

二阶控制论及其创始人 海因茨·冯·福尔斯特

万百五 西安交通大学 系统工程研究所

1、最年轻的与会者

在控制论形成的历史上有一个系列性的重要会议在1946 – 1953年间每年1至2次在美国纽约等地进行。这就是在由梅西（Macy）基金会支持的、导致控制论诞生的“生物和社会系统中的循环因果与反馈机制”讨论会（Meetings on circular causal and feedback mechanisms in biological and social systems）。它集中了工程师、数学家、神经生理学家、社会学家等共14个学科领域的顶尖专家，如会议的组织者兼主席、MIT教授、神经生理学家W·麦克卡洛（McCulloch）（1排左4）、墨西哥生理学家A·罗森勃吕特、MIT数学教授诺伯特·维纳（Norbert Wiener）（2排右2）、经济学博弈论的创始人J·冯·诺依曼（Neumann）、女人类学家M·米德（Mead）（1排左3）和她的丈夫人类学家G·贝特森（Bateson）以及英国精神病学家R·艾什比（Ashby）等。



图1 “生物和社会系统中的循环因果与反馈机制”讨论会的与会者

会议上这些不同领域的科学家开始时很难彼此理解，因为每个人都使用自己的专业语言。他们的思想交锋和争论有时非常激烈，以至于米德在一次会议后才发现她在会上把自己的一颗牙咬坏了。

出生奥地利的海因茨·冯·福尔斯特（Heinz von Förster）1944年从

Breslau大学得到物理学博士学位。1949年他揣着自己的40页德文小书《Das Gedächtnis: Eine quantenmechanische Untersuchung》（记忆：一个量子力学的研究）前往美国谋职(图2)。记忆是人的生理现象，被他用量子力学来加以研究。这自然切合到上述会议的主题。他被介绍去见麦克卡洛，当时他的英语并不好（只会200-300个词汇），两人使用笔和数学公式协助交谈。他得到了赏识并被邀请去参加了当年的第6次讨论会。38岁的他成为最年轻的与会者和报告人。报告完后听懂和回答问题都在熟悉德语的与会者的帮助下才完成的。

会后会议领导人和基金会代表指定他作为会议的秘书，负责整理、编辑本次以及以后4次会议的纪要和论文集。这是给他的一份工作并帮助他提高英语水平。这样他花去了约2年时间编辑，以后共编辑、出版了5卷的论文集。

在这过程中冯·福尔斯特要处理米德的一篇无题发言稿，在无法联系上她的情况下他将她稿中的警句“以控制论的方法探讨控制论”（Speaking about Cybernetics in a cybernetical way）改成为“控制论的控制论”（Cybernetics of Cybernetics）作为她发言的标题。这启发他以后提出二阶控制论思想。

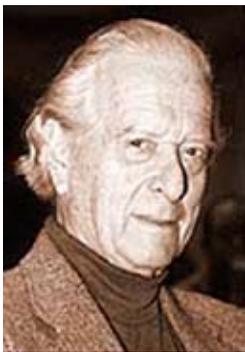


图2 二阶控制论创始人海因茨·冯·福尔斯特 (1911-2002)

2、生物计算机实验室成立与二阶控制论的诞生

1951年冯·福尔斯特到伊利诺斯大学任教。6年后他得到美国军方资助成立并主持了生物计算机实验室（Biological Computer Laboratory, BCL），研究生物系统和电子系统间的相似性，包含系统理论、仿生学和认知科学等内容。

上述Macy会议的与会者、已成为知名控制论学家艾什比应邀加入了该实验室，作为教授工作10年。他是继1948年维纳的名著《控制论》出版8年后，力求避开数学公式表述的、至今仍具有影响的《An Introduction to Cybernetics》（控制论导论）一书的作者。他在BCL期间的代表作是《Principles of the self-organizing system》（自组织系统原理）。他们俩人指导和培养了一大批研究生，其中包括后来担任过美国控制论学会（American Society for Cybernetics, ASC）会长的美国乔治·华盛顿大学教授S·翁玻尔贝（Umpleby）。参与实验室工作并对二阶控制论有重大贡献的其他学者有：英国的G·帕斯克（Pask），他的核心工作是对话理论（conversation theory）；智利的生物学家H·马图拉纳（Maturana）和合作者F·瓦雷拉（Varela），他们的核心工作是自生殖和认知，并发表同名专著《autopoiesis and cognition》。作为访问教授参与实验室工作的还有二阶控制论著名的英国学者、管理控制论的首创者S·比尔（Beer）等一批学者。

该实验室存在了20年（1957-1976）。1970年代中叶冯·福尔斯特发表和创立了二阶控制论。他的团队随后也发表了一系列新的见解。这促使作为研究对象之一的控制论，从过去的机器、生命系统发展到社会系统和认知科学，并研究观察者角色在控制系统中的重要性。一时BCL成为控

制论新思想的中心，并对认知科学和哲学的构建主义产生重要影响。

3、二阶控制论的基本论点

(1) 控制论的控制论

冯·福尔斯特这样通俗地解释二阶控制论的思想：“大脑被要求写出大脑的理论”，就是说大脑理论的研究者考虑他自己的大脑活动（图3）。



图3 人脑思索：“人脑是如何思索的”

因为大脑的功能本身是一个控制论的问题，这样控制论被应用到它自己身上，成为“控制论的控制论”，即二阶（second order）运作的控制论，故名为二阶控制论（second-order Cybernetics）。图4形象化地将这个思想表述成漫画。

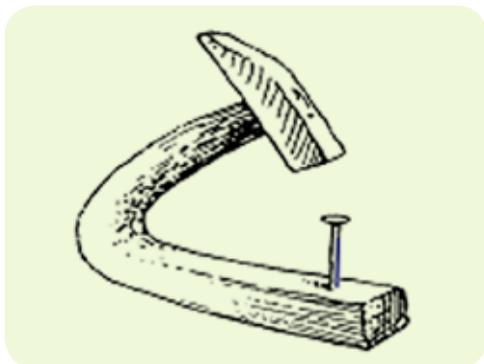


图4 控制论被应用到研究控制论

人类学家贝特森和米德对两类控制论系统在

1973年所作的对比如图5所示。图中上部为由检测及控制器组成的传统的反馈控制系统（方框内），设计工程师（观察者）在系统之外。图中下部添加由维纳、贝特森、米德作为观察者-动作者形成的外反馈回路。下一类控制论系统将观察者-动作者形成的反馈包括在（大方框）内。这类系统后来就被冯·福尔斯特命名为二阶控制论系统。

这不同于工程控制论系统中的多回路系统或过程控制中的串级控制系统。除了双回路相同外，二阶控制论系统中还存在观察者-动作者引发的反馈。

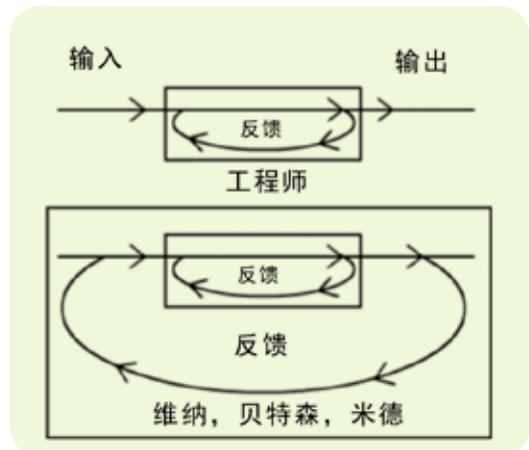


图5 两类控制论系统的对比

(2) 将控制论的原理运用于理解观察者的角色

米德是研究人类及其文化的著名科学家，她就居住在自己所研究的社会中。居民们会自然地、时不时地想要给她留下印象，同时好奇地留心注视她的一举一动，甚至模仿她。这个社会系统中内环是社会文化的自我维护，自我进步。她在那个文化中的出现又通过接触、关爱（如儿童）和进行调查影响了那个文化，反过来又影响了她所观察的当地居民。这种“观察者的作用”使得她无法知道这个社会的有些现象，原来（在

她不出现在那里时)是什么样的(图6)。



图6 米德在萨摩亚群岛和孩童在一起

显然,在原先控制论中被观察系统是被认为独立于观察者的,而二阶控制论学者认为在社会系统和组织中由于观察者自己的立场、观点和理念很难做到完全独立,也无法阻止自己对系统产生影响。为此,观察者的理念、行动影响被观察的系统。

(3) 自治系统

翁玻尔贝列表总结了原先控制论(被二阶控制论学者称为“一阶控制论”)和二阶控制论的定义或要点的差别,见下表1。

提出者	一阶控制论	二阶控制论
冯·福尔斯特	被观察系统的控制论	观察着的系统的控制论
帕斯克	模型的目的	建模者的目的
瓦雷拉	被控系统	自治系统
翁玻尔贝	系统中变量的互动	观察者与被观察系统的互动
翁玻尔贝	社会系统的理论	理念和社会间互动的理论

表1 “一阶控制论”和二阶控制论的定义或要点

下文逐条解释表中的观点:

冯·福尔斯特认为原先的控制系统是被观

察的系统(observed system)。而二阶控制论系统中观察者处在系统之内,他在观察在动作,故冯·福尔斯特称它为观察着的系统(observing system)(图7)。

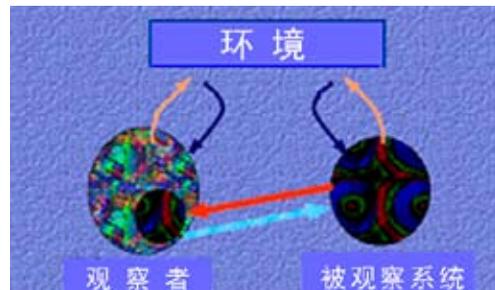


图7 观察着的系统的组成

观察者又是动作者,可以自己设定系统的目标,即设定自动控制系统的输入(给定)。这类二阶控制论系统又称为自治系统(autonomous systems),它是自己定义目标的系统。图8是自治系统的漫画。



图8 自治系统的漫画

帕斯克认为工程师或设计者建立系统的模型,因此原先的控制论以研究或演示模型为目的,而二阶控制论着重建模者的目的。例如,人们为船舶建立一个船舵驾驶的动态模型,其目的用来研究操纵船舵时船的动态响应和波浪的影

响；而建模者的目的是为将来设计一艘高稳定性并且动态性能良好的大型船舶。因而，模型的目的这时就成为目的的“目的”了。二阶控制论强调要关注建模者的目的，就是把建模者和被建模的系统结合在一起研究。

瓦雷拉认为提出建模者目的的建模者（观察者-动作者）就在系统之中，因此，系统是自治的或自设定的。或称为自设定系统（self-referential system），自设定性（self-reference）是二阶控制论的中心思想之一。

翁玻尔贝在表1中的观点本文在第4节（7）加以解释。

二阶控制论学者进一步推广认为从“一阶控制论”到二阶控制论是一场“革命”。观察者角色和效应这个问题存在于各门科学中。各科学都需要引入观察者以进行“革命”。在认识论和哲学、伦理学上他们认为人们对世界的知识和构建于脑中的“实在”是受到人们感觉的修整，是基于他的经验。与人沟通后脑中的“实在”可以被增强或削弱。因此，客观是不存在的，真理是不存在的；以及序（order）源于噪声、自生殖等理论观点。显然，有一些观点是与马克思主义哲学是不同的。此外，冯·福尔斯特在神经元运算结构与认知方面也做了许多研究工作，对人脑学习和记忆的机制提出了新的理论（图9）。



图9 冯·福尔斯特（左）解释神经元结成网络

1992年起季刊《Cybernetics & Human

Knowing》（控制论与人类认识）：一个二阶控制论、自生殖和赛伯符号学（Cyber-Semiotics）的杂志（图10）在英国出版。

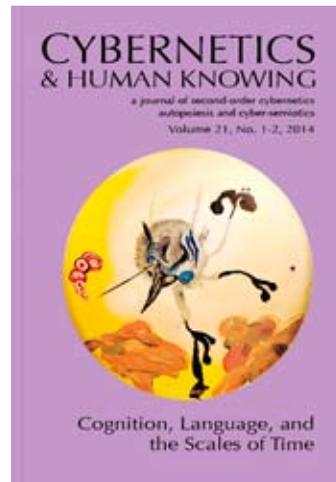


图10 2014年第1-2期的《Cybernetics & Human Knowing》

本文将就上述二阶控制论的三个基本论点的应用展开介绍和分析。

4、二阶控制论基本论点的应用

（1）持续发展社会系统的社会控制论模型

瑞典Blekinge理工学院教授柏国华（Bai, Guohua）提出社会经济活动模型（图11）。整个控制论模型包含两个环：社会经济活动的内环和社会政治活动的外环。内环表示社会再生产和消费是最基本的人类活动，消费需要生产，反之亦然。消费得愈多，也就生产得愈多，反之亦然。两者形成正反馈。图11上在消费前的交换是一个买卖过程。生产出的产品有一部分是半成品，须经过分配后重新回到相应的部门进行再生产。所以生产和分配组成内环中的另一个正反馈回路。这个基于正反馈内环的社会经济系统一般是一个不稳定的子系统。某些行业的泡沫引起的银行破产和经济危机就是不稳定的例子。

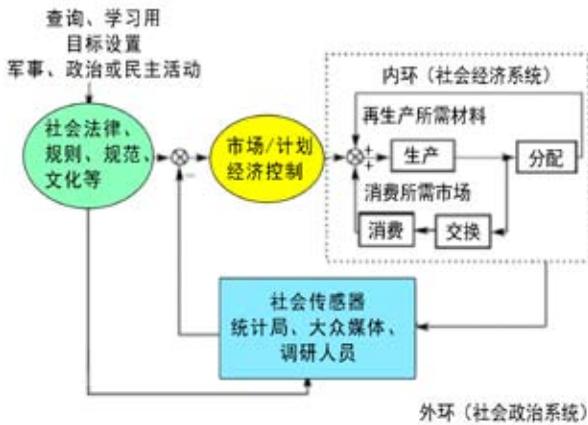


图11 社会经济活动模型（双回路控制）

不管是自由经济或是计划经济,内环应该从外界控制,因它具有自生殖和闭合性。图11上外环的社会政治子系统就是用来添加负反馈和前馈以镇定内环。图11上的三个彩色框就是二阶控制论的观察者-动作者。蓝色方框是社会的观察者形成社会传感器。黄色椭圆框（经济控制部分）是动作者对国民经济进行宏观调控（相当于政府部门）。绿色椭圆框更是目标的自设定者,通过政治或民主活动形成对上述系统的目标（图11上的输入）。所以这个社会经济系统是自治的,或自设定的。这是社会持续发展所必需的。

图11上外环作为观察者的社会传感器是极端重要的,但它必须是客观的、公正的。但事实并非如此,如在美国2007年前某些虚假宣传为泡沫经济吹捧。

对国民经济进行宏观调控也是极端重要的。如2007年世界经济危机爆发前美国采取新的自由主义对经济放任自流,使金融衍生品之类缺乏有效监管。

外环的社会政治子系统是自设定的和自生殖的。设定的目标必须是经过勤奋努力能够完成的,如力图永久占有世界经济主导地位的目标是难完成的。

(2) 公司、企业的活力系统模型

比尔热衷于将二阶控制论原理应用于组织（包括企业和机关）。他并不回避它们的复杂性,在建模时设法都包括进去加以研究,并将经理或管理者（观察者-动作者）的领导活动着重地包括进去。比尔还尽量将组织中的过程处理成闭环的。他创建了管理控制论,特别是活力系统模型（viable system model,简称VSM）。有活力的系统必须能适应变动着的环境,必须能吸收及利用自己的经验,必须能学习和发展。

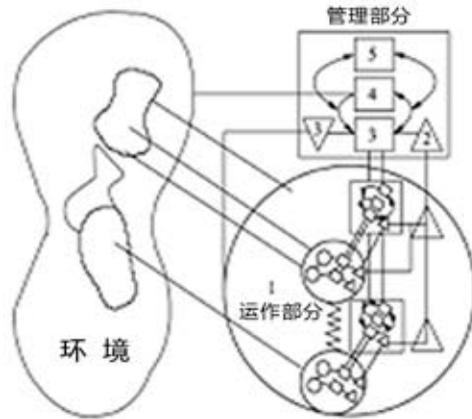


图12 基于活力系统理论的企业模型

依据VSM理论,一个VSM组织有3个部分,如图12所示:环境部分(不规则形状)、管理部分(矩形子系统3,4,5;三角形子系统2,3)和运作部分1(圆形)。运作部分1执行全部基本业务的功能(例如生产、分配、销售等),可以被划分成一些相互独立的子系统(各车间、部门、科室),如图中1部分内含2个子系统(小圆)。

管理子系统3执行协调职能;子系统4执行优化控制职能,观察外部环境的变化以及制定未来计划和预测未来环境的变化;子系统5执行决策的职能,负责制定组织的整体政策。由于吸收和利用环境部分的信息,各层管理部分具有智能,因

而能向环境学习。

二阶控制论启发比尔，所设计的运作部分的子系统（大圆1中的小圆）都有小型管理部分（小圆顶上的小方形），都含有在本子系统范围内的管理功能。这些连同组织的管理部门3、4、5都是处于不同层次上的观察者-动作者。他们有获取信息从而适应环境、设定各自目标的能力。这是活力之所在。

（3）人工适应主体技术研究法中的观察者-动作者

将宏观经济或社会当作一个由智能化微观模拟模型组成的、演化的复杂系统，而采用人工适应主体技术来描述系统中的微观模拟模型。主体应具有自治性、通信感知能力、优化能力、目标驱动能力、推理和规划能力、协作协商能力和适应能力。让一大群这样的主体在计算机所构造的虚拟环境下进行相互作用并演化，从而让整体系统的复杂性行为（如经济危机）自下而上地“涌现”出来。这被称为“复杂性研究法”（complexity approach），以区分基于宏观经济数学模型的“动态系统研究法”（dynamic system approach）。这种研究趋势的增长，反映在计算机专家J·Holland和经济学家S·Kauffman及W·Brain Arthur等的著作以及美国宏观经济模型ASPEN、“人工社会”等的研究成果中。

每个人工适应主体从二阶控制论看来，就是观察者-动作者。

目前，欧盟支持的EU-FP6计划集中了多国的力量，要为欧盟经济建立一个雄心勃勃的、基于人工主体的大型经济模型EURACE，以便理解欧盟的金融市场和整个经济，并为未来的政策决策找到依据。

基于真实的统计数据，该模型代表几千万的住户、十万商号和成百座银行。每个住户、商户

与银行是经济学上的主体，也是人工适应主体技术研究法中的主体。EURACE模型是一个基于主体的、整体集成的、极巨大及复杂的宏观经济模型和仿真器，规模达到一个国家的水平。包括三个部分：实体部分（消费品市场、消费品投资市场和劳动力市场）、金融部分（信贷市场和金融市场）以及管理部分（政府和中央银行）。EURACE研究工作正在进行中。

（4）对话、沟通、通讯、理解的理论

由帕斯克提出的对话理论提供了科学的理论来解释互动如何能导致“知识的构建”，或“认知”。图13所示为由“你”和“我”2个子系统组成的对话大系统。每个子系统是一个二阶控制论系统，图上标明它外环的语言形式的反馈，更有人脑内部思索、修正的思维内反馈（“三角形”内环）。

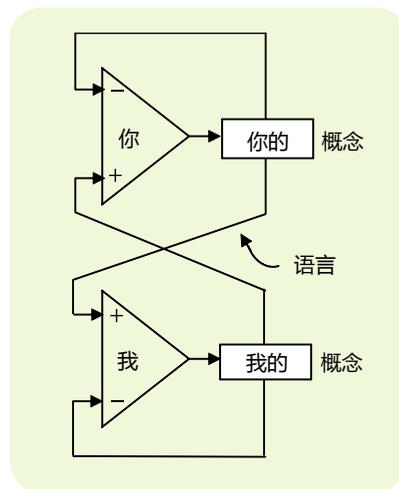


图13 你、我概念相比较，再修正

图13描述这种通过语言沟通将自己的概念传递给对方，而对方将它与自己的概念相比较（图上的正、负号），并在脑中形成新的概念，再传递给对方。对方又这样循环一次，……这样互动的结果导致共识的产生。

二阶控制论学派认为系统内的不同观察者由

于利益而形成立场、观点和理念的不同，对系统的建模和优化决策结果是不同的，因此没有客观这个东西，客观就是“共识”。

从两个同时已经存在的题目或概念中通过语言沟通以取得共识，推演出一个新题目或概念（图14）。通过对话沟通调整立场、修正观点，达成共识，也是一种广义的控制。

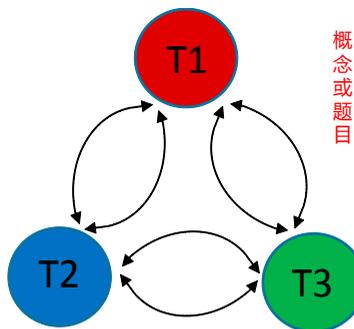


图14 概念T1和概念T2沟通后形成概念T3

对话本身当然是循环的，对话也可以用来谈论对话本身，所以这是一个二阶控制论系统。甲说了话，乙听了，并在他的理解的基础上用自己的话作了回答；甲从回答中要理解乙对自己的说话的理解程度。这就是对理解的理解（图13）。

因此，二阶控制论学派认为，要尊重别人的意见，进行人际、组织间、国家间的沟通，提倡宽容。必要时各人要调整自己的立场，通过语言沟通以取得共识，达成协议。

（5）家庭治疗上的应用

家庭治疗（family therapy）是心理治疗的一种形式，治疗对象不只是病人本人而是整个家庭。图15所示为家庭的病态写照。

家庭治疗是通过在家庭成员内部促进谅解，增进情感交流和相互关心的作法，使每个家庭成员了解家庭中的病态情感结构，以纠正其共有的心理病态，改善家庭功能，产生治疗性的影响，达到和睦相处。



图15 家庭的病态情感

家庭治疗师并不是和稀泥的和事佬，不是高高在上的裁判，而是深入家庭促进各方沟通、相互理解，并促进双方建立“理解的理解”的家庭心理医生（图16）。



图16 家庭治疗师（右）在沟通中

（6）工程控制系统中的智能体与观察者-动作者的结合

目前在大工业过程的在线递解优化控制中，已经提升协调器和每个局部决策单元的功能，使它上升为多智能体（intelligent agent）控制。本文作者认为应该进一步将智能体上升为上文第（3）小节的人工适应主体，也即为观察者-动作者。同时将系统提升为二阶控制论系统。这样它能在原料大变动、生产方案变动等情况下缩短过渡过程，较快投入稳态生产运行，大大提高经济效益，还可以进行故障诊断及处理。

同样的思想可以应用于复杂街口的交通信号

灯控制大系统，机器人足球比赛等场合。例如，在后一场合不仅每个机器人能把球踢向球门，还要被研制得能纵观全局，各司其职，能传球、组织进攻和防守。

这样的提升可以大大促进、提高这类复杂系统的功能和经济效益。

(7) 政治体制改革和体制的自我完善

中国共产党的十七届五中全会强调不断推进社会主义政治制度的自我完善和发展。能这样做的政党和组织从二阶控制论的观点是自治的或自设定的。

一个基于二阶控制论更强化的自我完善定义是：系统，无论是个人、组织或社会，收集有关自己功能的信息，而又利用它们反过来能改善这些功能。这就要求系统是自观察、自反馈并能确定完善的方向。这个方向可表示为一种理念。对社会系统而言，这就是表1所讲的理念和社会间的互动。而二阶控制论按照翁玻尔贝的意见，近期就是研究这种互动的理论，研究思想运动的设计（见表1）。

5、不同的声音

曾是物理学家的冯·福尔斯特，受到爱因斯坦的相对论和海森堡（Heisenberg）不确定性原理的启发，将观察者角色和效应这个问题应用到控制论中来，形成二阶控制论，并为此学派启动了一场“新的科学革命”。

早先控制论的观点和成就，已给其后的科学和工程带来巨大的进步。二阶控制论学者强调在对认识论、心理学对象和社会对象的研究中关注观察者的角色，这对于早先控制论研究者的观点是一个值得欢迎的补充。但对于二阶控制论的其余观点也有相当对立的不同意见甚至否定态度。

即便是美国控制论学者，也并不都同意这种

“一阶控制论”到二阶控制论的截然划分和“一阶控制论”的提法。认为后者是前者的继续和发展，未见两者中有什么“鸿沟”而需要什么“革命”。

早先控制论学者往往还是某一控制论分支的实体系统的研究参与者。例如，维纳在二次大战期间对工程控制论很有建树，他将随机信号和统计学引入高射炮火控制系统，创立了控制系统统计动力学。二战后他与罗森勃吕特一起参与并领导对生物控制论、神经控制论的研究。

二阶控制论学派的主流学者强调研究者要懂得神经生理学、数学、哲学和心理学，研究兴趣更多在于理解人类的认知和理解人类自己。因而被认为出现了“理论控制论”、“纯粹控制论”、“软控制论”的学者或分支，只“研究复杂系统组织的一些抽象原则”。有人称冯·福尔斯特除控制论学家外，还称他为“理论家”和“哲学家”。除了比尔研究活力组织，马图拉纳结合生物系统研究自生殖和认知外，几乎没有二阶控制论学者研究实体系统的实际问题。上文的应用是本文作者所综合的。

二阶控制论学派蓬勃发展的20年中，其主要思想在广大科学界传播缓慢，仅“播下种子”，未见“茁壮成长”。与当时的其他新学术思想如“混沌”相比，在广大科学界影响甚小。这场被创导的“科学革命”看来还远未“完成”，但二阶控制论学派坚持认为“种子会发芽、成长”。

1975年学派创始人冯·福尔斯特从伊利诺斯大学退休。因资助终止，BCL实验室也随后在1976年结束。2002年他在美国加利福尼亚州Rattlesnake Hill的家中去世，终年91岁。他的论述汇编成书《Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition》（理解的理解：控制论和认知文集）2002年出版，全书374页（图17）。

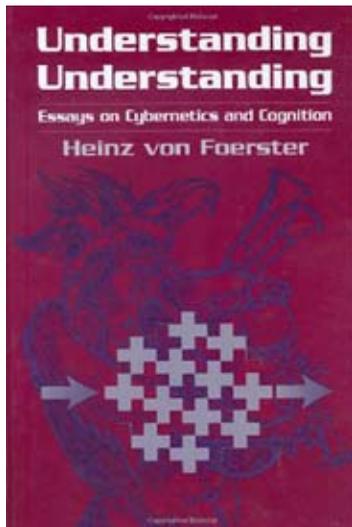


图17 理解的理解：控制论和认知文集

此外还举行了以海因茨·冯·福尔斯特命名的几个学术会议以缅怀他的贡献和继承他的研究，其中奥地利一些学术单位主办的“海因茨·冯·福尔斯特国际大会”（International Heinz von Foerster Congress）2011年召开了第5届。

他身后，二阶控制论的研究在走下坡路，重要成果的数量已经不如过去。在美国有翁玻尔贝继承他的旗帜，在英国有新一代的二阶控制论理论家美国控制论学会现任会长R·葛兰维尔（Glanville）教授等人。二阶控制论学者习惯用叠句来表述思想：控制论的控制论、目的的目的、理解的理解等等，这成为这个学派文风的一个标志。

参考文献

- [1] 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. www.wintopgroup.com/readings/articles/foerster.pdf, 2005.
- [2] Umpleby S. The history and development of Cybernetics, The George Washington University, 2006. //www.gwu.edu/~umpleby/cybernetics/2006%20WMSCI%20tutorial%202.ppt
- [3] von Foerster H. Cybernetics of Cybernetics, Urbana Illinois: University of Illinois. OCLC 245683481. 1974.
- [4] von Foerster H. The Cybernetics of Cybernetics (2nd edition). Minneapolis MN: Future Systems Inc., 1995.
- [5] von Foerster H. Observing Systems. Salinas, CA: Intersystems Publishers, 1981.
- [6] Ashby W R. Principles of the self-organizing system. In von Foerster H and Zopf G (eds), Principles of Self-Organization: The Illinois Symposium on Theory and Technology of Self-Organizing Systems (Hg.) . London: Pergamon Press, 1962, 255-278.
- [7] Maturana H R, Varela F J. Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living. Holland: Kluwer, 1991.
- [8] BAI, Guohua (柏国华) . A sociocybernetic model of sustainable social systems. Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the International Society for the Systems Sciences (ISSS), 2009.
- [9] Beer S. Brain of the Firm. London: Penguin Press, 1972.
- [10] Brian Arthur W, Steven N. Durlauf, David A. Lane. The Economy as an Evolving Complex System II. Santa Fe Institute Series. Westview Press, 1997.
- [11] von Foerster H. Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition. New York: Springer, 2002.
- [12] Pask G. Developments in conversation theory: part I. Int. J. Man-Machine Studies, 1980, 13, 357-411.
- [13] Deissenberg C, van der Hoog S, Dawid H. EURACE: A massively parallel agent-based model of the European economy . Applied Mathematics and Computation. 2008, 204: 541- 552.
- [14] 万百五. 二阶控制论及其应用. 控制理论与应用. 2010, 27(8): 1053-1059.

- [15] Heylighen F, Joslyn C. Cybernetics and Second-order Cybernetics, In Meyers R A (ed.), Encyclopedia of Physical Science & Technology (3rd ed.). New York: Academic Press, 2001.
- [16] Müller A, Müller K. (eds.), An Unfinished Revolution?: Heinz von Foerster and the Biological Computer Laboratory BCL 1958–1967. Echoraum: Vienna, 2007.
- [17] Glanville R. Second order Cybernetics. in Encyclopedia of life support systems. Oxford: EOLSS Publishers, 2002.
- [18] Wikipedia, the free encyclopedia. Heinz von Foerster. [en.wikipedia.org/Heinz von Foerster](http://en.wikipedia.org/Heinz_von_Foerster). 2014.