

智能控制

超越世纪的目标

——国际自动控制联合会第14次代表大会报告

宋 健

Intellectual control—A goal exceeding the century
—speech on the Fourteenth Conference IFAC

Song Jian

国际自动控制联合会 (IFAC) 第14次代表大会是本世纪最后一次, 能在北京召开, 中国科学界和工程界都无比高兴。我代表中国科学界和工程界的同行们, 向世界各国来京出席会议的同行和朋友们以及他们的家属表示最热烈的欢迎。

今年是 IFAC 成立 42 周年。1957 年在巴黎成立了第一届理事会, 中国是发起国之一。我有幸参加过在莫斯科召开的第一次代表大会。记得, 那是一次盛大的科学集会, 向全世界宣布了 IFAC 的诞生。20 世纪对控制论科学做出过重大贡献的杰出科学家们, 如 Norbert Wiener, Lev Pontryagin, Rudolf Kalman 等都出席了那次大会。现代工程控制论的先驱钱学森博士, 当时刚从美国回到他的祖国, 代表中国当选为 IFAC 第一届理事会成员。由于他受命主持中国的航天发展计划, 未

能出席莫斯科会议, 很多人都感到遗憾。由于 N. Wiener 在他的《控制论》(Cybernetics) 中把动物界和机器相提并论, 50 年代在哲学界曾引起轩然大波。人也是动物, 把人与机器等同起来, 有亵渎人类尊严之嫌, 就像哥白尼 (Copernicus, 1473—1543 年) 把地球从宇宙的中心搬到太阳系的一个角落而触怒了神学家们一样, 引起了激烈争论。有人骂控制论是“伪科学”。钱学森博士在《工程控制论》(Engineering Cybernetics, 1954) 一书中系统地揭示了控制论这一新兴学科对电子通讯、航空、航天和机械制造业的重要意义和深远影响, 情况才有了变化, 哲学界有些人的反控制论热潮才平息下去。到 1960 年, IFAC 第一届代表大会时, 控制论的反对者们已销声匿迹了, 所以那是一次庆祝胜利的大会。

近40年后的今天,与50年代相比,控制论和自动化技术的应用发生了天翻地覆的变化。由于微电子技术和计算机技术的迅速进步和普及,自动控制技术已广泛应用到制造业、农业、交通、服务业、航空、航天等所有产业部门。在制造业中,从计算机辅助设计与制造,数控机床,到柔性加工系统和计算机集成制造系统以及机器人的广泛进入生产线,成十、成百倍地提高了社会的劳动生产率,增强了脑力劳动创新能力,丰富了工业产品的多样性,改善了人们的劳动条件,提高了人们的生活水平。

在今天的社会生活中,自动化装置无所不在。通讯、金融业已接近全面自动化;医疗器械和仪器的自动化程度日益提高;自动化装置已广泛进入家庭,成为家庭主妇们须臾不能离开的东西。最近半个世纪,控制论和自动化技术为人类文明进步做出了重要贡献,很久以后的人们将会纪念这一代人的贡献。

现代自动控制技术的进步,为科学研究和探测工作开辟了新的可能性,开拓了靠人力所不能胜任的新科学事业。90年代实现了6 000~10 000 m深海探测。实现了对太阳系的金星、火星、木星及一些卫星和慧星的探测。哈勃空间望远镜的轨道运行给天文学家研究宇宙提供了前所未有的工具和机会。1997年美国科学家们研制的探路者号(Pathfinder)小车胜利地完成了火星表面的实地探测,是本世纪自动化技术最高成就之一。

分子生物学家们现在正在进行雄心勃勃的“人类基因组计划”(HGP, Human Genome Project),极大地得益于自动化装置。他们利用半自动DNA(脱氧核糖核酸)测序设备,到1998年已完成了总数为 3.5×10^9 中的 2×10^7 个碱基对的测序。最近又有公司研制出自动化测序装置,为人类基因组计划提供了更快、更准和更便宜的自动化科学设备。

40年来,在五六十年代一批杰出成就的基础上,控制理论本身又有了显著进步。首先,从线性近似到非线性系统研究取得了新的成就。本来,世界上真正的线性系统很少,取线性近似是不得已而为。直接在微分流形上研究非线性系统,借助微分几何的固有非线性框架,丰富的几何结构,

如李群、纤维丛、分布等构造,可以描述一大类微分动力学系统。由于非线性系统的研究越来越显得重要,越来越多的科学家转向这一研究方向,这将把控制论引向更广阔的道路,并可能开辟全新的前景。离散事件动力系统(DEDS)理论的形成,大大扩展了对离散系统的描述和分析能力,对制造业和服务事业具有重要价值。分布参数系统的研究又有了新的突破,对解决弹性体和含有连续介质的受控对象的控制有重要意义。带有不确定性的 H_∞ 控制和系统对外扰的强健性分析设计是在无穷维空间进行的。实践已经证明,系统或参数识别理论和技术对加工随机信息与处理不规则来源的数据具有不可代替的应用价值。自适应、自校正、容错、自组织系统的研究和应用又有了新的发展,这些功能的集成使控制系统的智能大为增加,从而出现了新的、具有远大前程的“智能控制理论”研究方向。

机器人学的进步和应用是本世纪自动控制最有说服力的成就,是当代最高意义上的自动化。仅仅花了20年,机器人从爬行学会了两腿走路,成为直立机器人,而人类从爬行到直立花了上百万年。机器人已能用手使用工具,能看、听、用多种语言说话。它安心可靠地去干最脏最累的活。据估计,现在全世界已有近100万个机器人在生产线上工作。有近万家工厂在生产机器人,销售额每年增长20%以上。机器人正雄心勃勃,21世纪进入服务业,当出租车司机,到医院去当护士,到家庭去照顾老人,到银行里去当出纳。

如果微电子学再进一步,就可以把IBM/6000SP挤进它的脑袋里,运行Deep Blue软件,像1997年5月击败世界冠军Gary Kasparov那样,使世界象棋大师们望而生畏。Isaac Asimov曾设想,“机器人有数学天才,能心算三重积分,做张量分析题目如同吃点心一样”,已不难做到。

60年代出现过的恐惧和反对自动化和机器人的社会心态已被证明是没有根据的。今天,一些应用机器人最多的国家失业率并没有明显升高,即使有,也没有人指责控制科学家和工程师,那是金融家和政治家们的过错。相反,智能技术广泛进入社会,有利于提高人民的生活质量,提高劳动生产率,提高全社会的文化素质,创造更多

的就业机会。

控制论的理论、概念和方法在计算机技术的支持下,已经远远超越了40年前主要为工业生产和军事装备的服务范围,广泛应用到政治、军事和社会科学的各领域。过去20年来,经济学家们从控制论中得益而获得新成就是有目共睹的事实。原属于控制论学科中的专业概念和术语,如正负反馈,系统分析,分叉,非线性系统,系统工程等已被自然科学、社会科学各学科所接受和采用,往往能在完全不同的学科中引导出令人意外的新发现。经济学家们从控制科学受益已是众所周知的。很多大学都把控制理论列为所有工科和部分社会科学学生的必修课。

近年来,让控制科学家最为兴奋的是,许多政治家和国家领导人开始理解控制论中的理论、概念和方法的重要性,他们很多人在演讲或论文中广泛使用控制论的语言去阐明社会政治问题。例如,在美国副总统的书中就大量使用控制论的观念和语言讨论社会问题。当政治家们遇到某些棘手的政治问题时,他们时常寄希望于系统科学家伸出援助之手,即使后者的研究工作从来未涉及到政治问题。这种形势常使控制论和系统科学家们冷暖皆忘,把酒临风,心旷神怡。

最近20年来,控制论和系统科学对国际社会、政治和法律事务产生过强大影响的领域中,人口学的发展可能是有代表性的。

自从Thomas Malthus于1789年发表了《人口论》以来,思想界和政治家们争论了近200年。20世纪,特别是下半叶世界人口猛增,引起了科学界的广泛关注。1994年9月,联合国专门召开了开罗高峰会议,讨论世界人口问题。控制人口增长是这个会议的主题。今天,世界人口已近60亿,比二战前增加了一倍,每年仍以8000万人的速度增长。亚洲人口为32亿,占世界人口53%。据联合国预测,到下世纪中叶,世界人口可能超过100亿。新增人口主要在发展中国家,集中在亚洲和非洲。中国和印度两国现在已超过20亿,占亚洲人口的2/3以上。科学家们担心,如果不控制人口增长,很快将超过地球的承载能力。科学家们普遍认为,人类只有控制住人口的增长,才能实现21世纪可持续发展。

20世纪,很多人口学家定量研究过人口增长问题。80年代以来,控制论科学家广泛介入人口发展过程的研究,对人口系统稳定性和控制规律取得了意想不到的新突破,找到了人口系统稳定性的判别准则和从常规人口统计数据中计算这个准则的方法。在人口统计中有一个关键指标叫做人口总和生育率(Total Facility Rate, TFR),它的意义是全社会平均每个妇女一生所生孩子数。从控制论关于系统稳定性的观点出发,容易证明,对每一个国家的TFR存在一个极限值,我们叫它做“双向生育率极限”,记为 β_{cr} ,如果TFR大于这个极限值,即 $TFR > \beta_{cr}$,人口动力学方程的本征值出现正值,人口数量将永远增长下去,永无停止之日。如果 $TFR < \beta_{cr}$,本征值为负数,人口数量将逐步减少。如果长期保持 $TFR = \beta_{cr}$,则人口数量迟早会稳定下来,最终停止增长。人口学中存在了100多年的这一关键问题,只有借助控制论的概念和方法才得到了完全的解决,这已为世界人口学家所接受。人口学历来被认为属于社会科学范畴,控制理论的介入,取得了意想不到的成功。

我们很高兴的是,中国政府完全接受了这一理论,制定了中国的计划生育政策。80年代中国的临界生育率是2.16,1979年TFR已降到1.8,远低于临界值。只要坚持当前的政策,30年后中国的人口将停止增长。至少中国不会发生“人口爆炸”。

站在进入21世纪的门槛,回顾人类文明进步的近代史,如果说19世纪实现了社会体力劳动机械化,延伸了人的体力,那么20世纪的主要特征是实现了劳动生产自动化,极大地提高了社会劳动生产率,创造了比过去任何时期都多得多的社会财富,彻底改变了人类的生产和生活方式,提高了人们的生活质量,延长了人类的平均寿命。这完全是现代科学技术的功劳。我们可以感到骄傲的是,控制论科学家和工程师们为此做出了重要贡献。预计21世纪,自动化技术仍将是高技术前沿,继续是推进新技术革命的核心力量。制造业和服务业仍然是它取得辉煌成就的主要领域。

在展望21世纪时,我们不能不注意到,20世纪世界上已经和正在出现的一些重大问题,将

由我们和下世纪的人们去解决。首先,也是最大的挑战,要在世界人口增长一倍的情况下,保证全人类的食品安全和生活必需品供应。物质财富的生产和安全供应将永远是人类生存和发展的根本保障,制造业和服务业永远是人类社会生活的支柱,据世行统计,制造业仍占发达国家GDP的30%。克林顿总统说:制造业一直是美国经济的支柱,世界80%的人口生活在发展中国家,还有10亿人口经常处于饥饿威胁之中。联合国年年发表宣言,科学界不断疾呼,全力保障下世纪各国人民的食物和生活必需品的充足供应是各国政府的责任,也是科学界的义务。继续发展和推广应用工业、农业生产中的自动化技术仍将是21世纪控制论科学家和工程师们的光荣任务。特别是发展中国家应该培养更多人才,通过技术转移和学习,普及和推广应用自动化技术,提高社会生产力,拯救仍处于贫困中的妇女和儿童。最近有人说:“人类将越来越多地使用比特,越来越少地使用原子”。前一句是对的,对21世纪信息技术的作用怎么估计都不会过分。这后一句可能把人们引入歧途,至少在发展中国家中不能成立,要当心上当。

扩大控制理论的应用范围,将会是21世纪的社会需求和不可避免的发展趋势。为解决人类面临的重大社会问题和全球性问题,如防止金融危机,控制人口增长,保障食品安全,保护生态环境系统,预测和控制气候变化等这些大系统、巨系统性问题,控制论科学家们应该伸出手来,助人一臂之力。现在各行各业的专家们都在广泛采用建模、系统分析和系统模拟的方法研究自己领域中的问题。在控制理论中发展起来的一些新概念和方法,如系统识别,滤波,参数估计,最优控制,模糊控制,强健性分析等,对他们也可能派上用场。很多国家领导人,都曾真诚地邀请控制论科学家帮助研究一些重大社会政治问题。可以预见,21世纪这种需求会更加迫切。

举例说,气候变化是当前重大问题之一,近几年被新闻界炒得沸沸扬扬,人们心惊胆战,一直上升至联合国最重大的国际政治问题。先是酸雨问题,后来是臭氧洞,现在又是气候变暖,海平面上升,夏天的炎热,冬天的严寒,冰雪融化

等等,新闻界几乎每天都在为预示人类毁灭增加证据。

其实,我们所听到的所有关于气候变化的推测都来自气候学家和气象学家的系统分析和计算机模拟。他们采用的主要模型叫全球环流模型(GCM, General Circulation Model)。模型中包括了大气、海洋、热、水气、云雨等10多组微分方程,地球表面温度,水蒸气的蒸发源和汇,海气热交换等边界条件和初始条件。几乎所有变量之间都有交叉反馈。为了在计算机上模拟中短期气象变化,经离散化处理后,每次要求解2亿多个代数方程,处理2万多份地面边界条件,7万多份卫星遥感数据。气象学家们承认,模型中含有许多不确定因素和随机量,甚至“到目前为止,我们并没有真正了解全球气候变化的机理”。更有甚者,气候学家各用自己的模型,全世界有40多种,仅美国就有14种,彼此差别很大。我们敬佩气候学家的艰苦努力和敢于攻关的精神,为他们已取得的成就而高兴。但是,回想过去广泛流传的关于短期天气预报的笑话,著名气象学家E.Lorenz无可奈何地称之为“蝴蝶效应”和混沌,气象学家们使用世界上最快的计算机,几个月后的中期天气预报尚且没有完全解决。可以理解,欲研究几十年后以至100年后的气候,他们所遇到的困难是多么巨大。我深信,这类问题的彻底解决,需要数学家,控制科学家和工程师们的参与和帮助,就像伟大数学家Lev Pontryagin和杰出的科学家C.Shannon对控制论所做过的那样。

早在50年代人们开始在计算机上进行科学运算和数据处理时,很快就发现计算机还可以做很多其它非数值计算方面的事,如逻辑推理,数据库,图像处理,奕棋等,开始被称之为人工智能(Artificial Intelligence, AI)。1969年在美国召开了第一届国际人工智能联合大会(International Joint Conference on Artificial Intelligence),这在全世界范围内产生了重要影响,推动了人工智能的研究,其中发展特别迅速的是计算智能(Computational Intelligence)。同一时期,分子生物学和生命科学取得了重大突破,发现了生物遗传基因染色体——脱氧核糖核酸的双螺旋结构。这些重大科学成就推动了科学界对人工生命的研究。

了解生命的科学原理是自然科学各学科的长期追求。生物体中的自动控制系统能完美地维持生命的发生、发展、代谢、免疫和遗传早就引起了科学界的注意，在人们认真讨论生命的本质和人工智能(AI)时，才想到原来控制理论和在大量运行的自动化装置中已经含有生命发生和发展以及人工智能的部分原理和因素。科学界现在普遍认为，控制论和自动化为生命科学的进步起到了引导作用。

在生命科学和人工智能的推动下，控制理论和自动化领域出现了提高控制系统智能的强大趋势。1992年成立了一个新学术团体，智能自动化国际联合会(IFIA, International Federation on Intelligent Automation)，标志智能控制研究已进入了科学前沿。对这门新学科今后的发展方向和道路已经取得了一些共识。可以列举以下诸点。

第一，研究和模仿人类智能是智能控制的最高目标。人们把能自动识别和记忆信号(图像、语言、文字)，会学习，能推理，有自动决策能力的自动控制系统称为智能控制系统。

第二，智能控制必须靠多学科联合才能取得新的质的突破。生命科学和脑科学关于人体和脑功能机制的更深入的知识是不可缺少的。揭开生物界的进化机制，生命系统中自组织能力，免疫能力和遗传能力的精确结构对建造智能控制系统极为重要。这主要是生物化学家和遗传学家的任务，但控制论科学家和工程师们能够为此做出贡献。

第三，智能的提高，不能全靠子系统的堆积。要做到“整体大于组分之一”，只靠非线性效应是不够的。智能越高系统将越复杂。复杂巨系统的行为和结构必定是分层次的。子系统与整体的利益和谐统一是有机体得以生存发展的基本原则。每一个层次都有自己的新特质和状态描述。要建立每个层次能上下相容的结构和与周边友好的界面。统计力学中从分子热运动到气体宏观状态参

数的抽取是层次划分的范例，这就是物理学家们称之为“粗粒化”抽取(Coarse-graining extraction)的最好说明。

第四，世界一切生物进化都是逐步的，人类从新石器时代到机器化经历了1万年。从机械自动化到电子自动化仅用了100年。要做到智能自动化，把机器人的智商提高到智人水平，还需要数十年。这是科学技术进步不可逾越的过程。20世纪后半叶，微电子学、生命科学、自动化技术突飞猛进，为下世纪实现智能控制和智能自动化创造了很好的起始条件。为达到此目标，不仅需要技术的进步，更需要科学思想和理论的突破。很多科学家坚持认为，这需要发现新的原理，或者改造已知的物理学基本定理，才能彻底懂得和仿造人类的智能，才能设计和制造出具有高级智能的自动控制系统。无论如何，进程已经开始。可以设想，再过50年，第31次IFAC大会时，人类的生产效率将比现在提高10倍，不再有人挨饿。全世界老人都可以有一个机器人服务员，在身边帮助料理生活。每一位参加会议的人都可能在文件中带一个机器人秘书，就像现在的电子笔记本一样。

21世纪对人类是一个特别重要的历史时期。世界人口将稳定在较高的水平上，例如120亿，比现在翻一番。科学界要为保障人类和我们的家园——地球的生存和可持续发展做出必须的贡献，而控制论科学家和工程师应当承担主要任务。进一步发展和大力推广应用控制论和自动化技术，保证未来的后代在一个没有短缺、饥饿和污染的世界里生活得更幸福，是天赋我责。正如物理学家Murray Gell-mann所说，在可见的未来，包括人类在内的自然进化将让位于人类科学技术和文化的进步。Cybernetics来自希腊文，原意为舵手，我们至少有资格成为舵手们的科学顾问和助手，对推动社会进步发挥更大作用，这是我们的光荣。

