

高科技发展的新领域——驾驭混沌的应用前景*

[关键词] 混沌 控制与反控制 通信 生物混沌控制 激光混沌 [中图分类号] N 04

方锦清

(中国原子能科学研究院,研究员 北京 275 信箱 102413)

高科技既具有突破性、创新性和带动性,又具有风险性,但是它已成为现代科技发展的主流和方向,是生产力中最积极、最活跃的因素。这里所谓“驾驭混沌”是指,对混沌进行控制、反控制和实现同步,以达到既定的应用目标。混沌控制的目标是对混沌系统中存在的不稳定的周期轨道等实现稳定控制或获得所需的动力学行为;混沌反控制则是对一个没有混沌的系统根据需要产生或制造出混沌行为(也叫混沌化),或者维持和增强原来的混沌系统的混沌行为;混沌同步是实现两个或多个混沌系统的混沌轨道的一致性 or 确定关系。自从 1990 年混沌控制和混沌同步取得了突破性进展以来,驾驭混沌方法及其应用研究已成为国内外的一个热门课题,发展了许多驾驭混沌的方法,为高科技提供了新的生长点和发展空间。驾驭混沌的创新知识正为高科技开辟新天地,这是一个值得关注的发展高科技的新领域,国际上已经展开了激烈的竞争态势。诸如:基于混沌的保密通讯和混沌信息技术将在信息时代产生深刻的影响;强流加速器驱动的放射性洁净核能系统,比常规核电更安全、更干净、更便宜,而控制强流束产生的束晕——混沌已经成为强流离子束应用中的关键技术之一;混沌理论在生物医学工程中对探索生物复杂性、人脑奥秘、控制心脏系统和“动态病”治疗等提供了新思路和新方法;混沌控制还大大提高了激光输出功率、改善了激光性能,使激光应用更加广阔。显然,驾驭混沌在国防和国民经济领域都有很大的应用潜力,已引起了世界性的关注。我国正面临这一发展高科技的良好机遇和国际竞争态势。

一、混沌保密通信,大有希望

自从 1990 年以来,利用混沌进行保密通讯及信息处理已成为国际上高技术领域一个新的生长点。2001 年国际上该领域的 5 位专家 L. Kocarev, G. M. Maggio, M. Ogorzalek, L. Pecora 和 K. Yao 共同主编了“在现代通讯系统中混沌的应用”专刊^[7]。他们在专刊“引言”中指出:“现在国际上基于混沌的通

讯系统的发展已经处于成熟状态,已有几种可能的通讯方案被认同并颇具特色”。这个进展增强了人们的信心,看到了混沌通信美好的发展前景。表 1 列出了混沌通信与传统现代通信的对照比较,从表可见,混沌保密通信刚刚研究 13 年,已初露锋芒,显示出潜在的应用发展前景。发达国家正在加紧研制,并取得了明显进展。特别是,由美国加利福尼亚大学两所分校(UCLA 和 UCSD)和斯坦福大学共同组成的混沌通信“大学研究联合体”(MURI)宣称,他们已经取得了杰出的进展。主要表现在 3 个方面:一是提出了混沌脉冲定位调制(CPPM)进行数字通讯的新方法,并建立和实现了自由空间激光通信的演示系统,成功地进行了 2.5 公里的通信试验,同时也研制了混沌保密通信语音电路演示装置;二是改善了通信所需要的非线性混沌系统的关键分析技术;三是解决了通信中需要应用的符号动力学的方法与技术,等等。

表 1 混沌通信与传统现代通信的简单比较

项目内容	通常现代通信	最新混沌通信
历史	100 多年,技术成熟	13 年,新出现的通信技术
通信的 3 种最主要方式	模—模通信、模—数—模通信和数—数通信	同样有通信的 3 种最主要方式
理论与技术关系	门类齐全,体系完整(从信息理论到通信技术,从通信软件到电路硬件……)	开创初期,寻求重点发展,提出一些混沌通信方案,涉及电路、激光和计算机网络系统等
保密技术基础	数学方法为主,涉及复杂的数学知识(数论,各种多项式)和系统复杂性	物理方法为主,涉及利用混沌基本特性(对初值的敏感性、宽谱特性、快速衰减的关联函数)
主要保密基础	已发展许多保密技术,基于各种密钥算法,如:DES, IDEA, 三重 DES, 序列密码算法,单向散列函数(SHA—1, MD—5), RSA, DSA, Fiat - Shamir, Diffie - Hellman 等	有 3 大类:直接利用混沌加密通信;利用混沌同步秘密通信;混沌数字编码的异步通信。发展的主要技术:混沌遮掩、混沌开关、混沌调制三大技术等正在研究中。
保密性抗破译能力	抗破译,保密性好,但仍有漏洞:因为再大的随机性也有周期性,可破译;或十分费时,代价极大;软件的致命漏洞;低效的攻击保护。	从理论上,因混沌具有高度随机性、非周期性、不可预测、快速衰减的关联函数和宽带特性,保密性更强。安全技术问题正在研究中
鲁棒性	鲁棒性好	应用时空混沌可增强鲁棒性;难被攻击

*国家自然科学基金资助项目: Nos. 10247005、70070147, 19807080, 10247005

目前混沌通讯系统的发展正处于实质性应用开发的研究阶段,需要解决一些关键技术,包括:在噪声存在和通道畸变下通信的障碍问题,发射高数据速率时需要发展的具有良好特性的比特—误差(BER)系统,抵制多路传播技术,增强带宽/提高功率谱密度的发送能力,等等。作为一种高新科技的生长点,混沌在通信和信息处理领域将在未来的信息战中具有战略意义。和其他高新技术一样,它既有创新性、战略性、带动性,又带有风险性,但作为一门新兴技术,必将在 21 世纪早日实现,在信息时代发挥其应有的作用。

二、束晕—混沌控制,用途广泛

能源是当今世界范围内最令人关注的重大课题之一,它对国家经济可持续发展的影响最大。目前大量使用化石能源引发了严重的环境污染并导致室温上升,已引起了各国的极大忧虑。世界虽然有太阳能、风能、潮汐能和水力发电等清洁无污染的能源,但从长远看,清洁有效、取之不尽、用之不竭、又能随时随地满足人类社会生产和生活需要的未来能源,是核聚变能。根据能源专家预测:到目前为止唯一能大规模代替化石燃料等常规能源而成为世界主要能源的只有核裂变能。因为到 21 世纪后半叶核聚变能才可能具有商业应用的价值,因此,核裂变能还是新世纪的世界主要能源之一,大力发展和改善核电和核供热已经成为许多国家的重要国策。为此,20 世纪 90 年代世界上已经提出了加速器驱动的放射性洁净核能系统(ADS),它是新一代更安全、更干净的核能系统,代表了 21 世纪极富诱惑力的核能发展方向。它的巧妙就在于把 20 世纪最重要的两大核科学装置——加速器和反应堆两者很好地结合起来,从而克服了常规核电的弊端。但是,它同时面临着诸多高新技术的极大挑战,其中的困难和关键技术之一是强流中能加速器。它对加速器的性能指标要求比现有的加速器超过数十至上百倍。目前已发现,在这种强流质子流下可产生束晕—混沌现象,即在高度束核的外围弥漫着许多粒子,伴随着一种复杂的时空混沌运动,这些粒子最容易被打到加速器器壁和其他部件上,足以产生超强的放射性剂量并损坏加速器的结构元件等,将会导致严重的危害性。因此,欲实现洁净核能系统的关键问题之一就是:必须提出一套设计新型强流加速器的有效方法。为此就不仅必须深入研究这类束晕—混沌的特性及其产生的物理机制,而且非常需要研究控制束晕—混沌的有效方法和技术,才能确保加速器周围环境与人身的安全,真正达到安全高效地利用洁净核能。从 20 世纪 90 年代以来,强流质子加速器及其离子束的研究已成为国内外十分

关注的一个新课题。强流离子束有着非常突出的优点:束流强度高,粒子注入和引出容易,加速器可以分期分段建造并逐步提高最终能量,特别适合于国防和一些国民经济领域的重要应用,具有诱人的远大发展前景。美国、西欧、日本、俄国以及韩国都提出了各自的强流质子直线加速器建造计划,有些已在建造之中。强流质子直线加速器如此受人青睐,是因为它有以下重要而广泛的用途。(1) 可作为散裂中子源。利用中子与物质之间的相互作用,人们可以获得物质结构和动力学等方面的微观信息,为众多交叉学科的发展提供研究工具和应用的平台。例如,它对 20 世纪初的中子核科学以及材料科学,尔后对航天科技和生命科学发展都起了促进作用。正因为利用中子散射技术研究方面的突出的先驱性贡献,加拿大的伯特伦·布·罗克豪斯(B. B. Khouse)教授及美国的克利福德·沙尔(C. Shull)教授荣获 1994 年诺贝尔物理奖。这标志着中子散射技术的重要性已被国际学术界所公认。人们在凝聚态物理、材料科学、生命科学等方面利用中子散射技术,已经获得一大批科研成果。(2) 可用于生产军用核材料、钚和氚、放射性洁净核能以及嬗变处理核废物等。例如,ADS 将为世界和我国核电发展开辟一条创新的技术路线,成为 21 世纪最有发展前景的新型能源系统之一。它能在很大程度上克服目前裂变核能发展中所面临的严重困难,包括:铀资源利用率低,传统核能所需的铀只占天然铀含量的 0.75%;核废物中含有的大量长寿命的强放射性核素,构成对生物圈的潜在威胁;公众对核安全的担心,使核电成本上升、发展受阻。一旦这些问题能得到妥善解决,将使人类进入洁净、高效、安全利用核能的新时代。(3) 它仍将广泛地应用于高能物理、核物理与核技术、粒子物理等方面的科学实验研究。(4) 在工业、医疗等领域同样有着广泛的应用,例如用于质子治疗。20 世纪 90 年代初美国首先提出利用 S 波段直线加速器进行质子治疗的建议,即利用 S 波段边耦合直线加速器获得毫米质子束,就可以用于现有的医用电子直线加速器高频技术。除质子治疗外,这类加速器还可用作射线检测、同位素生产、射线消毒、材料辐射改性、离子注入和生命科学研究。(5) 强流直线加速器及其强流离子束在粒子束武器、离子推进技术、等离子体与核聚变技术、强激光等方面都有极其重要的应用和发展潜力,是高科技和国防事业极其重要的研究领域。

为了解决强流离子束在上述应用中遇到的一个极其关键的问题,即强流离子束形成的束晕—混沌复杂性现象,我们已经提出了控制束晕—混沌的 6 种有效方法:非线性反馈控制法,小波反馈控制法,变结构控制法,延迟反馈控制法,参数自适应控制法和神经网络控制法^[14-20]。凡是经过控制之后,

所有的发射度都大为改善,甚至在聚焦周期数目很多的情况下,例如 $P = 1200$ 时均能得到明显改善,发射度减少了一半多。但是,美国 Los Alamos 国家实验所的 LEBT/RFQ 上的实验和模拟计算结果表明,在没有任何控制时在 $P = 52$ 处的发射度比在 $P = 1200$ 处加了控制之后的发射度还大。这充分说明:没有对强流离子束晕—混沌施加控制对实际应用是极为不利的。因此,控制束晕和混沌是完全必要的和非常重要的,继续深入开展对束晕—混沌控制的新方法和新技术的研究,对于今后强流离子束在国防和能源等方面的高新技术发展、设计、试验和工程应用都具有重要意义。

三、生物混沌控制,进展喜人

生命系统中的混沌控制与反控制是令人关注的。事实上,生物界无处不存在控制,从神经系统到心脏系统,从分子蛋白质合成到生物群体之间的生态平衡,控制与生命现象紧密相联。国际上已有一些小组在积极开展混沌控制与反控制在生物医学工程中的应用研究,例如,美国迪托(Ditto)小组一直在研究心脏模型的混沌控制及动物试验控制,进行人体心脏混沌控制的临床试验。美国医学院为治疗癫痫病,还用海马的脑进行了混沌反控制的试验以及其他临床试验。混沌控制与反控制在生命系统中的应用正在不断取得新进展。

研究生物医学工程中的混沌控制与反控制问题的一般步骤是:首先,对所研究对象提出生物医学系统的模型和建立方程式;其次,倘若模型未知或难以建立时,可以从系统的试验获得时间序列数据,然后重构动力学方程;最后,根据实际的控制目标,研究混沌控制与反控制的方法,并结合动物试验或人体的临床试验,以达到满意的控制效果。一旦在生物医学工程中的应用取得突破,例如在疑难病症的医疗控制、疾病预测预防、“动态病”治疗及生态平衡等方面,都将给人类带来福音。

混沌控制可以应用于心脏系统、神经系统和脑功能的机理分析,以及探索生命的奥秘,包括探索人脑的奥秘。

首项在生物系统中诞生的混沌控制技术可以追溯到 1991 年第一届国际实验混沌大会之后,迪托等人与洛杉矶加利福尼亚大学医学院研究人员组成的研究小组研究了一个兔子上的某个隔离区,设计了 OGY 型控制器,首先通过向冠状动脉注射鸟本苷的药物以便在心肌上加速不规则的收缩;一旦这种心律不齐症状开始发生,他们就使用 OGY 控制器产生的电信号去刺激心脏。这些看上去随机的电信号足以造成有规律的心跳,有时能把心跳控制到正常水平。目前正继续进行动物和人体临床试验。例

如,已经对 25 个病人进行了临床电生理测试。该项目是在美国 Emory 大学人类研究委员会与所有上述病人签约后开展研究的。在对 25 个病人的控制试验中,达到混沌控制得很好的占 36%(9 个)、部分控制的占 40%(10 个)、不成功的占 24%(6 个),混沌控制试验取得了初步结果。可见,混沌控制可以应用于稳定不稳定不动点,它对应于活动性间隔,等于或大于人类心房纤维性颤动期间无控的活动性间隔的平均值。虽然这些试验还不是最终临床证据,但是显示了应用前景。当然,还有许多问题尚待解决。尽管如此,混沌控制无疑为人类医治心房纤维性颤动等疾病,从改变韵律动力学的角度,提供了一个新方法和新的研究方向,因为这个新方法的最明显优点是不需要通常采用的高能量电震技术。

采用混沌反控制可以对“动态病”进行治疗,一个生动例子是对癫痫病人的治疗。国际上已经用电极监控小鼠海马的大脑切片,进行癫痫病人大脑的模拟实验。用混沌控制器给试管“大脑”输入电脉冲,发现通过混沌控制,一方面可以使海马神经元的激发更接近周期性;另一方面也可以改变不同的脉冲宽度和大小使其出现混沌行为。实验研究表明:高度周期性的神经模拟更可能引起癫痫发作;而只有转变成混沌行为,才能防止癫痫发作。因为混沌在感知和其他脑功能中起着极其重要的作用,原因是神经元的混沌激发,可能形成一种载波,它可以对最细微的信号作出迅速的反应。精神疾病,如阿尔兹海默氏病等,可能与周期性过度有关。因此,医学上正在研究如何设计混沌反控制器,使它像蝴蝶翅膀扇起的阵风那样以平和的外部电脉冲来控制或抑制癫痫病等的发作。

混沌控制、反控制与同步在生物医学工程和生命科学的研究中是一种强大的推动力,有助于揭开人类自身的奥秘。

四、驾驭激光混沌,如虎添翼

激光在高科技和国防领域有着极其广泛的应用。例如,美国提出的国家导弹防御系统(NMD)的核心是发展太空武器,而太空武器则主要是定向能武器。定向能武器是指利用能产生高热、电离、辐射等综合效应的激光束、微波束和粒子束的能量,沿着一定的方向传播,摧毁一定距离内敌方导弹及其电子设备的武器。定向能武器具有极快的射速。它利用大功率加速器,将电子、质子或离子等微观粒子,加速到接近光波的速度,例如射击 3 公里外的目标仅需要 $1/10$ 万秒。特别是利用其电磁代替爆炸能的特性,几乎可以在射击的同时,将对方的导弹及其电子设备等目标在无声无息中摧毁。定向能武器作为重点研究的有:自由电子激光器、准分子激

光器、X射线激光器、红外化学激光器和中性粒子束等5项。激光武器是利用具有极高能量的自由电子激光束去拦截和摧毁导弹，是NMD中研究的重要的太空武器之一。激光器是激光武器的核心，其技术难点是既要功率大，又要体积小。美国NMD研制的激光器主要包括自由电子激光器（FEL）、X射线激光器和化学激光器等。同时美国也在积极研究高功率的微波武器。美国目前NMD计划研制的机载激光器采用的是氧碘化学激光器。实验已证明：混沌是不同类型激光器中都存在的普遍现象。不论电子混沌运动，还是光场混沌都对激光十分有害，例如FEL在大电流情形下，电子束自身产生的电场、磁场相当大，这时出现的电子混沌运动将严重限制激光直接输出的功率，因为混沌导致激光光束严重发散，大大降低了激光输出光场的质量。光场混沌是工程上更为关注的问题。为了获得理想高功率单色光输出，就必须有效地控制激光中的电子混沌运动和光场混沌。目前FEL应用的加速器能量不够，短波功率还达不到兆瓦量级。根据理论分析，0.01 μ m的波长可能是FEL的运动极限。如何解决激光混沌引起的难题，即如何控制混沌对激光武器的影响，是一个尚未解决的技术难题。由于NMD体系是一个高、精、尖技术的综合体，迄今并未完全取得突破，故就激光武器而言，如何控制激光混沌对武器的影响，迄今仍是一个尚未解决的高科技问题，无疑也是导弹防御系统中的一项重要任务。

驾驭激光混沌，可以把激光武器系统，或者变成混沌系统，从而大大降低光电武器功率，使来袭导弹失去攻击真正目标的能力；或者使激光获得所需要的频率，大大提高激光束功率。可见，采用混沌控制和反控制的高新技术方略，有可能达到不同的应用目的。

从上可见，驾驭混沌可以应用于许多高科技领域，将有广阔的发展前景。希望能引起我国有关部门的关注和重视，加强这方面的研究工作，推动我国这一高科技领域的发展。

参 考 文 献

[1] 方锦清编著．驾驭混沌与发展高新技术[M]．北京：(上接第49页)

[4] 杨瑞龙，陈秀山，张宇．社会主义经济理论[M]．北京：中国人民大学出版社，1988，184-204

[5] 张维达．政治经济学[M]．北京：高等教育出版社，1999，299-302

[6] 大卫·马拉维兹．发展中国家工业化过程中的就业[J]．经济杂志，1974(9)

[7] 杨成绪，贾庆国，等．中国在世界的位置[J/OL]．http://www.chinanews.com.cn/2000-09-06/26/45024.html，2002-08-01

[8] 石冀平．调整经济增长与社会主义优越性[J]．北京市总工会职工大学学报，2001，16(1)

[9] 马钦援．论经济增长与社会进步[J]．兰州商学院学

原子能出版社，2002

[2] 方锦清．非线性系统中混沌的控制与同步及其应用前景(一)．物理学进展[J]．1996，16(1)

[3] 方锦清．非线性系统中混沌控制方法、同步原理及其应用前景(二)[J]．物理学进展，1996，16(2)

[4] 赵耿，郑德玲，方锦清．混沌保密通信的最新进展．自然杂志，2001，23(2)：97-106

[5] 赵耿，方锦清．混沌通信分类和保密通信的最新进展．自然杂志，2003，25(1)：21-30

[6] Special Issue on “Noncoherent Chaotic Communication”，IEEE Transactions on Circuits and System - I: Fundamental Theory and Applications，2000，47(12)：1661-1732

[7] Special Issue on “Applications in Modern Communication Systems”，IEEE Transactions on Circuits and System - I: Fundamental theory and Applications，2001，48(12)：1385-1527

[8] Rubbia，C. CERN/AT 93-47(ET)，1993

[9] Lagniel J. M., Nuclear. Instruments & Methods A，1994，343:46-53 LNS/SM/93-12，December 1993

[10] Jameson R. A., Proc. of EPAC94 Conf. 1994, p. 1177

[11] Guckstern R. L., Phys. Rev. Lett. 1994，73: 1247-1250; Proc. of LINAC，1996，333-337; Phys. Rev. 1998，E58: 4977-4990

[12] Fedotov A. V., Guckstern R. L., Kurennoy S. S., Ryne R. D., Phys. Rev. ST Accel. Beams，1990，2:014201

[13] Allen C. K., Chan K. C. D., Colestock P. L., et al., Phys. Rev Lett. 2002，89(21)：214802-4

[14] 方锦清，陈关荣．束晕—混沌的复杂性理论与控制方法及其应用前景．物理学进展[J]，2003(4)

[15] Liao X. X., Chen G., Fang J. Q., Stability analysis of nonlinear feedback halo - chaos contro，2003, to appear

[16] Fang J. Q., Chen G, Zhou L. l., and Huang J. J., Prog, in Nature Science，2001，11:6-15

[17] 方锦清，陈关荣，周刘来等．自然科学进展，2001，11(2)：113-120

[18] 方锦清，高远，翁甲强，陈关荣．自然杂志，2000，22：368-370

[19] 方锦清，高远，翁甲强，罗晓曙，陈关荣．物理学报，2001，50:67-71

[20] Fang J. Q., Chen G., et al., Chi. Phys. Lett. 2001，18(12)：1554-1557 (责任编辑 蔡德诚)

报，1998(4)

[10] 董振华．市场经济与社会进步[J]．许昌师专学报(社会科学版)，1998，17(2)

[11] 杨宜勇．2001~2002年国民经济增长与就业状况长期发展分析[J]．调研世界，1998(5)

[12] 樊纲．适当技术，后发优势[J]．中国小企业，2001(5)

[13] 朱大志．经济增长不能自动或完全实现就业质量[J]．中国劳动，1998(12)

[14] 董藩．保持经济快速增长是硬道理[J]．对外经贸实务，2000(2)

[15] 董藩．中国经济将快速增长50年[N]．上海商报，2001-06-06(10) (责任编辑 邱夜明)