

通识课“混沌与非线性思维”建设

陈立群¹⁾

(上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要 为探讨非线性动力学的普及化和整合科学新进展加强通识教育课程, 本文总结和分析了通识教育课“混沌与非线性思维”的设计与实践。非线性动力学现在已经成为人类知识的一部分。“混沌与非线性思维”是为上海大学所有学生(包括理工、经营和人文三大类)开设的通识教育课。该课程聚焦于混沌的科学概念和文化影响, 非线性不仅作为数学模型也作为思维模式。该课程帮助学生从非线性思维角度观察、分析和理解自然和社会中的不可预测和不确定现象。教学实践表明, 非线性动力学可以恰当的方式普及而成为通识教育课程的实质性内容, 并为各专业的本科生接受。

关键词 混沌, 非线性, 通识课, 教学, 力学史

中图分类号: O312 文献标识码: A doi:10.6052/1000-0879-19-272

THE GENERAL EDUCATION COURSE CHAOS AND NONLINEAR THINKING

CHEN Liqun¹⁾

(School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract In order to popularize the nonlinear dynamics and to improve the general education by integrating the new scientific achievements, the paper summarizes and analyzes the design and the practice of the course “Chaos and Nonlinear Thinking”. Nonlinear dynamics nowadays becomes a part of the general human knowledge. The course “Chaos and Nonlinear Thinking” is intended for all three categories of students, namely, those majored in science and technology, economics and management, as well as humanities, in Shanghai University. The course involves the scientific concepts of chaos and its cultural impacts. Nonlinearity is treated not only as a mathematical model but also a thinking mode. The course encourages the students to observe, analyze, and understand unpredictable and uncertain phenomena in nature or society via the nonlinear thinking. The teaching practice demonstrates that the nonlinear dynamics can be appropriately popularized for undergraduates in all fields to form a substantial part of a general education course.

Key words chaos, nonlinearity, general education, teaching, history of mechanics

随着高等教育由精英教育向大众教育发展, 人才培养的宽口径、厚基础愈发成为社会要求。通识教育在满足这种要求中起着重要作用。通识教育通常具有基础性、整合性和普适性, 具体课程既有经典学

科的简要概述, 也有新兴研究课题的通俗阐述。非线性动力学就属于后者。非线性动力学已经成为人类知识大厦中的重要结构, 是理解多种自然现象和社会现象的必要工具, 也是一些工程系统设计时需要

2019-07-29 收到第 1 稿, 2019-08-16 收到修改稿。

1) 陈立群, 教授, 主要研究方向为振动控制和非线性动力学。E-mail: lqchen@shu.edu.cn

引用格式: 陈立群. 通识课“混沌与非线性思维”建设. 力学与实践, 2020, 42(1): 75-79

Chen Liqun. The general education course chaos and nonlinear thinking. *Mechanics in Engineering*, 2020, 42(1): 75-79

考虑的因素,具有基础性。非线性动力学是数学、物理学、力学等多学科的交叉,提供了分析众多具体学科领域包括社科人文领域新的视角和方法,具有整合性。非线性动力学也是放之四海而皆准的客观知识,不局限于特定文化和族群,具有普适性。因此,具有基础性、整合性和普适性的非线性动力学已经成为通识,应该以恰当的方式进入通识课堂。

2011年,配合上海大学大类招生,开设非线性动力学方面的通识课,课程名称自定为《混沌与非线性思维》。该课程力图满足学校对通识课程的要求。课时按学校统一规定为20学时。不预先假定学生学过任何大学课程(零起点),由浅入深地展开;以学生为主体,课程设计考虑学生需要,学生的积极参与是课程不可或缺的部分;思考和分析现实生活问题,让学生有机会从各种角度进一步发展自身兴趣。该课程迄今共讲过15轮。每轮上课人数大多在100到150人之间,最多一次232人选课,总听课学生超过1800人。新生来自理工、社科、经管、艺术等大类,二年级以上学生来自上海大学各个学院,包括理学、通讯、计算机、机自、材料、环化、土木、生科、经济、管理、图书情报档案、社科、外语、文学、美术、影视、中欧等学院,几乎覆盖学校各专业。

为探讨非线性动力学的普及和整合科学新进展加强通识课程,本文分析总结“混沌与非线性思维”课程建设情况,包括课程内容、教学特点、学生参与和反馈影响几个方面。希望该课程建设的实践与思考不仅有助于向各专业本科生普及非线性动力学知识,也可供通俗处理其他力学新兴研究领域如散体力学、微纳米力学和力学信息学等借鉴参考。

1 课程内容

在繁杂丰富的非线性动力学知识中,本课程突出一个主题和一个副题。主题是混沌的科学概念及文化影响,副题为既是数学模型也是思维模式的非线性。因此课程名称为“混沌与非线性思维”。混沌的相空间结构往往具有分形特性,系统随参数变化而出现混沌,通常还伴随着分岔。因此分形和分岔也是课程的教学内容。

本课程的教学目标是,阐述混沌、分形、分岔等科学概念及其历史演化和文化影响,强调非线性系统的本质特性,使得学生能从非线性的角度观察和

思考广泛存在于自然和社会中的不可预测和不确定现象。

课程包括引言、虫口模型、混沌、分岔、分形、学术和文化影响和结束语。课程本身以非线性展开,具有渐次放大细化的自相似结构。引言中最简明地提到混沌、分岔、分形和非线性。接着以虫口模型为例进一步说明非线性、稳定性、分岔和混沌,也涉及分形。随后较为详细地分别阐述混沌、分岔和分形,以及广泛影响。最后用结束语回顾总结全课程。

引言2学时,介绍课程主题和副题,说明混沌概念和影响后,重点解释非线性,包括线性与非线性、线性模型的意义与局限、线性思维与非线性思维、追求简单性与探索复杂性。第一讲虫口模型2学时,简要说明模型建立后,重点分析其中的周期点及其稳定性,说明稳定性概念和判据,引入倍周期分岔和混沌的概念。第二讲6学时,阐述混沌概念及其演化,具体内容有,中国和西方文化中的关于混沌的“言”与“意”;非线性动力学意义上的混沌,包括麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831—1879)、迪昂(Pierre Maurice Marie Duhem, 1861—1916)等对初值敏感性的认识,庞加莱(Jules Henri Poincaré, 1854—1912)的开创性贡献,斯梅尔(Steven Smale, 1930—)马蹄,洛伦兹(Edward Norton Lorenz, 1917—2008)方程,上田(Yoshisuke Ueda, 1936—)吸引子,混沌的李(李天岩, 1945—)–约克(James A. Yorke, 1941—)定义;混沌的物理实例与运动的几何表示。第三讲分形4学时,具体内容有,自相似性、维数与分形;几何中的分形,包括康托(Georg Cantor, 1845—1918)集及其空间推广、科克(Niels Fabian Helge von Koch, 1870—1924)曲线、谢尔宾斯基(Wacław Sierpiński, 1882—1969)三角形和地毯、门格尔(Karl Menger, 1902—1985)海绵和非规则几何体维数分析;动力学中的分形;以及曼德布罗特(Benoît Mandelbrot, 1924—2010)集。第四讲2学时,说明分岔与混沌,包括分岔概念、静态分岔、动态分岔和进入混沌的几种典型路径。第五讲2学时,概述物理和工程系统中的混沌及混沌对社科和人文的影响。最后结束语2学时是全课的总结与回顾,并再次说明非线性思维,包括非线性系统的特性及其对现实世界中不确定性的认识 and 应对。

教学素材大多数取自较为国际上流行的通俗读物^[1-6],其中多数用的是汉译本^[2-5]。这些书也是本

门课程的主要参考书。

2 课程特点

本通识课程用通俗易懂的方式介绍现代非线性动力学的基本概念,使得学生对这一蓬勃发展的研究领域有初步的了解。同时说明非线性动力学的文化影响,以开阔视野、活跃思路,提供学生思考问题的新视角。具体有下列主要特色。

首先是通俗地阐述非线性动力学的核心概念。本课程围绕非线性动力学的核心概念混沌展开,同时也涉及与分形和分岔概念,特别是两者与混沌概念的关联,即奇怪吸引子和进入混沌路径。所需要基础知识不超过听课学生正在学习的微积分和大学物理。讨论两类典型系统中的周期和混沌运动,离散时间系统虫口模型和连续时间系统非线性振子;用直观的几何表示,包括时间历程、相平面图和庞加莱映射区分周期性运动和混沌运动;突出混沌的初值敏感性、非周期性和长期不可预测性。分形着重说明自相似性和分数维数,计算了规则几何结构的维数,并说明这些计算方法向非规则结构的推广。用物理实例说明分岔,包括静态分岔和动态分岔;从动态分岔的角度解释生活和工程中的动力学现象,例如荡秋千和绳系卫星的子星减振。

其次是说明非线性动力学的文化影响。非线性不仅是数学模型,也是种思维模式。在课程中说明现实世界的多样性和不确定性。线性世界里“种瓜得瓜,种豆得豆”“一分耕耘,一分收获”。习惯于整体为部分之和、投入产出成比例就落入了线性思维的窠臼。现实世界有时候呈现非线性的特征,“播下的是龙种,收获的却是跳蚤”“失之毫厘,差以千里”。非线性思维也许难以概括为具体的规则,最重要的是时刻保持开放的心态,以应对各种可能性。除思维模式外,混沌等非线性概念也对文学艺术有一定影响。例如倍周期分岔图用于时装设计,分形图用于美术装饰,一些小说和电影中也有“蝴蝶效应”等概念。

第三,强调概念的历史演化过程。本课程同时具有科学史的属性。在历史与逻辑的双重变奏中,让学生理解非线性动力学的核心概念。对于混沌概念,详尽地分析了其历史演化过程,揭示不稳定性、非周期性、不可预测性和初值敏感性是如何逐渐成为其内涵。对于分形概念,说明了数学工具分数维的起源以及曼德布罗特的开创性贡献。对于分岔概念,说明了

最早的分岔问题,压杆屈曲。在教学中介绍了非线性动力学开创者如庞加莱,斯梅尔,洛伦兹,费根鲍姆(Mitchell Feigenbaum, 1944—),曼德布罗特等的生平和贡献,并且推荐他们的经典论文^[7-12]、评论性文章^[13]或者回顾性文章^[14]供学生课外阅读。

第四,注重用经典和文学语言帮助学生理解科学概念。讲解混沌概念时,从中外典籍中引用了亚里士多德《论天》中的“在起点中微不足道的东西在终点中就会变得举足轻重。”《礼记·经解》中的“差若豪厘,谬以千里”,《尚书·盘庚上》中的“若火之燎于原,不可向迩,其犹不可扑灭”,《五灯会元》中的“毫厘有差,天地悬隔”,苏轼的诗句“竹中一滴曹溪水,涨起西江十八滩。”为对字面意思有更清晰的认识,分别借助《辞源》和《牛津大字典》解释“混沌(chaos)”的词义,并引征《庄子·应帝王》《三五历记》《白虎通·天地》和唐诗中有“混沌”的内容,还引征了《神谱》《变形记》《圣经》等中英文译本中有“混沌(chaos)”的内容。讲解分形概念的自相似性时,布莱克(William Blake)诗《天真的预言(Auguries of Innocence)》的片段,“一花一世界,一沙一天国,君掌盛无边,刹那含永劫。”讲解分岔概念时,引用《易传·系辞上》中的“易有太极,是生两仪,两仪生四象,四象生八卦”类比倍周期分岔。

最后,重视信息技术应用,收集相关视频使抽象的概念可视化。我们制作了基于磁耦合双摆的玩具体操运动员^[15]的视频和一种复合摆教具^[16]的视频,形象地展示了混沌运动。还在网络上收集自由双摆、洛伦兹水轮等混沌运动视频在课堂或课件播放。为提高学生的兴趣,还从影视作品如《侏罗纪公园》和《生活大爆炸》中截取部分视频,让剧中人物解释混沌概念。

3 学生参与

学生的投入与参与是课程取得良好效果的重要因素。在课程开始时,就引用先贤名言说明该课程的特点和注意事宜。“人皆知有用之用,却不知无用之用也。”提醒学生注重知识及其增长方式,不过早、过分地纠结于所学知识的具体用处。“读书切戒在慌忙,涵泳工夫兴味长。未晓不妨权放过,切身须要急思量。”建议学生积极尝试新的学习方式。关注受到的启发和能够理解的内容,而不郁闷于不明白的内容。针对班上文理科学生都有的情况,倡导“两脚踏

中西文化,一心评宇宙文章。”保持开放心态,不执着于现有已知的界限,文理之分、对错之分、中外之分等。

考察和考核也是调动学生积极性的手段。期末成绩按学校要求用五分十三等计分。课程成绩由三部分构成。一个读书报告,占40%;一个学习总结,占45%,课堂上5分钟的PPT分享与讨论,占10%。提交的读书报告或学习,如果与书刊网络文献重合超过20%又无引用说明不计分。尽管教师反复强调这一原则,几乎每轮都有学生因重复率过高而挂科。读书报告和学习总结评分取决于内容、结构、提交时间等。

除了前两轮读书报告为自由阅读外,后面几轮都要求阅读参考书或者推荐读物的指定部分,一般是数页到十余页。全班通常分6~8组,按学号的同余数确定组别,每组有中英文材料,任选其一。读书报告结构统一为内容概述、观点评论和阅读体会三部分,在第八周结束之前提交电子版。

学习总结限制篇幅在一千汉字之内。总结要求有过程回顾、内容概述和收获体会三部分,也可以有与成绩无关的建议和意见部分。第10周上课时提交纸质版,作为学校要求归档的试卷。

课堂上的PPT分享,要求与课程相关,浅显、具体、生动。后来要求学生提前一周提交,教师审阅通过后安排报告。报告通常安排在最后三周。有些分享还是比较有趣的。例如通讯专业学生介绍他人的研究工作,用混沌算法的敏感性和遍历性进行图像加密,特别是由于遍历性,加密图像损坏后,均匀地降低解密后图像的质量,但仍然可以辨认。

4 反馈影响

该课程受到选课学生的欢迎。因教室限制班级人数只能在100人或150人时,选课人数都超出上限。有些学生在实名的课程总结或匿名的网上评论中,对该课程教学给予正面评价。

教学内容及其处理得到同行肯定,他们多次邀请笔者开设讲座。利用本课程的素材,准备了一或两学时的报告《混沌的科学概念和文化影响》,在十所高校为本科生或研究生讲授。这些学校和报告时间为上海应用技术学院(2012)、南京理工大学(2012)、沈阳航空航天大学(2013)、大连民族大学(2013)、苏

州科技学院(2013)、清华大学(2013)、绍兴文理学院(2014)、上海大学钱伟长学院(2014)、厦门理工大学(2015)和哈尔滨工业大学(深圳)(2017)。在本课程素材基础上,增加部分周期运动的内容,形成两学时讲座《周而复始与杂乱无章——浅谈混沌与周期运动》,在辽宁科技大学(2015)和福州农林大学(2016)报告;并成为上海大学核心通识课“无处不在的力学”中的一讲,在2019年首次讲授。应用这些素材的两学时讲座《从单摆的等时性谈起:周期、非线性与混沌》,作为上海交通大学致远学院课程“科学思想背后的小故事”中的一讲,在2017和2018年两次讲授。

在课程进行过程中,笔者对教学内容和方法进行总结思考,并在国内外学术会议上交流和在国际期刊上发表。2012年,在第23届国际力学家大会的力学教育分会场,笔者做了题为《教大学新生混沌的通识课》的口头报告^[17]。刚开课时,前两届听课的学生主要是一年级学生。这是我们期待的情况,但后来高年级学生更有选课经验,只有少数新生选修该课。前述口头报告^[17]的内容加以充实后,2013年发表于《机械工程教育国际期刊》^[18]。2013年底,在高校力学课程教学系列报告会(即全国力学课程报告论坛)上,应邀做了题为《“混沌与非线性思维”通识课建设》的大会报告^[19]。

基于对该课程的通俗化处理,形成了一些科普性文章,固化教学内容。例如通俗阐述混沌概念的《混沌浅释》^[20]和通俗解释稳定性概念的《稳定性漫谈》^[21]。把从古代典籍中收集的有关混沌和初态敏感性的描述整理成文^[22],以便于其他同行在教学或科普中引用。此外,对教学中建议学生动手的一个混沌摆教具进行了建模和仿真^[21]。

5 总结

以上是“混沌与非线性思维”通识教育课程建设情况。该课程的教学聚焦于混沌、分形、分岔的科学概念和文化影响。课程的特点包括通俗地阐述科学概念、展现科学概念的文化影响、注重逻辑历史统一、提升文化品位和追求生动形象。除听课外,学生以课外阅读、课堂分享和学习总结的方式参与教学过程。教学实践表明,非线性动力学经过适当普及后能形成通识教育课程,并被各专业的本科生接受。

参 考 文 献

- 1 Smith LA. Chaos: A Very Short Introduction. Oxford: Oxford University Press, 2007
- 2 格莱克 J. 混沌: 开创新科学. 张淑誉译. 上海: 上海译文出版社, 1990
Cleick J. Chaos: Making A New Science. Transl. Zhang Shuyu. Shanghai: Shanghai Translation Publishing House, 1990 (in Chinese)
- 3 洛伦兹 EN. 混沌的本质. 刘式达等译. 北京: 气象出版社, 1997
Lorenz EN. The Essence of Chaos. Transl. Liu Shida, et al. Beijing: China Meteorological Press, 1997 (in Chinese)
- 4 吕埃勒 D. 机遇与混沌. 刘式达等译. 上海: 上海科技教育出版社, 2005
Ruelle D. Chance and Chaos. Transl. Liu Shida, et al. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press, 2005 (in Chinese)
- 5 斯图尔特 I. 上帝掷骰子吗?——混沌之数学. 潘涛译. 上海: 上海远东出版社, 1995
Stewart I. Does God Play Dice? The New Mathematics of Chaos. Transl. Pan Tao. Shanghai: Shanghai Far East Publishers, 1995 (in Chinese)
- 6 Smith P. Explaining Chaos. Cambridge: Cambridge University Press, 1998
- 7 Lorenz EN. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, 20(2): 130-141
- 8 Mandelbrot B. How long is the coast of Britain? Statistical self similarity and fractional dimension. *Science*, 1967, 156(3775): 636-638
- 9 May RM. Biological populations with nonoverlapping generations: stable points, stable cycles, and chaos. *Science*, 1974, 186(4): 645-647
- 10 Li TY, Yorke J. Period there implies chaos. *American Mathematics Monthly*, 1975, 82(10): 985-992
- 11 Hénon M. A two-dimensional mapping with a strange attractor. *Communications in Mathematical Physics*, 1976, 50(1): 69-79
- 12 Feigenbaum MJ. Universal behavior in nonlinear systems. *Los Alamos Science*, 1980, 7(1-3) 4-27
- 13 May RM. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 1976, 261: 459-467
- 14 Smale S. Finding a horseshoe on the beaches of Rio. *Math. Intel.* 1998, 20(1): 39-44
- 15 刘延柱, 彭建华. 磁耦合双摆的混沌运动. *力学与实践*, 2008, 28(5): 76-77
- 16 唐有琦, 陈立群. 混沌摆的建模和仿真. *力学与实践*, 2014, 36(4): 493-496
Tang Youqi, Chen Liqun. Modeling and simulations of a chaotic pendulum. *Mechanics in Engineering*, 2014, 36(4): 493-496 (in Chinese)
- 17 Chen LQ. Teaching chaos for freshmen as a liberal education course. XXIII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Beijing, China, 2012
- 18 Chen LQ. Teaching nonlinear dynamics at the freshman level. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 2013, 41(2): 93-98
- 19 陈立群. “混沌与非线性思维”通识课建设. 高校力学课程教学系列报告会, 上海, 2013
- 20 陈立群. 混沌浅释. 系统与控制纵横, 2016, 3(1): 46-53
Chen Liqun. Introductory explanation of chaos. *All About Systems and Control*, 2016, 3(1): 46-53 (in Chinese)
- 21 陈立群. 稳定性漫谈. *力学与实践*, 2015, 37(1): 148-151
Chen Liqun. Informal explanation of stability. *Mechanics in Engineering*, 2015, 37(1): 148-151 (in Chinese)
- 22 陈立群. 中国古籍中的初态敏感性和混沌. *力学与实践*, 2014, 36(5): 680-681
Chen Liqun. Sensitive dependence on initial states and chaos in Chinese classics. *Mechanics in Engineering*, 2014, 36(5): 680-681 (in Chinese)

(责任编辑: 胡 漫)