

略论复杂性问题和非线性复杂网络系统的研究^{*}

方锦清¹ 汪小帆² 刘曾荣³

(中国原子能科学研究院, 研究员、博士生导师 北京 102413; 上海交通大学², 教授、博士生导师; 上海大学³, 教授、博士生导师)

〔摘要〕 目前, 国际上已形成了非线性科学和复杂性问题、复杂网络的研究热潮。本文介绍了复杂性问题与复杂网络的开创性研究工作, 论述了复杂网络的基本特征和网络建筑艺术与方法, 比较了生物系统中的复杂网络, 指出复杂性科学研究及其应用对 21 世纪的科学与社会的发展具有重大的作用。

〔关键词〕 非线性科学 复杂性科学 复杂网络 生物系统 [中图分类号] O4 N94

上世纪兴起的复杂性科学及其复杂性研究, 在世纪之交已经引起了国内外的普遍关注和广泛重视^[1-10], 正以锐不可挡之势向着众多学科和领域, 包括自然科学、社会科学和人文科学进行广泛的交叉和融合。正如当代最富有影响的思想家之一——史蒂芬·霍金 (Stephen Haking) 在 2000 年所指出的: “我认为, 下个世纪将是复杂性的世界 (I think the next century will be the century of complexity)”^[1]。从科学发展史来看, 牛顿力学问世以来, 还原论的研究方法主宰了现代科学中的众多领域。该法把系统分解为大量的基本单元, 认为这些单元的行为及其相互作用遵从普遍而简单的自然法则。该方法虽然取得了巨大的成功, 但是它同样存在极大的局限性, 因为它仅仅适用于“简单系统”, 而无法或根本不适用于自然界中大量存在的“复杂系统”。大量客观事实和科学论证表明: 不能用还原论来处理复杂系统, 简单地说就是 1 加 1 并不等于 2; 不能用单元的个体性质来预言复杂系统整体的丰富的行为。随着 20 世纪科学的巨大进步, 复杂性研究正越来越被人们所认识, 但是它的奥秘还没有被完全揭开。预期 21 世纪将是复杂性的世纪, 复杂性科学将成为新世纪的主导科学之一, 涉及到非常广泛的学科, 特别是物理科学、生命科学、信息科学和社会、经济科学等主要领域。当前国际上迅猛发展的态势和迫切需要, 使它成为新世纪科学研究的前沿之一, 有着广阔的应用潜力^[12-15]。

一、复杂性问题与复杂网络

从 20 世纪七八十年代开始, 复杂性问题的研究引起国内外关注, 并与非线性科学及其混沌动力学的复杂性研究交错在一起, 在国际上形成了非线性科学和复杂性问题的研究热潮。国内外以非线性和复杂性命名的研究所或中心纷纷成立。最引人注目的是, 1984 年由 3 位诺贝尔奖得主盖尔曼 (Murray Gell-Mann, 物理)、安德森 (Philip Anderson, 物理) 和阿罗 (Kenneth Arrow, 经济) 组建的美国桑塔菲研究所 (Santa Fe Institute), 这是一个国际性的不同领域

的科学家关于复杂性问题的研究中心。该所向全世界开放, 研究人员来自各国的不同学科的科学家, 包括物理学家、生物学家、计算机科学家和经济学家, 等等。他们在一起自由讨论和研究感兴趣的几乎所有的复杂性问题, 例如自组织现象和自组织临界性、自适应问题、计算机与智能问题、生命与生物的演化 (包括人工生命)、全球经济的演化、人类文化和语言的演变, 等等。我国自 2000 年开始在国家自然科学基金委员会支持下设立了“复杂性科学”专项基金资助, 开展了物理、经济和生物等领域的复杂性问题的研究, 目前正在组织不同学科学者进行交叉研究, 更广泛深入的探索工作已经提到我国基础研究的日程。

由于复杂性问题研究与网络的复杂性关系有密切联系, 所以近年来它们之间的交叉研究引起了人们的高度重视。我们知道, 从数学上能够用一个图来表示一个网络, 复杂网络的理论研究始于 20 世纪 60 年代由著名数学家 Erdos 和 Renyi 提出的 ER 随机图模型。在此后的近 40 年里, 该模型一直是研究复杂网络的基本模型。但是, 近年来复杂动力学网络的研究已经突破了该模型, 取得了可喜的进展, 受到了不同学科的广泛关注。进展的主要原因之一是, 以还原论和整体论相结合为重要特色的复杂性科学的兴起, 促使人们开始关注复杂网络的拓扑结构及其产生机理。随着计算能力的日益强大, 以及学科之间的相互交叉和不断融合的必然趋势, 目前已经开始对复杂性科学进行交叉研究, 从生物体中的大脑到各种新陈代谢网络, 从 INTERNET 到万维网 (WWW), 从全球卫星通讯网络到全球交通网络, 从大规模集成电路到大型电力网络, 从科研合作网络到各种经济、政治、社会关系网络等, 可以说, 人们已经生活在一个充满着各种各样的复杂网络的世界中。

近几年来, 复杂网络的研究正渗透到从物理学到生物学的众多不同的学科, 对复杂网络的定性特征与定量规律的深入探索、科学理解以及可能的应用, 已成为网络时代复杂性科学研究中一个极其重要的挑战性课题。

特别是, 国际上有两项开创性工作掀起了一股研究复杂网络的热潮。一是 1998 年 Watts 和 Strogatz 在《Nature》杂志上发表文章, 引入了小世界 (Small-World) 网络模型^[7,9], 以描述从完全规则网络到完全

^{*}国家自然科学基金资助项目: Nos. 10247005, 70371068, 70070147, 70271072, 10372054, 10171061; 国家杰出青年基金资助项目: 60225013。

随机网络的转变。小世界网络既具有与规则网络类似的聚类特性,又具有与随机网络类似的较小的平均路径长度。二是1999年Barabasi和Albert在《Science》上发表文章指出^[8],许多实际的复杂网络的连接度分布具有幂律形式。由于幂律分布没有明显的特征长度,该类网络被称为无尺度(Scale-Free)网络。人们相继提出并研究了多种复杂网络模型及其性质,特别是这类网络的拓扑结构与网络行为之间的关系、它们的同步问题,以及复杂网络对于随机性“故障”、“错误”和“攻击”的“鲁棒性”与“脆弱性”的关系,等等。但是,关于小世界网络模型和复杂网络的连接度分布具有幂律形式的两项发现,正如Albert和Barabasi所指出的,“迄今为止的研究只是尝到了一杯冰淇淋的尖端而已”。

当前非线性复杂动态网络的研究正渗透到从物理学到生物学的众多不同的学科,提出了许多更具挑战性的课题,人们对网络的复杂性奥妙的研究只是揭示了冰山的一角,大量复杂网络的奥秘有待于深入探索和研究。推进复杂性科学在我国的交叉研究,深入探索和科学理解复杂网络的定性特征与定量规律,使它获得广泛的应用,对我国科学和社会的发展具有十分重大的长远意义。

二、复杂网络的基本特征和网络建筑艺术与方法

复杂网络的优美结构和新奇的规律,越来越吸引着人们去探索更多的奥妙。概括地说,绝大多数实际的复杂网络具有如下5个特征。(1)网络的大规模性和行为的统计性:网络节点数可以有成百上千万,甚至更多,大规模性的网络行为具有统计特性。(2)节点动力学行为的复杂性:各个节点本身可以是各非线性系统(可以有离散的和连续微分方程描述),具有分岔和混沌等非线性动力学行为。(3)网络连接的稀疏性:一个有 N 个节点的具有全局耦合结构的网络的连接数目为 $O(N^2)$,而实际大型网络的连接数目通常为 $O(N)$ 。(4)连接结构的复杂性:网络连接结构既非完全规则也非完全随机,但却具有其内在的自组织规律。(5)网络的时空演化的复杂性:复杂网络具有空间和时间的演化复杂性,展示出丰富的复杂行为,特别是网络节点之间的不同类型的同步化运动[包括出现周期、非周期(混沌)和阵发行为等运动]。大多数实际的网络系统同时具有3个主要特征:小世界、无标度和高集团度。

如上所述,复杂非线性动态网络的特点之一是:不仅网络上节点具有非线性和复杂性(它取决于具体研究或应用的对象,其内容、形式可以多种多样),而且复杂动态网络系统的连接结构和时空演化更是错综复杂、丰富多彩。这就向复杂性科学、非线性动力学和复杂网络理论等交叉科学提出了一系列极富挑战性的新课题。特别需要强调的是:其中复杂动态网络系统的时空演化中出现的复杂性,尤其是各类同步问题,包括广义同步的物理机制及其控制方法等问题,是迄今尚未解决的一类难题,也是众多领域中都存在的值得共同研究的复杂

性课题。这些研究将在复杂网络系统中占有头等重要的位置。

长期以来,同步一直是科学技术中的一个重要的基本概念,耦合振子之间的同步化运动是解释许多自然界中同步现象的基础。因为自然界及实验室里存在着大量的同步现象,具有相当大的普遍性。同步研究的最早发明者是惠更斯。历史上为了弄清不同领域的同步机理,科学家们经历了漫长的探索道路,从20世纪60年代开始,数理生物学家利用计算机的突破与实验者合作,借助于物理学中的概念及数学的新成就,一直到20世纪80年代末才取得了突破性进展。特别是,应用物理学中的对称破缺理论,对相同的表面上对称的振荡子相互耦合时所出现的一般模式进行了分类,而且把同步与相变类比,从统计力学的新高度认识存在于自然界及实验室中的同步现象及其原理。这些表明:生物学与物理学及其它领域之间存在一种内在的联系,物理学的耦合振子理论和对称破缺理论为研究同步现象提供了理论基础。

令人惊奇的是,1990年初Pecora和Carroll从电子学线路实验证明了混沌同步。他们的论文在《物理评论通讯》上发表后,立即在全球引起了轰动,打开了混沌应用的新天地,特别在利用混沌复杂性的同步特性进行秘密通讯等方面显示了应用前景。然而这些同步仅限于两个或少数小系统之间。现实是,复杂动态网络中存在着的多种同步,尤其涉及多种类型的广义同步,是非常复杂的,其产生的物理机制迄今尚不清楚,需要进一步深入探索。

目前绝大多数关于大型动态网络同步的工作均假设网络具有完全规则的连接结构,如最近邻耦合和全局耦合结构等,极少数工作探讨了具有完全随机的连接结构的动态网络的同步化问题。尽管已有的研究结果表明,当网络耦合强度足够大时,网络节点之间会产生同步化行为,但这一结果并不能解释为什么即使在网络耦合相当弱的情形下,一些实际的复杂网络的节点之间仍会产生同步化行为。笔者在这方面的研究与国际上的研究可以说是同步的^[11-15]。例如,我们分别研究了具有小世界和无尺度拓扑结构的复杂动态网络的同步化能力,并分析了同步化能力对于随机性故障的鲁棒性和对于有意攻击的脆弱性。此外,我们还初步探讨了复杂网络的稳定性问题。

复杂网络具有优美的结构,由此引出网络建筑艺术的问题。

从理论上说,网络建筑艺术五彩缤纷、多种多样。核心的问题是如何研究各种网络的结构、揭示网络结构与功能之间的关系、发现它们的规律、探索最佳网络设计及其应用。例如,可以把一些已知的简单非线性子系统作为构造复杂网络系统的基本单元(作为节点),通过不同形式的耦合构造出任意高维的复杂动态网络系统。这样的系统在物理上常称为高维超混沌系统和时空混沌系统,这里统称为“混沌复杂网络系统”,属于一大类典型的复杂动力学网络系统。因为这类复杂网络系统出现的复杂现象具有典型性和普遍意义,诸如周期、分岔、混沌、阵发行为和种种时空斑图,广泛存在于物理、生物、计算机网络和社会、经济等众多领域,具有许多

基础科学

非线性动力学复杂网络的基本特性。迄今,从数学、物理上描述这类复杂性的方程主要有以下类型:各种耦合映象格点(CML)、耦合常微分方程组(CODE)、元细胞自动机、人工神经网络系统等,可以根据研究需要来适当选择这些大系统上基本单元的动力学方程(取决于具体研究对象),并结合国际上复杂网络连接结构的研究进展,合理地把基本单元的动力学方程用到复杂网络系统的结点上去。通过深入研究,可望了解复杂网络系统的复杂性的基本特性、斑图和同步形成的物理机理。这方面的研究国内外已经积累了理论基础。应该看到,涉及到超混沌和时空混沌的同步和控制比一般的同步和控制更为困难、更具挑战性。现在网络系统建筑的艺术和方法已经突破早期从数学上随机图论的研究,而更多地采用统计物理学方法进行研究,例如平均场近似、场论、量子统计、重整化理论、蒙特卡罗模拟和主方程,等等。但是,目前对复杂网络的复杂性研究的方法,仍然需要进一步探索和创新。

三、生物系统中的复杂网络

生物系统几乎都是复杂系统。“人类基因组计划”引发的生命科学革命带来了一个崭新的“后基因组时代”。在这个时代,研究者意识到,必须在成千上万个生物分子组成的复杂系统的层面上认识生命现象,而这种成千上万个生物分子在结构上都表现出网络的特征,所以可以说,今天的生命科学正面临着一个新的转型期:要以生物分子所组成的网络的结构和功能来认识生命活动^[19]。

在短短几年的研究中,人类以网络观点对涉及生命科学的各个方面进行了广泛的探索,证实了所有这些网络都具有复杂网络的基本性质。这儿简单给出一些例子和有关结果。

1. 细胞网络 Jeong 等人研究了 43 种组织构成的新陈代谢网络^[20]。在这些网络构造中,节点表示为各种基质(比如 ATP、ADP、H₂O),连线用来表示这些基质参与了某种化学反应。研究表明:网络中进入与出去的连线的度分布都服从幂律,其指数范围在 2.0~2.4,因而它们都具有无标度网络的特征。此外还发现网络的平均路径长度对所有组织几乎相同。由于连线为有向,故当时没有研究串接系数。后来,Wanger 和 Fell 研究了 Escherichia coli 细菌的能量和生物合成代谢网络^[21,22],不仅发现度分布服从幂律,而且有小的平均度和大的串接系数(见表 1),从而说明这种网络不仅有无标度特征也具有小世界性质。最近,有人已经开始讨论这种网络上的整体动力学行为,并用所得结果来说明有关的生命现象^[23]。

2. 蛋白质—蛋白质作用网络 在蛋白质—蛋白质作用网络的研究中,节点为蛋白质,连线的存在表示已经有实验证实这两种蛋白质之间是结合在一起的。对酵母的这类网络研究表明其度分布为 $p(k) \sim (k+k_0)^{-\gamma} e^{-(k+k_0)/k_c}$ 。其中 $k_0 = 1$, $k_c = 20$, $\gamma = 2.4$ 。显然它的度分布既不是幂律分布,也不是指数型分布,而是一种具有指数截断型的幂律分布。这种网络表现出广义随机图的特征。

3. 生态网络 生态网络主要考虑食物网。在这种网络中,节点由物种表示,如果两个物种之间存在捕获与被捕获关系,它们之间就用连线加以表示。William 讨论了 7 处地方的食物网^[25]。研究表明,这些食物网的物种数目和平均度数各不相同;但也发现各地的物种之间往往只有少数的连接。这个结果已得到进一步的证实^[26,27],并进一步证实了这些网络具有高串接系数的特点。近来,Montoya 和 Sole 又研究了食物网的度分布^[28],虽然这些网的节点数不多,但表现出明显的非随机性。特别要指出,给出度分布具有指数 $\gamma = 1.1$ 的幂律分布的特征,这个指数与其它网络相比较具有特别小的特点。上述结果的实例在表 1 中给出,从表中可看出其具有无标度和小世界特征。但后来,Camacho 又给出适合指数分布的食物网的例子^[29,30]。考虑到网络拓扑结构的研究往往需要很多的数据,因而这方面的工作还有待更进一步深化。

4. 蛋白质折叠网络 蛋白质在折叠过程中,顺序地经过一系列构象。我们把蛋白质每个不同构象作为不同的节点。如果两个构象可以互相得到,则认为有一连线。文献[31]研究了两维格点聚合物构象所形成的网络,发现其有小世界性。其平均路径长度随聚合物大小增长以对数形式成长,串接系数比对应的随机图大得多,有小世界特征。但其度分布服从高斯分布,没有显示出无标度性质。

5. 神经系统 线蠕虫 C. elegans 神经系统具有 282 个神经元。如果把神经元看成节点,两个神经元之间是否存在连线决定于它们之间是否有突触或缝隙。对用这种方法所构成的网络进行研究,发现平均路径长度近似于同样大小随机图所具有的平均路径长度,而串接系数比同样大小的随机图高很多,即这种网络具有小世界性质(具体数据见表 1)。但它的度分布是在中间大小的 k 处有一峰值,然后指数衰减^[7]。

表 1 若干种复杂网络的基本性质比较

网络	大小	<k>	L	L _{rand}	C	C _{rand}	Y _{out}	Y _{in}
E. Coli 基质图	282	7.35	2.9	3.04	0.32	0.026		
E. Coli 反应图	315	28.3	2.62	1.98	0.59	0.09		
Ythan estuary 食物图	134	8.7	2.43	2.26	0.22	0.06	1.05	1.05
Silwood park 食物图	154	4.75	3.4	3.23	0.15	0.03	1.13	1.13
C. Elgans 神经网络	282	14	3.65	2.25	0.28	0.05		
C. Coli 代谢网	778		3.2	3.32			2.2	2.2
蛋白质 S. cerev 作用网	1 870						2.4	2.4

注:表中, k 是度平均数;L 为网络平均路径长度, L_{rand} 为对应的随机网络平均路径长度; C 是串接系数, C_{rand} 为对应的随机网络串接系数; Y_{in} 和 Y_{out} 分别代表进入和出去连线的度幂律分布的指数。

由于实验困难,对高级动物的神经系统尚缺乏精确的实验结果,但从大脑中突触所具有的量级可分析出高级动物的神经系统也应具有小世界网络的性质。加上在大脑电活动中斑图结构以及神经元电活动中的同步行为的实验结果,使得我们认识到

有可能用复杂系统(包括复杂网络)和非线性动力学方法分析大脑活动的机理^[31-35]。也就是说,大脑是由许多相互作用的基本单元(神经元和胶质细胞)组成的最复杂的网络系统;从复杂性科学的角度来看,大脑确实表现出复杂网络的非线性和复杂性的许多特点。例如,神经元构成网络就是一种典型的复杂网络,神经元的电活动表现出各种同步特性。这种同步特性是构成脑中有序态的基础。因此,可以从复杂网络的同步特性出发,对大脑的复杂性进行交叉研究,这不仅有利于对大脑活动的理解,而且本身也会丰富复杂性的新知识和促进复杂性科学的发展。

四、研究与应用前景展望

最近,国家和省市府陆续推出与复杂网络系统的复杂性研究紧密相关的重大课题和重点项目。例如,国家自然科学基金委员会2003年推出两个重大研究计划——《以网络为基础的科学活动环境研究》和《化工过程中的时空多尺度结构及其效应》,以及一些有关的重点项目——《时空斑图和时空混沌系统的研究》、《复杂非线性力学系统的分析与控制研究》、《复杂动态系统的建模与控制》、《基于互联网络的控制理论与方法研究》、《化学工程中的复杂系统及其多尺度方法》,2004年即将推出重点项目《非线性复杂网络系统的复杂性研究》;北京市科委2003年也推出重大项目《网络计算机(NC)的产品研发及其示范应用》,包括《基于网络计算机的政府与企业信息化应用示范》等等课题。所有这些项目的研究不仅将可以解决各自领域网络相关的重要科学问题,而且更可以为复杂性科学的发展和应用提供生动的范例。科学论证表明:随着现代高科技的发展,以复杂性研究和网络为基础的科学活动及其应用,已经成为当前国内外研究的一个热点和前沿领域,开展以复杂网络系统为基础的复杂性研究和科学活动环境的研究,将为物理、信息科学、生命科学(生物信息)、大气、天文、石油化工和地质等许多重大领域提供科学活动与应用的平台(如虚拟计算环境)和技术理论基础。

总之,世纪之交的科学研究的进展显示:复杂性—非线性问题的研究已经使人类的认识产生了新的飞跃。面对网络化和信息化时代的巨大挑战和空前机遇,在21世纪复杂性科学必将大有作为,可望取得重大突破。整个复杂网络系统的复杂性及其相关规律的深入研究,必将对我国国防、科学研究、社会和经济的发展以及人们的生活和工作方式产生巨大的影响,并在各个领域获得广泛的应用。

参考文献

- [1] Stephen Hawking (cited by San Jose Mercury News: "Unified theory's getting closer, Hawking predicts," Sunday January 23, 2000)
- [2] 成思危主编. 复杂性科学探索. 北京:民主与建设出版社, 2000
- [3] 方锦清编著. 驾驭混沌与发展高新技术. 北京:原子能出版社, 2002
- [4] 方锦清. 令人关注的复杂性科学和复杂性研究. 自然, 2002, 24(1): 7-15

- [5] Chua L O. (ed.), Special issue on "Nonlinear waves, patterns and spatiotemporal chaos in dynamical arrays". IEEE Trans. Circuits Syst. I, 1995, 42: 557-823
- [6] Erdos P, Renyi A. On the evolution of random graphs. Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci. 1960, 5: 17-60
- [7] Watts DJ, Strogatz SH. Collective dynamics of Small-world networks. Nature, 1998, 393: 440-442
- [8] Barabasi A-L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. Science, 1999, 286: 509-512
- [9] Strogatz SH. Exploring complex networks. Nature, 2001, 410: 268-276
- [10] Albert R, Barabasi A-L. Statistical mechanics of complex networks. Review of Modern Physics, 2002, 74: 47-97
- [11] Wang XF, Chen G. Synchronization in small-world dynamical networks. International Journal of Bifurcation & Chaos, 2002, 12(1): 187-192
- [12] Wang XF, Chen G. Synchronization in scale-free dynamical networks: robustness and fragility. IEEE Transactions on Circuits & Systems I, 2002, 49(1): 54-62
- [13] Wang XF, Chen G. Pinning control of scale-free dynamical networks. Physica A, 2002, 310: 521-531
- [14] Wang XF. Complex networks: topology, dynamics and synchronization. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2002, 12(5): 885-916
- [15] Wang XF, Chen G. Complex networks: small-world, scale-free and beyond. IEEE Control & System Magazine, 2003, 3(1): 6-20
- [16] Gass L. Synchronization and rhythmic process in physiology. Nature, 2001, 410: 277-284
- [17] Steinmetz PN, Roy A, Fitzgerald PJ, Hsiao SS, Johnson KO, Niebur E. Attention modulates synchronized neuronal firing in primate somatosensory cortex. Nature, 2000, 404: 187-190
- [18] Arhem Peter, Blomberg Clas, Liljenstrom Hans. Disorder versus order in brain function. World Scientific, 2002
- [19] 吴家睿. 科学, 2003, 55(3): 27
- [20] Jeong H, Tombor B, Albert R, Oltvai ZN, Barabasi A-L. Nature 2000, 407: 651
- [21] Wanger A, Fell D. Technical Report No. 00-07-041, Santa Fe Institute. 2000
- [22] Fell DA, Wanger A. Nat Biotechnol, 2000, 18: 1121
- [23] Fangting Li, Tao Long, Lu Ying, Ouyang Qi, Tang Chao. The Yeast cell-cycle network is robustly designed. (Preprint)
- [24] Jeong H, Mason SP, Oltvai ZN, Barabasi A-L. Nature, 2001, 411: 41
- [25] Williams RJ, Martinez ND, Berlow EL, Dunne JA, Barabasi A-L. Santa Fe Institute Working Paper 01-07-036, 2000
- [26] Sole RV, Montoya JM. Proc. R. Soc. London. Ser. B, 2001, 268: 2039.
- [27] Camacho J, Guimera R, Amaral LAN. (Preprint cond-mat/0102127), 2001
- [28] Montoya JM, Sole RV. (Preprint cond-mat/0011195), 2000
- [29] Camacho J, Guimera R, Amaral LAN. (Preprint cond-mat/0103114), 2001
- [30] Albert R, Barabasi A-L. Rev. Mod. Phys, 2002, 74: 47
- [31] Barthelemy M, Amaral LAN. Phys. Rev. Lett, 1999, 82: 3180; 1990, 82: 5180(E)
- [32] 刘曾荣. 大脑活动中动力学问题. 21世纪100个交

(下转第64页)

《科技导报》理事会人员名录

名誉理事长：	王海波	河北省农林科学院副院长、研究员
周光召	严纯华	北京大学教授
韩启德	彭克刚	北京时代佳音广告公司总经理
	理事：	
王 选	王渝生	中国科学技术馆馆长、研究员
程 路	肖锦清	哈尔滨工程大学出版社社长、教授
理事长：	卫民堂	西安交通大学出版社社长、教授
冯长根	张 骏	西北工业大学研究生院副院长、教授
	河北北方学院	
副理事长：	李 敏	河北省万全县人民政府县长
袁家军	杨振江	河南省新华书店南阳市店总经理
徐井宏	贾 清	北京计然电子科技有限公司总经理
王永民	王子恒	西安生命源生物工程有限公司总经理
匡镜明	贾伟民	精碳伟业(北京)科技有限公司董事
杜玉波	郑胜国	河北省秦皇岛市直属机关印刷厂厂长
姜澄宇	秘书长：	
潘留仙	陈家俊	科技日报社副社长
常务理事：	副秘书长：	
杨 卫	苏 青	科技日报社副社长、副主编、教授
贺福初	王 剑	科技日报社理事会办公室主任

科技动态

有弹性的机器人皮肤

据英国《新科学家》2003 年 10 月 25 日报道：美国普林斯顿大学的电子工程师 Sigurd Wagner 和 Stephanie Lacour 研究出一种新式连接器，由其连接的宽大的波纹状金属膜埋入一块有弹性的硅橡胶蒙皮中。这种波纹状金属膜即使长度拉伸 1 倍也仍然能导电，而不像一般的导线会拉断。他们认为用这种波纹金属膜制作机器人皮肤是比较理想的。

为了让机器人皮肤具有和人的皮肤一样的功能，机器人的皮肤必须满足两个看起来相互矛盾的要求：一是机器人皮肤必须像人的皮肤一样有弹性，以使机器人行动起来和真人一样敏捷灵活；二是机器人的皮肤上必须有足够多的传感器电路，以便机器人能敏锐地感觉到周围的环境变化。但如果把机器人皮肤上的传感器电路用普通的金属导线连接，这些导线和传感器在皮肤伸长时就会损坏。

Wagner 说，一般的金属薄膜通常很脆，在拉伸长度超过 1 %时，就会断裂，但以 25 纳米厚的黄金薄膜制作的弹性连接器在埋入硅橡胶薄膜时，可以像硅橡胶薄膜一样拉伸至少 15 %，也不会断裂，这是因为黄金薄膜是波纹状的，它在拉伸和压缩时都不易断裂，并且能够导电。

有趣的是，这种波纹状黄金薄膜拉伸的长度甚至超过原来的长度 1 倍，且金膜已经出现裂纹时，仍然能导电。Wagner 现在还不能解释这是为什么。但他推测，这可能是波纹状薄膜拉伸太长时，虽然裂开了，但不平坦的黄金薄膜裂口上仍然有一些保持着相互接触。

Wagner 在内华达州拉斯维加斯举行的机器人学术研讨会上展示了他们研制的粘纹状弹性连接器，并希望在不久的将来先用手制造出可以像气球一样吹起来的有弹性的且可以导电的机器人皮肤，然后再设法用自动化机器进行大规模生产。

(刘先曙)

(上接第 12 页)

叉科学难题：中科院政策局主编，将出版

[33] Liu Z R, et al. A method to generate new exact solution from a know stationary solution, Chinese Physics Letter, 1999,16(5) :313- 315

[34] Liu Z- R, et al. Strange attractors in the orientation -

preserving Lozi map. Chaos, Solitions and Fractals, 1998, 9, (11) :1857 - 1863

[35]Liu Z- R,etal ,Information transmission in human cerebral cortex,Physica D ,1997 ,106:363- 372

(责任编辑 王宏章)