都出版有论文

集^[1-4]. 此外IEEE在印度举行的“21世纪诺伯特·维纳的纪念演讲会”^[5]. 有关控制论的主要杂志上也在2004年发表纪念维纳诞生120周年的论文^[6-7].

然而, 本文作者认为有一有争议的议题在这些会议上没有被直接议论到, 它就是控制论在21世纪的发展态势. 本文就以此为题, 对发展态势及其有关议论进行分析和评述.

1 引言(Introduction)

自维纳《控制论》出版后的20世纪50年代初开始, 参与梅西(Macy)基金会支持的、创建控制论的“生物和社会系统中的循环因果关系与反馈机制讨论会”(1948年后被简称为“梅西控制论会议”)的各领域的顶尖专家学者, 开始组织和带领团队, 将控制论基本思想在自己的学科中进行应用、推广. 就此开始了艰苦的探索历程, 这是控制论的纵深发展的创新时期. 此后20多年, 控制论在世界范围内推动了一些学科的发展, 衍生出各分支并孵化了一批新的学科. 它对20世纪的科学和社会产生了强烈的影响. 故在20世纪中叶控制论创立后经历约20多年热烈传播、推广、发展, 而同时也是媒体热炒的“繁荣”.

70年代中期梅西会议的年轻参加者、二阶控制论学派创始人海因茨·冯·福尔斯特(Heinz von Foerster)由于研究经费断档而从伊利诺斯大学退休. 他所领导的、有控制论大师W·R·艾什比(Ashby)参与的生物计算机实验室(BCL)被迫关闭. 此后在控制论的核心理念部分(含基本原理)的研究工作, 与其衍生的、受“热炒”的学科如人工智能、机器人等的研究工作规模和重要成就相比, 都不太引人注目.

结果, 在20世纪末开始就有人发出负面的议论, 而且并非完全出自媒体的炒作: “控制论已被人遗忘”^[8]; 控制论部分由于后继新兴学科的成就使人感到它已“衰老”, 部分是被人“遗忘”^[9]; 因此, “维纳成为信息时代的‘失去光彩’的英雄”^[10]; 控制论经过“兴盛”然而走向“衰落”^[11]; 控制论“失去了作为独立学科的地位”, 已经“溶解在一些新兴诸如自动机理论、系统科学、人工智能等学科之中”^[12]; “控制论还没有真正被确立为一个独立的学科”^[13]; “21世纪会接受控制论吗?”^[14] “21世纪控制论还存在吗?”^[9]等等负面议论.

有些负面“议论”出自同行学者之口, 甚至载入科技辞书^[13]. 这更值得控制论学术界来关注和讨论: “控制论仍然活着”^[12], “控制论依然存在”或“控制论的新时代来到了”^[15]. 然而据理力争的辩驳在本文作者看来似乎显得“软弱无力”, 不“理直气壮”. 有的虽然语气肯定^[15], 但由于对控制论的学科定位不准确^[9], 因而辩驳都没有击中要害.

究竟应该对控制论70年发展作如何的估计和评

价? 控制论学科的现况、发展态势或前景究竟怎样?

2 对控制论定位的不同理解(Different understandings of cybernetics positioning)

展望21世纪的控制论, 述及到控制论发展的历史评价和当今发展态势. 议论纷纷中可以感到: 这里存在着对控制论学科定位、对其各分支关系的不同的、甚至差别很大的观点.

所以, 本文认为必须首先理清控制论的学科定位. 这必须从多个方面来进行分析. 据调查至少存在着3种对控制论不同理解: 狭义的理解、广义的理解和折衷、也是本质的理解^[16].

对控制论狭义的理解: 控制论的负反馈控制机理, 是世界万种生命体和人类社会的经营理念之一. 这是20世纪30-40年代普林斯顿大学召开的、创建控制论的、关于信息与反馈的讨论会和梅西控制论会议的中心论点之一^[17]. 接受这种观点的人认为: 控制论“依然存在”. 它体现在伺服系统以及电工、机械工程的自动控制系统、装置之中; 应用在如机器人、制造(生产)过程, 甚至航天、火箭、汽车以及无数的工业和家庭用途之中^[16].

然而, 它适宜被称为“控制理论”或工程控制论的应用, 它在维纳之前就出现了, 而且会永远被广泛地采用. 但它不代表控制论的全貌或整体, 不是任何控制都代表控制论.

对控制论的广义的理解: 控制论被认为替代或者补充物理学, 至少与之共存, 成为各门学科的科学基础, 或者说用它来改造其他学科. 例如, 文[9]认为, 控制论对自然的研究有别于物理研究法. 从特性而言, 前者是不可替代的; 控制论应该更新成为像物理那样的基础科学, 或被称为“一统的科学”(unifying science)^[18]. “二阶控制论”的观察者在反馈系统中的角色重要性观点被认为存在于一切学科. 为此, 要对科学进行一次“革命”, 形成“二阶科学”(second-order science)^[19]. 或者如美国学者、博士P·潘加罗(Pangaro)所说: 控制论是科学未来的中心^[20]. 又或者是统辖“任何事情”的科学的科学^[21].

后来的发展表明, 除了在社会、管理和认知等方面外, 将控制论“无限拔高”和“理想化”的理解在其他学科中响应寥寥. 标志“无限拔高”控制论的“一统的科学”的观点, 随着20世纪70年代末期二阶控制论创导人冯·福尔斯特的退休和他主持的BCL实验室的结束, 就开始悄然“降温”了.

对控制论的正确的、折衷的也是本质的理解, 是将它处于两者之间^[16]. 本文认同钱学森的创导, 控制论不是基础科学, 也不是控制理论, 而是一门技术科学^[23]. 统帅各类系统的基础性科学, 应是“系统学”(systematics)^[22-23]. 他同时提出系统学的纵向三层的

分解: 工程技术、技术科学和基础科学三层. “则在系统科学这个基础科学内, 系统学是基础科学; “二论(控制及信息)”、大系统理论、运筹学是其技术科学; 自动控制技术、系统工程等属于工程技术. 这样形成系统科学的纵向三层^[23]. 而系统学正是从上述技术科学一些学科的共同基础理论提炼而形成的一门更高层次的基础理论学科.

钱学森的这些思想为控制论的定义和定位奠定了科学的基础.

换言之, 控制论不是处于各学科之上的或统帅各学科的基础科学, 不是与物理学“物之理”对等的“任何事情(事发、知事、行事、互动)”的理论的“事之理”的科学^[21], 或万用的科学(universal science)^[18]. 也不是和物理学“互补”^[9]或替代它的基础科学.

既然如此, 定位作为技术科学的控制论, 它在21世纪的发展现况、发展态势或前景究竟怎样?

3 控制论是一个整体(Cybernetics is a whole)

回答这个问题之前, 首先本文认为要确立控制论是一个整体的认识.

在20世纪40年代末50年代初, 控制论就是维纳的著作“控制论, 或关于在动物和机器中的通讯和控制的科学”^[24]、“人有人的用处——控制论与社会”^[25]、艾什比的“大脑设计——适应性行为的起源”^[26], 以及在普林斯顿大学信息与反馈的讨论会和梅西控制论会议论文集集中的控制论新观点.

其后, 到50年代末, 工程控制论分支出现, 艾什比的《控制论导论》^[27]出版, 由维纳参与的生物控制论、医学控制论和神经控制论的研究开展, 以及梅西控制论会议的各领域的顶尖专家学者, 在自己领域组织和带领团队将控制论基本思想在自己的学科中进行应用和创新. 一时控制论出现了多方向纵深“开花”的局面.

就在1958年, 维纳写道: “在我撰写《控制论》一书大约14年之后……人们建议我现在来论述一下控制论的历史, 探讨一下工作的种种线索, 这些似乎对眼前和遥远的未来都是极有意义的. 我希望一开始就放弃全面概括的任何企图, 因为要把控制论的一切分支作为整体, 给出一个百科全书式的说明, 我既无这样的能力, 又无这样的意图^[28].”

显然, 他很谦虚, 更重要的是, 他认为控制论包含了上述所有著作的思想和刚兴起的新分支的研究成果, 并且认为可以概括成一个整体. 当时, 工程控制论分支已经成立, 神经控制论、生物控制论、医学控制论的研究已有一定进展, 社会控制论和管理控制论也正在酝酿、展开研究等, 维纳所指的分支就是这些. 实质上, 他认为控制论学科上是一个整体.

到60年代维纳的《God & golem, Inc.: A comment on certain points where cybernetics impinges on religion》(神与魔: 关于控制论冲击宗教的某些点的评论)^[29], 维纳《控制论》第2版的问世、经福尔斯特更改发言题目的、女人类学家 M·米德(Mead)的“The cybernetics of cybernetics”(控制论的控制论)的论文^[30]、艾什比的《Principles of the self-organizing system》(自组织系统的原理)论文^[31]等先驱者的一些重要著作和论文相继出版.

70年代以后控制论的内容大大扩展了: 控制论包括许多有关专著中的重要思想、理念和生物、工程、社会、军事等各分支的理论和应用研究成果. 新出现的有福尔斯特“二阶控制论”^[32–33]以及著作《Understanding Understanding》(对理解的理解)^[34]. 所以, 此后控制论“整体”中除了分支外还有以上列举维纳等人的新、老的重要著作中所含的核心理念^[35–36].

由此可知, 维纳首先采用控制论各“分支”和“整体”的提法, 当今二阶控制论的领军人 S·昂普尔比(Umpleby, 前译为翁玻尔贝^[19])^[37]及美国控制论学会的公告^[38]、文^[39]及本文作者^[17]也采用“分支”这个提法. 但“分支”的提法在控制论文献中出现得不是很多, 这是由于每个控制论分支又是独立的、自成体系的技术学科. 学者们忙于在自己的分支中开展研究, 很少论及分支与其整体的关系.

3.1 控制论的核心理念(Core ideas of cybernetics)

所有上述这些新老控制论著作可以其精华理念的集成为代表, 即学术界称之为控制论的核心部分或核心理念^[13, 35–36].

然而, 控制论核心部分或核心理念到底是指哪些? 本文认为, 核心部分(或理念)主要呈现为控制论的基本原理(规律), 当然还包括未能纳入在内的一些重要理念.

重要的是, 不能将控制论的核心理念(含基本原理)与它各分支完全割裂而成为独立的学科. 它为各个分支所共有, 也是各个分支的一部分. 因为, 核心理念是从上述重要著作和各分支中提炼、抽象出来, 而又应用于各个分支的分析、研究. 它们间关系可以图1表示.

图中各已有分支学科(实椭圆表示)和正在或可能发展成独立分支的学科(虚椭圆表示), 是控制论整体的一部分, 与它们共有的核心理念、基本原理(横向椭圆)在一起形成一个整体(虚长方框)——完整的控制论整体. 图1还表示控制论与各门科学的关系.

有的学者认为, 核心理念就是控制论的理论部分, 或直截了当地称它为“理论控制论”^[9]或“一般控制论”, 甚至就是“控制论”^[13]. 前者被哲学家们所乐用, 后者也被有哲学倾向的控制论理论家们所乐用.

本文认为这些提法都欠确切, 因为基本原理、核心

理念与各分支有机组成控制论整体,并分支也有它自己的重要理论,例如生物控制论中有H·马图拉纳(Maturana)和F·瓦雷拉(Varela)有关生命体自繁殖的

理论^[40];社会控制论中有自反性学说、复杂系统理论、人类活动理论等多种理论;工程控制论中有大系统理论等等。

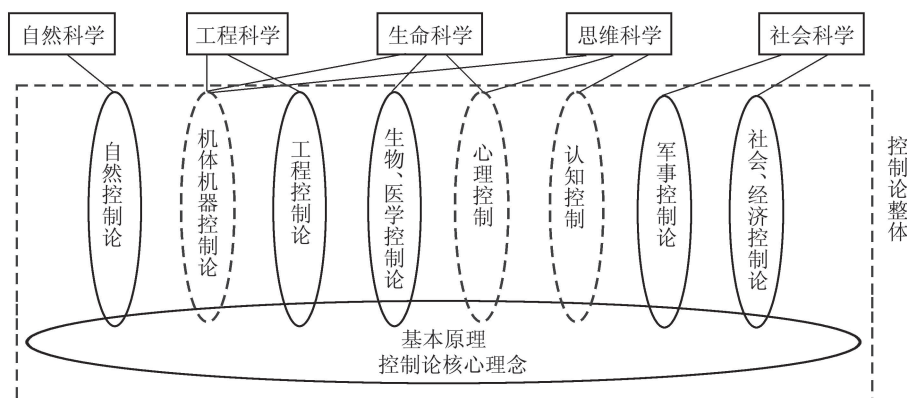


图1 包括基本原理、核心理念及其各分支的控制论

Fig. 1 Cybernetics including basic principles and core ideas, as well as all its branches

如果“理论控制论”是指,由控制论及多个控制论分支思想的基础理论进一步提炼而得的内容,则钱学森曾经采用过这个观点.他在1979年曾认为应把工程控制论、生物控制论、经济控制论、社会控制论等中的共性问题集中研究,提高到一门基础科学——理论控制论^[41].但是,他的这思想1981年进一步发展成为:如第2节所说,由系统论、信息论、控制论等的共同基础理论提炼而形成的一门更高层次的基础理论学科取名为系统学^[23].

至于将控制论的核心理念部分称为“控制论”,这是不确切地以部分代替了整体.正是由于只局限于一些核心理念、原理,所以才有“控制论还没有真正被确立为一个独立的学科”^[13]、“失去了作为独立学科的地位”^[12]这样的负面的不确切的议论.

有学者称呼各控制论分支为控制论的应用部分,本文认为这也很难被接受.如上文所言,分支也有它自己的重要理论.

核心理念部分和各分支是一个整体.因此,显然不能说:各分支发展得很有成绩,而核心理念部分却“衰落”了^[11].各分支的发展反过来丰富、发展和充实了核心部分.本文第6节将会论证,控制论核心理念部分的发展是以分支的理论和技术创新的积累为基础.这里,存在着核心理念和分支两者相辅相成地发展的辩证关系.

此外,美籍捷克裔教授G·J·克利尔(Klir)的纪念控制论创立60年的论文^[42]标题就是《Sixty years of cybernetics: from youthful to useful》(控制论60年:从年轻到实用),指的就是整体.因为,它的核心理念部分是很难认为是实用的,而且克利尔的意思是指控制论后期的发展使控制论实用化.他也评论,“随着岁

月的增加,控制论在某种程度上失去了它的特性和年轻的活力,...”.尽管他的这个评论还很值得争议,但显然这也是指控制论整体.本文在第6、9节还要进一步分析他的这个论点.

总之,本文作者体会维纳的思想是,控制论的核心理念和各分支应概括成一个整体.

4 控制论的核心理念提炼成其基本原理 (Core ideas of cybernetics are refined into its fundamental principles)

尽管学者们都承认控制论具有核心理念、基本原理或基本理念的提法,但什么是控制论的核心理念、基本原理?学术界在观点上还没有一致.关键在于对控制论的定位.

比利时控制论学家、教授F·海拉恩(Heylighen)认为它们应拥有原始性、简单性和通用性.并且他认为,通过变异和选择,系统自发涌现的基础上,可以勾画出“系统理论和控制论”的一组带有进化观点和公理性的基本原理^[43]: 1) 选择性保留原理(principle of selective retention); 2) 自催化生长原理(principle of autocatalytic growth); 3) 熵和能量不对称转移原理(principle of asymmetric transitions: entropy and energy); 4) 盲变异原理(principle of blind variation); 5) 选择变异原理(principle of selective variety); 6) 递归系统构建原理(principle of recursive systems construction); 7) 关于控制系统的原理(on the principle of control systems); 8) 必需变异度定律(law of requisite of variety); 9) 必需的知识定律(law of requisite knowledge); 10) 不完备的知识原理(principle of incomplete knowledge)等.

文[44]也提出控制论原理. 该文列举的原理有: 1) 外界完备原理 (principle of exterior completion); 2) 必需变异度原理 (principle of requisite variety); 3) 反馈原理 (principle of feedback); 4) 意向性原理 (principle of intentionality); 5) 不确定性原理 (principle of uncertainty) 以及 6) 内稳态原理 (principle of homeostasis) 等等. 其中一半是从哲学高度总结出的一般的指导性思想. 而这些原理所述内容没有具体解释, 大部被引用在文[15].

本文认为, 上述海拉恩的基本原理“7) 关于控制系统的原理”及“8) 必需变异度定律”与他提出的其他一些原理相比, 从科学的概括和抽象的高度来看, 不在同一个层次上. 其他一些原理都处在更高的层次. 将这些原理归结为作为基础科学的、由钱学森创导的“系统学”的基本原理应该是更合适一些^[22]. 而基本原理7)和8)适合作为技术科学的基本原理.

而控制论等“三论”被钱学森认为是从系统学派生出来的技术科学. 为此, 没有必要将它的原理提炼得太高. 作者将过去已被提出的控制论核心理念和基本原理整理成一些与“反馈控制”、“必需变异度定律”层次程度相似的、与其技术科学身份相符的一些基本原理、核心理念. 这样更直截了当, 便于学者应用. 现将本文作者汇集、整理的控制论基本原理、核心理念表述如下:

1) 因果系统原理 (principle of causal system). 控制论认为, 所研究的对象或事物都可以用具有因果关系的动态系统来加以描述. 动态系统中, 由输入作用(激励)而后系统运作产生输出作用(响应). 并系统是开放的, 即受到外部环境的扰动.

2) 信息变换核心理念 (core idea of information transformation). 控制论认为, 系统中各部件间的相互作用, 可用信息来描述. 它是感觉到并处理过的作用内容的不确定性描述. 通讯就是信息的流动.

系统中存在着信息的传递、变换、储存、处理和加工以达到控制的目的.

3) 外部动态行为核心理念 (core idea of external dynamic performance). 控制论认为, 内部信息的变换是用来控制系统的外部行为.

与通常关注系统的能量、物质、效率以及内外部结构不同, 控制论关注的是系统的功能、系统在与外部环境相互作用的过程中所表现出的外部动态行为.

4) 负反馈原理 (principle of feedback). 或称循环因果关系原理 (principle of circular causality). 控制论认为, 不管哪类系统, 只要是符合下列4点, 就符合这个原理: a) 系统具有目标(又称“目的”); b) 系统朝向目标的运动受到环境的干扰; c) 系统对目标和现况的偏差进行测量; d) 系统采取纠正动作. 纠正以后系

统继续向目标运动, 并继续对目标和现况的偏差进行再测量, 然后再纠正, …….

这也就是循环因果, 即“果”又通过反馈到前端“因”处进行了闭环. 它能使系统所受的干扰的影响大大减低, 最后达到目标.

负反馈有助于系统稳定, 而正反馈促使系统失稳.

5) 黑箱原理 (principle of black box). 黑箱(盒)是一个抽象, 表示一个具体的开放系统完全可以用“输入”和“输出”来描述. 控制论认为, 具有同样的输入–输出关系的黑箱, 形成系统的模型. 这就是可以完全不考虑系统的能量和结构等的功能模拟研究方法.

这也可称为建模原理. 模型根据需要以必要维数的变量并量化来表示, 经得起重复验证. 有了模型, 可以用仿真来研究系统.

6) 内稳态原理 (principle of homeostasis). 有机体内环境通过各种不同反馈环而保持的恒定性称为机体的内稳态. 内稳态原理指的是, 内稳态是机体自由和独立生存的基本条件, 它与人造系统(机器)的稳态相对应.

7) 进化和适应原理 (principle of evolution and adaptation). 自然选择能促使物种的生存和进化更适合于所处环境的变异, 这就是所谓“适应”的效应. 进化与适应的过程本身是与信息的传递和反馈有联系的. 进化和适应原理指的是, 机器能有适应环境变异的能力.

8) 学习和智能原理 (principle of learning and intelligence). 学习是指动物借助于个体生活经历和经验使自身的行为发生适应性变化的过程. 所谓智能就是从感觉到记忆到思维这一过程所具有的能力. 学习和智能原理指的是, 控制论肯定机器能学习和具有智能.

9) 必需变异度律 (law of requisite variety). 必需变异度律指的是, 为了进行适当的控制, 控制器各作用量必须等于或大于系统中各受控量.

阿什比提出的上述原理, 他所指的变异度就是“状态”, 也即独立的变量.

10) 自组织原理 (principle of self-organization). 控制论认为, 自组织系统在与环境相互作用条件下, 其内在过程或者互动规律能够没有变化, 同时能够演化而形成新的结构和功能的系统. 自组织原理指的是, 自组织系统是在外界环境扰动下熵能自动减小的系统. 熵是对系统变异的随机度量. 熵值越大, 系统的混乱无序的程度越大.

11) 自繁殖原理 (principle of self-reproduction, autopoiesis). 指的是, 由系统的动态特性可以功能上复制, 发展成为生命体(或系统)可以产生一个具有同

样功能的复制品或其部件的原理。

12) 观察者原理(principle of observer). 在研究和理解一个社会和认知系统时, 无法将观察者与系统分离开来, 也无法阻止观察者对系统产生影响的原理。观察者原理指的是, 观察者处在系统之中, 而不是在系统之外。

13) 自治或自设定系统核心理念(core idea of autonomous system, or self-reference system). 控制论认为, 在自治系统或自设定系统中, 系统自己定义目标(目的), 也即不是外界决定系统的设定点。实际上, 系统中的观察者又是操作设定点的行动者。

14) 学科之间类比和借鉴原理(principle of analogy and implant among disciplines). 指的是, 从一类学科系统中引进其有益的思想、原理、方法, 采用类比或移植的方法研究另一类不同学科的系统, 以促使各学科能相互借鉴共同发展。

多数上述原理和核心理念可以采用状态变量、状态空间、映射、闭包等表示成紧凑的数学解析式, 甚至列成数学解析式的定律^[5, 13, 27]。本文限于篇幅从略了。

控制论的许多思想并不是都能整理或者适宜表述成原理或核心理念的形式。还有的原理只适用于个别分支。所以有些重要理念未能纳入在上述14条中, 如维纳关于信息、关于控制论与社会的论述以及只适用分支较少的一些理念, 如自反性原理等等。

这样的基本原理和核心理念随着分支的发展以后还会增加。必须指出, 基本原理和核心理念的发展是缓慢、而且波浪式的。有一种负面议论: 控制论的“衰落”, 或者如上节克利尔所言“失去了它的特性和年轻的活力”^[42], 就是指较久没有重大的新原理或核心理念出现了。但这种提法显然忽视重大原理和理念的出现与控制论分支的理论及技术的成就和积累的辩证关系。从1943年底在普林斯顿大学的关于信息与反馈的讨论会算起, 迄今已有74年总共才有14条多的原理和核心理念, 平均5年才有1条。抱怨这方面研究成果的论文80年代以后太少怕是忽视上述的辩证关系。本文第7节将进行对此详细剖析。

5 物理学的借鉴(Physics as a reference)

与控制论可以比拟的类似学科是物理学。虽然, 物理学是基础科学, 而控制论是技术科学, 但在两者都拥有较多分支的统一体这一点上, 可以比拟。

中国著名物理学家朱洪元认为: “物理学研究宇宙间物质存在的各种主要的基本形式, 他们的性质、运动和转化以及内部结构, ……物理学的各分支学科是按物质的不同存在形式和不同的运动形式划分的。随着实践的扩展和深入, 物理学的内容也不断扩展和深入, 新的分支学科陆续形成; 已有的分支学科已趋成熟, 应用也日益广泛^[45]”。

他又写道: “客观世界是一个内部存在着普遍联系的统一体。……各分支学科之间开始相互渗透。物理学逐步发展成为各分支学科彼此密切联系的统一体”^[45]。

本文认为, 除了新、老分支之外, 物理学只剩下能量和物质不灭定律、时间和空间、物质的四态和度量衡制度、实验方法等不多的内容了。物理学与其各分支不可割裂。而物理学各分支, 像控制论各分支一样已发展成独立的基础科学学科, 如核子物理、半导体物理等。

物理学是这样, 控制论也是这样。各分支的研究成果正不断充实整个学科, 包括其基本原理和核心理念, 并更新其定义。本文作者认为: 上文朱洪元所说的“统一体”就是维纳所说的“整体”。

一种负面观点认为: “尽管控制论重要的历史作用, 它还没有真正被确立为一个独立的学科。其从业人员相对较少, 并没有很好地组织。几乎没有专门领域研究的部门, 甚至更几乎没有学术课题计划”^[13]。这实际上是指控制论的核心(原理)部分, 并又把这部分和它的各分支割裂开来了, 以它代表控制论。事实上, 从控制论整体或者它的较成熟的分支来看, 它们都是符合独立的科学的定义的。控制论的从业人员应包括各分支的众多的研究人员。

值得一提的是, 控制论创立以后, 维纳本人将主要精力参与墨西哥生理学家A·罗森勃吕特(Rosenbluth)领导的生物控制论、医学控制论和神经控制论的研究。后两者现在都归属在生物控制论之内。维纳20世纪60年代他还参与主持生物控制论的学术会议, 曾与J·谢德(Schade)合编《神经、大脑和记忆模型》(二卷), 1964年又合编《神经控制论》和《生物控制论进展》(三卷)。他的行动表明, 他认识到新的理念要从分支的创新中形成, 即认识到基本原理和核心理念与各分支之间的正确关系。

这着重说明, 控制论学者不能将主要精力守着“基本原理”、“核心理念”, 再从“概念、原理”到“概念、原理”地研究。要像维纳那样主要精力投身到实际的分支, 至少相当一段时间是这样。

而60年代维纳才又陆续发表了含有新章节的《控制论》(第2版)以及《神与魔: 关于控制论冲击宗教的某些点的评论》^[29]等著作。

美国控制论协会认为, 对与控制论的基本原理、核心理念的研究在数量上仍然相对是小于控制论应用的研究^[36]。本文认为, 多个分支及众多的分支研究课题, 其研究人员当然很多。这是正常的现象。正在这个基础上, 新的理念、原理的雏形才会在分支中逐渐酝酿出现, 而后才由偏重研究核心理念的人员或分支研究人员提炼它们、发展成为成熟的理念或原理。

事实上, 控制论的发展史证实, 在分支理论和技术创新基础上, 控制论学者会发现或通过类比、借鉴、提炼, 得出控制论新的基本原理或理念. 本文将在下一节详细加以论证.

6 控制论分支与其核心理念相辅相成地发展(The branches of cybernetics and its core ideas develop complementarily)

6.1 控制论核心理念在新领域的应用推动其新分支的创立(The application of core ideas of cybernetics on new domains promotes the creation of its new branches)

为了说清这个问题, 本文要对控制论的诞生作简要的回顾.

20世纪40年代, 生理学中内稳态、自动控制中的闭环反馈控制及稳定性、通讯理论中的负反馈放大器、数学中的统计力学和物理学中的继电器、计算机科学的成就等等, 对控制论的诞生起了关键的技术准备作用.

20世纪30年代末起, 维纳就和A·罗森勃吕特在哈佛大学医学院组织方法论的讨论会. 1943年到1946年, 由维纳和著名科学家冯·诺依曼(John von Neumann)发起普林斯顿大学的信息与反馈讨论会. 1946到1953年, 上述会议发展成梅西控制论会议.

梅西控制论会议的与会者发现在完全不同的领域里, 有些概念是相同的: 譬如生物体的内稳态和电气工程中机器的稳态, 都是一个概念, 可以相类比. 这个思想的建立, 意味着人类对生命活动的认识进入一个新阶段.

反馈基本概念在早期的“信息与反馈”会议上就得到了确认和推广, 人们开始认识到: 人的行动和目的是从神经系统出发进入肌肉, 然后通过感觉再进入神经系统的环形反馈过程. 就是说, 首次用反馈和闭环回路来代替原先的目的论的神经生理行为. 这就形成罗森勃吕特和维纳的1943年后被称为最早的控制论论文《Behaviour, purpose and teleology》(行动、目的和目的论)论文^[46]. 这是控制论萌芽的重要标志, 奠定了控制论思想的雏型.

也在这个会议上美国MIT教授、梅西控制论会议主席M·麦克洛克(McCulloch)与W·皮茨(Pitts)于1943年提出最早的人工神经元模型论文《A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity》(内在于神经活动中的思想逻辑计算), 该模型一般简称为M-P神经元模型, 是目前许多神经元模型的基础, 被称为神经元的第一个数学模型^[47].

梅西控制论会议的与会者认识到, 在不同领域的工作者之间存在着一个实在的共同思想基础. 即信息及通讯和反馈在机器和生物体中都存在; 信息及通讯

作为组织化机制不但对于个体是重要的而且对于集体(社会、经济)也是重要的. 与会者发现关于这些问题的文献缺乏统一的表述, 没有任何共同的术语, 甚至没有一个称呼这个新领域的简单名称. 这不适宜于这个新领域未来的发展. 为了有利于这个新领域未来的发展, 维纳在1947年梅西控制论会议上提出以希腊语的“舵手”(κυβερνήτης, 相当于英文字“governor”)借来的词汇“cybernetics”(译为“控制论”)来代表这个新领域.

在上述基础上, 1948年由维纳出版他的震惊世界学术界的《控制论》不朽著作^[24].

从上述这篇论文、生物的“内稳态”, 以及维纳在其《控制论》著作中提到的“目的震颤”、“运动共济失调”以及麦克洛克的“神经元模型”等例子都是将研究机器中的控制和通讯的成就, 应用到生命体, 即维纳《控制论》书名副标题所称的“动物”的研究上. 梅西控制论讨论会主席麦克洛克是神经生理学家, 和维纳长期合作, 在《控制论》一书中多次提到的、也作为控制论创始人之一的罗森勃吕特是生理学家. 这表明: 当时的控制论的酝酿和形成主要是将机器(人造物理系统)领域的控制与通讯核心理念应用于研究生物(动物)这一领域而产生的. 所以维纳在其书名的副标题上确切地反映了这一点^[24].

此后控制论的反馈、内稳态、信息及通讯、适应、智能等核心理念被推广应用到社会(含经济、管理)、认知, 直到生态、环境、资源、气候等控制^[39], 并相应形成各个新分支. 可见, 控制论核心理念在新领域的应用、推广推动了其新分支的创立.

6.2 控制论核心理念的发展是以分支的理论和技术创新的积累为基础(The development of core ideas of cybernetics should be based on the accumulation of the theoretical and technological innovation of its branches)

此后在各分支的创立过程中控制论的核心理念也逐渐添加了自组织、观察者、自治系统、自繁殖等新理念. 所以新分支的发展也回过头来更新、丰富和增扩了控制论的核心部分——核心理念或基本原理. 上文所汇集的14条控制论的基本原理, 其中一小半也是在《控制论》成书以后由分支的发展而后来积累起来的. 所以控制论核心理念和基本原理今后的发展主要也将取决于各分支和相关衍生领域的研究成果、进展的积累.

为此, 本文强调指出, “控制论各分支和衍生学科都发展了, 而控制论却衰落了”^[11]以及“……失去了它的特性和年轻的活力”^[42]的负面议论显然是很难说得通的.

6.3 控制论发展是波浪式的(The development of cybernetics is bound to be wavy)

在新世纪,控制论在各分支发展的基础上,在控制论所孵化的新学科的基础上,新科研成果的积累将是控制论基本原理下一步发展的前提.

控制论发展必定也是波浪式的. 1946到1953年以梅西控制论会议和《控制论》的出版为标志可认为是第一波的峰值. 随后开始纵深发展的时期. 第二波是工程控制论的提出和60年代的波峰是生物控制论(包括医学控制论和神经控制论)的崛起. 70年代年是以二阶控制论和社会、经济、管理等控制论的兴起作为一个新波峰. 这几个小峰组成一个较宽较大的波峰,就是第1节引言所谓“20多年空前的热烈传播、推广、发展”.

文[48]的图3(本文未画出)只根据登载在3个顶级控制论杂志上的论文,画出按逐年统计控制论在论文中的用词频率量曲线,结果表明它的用词频率由1970年的高峰而不断“跌落”迄今. 接着衍生的机器人词频率量曲线,在1986年出现更高的高峰后回落. 本文认为机器人学实际上是工程控制论的下级分支. 从控制论观点应命名它为“机器(或机械工程)控制论”.

以后是“系统理论”(或称“一般系统理论”)、“复杂系统”的兴起. 这个学科的研究者们采用了控制论的多个核心理念,但极少援引它们出自控制论^[48]. 2000年后有不少研究帅搏客学(cyborgology)(本文称之为“机体-机器控制论”,见第7-8节)的论文也不提控制论. 再加上文[48]所统计的杂志太少,所以,文[48]图3这样的统计及采样方法和图示似难反映控制论态势的真实波峰.

90年代到新世纪初是自然控制论,包括生态、环境、资源、气候等的控制是新一波.

未来的波峰也必会在新分支、新成就的基础上涌现. 因此,可以预期未来的“当代控制论”(见下段)、认知控制、帅搏客学、人工智能和信息学以及心理控制的新发展,必将带给控制论核心部分新的进步.

下节介绍的王-金斯纳-张(Wang-Kinsner-Zhang)3位教授的“当代控制论”(contemporary cybernetics),带来的控制论新进展和新定义就是21世纪初新成就的佐证^[49].

此外,近20年来兴起的对帅搏客学的研究,是值得注意的动向^[50]. 帅搏客(cyborg)是cybernetic organism(控制论肌体)的前3个字母合并而成简称. 它是为了扩大、提升生物肌体功能,研发被人工方法(机械-电子装置)增强后的肌体^[51],是半理论、半虚构的基于人-机系统的生物. 在医学、生理、社会、军事等方面的开发与应用正在全世界包括中国在内加速展开. 这也是控制论的一个研发前沿. 它的兴起必将会

带给控制论新的冲击.

由此可见,控制论的正波浪式前进.“复兴”^[6]、“衰落和重生”^[11]这些提法看来都是很难被接受的.

7 控制论整体的发展导致其学科定义的不断更新(The development of holistic cybernetics has led the updating of its definition)

国际学术界还从来没有一个学科像控制论那样,自诞生日起,定义就不断地被更新,而且现在还正在,未来也将会被不断更新.

与一些为21世纪的控制论试图给出一个精确和复杂的定义的学者不同,捷克科学院控制论和哲学研究员I·哈维尔(Havel)认为:“任何定义最终都会为控制论划定一个学术上的边界,使得它成为通常意义下的一般性学科. 这可能会剥夺它的原来固有的跨学科的特性. 应该视它为一个开放的研究领域,时常准备容纳完全新的主题、概念、思想和理论. 不仅如此,除了其经常演示为正规和抽象的概念以外,这些全新的事物能够活跃地从一个科学领域通过概念的范式(范例)转移到另一领域”^[12]. 显然,他的观点是在当前不赞成控制论拥有定义. 然而,控制论过去的历史表明定义也是可以发展的,并不剥夺它“原来固有的跨学科的特性”,也没有划定什么不可逾越的“学术边界”.

而英国控制论学家、帅搏客研究的先驱者凯文·沃里克(Kevin Warwick)在1994年题为《控制论——系统的现代科学》论文中认为,“控制论不像其他的科学,是由阻碍探索和设置不可能性的规则和定律所支配的. 从控制论的角度看几乎任何事情都是可能的,控制论仅提供一个时间约束”^[52]. 本文认为,他的意见很有见地. 学术界给控制论以定义,不过是对一个时期的研究进展的归纳和小结,不是用来限制或束缚它的发展.

如果在初创时期维纳定义控制论是“关于在动物和机器中的通讯和控制的科学”,70年来,控制论的定义被很多学者、百科全书根据其成就而更新过. 例如,大英百科全书(Encyclopaedia Britannica)认为“控制论是应用于复杂系统的控制理论”. 而文[53]是国内最早提出控制论向复杂大系统广度发展.

今天审视它的定义,不再仅仅是在动物和机器中的通讯和控制的科学,而是“生命体、机器、组织、社会、经济、自然和军事等复杂系统中通讯和控制的科学”. 而钱学森则从另一角度,认为“控制论是系统中组建机械和电气部件以达到稳定性和有目的动作的科学. 事实上,控制论的主要关注点在于系统的各个组成部件之间的相互关系和整个机件的合成行为的定性方面”^[41]. 在下文还将介绍甚至更新、更复杂的定义.

7.1 “当代控制论”的崛起(The rise of “contemporary cybernetics”)

在新世纪,情况还有进一步的发展.2016年7月在澳大利亚墨尔本举行的“2016年IEEE诺伯特·维纳在21世纪会议”,其主题是“现实世界中的思想机器”(Thinking machines in the physical world)^[2].这是在维纳著作对技术和社会影响关注的背景下,聚焦于认知计算(cognitive computing)的进步所提供的机会和挑战.

这个主题显然与上文第6节就提到、2009年美国的王-金斯纳-张3位教授的“当代控制论”以及其他有关的认知科学研究成果有关.通常认为,只有人类和高级物种才具有智能.然而3位教授和维纳一样认为,计算机、机器人和控制论系统的发展表明,机器和人造系统也可以创造或实现智能.所以,“控制论的一个关键目标就应该是寻找有关的理论来解释自然智能和机器(人工)智能两者的机理”^[49].

“一方面由于控制论的横向发展出现了对组织进行管理以及社会进行治理的覆盖,另一方面又出现了纵向对于人脑功能、机理的深入研究.在这情况下如何将这两方面的进展用来扩展控制论在70年前的经典定义”^[49].所以,3位教授从认知和智能的角度对控制论作出新的解释,尝试提出“当代控制论”的定义:“当代控制论是横贯神经级、认知级、功能级和逻辑级的还原-抽象递阶的角度,研究在人类、机器、组织和社会中通讯和控制的科学”^[49].

文[49]还有一些重要的创新内容,如认知信息学和计算智能的理论框架等,前者覆盖10个基础的理论,如抽象智能、信息-事物-能量智能(IME-I)、脑的层次化的参考模型(layered reference model of the brain, LRMB)、脑中内部信息表述的目标-属性-关系模型(OAR)、脑的认知信息学模型(CIM)、自然智能(NI)的机理、神经元信息学、人类感知过程的机理、正向推理的认知过程,以及正式的知识系统.感兴趣读者可参阅.

3位教授的控制论新定义是21世纪控制论发展的新动向.非常值得注意国际学术界的评论和后继的进展!控制论就是在类似这样的重要成果的推动下,不断逐步产生新理念以及更新基本原理和定义,不断逐步波浪式发展前进.

8 帅搏客学正在形成控制论的新分支(Cyborgology is forming a new branch of cybernetics)

第6节提到帅搏客的概念,是1960年由美国两位学者M·克莱因斯(Manfred E. Clynes)与N·克林(Nathan S. Klin)提出.原本是一个半理论半虚构的、既具有有机体又具有机电一体化部件的人,期望使人能适应

星际航行时遇到的险恶环境^[51].

此后,帅搏客的探索、研发和应用已历经50多年的初创、发展和成长等阶段.现今正展现一个崭新的控制论研究领域——机体和机器实体在控制论思想指导下的结合,再与内、外部进行通讯和控制^[50].过去控制论的新分支都是将控制论思想、方法引用、移植到新的领域而产生的.而如今两分支的实体——机体与机器的合并形成新的领域.帅搏客的研究显然不属于或者很难概括在生物控制论,或者机器人学或者工程控制论之内.由此诞生帅搏客学^[55],正在逐渐形成控制论独立的新分支学科.

帅搏客学是控制论的一个极重要的新的发展,打破了机体和机器的界限,创造了对机体和机器的各种不同程度的结合体的通讯和控制的研究.它的学术、应用、伦理、哲学上的意义非常巨大、对人类生活上的影响非常深远和前景非常广阔,特别在医疗方面.本文作者的综述[56]已对此进行评述.

这里机体-机器关系的结合模式是帅搏客学研究的关键内容之一.而它研究机体(不一定是人)和植入物(如芯片、电极、微电子器件、计算机等)及假肢(体)之间的控制和通讯关系.沃里克称这种关系为“拼合”,或“集成”,有人称为结合.而作者强调的是从开始的意念控制的假肢(体),称为拼合,到微型晶体管与细胞在帅搏格肌肉的成长在一起,这已经发展成为本文作者提出的“融合”.所以,融合为机体-机器关系揭开帅搏客学新的重要一页^[56].

帅搏客学正形成控制论的一个新分支,作者曾建议称为机体-机器结合体控制论^[56],简称“机体-机器控制论”(org-machine cybernetics).相比之下,这与机器人学被上文建议称为“机器控制论”一样,都再确切不过了.

这样,控制论的学科框架在帅搏客学、当代控制论、认知控制及心理控制等新事物出现发展的冲击下,正在被打破并扩展.这为控制论揭开新的一页.这又一次表明控制论的发展导致其核心理念和基本原理的增扩和定义的更新.

9 结束语:控制论前面的征途(Concluding remarks: cybernetics—the way ahead)

综上所述,控制论被部分学者拔高定位为基础科学,并且将它的核心理念部分(含基本原理)和各分支人为地割裂开来,漠视各分支和核心理念发展间的相辅相成关系,片面地认为前者的发展应该是直线上升式的.本文认为这是对控制论发展态势一些负面议论的根源.

“如果一门新的科学学科是真正有生命力的,它的引人兴趣的中心就必须而且应该随岁月而转移”(维纳《控制论》第2版序言)^[24].从上文第6、7节

可以感到, 20世纪50–60年代控制论兴趣的中心在生物(包括医学、神经)控制论, 70–80年代兴趣中心在社会(包括经济、管理)控制论, 80–90年代兴趣中心应是工程控制论一个分支的机器人(见第6.3小节), 新世纪初开始兴趣中心转移至认知控制、帅搏客学(机体–机器控制论)及当代控制论。

认知控制, 是思维科学和控制论之间的“被忽视的无人区”, 是研究人及其他动物的智能以及人造系统智能的科学。在这个领域内存在几个不同的类似名字, 反映不同的研究侧重和范围: 管控(执行)功能(executive functions)研究^[57]、感知控制论(perceptive cybernetics)^[58]、认知控制论(cognitive cybernetics)等^[59–61]。这有待于进一步展开研究后, 由学术界在国际学术会议上的集思广益而加以统一。其中采用较多的认知控制论指的是, 采用控制论思想来研究管控人们学习、行为, 以及做决定的神经元反馈系统; 了解这些认知过程如何帮助人们理解周围的世界和如何影响人们的决定^[60]。与之相关的心理控制也正在崛起^[62]。

当然, 除了控制论整个学科的兴趣中心外, 各分支学科也有自己的分支兴趣中心。如工程控制论分支的机器人学的无人机、无人驾驶汽车等即是分支的一类兴趣中心。

而动态随机一般均衡模型(DSGE)和基于主体可计算的经济学模型(ACE)模型的结合, 代表研究宏观经济数学模型的定量和定性方法相结合的研究法, 以建立能预测和处理危机的宏观经济数学模型, 则是经济控制论分支的一个重要的兴趣中心^[63–64]。

生物控制论的研究由宏观进入到微观领域, 即深入到分子级。基因调节系统和网络的建模与仿真, 则是生物控制论分支的一个兴趣中心^[65]。社会控制论分支的兴趣中心移到: 中国的和平崛起和建设一个和谐共赢的世界(人类命运共同体)^[66]、反恐、贫富差异等问题。帅搏客学^[55]分支则聚焦于E-医学(E-Medicine)和思想通信^[50, 67]。自然控制论分支的兴趣中心则是全球气候变迁问题^[68]、雾霾成因及治理研究、建立绿色家园和经济社会的持续发展等。军事控制论的一个兴趣中心是国防和空间系统, 如无人水下潜航器、无人战车和无人作战平台等。

值得注意的是, 控制论的引人兴趣的大型或“团队攻坚”课题都会是非常复杂的系统, 并是跨学科、多学科的; 采用递阶或分散的协调控制; 系统的模型会是部分模糊的, 是“以人(甚至众多用户)为中心”, 以适应、智能控制替代最优控制; 以方便、舒适、满意、安全、可靠为目标, 并从工程视角扩大成还包括经济、社会、心理、生理等因素^[68–69, 71–72]。

总之, “21世纪是一个全球化、存在危机、快速变

化、城市和经济出现困难、经济增长存在极限、不稳定、人口过剩、气候变化以及其他挑战的世纪”^[68]。作为技术科学的控制论等“三论”大有用武之地。

最后, 由“当代控制论”、帅搏客学, 以及“认知控制”、“心理控制”^[70]等新兴趣中心可知: 21世纪控制论将在这些新兴趣中心和信息论、人工智能的新成就、新进展下, 不是“被遗忘”^[8]的问题, 而是挑战和机遇并存。在新世纪面临的国际、国防、经济、全球化、社会、生物、生命、认知许多复杂系统待解决的问题前面^[65, 71–72], 如何结合大数据, 在巧妙地解决这些问题中继续发展, 继续丰富, 并继续赋予控制论新的生机、新的生命力问题。

控制论学者要漠视媒体过去的热炒和今天的冷言冷语, 不理睬因科幻和商业“劫持”cybernetics名字^[53], 而炮制冠以“帅拔X”(cyberX)和“帅搏X”(cyborgX)影视及商品的“喧闹”, 更不要因为对控制论负面的闲言碎语而困惑。科学是老老实实的学问, 控制论创新地结合大数据, 充分利用人工智能, 在解决上述这些时兴的全球性问题中造福于人类, 也必将发展控制论自己——丰富它的分支和增扩它的核心理念和基本原理。

参考文献(References):

- [1] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Proceedings of Conference on Norbert Wiener in the 21st Century* [C]. Boston, USA: IEEE, 24–26 June, 2014.
- [2] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Proceedings of Conference on Norbert Wiener in the 21st Century* [C]. Melbourne, Australia, USA: IEEE, 3–15 July, 2016.
- [3] HASHIMOTO K, YAMAMOTO Y, OISHI Y(Eds.). *Control and modeling of complex systems: cybernetics in the 21st century, Festschrift in Honor of Hidenori Kimura on the Occasion of His 60th Birthday*[M]. Boston: Publisher Birkhäuser Basel, 2003.
- [4] LACKO B, SEVCIK V. *Cybernetics in the 21st Century* [M]. London, UK: Unicorn Press, 2005.
- [5] MAJUMDER D D. *Thinking machines in the physical world in the context of 21st century* [EB/OL]. 21st century Norbert Wiener memorial lecture, IEEE-India, www.21stcentury-wiener.org/wp-content/uploads/2016/04/21st-Century...016-04.
- [6] LACKO B. The importance and contribution of cybernetics for contemporary information society [J]. *Kybernetika*, 2005, 41(4): 551 – 552.
- [7] WAN Baiwu. Past, present and all about of systems and control – To commemorate the 120 anniversary of the birth of the founder of Cybernetics Norbert Wiener (1894–2014) [J]. *All About Systems and Control*, 2014, 1(1): 6 – 12.
(万百五. 系统与控制的今昔与纵横——纪念控制论创始人诺伯特·维纳诞生 120 周年 [J]. *系统控制纵横*, 2014, 1(1): 6 – 12.)
- [8] FREEMAN J DYSON. The tragic tale of a genius – Comment on “The Dark Hero of the Information Age: Exploring the Father of Cybernetics Norbert Wiener” [J]. *New York Review of Books*, 2005, 12: 10 – 12.
(弗里曼·戴森. 一个天才的悲剧故事——评《信息时代的黑暗英雄: 探究控制论之父诺伯特·维纳》[J]. 纽约书评. 张达文译, 2005, 12: 10 – 12.)

- [9] DIDUK N, KOVAL V. Does the science of Cybernetics exist? (About the role of Cybernetics in natural science) [J]. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2001, 33(6): 69 – 85.
- [10] CONWAY F, SIEGELMAN J. *Dark Hero of the Information Age: In Search of Norbert Wiener, the Father of Cybernetics* [M]. New York: Stillpoint Press, 2005.
- [11] New World Encyclopedia. *Cybernetics* [EB/OL]. www.newworldencyclopedia.org/entr...ermetics. 24 July 2013.
- [12] HAVEL IVAN M. Cybernetics still alive [J]. *Kybernetika*, 2008, 44(3): 314 – 327.
- [13] HEYLIGHEN F, JOSLYN C. Cybernetics and second-order cybernetics [M] // *Encyclopedia of Physical Science & Technology* (3rd ed.). New York: Academic Press, 2001.
- [14] POLONNIKOV R, YUSUPOV R. Will the 21st century accept Cybernetics? [J]. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2001, 33(12): 1 – 15.
- [15] SHARMA A, SENGAR C, BISHT L, et al. Cybernetics – The new era arrives [J]. *International Journal of Advancements in Research & Technology*, 2012, 1(7): 118 – 124.
- [16] ASARO P M. *What ever happened to Cybernetics. Geist in der Maschine. Medien, Prozesse und Räume der Kybernetik*, In: *Monochrom Yearbook 2007, Umea University* [M]. Austria: Verlag Turia & Kant, 2010.
- [17] WAN Baiwu. Sixty years of Cybernetics since funding [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(4): 597 – 602.
(万百五. 控制论创立 60 年 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(4): 597 – 602.)
- [18] KLINE R. *The Cybernetics Moment, or, Why We Call Our Age the Information Age* [M]. Baltimore, USA: Johns Hopkins University Press, 2015.
- [19] WAN Baiwu. Second-order cybernetics and its applications [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(8): 1053 – 1059.
(万百五. 二阶控制论及其应用 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(8): 1053 – 1059.)
- [20] PANGARO P. Cybernetics: The center of science's future [EB/OL]. Presentation at The Philosophical Society of Washington, 1973rd Meeting, John Wesley Powell Auditorium, Cosmos Club, Friday, February 1, 1991. www.pangaro.com/cybernetics-the-center-of-sciences-future.html.
- [21] HU Jixuan. *Understanding understanding: An introduction to Heinz von foerster and second-order cybernetics school* [EB/OL]. www.wintopgroup.com/readings/articles/foerster.pdf, 2005.
(胡继旋. 对理解的理解: 介绍海因茨·冯·福尔斯特及二阶事理学(二阶控制论)学派 [EB/OL]. www.wintopgroup.com/readings/articles/foerster.pdf, 2005.)
- [22] QIAN Xuesen. Talk about the system of system science again [J]. *Systems Engineering—Theory and Practice*, 1981, 1(1): 2 – 4.
(钱学森. 再谈系统科学的体系 [J]. 系统工程理论与实践, 1981, 1(1): 2 – 4.)
- [23] QIAN Xuesen. My understanding the course of systematics [M] // *Creation of Systematics*. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2009.
(钱学森. 我对系统学的认识历程 [M] // 创建系统学. 上海: 上海交通大学出版社, 2009.)
- [24] WIENER N. *Cybernetics: Control and Communication in the Animal and the Machine* [M]. Second Edition, Boston, USA: MIT Press, 1963.
- [25] WIENER N. *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society* [M]. Boston, USA: Houghton Mifflin, 1950.
(维纳 N. 人有人用处——控制论与社会 [M]. 陈步, 译. 北京: 商务印书馆, 1978.)
- [26] ASHBY W R. *Design for a Brain: The Origin of Adaptive Behavior* [M]. London, UK: Chapman & Hall, 1952. 2nd edition 1960.
(W R 艾什比. 大脑设计——适应性行为的起源 [M]. 1952, 乐秀成, 等译. 北京: 商务印书馆, 1991.)
- [27] ASHBY W R. *An Introduction to Cybernetics* [M]. New York: Wiley, 1956.
(W R 艾什比. 控制论导论 [M]. 张理京译, 北京: 科学出版社, 1956.)
- [28] WIENER N. My connection with Cybernetics. Its origin and its future [J]. *Cybernetica*, 1958, 1(1): 1 – 14.
- [29] WEINER N. *God & Golem, Inc.: A Comment on Certain Points Where Cybernetics Impinges on Religion*. USA: MIT Press, 1966.
- [30] MEAD M. The cybernetics of cybernetics [C] // *Purposive Systems. Proceedings of the First Annual Symposium of the American Society for Cybernetics*. New York, Washington: Spartan Books, 1968.
- [31] ASHBY W R. Principles of the self-organizing system [M] // VON FOERSTER H, ZOPF G. *Principles of Self-Organization: The Illinois Symposium on Theory and Technology of Self-Organizing Systems*. London: Pergamon Press, 1962: 255 – 278.
- [32] VON FOERSTER H. Cybernetics of cybernetics [M] // *Communication and Control in Society*. New York: Gordon and Breach, 1979.
- [33] VON FOERSTER H. *Observing Systems* [M]. Salinas, CA: Intersystems Publishers, 1981.
- [34] VON FOERSTER H. *Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition* [M]. New York: Springer, 2002.
- [35] BAECKER D. The Culture of Cybernetics [J]. *Constructivist Foundations*, 2010, 5(2): 102 – 103.
- [36] The George Washington University. *The origins of Cybernetics* [EB/OL]. www.gwu.edu/~asc/origin.html. 2005-2-4.
- [37] UMPLEBY S. The science of cybernetics and the cybernetics of science [J]. *Cybernetics and Systems*, 1990, 21(1): 109 – 121.
- [38] ASC. American Society of Cybernetics 2005 Conference [EB/OL]. www.asc-cybernetics.org/005/index.htm. 26 October, 2005.
- [39] ZENG Qingcun. Natural cybernetics [J]. *Climatic and Environmental Research*, 1996, 1(1): 11 – 20.
(曾庆存. 自然控制论 [J]. 气候与环境研究, 1996, 1(1): 11 – 20.)
- [40] MATURANA H, VARELA F. Autopoiesis and cognition: the realization of the living [M] // *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Dordrecht, Netherlands: Springer Publisher, 1980.
- [41] QIAN Xuesen, SONG Jian. *Engineering Cybernetics* [M]. Beijing: Science Press, 1983.
(钱学森, 宋健. 工程控制论 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.)
- [42] KLIR G. Sixty years of cybernetics: From youthful to useful [J]. *Kybernetika*, 2008, 44(3): 307 – 313.
- [43] HEYLIGHEN F. *Principles of systems and cybernetics: an evolutionary perspective* [EB/OL]. www.researchgate.net/publication/2441746.Principles_of_Systems_and... Sep 18, 2012.
- [44] SARNOVSKY J. Modern rationality: a cybernetic view [J]. *Kybernetes*, 2006, 35(10): 1745 – 1755.
- [45] ZHU Hongyuan. Physics (entry) [M] // *Encyclopedia of China Vol. Physics* (1st Edi.). Beijing: Encyclopedia Press of China, 1987.
(朱洪元. 物理学(条目) [M] // 中国大百科全书, 物理学卷(第 1 版). 北京: 中国大百科全书出版社, 1987.)
- [46] ROSENBLUETH A, WIENER N, BIGELOW J. Behaviour, purpose & teleology [J]. *Philosophy of Science*, 1943, 10: 18 – 24.
- [47] MCCULLOCH W, PITTS W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity [J]. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 1943, 5: 115 – 133.
- [48] UMPLEBY, S. Cybernetics: A general theory that includes command and control [C] // *The 20th International Command and Control Research and Technology Symposium*. 2015.

- [49] WANG Y X, KINSNER W, ZHANG D. Contemporary cybernetics and its facets of cognitive informatics and computational intelligence [J]. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 2009, 9(4): 823 – 833.
- [50] WARWICK K. Cybernetics – The way ahead (Chapter) [M] // LACK-O, B, SEVCIK, V (eds.). *Cybernetics in the 21st Century* London, UK: Unicorn Press. 2005.
- [51] From Wikipedia, the free encyclopedia. Cyborg [EB/OL]. -en.wikipedia.org/wi... 2015-2-24.
- [52] WARWICK K. Cybernetics – The modern science of systems [J]. *Kybernetes*, 1994, 23(6/7): 7 – 85.
- [53] TU Xuyan. *Large-Scale Systems Cybernetics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1994.
(涂序彦. 大系统控制论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.)
- [54] COLTON S. Press release cyborg off his Christmas tree [J]. *Times Higher Education Supplement*, 22nd December, 2001.
- [55] GRAY C, FIGUEROA-SARRIERA H, MENTOR S. *The Cyborg Handbook* [M]. New York, London: Routledge Publisher, 1995.
- [56] WAN Baiwu. Progress in cyborgology research that is forming a new branch of cybernetics (review) [J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(9): 1129 – 1138.
(万百五. 正在形成控制论新分支的帅博客学的研究进展 (评述) [J]. 控制理论与应用, 2016, 33(9): 1129 – 1138.)
- [57] From Wikipedia, the free encyclopedia. Executive functions [EB/OL]. en.wikipedia.org/wiki/Cognitive_cont... 3 November 2016.
- [58] LIU Jiayu. Research on cognitive Cybernetics and its philosophical meaning [J]. *Industrial & Science Tribune*, 2009, 8(5): 21 – 25.
(刘甲玉. 感知控制论及其哲学意义探究 [J]. 产业和科技论坛, 2009, 8(5): 21 – 25.)
- [59] ZHANG Huaxia, YAN Zexian, FAN Dongping. Cognitive cybernetics — Expansion research on powers's cognitive control [C] // *Proceedings of the Symposium on Philosophy and Cognitive Science* (II). Nanchang: Jiangxi People's Publishing House, 2004.
(张华夏, 颜泽贤, 范冬萍. 认知控制论——对 Powers 的感知控制论的拓展研究 [C] // 哲学与认知科学国际研讨会论文集 (二). 南昌: 江西人民出版社, 2004.)
- [60] CASSENTI D N, GAMBLE K R, BAKDASH J Z. Multi-level cognitive cybernetics in human factors [M] // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Berlin, Germany: Springer International Publishing, 2016.
- [61] PATON G S, HENDERSON J. Visualization, interpretation, and cognitive cybernetics [J]. *Interpretation*, 2015, 3(3): SX41 – X48.
- [62] MALTZ M. *The New Psycho-Cybernetics* [M]. USA: Amazon books, Prentice Hall Press, 2002.
- [63] WAN Baiwu. The global economic crisis and lessons drawn in the viewpoint of economic cybernetics (analogy study and review)—To commemorate the 120 anniversary of the birth of the founder of Cybernetics Norbert Wiener (1894–2014) [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(2): 129 – 139.
(万百五. 经济控制论观点下的全球经济危机及其教训 (类比研究与评论)—纪念控制论创始人诺伯特·维纳诞生 120 周年 (1894 – 2014) [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(2): 129 – 139.)
- [64] DEISSENBERG C, VAN DER HOOG S, DAWID H. EURACE: A massively parallel agent-based model of the European economy [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2008, 204(2): 541 – 552.
- [65] De JONG H. Modeling and simulation of genetic regulatory systems: A literature review [J]. *Journal of Computational Biology*, 2002, (1): 67 – 103.
- [66] WAN Baiwu. Sociocybernetics and its progress: A review [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(1): 1 – 10.
(万百五. 社会控制论及其进展 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(1): 1 – 10.)
- [67] WARWICK, K. The promise and threat of modern Cybernetics [J]. *Southern Medical Journal*, 2007, 100(1): 112 – 114.
- [68] MESAROVIC M, MCGINNIS D, WEST D. *Cybernetics of Global Change: Human Dimension and Managing of Complexity* [M]. Caracas/Amprincipe, Paris: UNESCO, 1996.
- [69] GERSHENSON C, CSERMELY P, FRDI P, et al. *The past, present and future of cybernetics and systems research* [EB/OL]. arxiv.org/abs/1308.6317v3/, 2013.
- [70] FUREY M. *Psycho-Cybernetics, Updated and Expanded* [M]. USA: Tarcher Perigee Books, 2015.
- [71] PALMER J D, SAGE A P, SHERIDAN T B, et al. The IEEE systems, man and cybernetics society: Past, present, and future [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics*, 1992, 22(1): 1 – 9.
- [72] HIPEL K W, JAMSHIDI M M, TIEN J M, et al. The future of systems, man and Cybernetics: Application domains and research methods [J]. *Part C: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 2007, 37(5): 726 – 743.

作者简介:

万百五 (1928–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为大系统递阶稳态优化控制、智能控制和工业产品质量控制以及控制论, E-mail: wanbw@mail.xjtu.edu.cn.