



中国原子能科学研究院科学技术丛书

驾驭强流束晕与 探索网络科学

方锦清 编著



原子能出版社

中国原子能科学研究院科学技术丛书

驾驭强流束晕与 探索网络科学

方锦清 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

驾驭强流束晕与探索网络科学/方锦清编著. —北京:原子能出版社,2008.11

(中国原子能科学研究院科学技术丛书)

ISBN 978-7-5022-4272-5

I. 驾… II. 方… III. ①束流-研究 ②计算机网络-研究 IV. TL501 TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 181474 号

内 容 简 介

在世纪之交,网络科学的诞生引发了当前世界性的网络革命,与 20 世纪 60 年代混沌科学引起的物理学革命,相互交融和推动,又一次提供了一种新的科学发展观和方法论,使确定性与随机性、有序性与无序性、复杂性与简单性,又一次达到了和谐的统一,人类的认识产生了一次新的飞跃。本书就是反映近年来这一交叉科学的最新成果。本书从网络科学出发,以新观点和新视角从理论上统一探讨一大类传统的规则网络—强流加速器中由电磁单元组成的束流传输网络中强流束晕-混沌的控制方法,并总结吸取了网络科学的新思想和新方法,构造和研究了具有小世界和无标度特性的束流传输网络的新特性及其控制方法。同时,书中系统概述了网络科学的理论方法及其应用的进展,并指出了当前面临的挑战性课题,发展的方向和广阔的应用前景。

本书的主题是,驾驭强流束晕与探索网络科学,它们是国内外关注的既独立又交叉的两个新兴前沿科学。该书把两者融合在一起,突出了两个学科密切的关联性和重要性,以便读者能够更深刻地了解和运用它,以促进新兴科学的发展及应用。本书可供具有大专文化程度以上不同层次的广大读者阅读,包括大专学生、研究生、企业家、管理干部在内,以及供自然科学、社会科学和工程技术人员参考。

驾驭强流束晕与探索网络科学

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 孙凤春

责任校对 冯莲凤

责任印制 丁怀兰

印 刷 保定市中国画美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 21.625

字 数 411 千字

版 次 2008 年 11 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4272-5

印 数 1—2500 定 价 78.00 元

版权所有 侵权必究

网址:<http://www.aep.com.cn>

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

出版委员会

主 任 赵志祥

副主任 张昌明 柳卫平

委 员 (按姓氏笔画为序)

万 钢	王 楠	王阿凤	王国保	尹忠红	石永康
叶宏生	叶国安	刘森林	许谨诚	李林虎	李和香
李树源	杨丙凡	张东辉	张生栋	张立红	张和平
张锦荣	张静波	陈 凌	陈建欣	邵焕会	罗志福
岳维宏	赵崇德	柯国土	姜兴东	夏海鸿	强家华
樊 胜					

编审委员会

顾 问 (按姓氏笔画为序)

王乃彦	王方定	方守贤	阮可强	张焕乔	周永茂
钱绍钧	黄胜年	樊明武			

主 任 赵志祥

副主任 柳卫平 许谨诚

委 员 (按姓氏笔画为序)

勾 成	卢玉楷	叶国安	吕忠诚	朱升云	刘一兵
关遐令	汤秀章	杨红义	杨启法	肖雪夫	张万昌
张天爵	张先业	张伟国	张应超	陈玉宙	陈永寿
陈钟麟	范显华	林灿生	罗上庚	罗志福	竺礼华
金小海	金华晋	周祖英	姜 山	赵守智	贺佑丰
袁履正	顾忠茂	党淑琴	徐 铄	浦胜娣	容超凡
谢建伦	裴鹿成				

办公室

主 任 尹忠红

副主任 李来霞

成 员 (按姓氏笔画为序)

马英霞	王丽英	王宝金	伍险峰	张小庆	骆淑莉
韩翠娥					

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

编辑工作委员会

主 任 侯惠群

副主任 杨树录

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 王艳丽 刘 朔 李 宁 杨树录 张关铭
张铎清 赵志军 侯惠群 谭 俊

编辑工作小组

组 长 杨树录

副组长 丁怀兰 赵志军

成 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 王艳丽 刘 朔 李 宁 杨树录 张关铭
张铎清 赵志军 谭 俊

总 序

中国原子能科学研究院创建于 1950 年,是我国核科学技术的发祥地和先导性、基础性、前瞻性的综合性核科学技术研究基地。

在党中央和上级部门的关怀和指导下,中国原子能科学研究院为我国的国防建设、国民经济建设和核科学技术的发展做出了重要贡献,造就了 7 位“两弹一星”功勋科学家和 60 多位两院院士,培养了大批科技人才,在核物理、核化学与放射化学、反应堆工程技术、加速器工程技术、同位素技术、核电子学与核探测技术、辐射防护、放射性计量等学科形成了自己的特色和优势,并拥有核科学与技术 and 物理学两个一级学科硕士、博士学位授予权。

为了系统地总结原子能院在核科学技术相关优势学科积累的知识和经验,吸收和借鉴国内外核科学技术最新成果,促进我国核科技事业的发展,我院决定组织出版《中国原子能科学研究院科学技术丛书》,并选定王淦昌、肖伦、丁大钊、王乃彦、阮可强等院士编著的《惯性约束核聚变》、《放射性同位素技术》、《中子物理学——原理、方法与应用》、《新兴的强激光》、《核临界安全》5 本专著首批出版,今后还将组织撰写更多的学术专著纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给为我国核科技事业献身的人们!

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》出版委员会
2005 年 9 月 1 日

序 言

方锦清教授在 2002 年出版的《驾驭混沌与发展高新技术》一书与这本《驾驭强流束晕与探索网络科学》新书可谓难得的姐妹篇。前书主要介绍了上个世纪末国际国内科学研究前沿中取得的重大进展的混沌控制、混沌反控制与混沌同步的主要原理和方法,并阐述了它们在发展高新科技中的主要应用。本书则把前书中初步介绍过的传统束晕-混沌的若干控制方法和新近蓬勃开展起来的复杂网络理论及其应用的研究有机地联系在一起,讨论了许多相关的有趣而且重要的课题,并探讨了具有小世界网络和无标度网络的束流传输网络中的束晕-混沌现象及其控制。本书的特点是将强流束晕-混沌与复杂网络科学的研究前沿紧密地结合起来,向读者展现了驾驭束晕混沌与探索复杂网络两个既各自独立又相互融合的前沿学科的重要性、关联性和交叉性。

值得提到的是,作者方锦清教授本人是一位资深的科研工作者,多年来从事混沌科学、非线性-复杂性科学及其应用的研究,在这些新兴的前沿领域取得了不少值得称颂的研究成果。特别是,方锦清教授是我国开展束晕混沌分析与控制的第一人,也是我国复杂网络研究最早的推动者、组织者和研究工作者之一。难能可贵的是,他对国内外浩如烟海、丰富多彩的科学进展信息具有深刻的洞察、分析与归纳能力,并有浓厚的兴趣对其进行精心选择、组织和描述,从而写成一篇篇十分合时宜的综述性文章和一本本十分有价值的专著,为我国科研工作人员提供了许多很有价值的介绍和指导。

《驾驭强流束晕与探索网络科学》一书内容丰富、观点鲜明、活泼生动、寓意深刻,故此我特别推荐这本难得的好书。我相信读者一定会欣

赏阅读这部新作,并从阅读之中对束暈混沌和复杂网络两个联合论题的基本理论要素和应用前景获得深刻的认识和理解,进而对目前和将来相关的科研工作有所裨益。

A handwritten signature in black ink, reading "G. R. Chen". The signature is fluid and cursive, with the first name "G. R." and the last name "Chen" clearly distinguishable.

香港城市大学讲座教授、《混沌与复杂网络研究中心》主任

前言

本书的主题是,驾驭强流束晕与探索网络科学,两者是既独立又交叉的、令人关注的两个前沿科学,与我国制定的第二个《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020)》和《十一五规划》中重大(前沿)课题有着密切的关系。因此,首先来说明这两个学科的意义、发展及其相互联系。

从20世纪90年代以来,强流加速器及其束物理成为国内外关注的一个重要课题。由于强流离子束具有束流强度高、粒子注入和引出容易、最终能量可分期提高等突出优点,它在重要科研领域、国防领域和国民经济部门有着十分广泛的应用,发展前景远大。世界主要国家和地区(美国、俄罗斯、西欧地区、日本和中国等)都提出了强流质子直线加速器建造计划,有的已建成,有的正在建造之中。

强流质子直线加速器之所以如此令人青睐,是因为它有着重要而广泛的用途和发展前景。首先,它作为具有高中子注量率或兆瓦量级的散裂中子源,利用中子与物质之间的相互作用可以获得物质结构和动力学等方面的微观信息;第二,用作驱动次临界反应堆,来生产放射性洁净核能(ADS)、军用核材料(钚和氚)和嬗变核废物等;第三,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,如中微子工厂、 μ 子对撞机等用于高能物理领域的研究;第四,离子束用于工业、医疗等领域;第五,在粒子束武器、离子推进技术、等离子体与核聚变技术、强激光等方面有重要的应用,是国防高科技极其重要的研究领域。

实际上,自然界和人类社会中广泛存在着复杂系统,各种加速器及其ADS系统都是典型的复杂系统。据最新报道,欧洲粒子物理研究中心建成了当今世界上最大的、最复杂的大型强子对撞机,已于2008年9月10日启动。它是一个圆形加速器、环形隧道长达27 km,走完全程需要4个多小时。值得注意的是,不论是圆形加速器,还是直线加速器,它

们的核心部分都是由一系列电磁聚焦系统(单元)组成的束流传输线系统,即束流传输网络系统(BTN),它们属于一类规则的复杂网络。因此,应用网络科学的理论、方法和观点来重新描述和研究 BTN 从理论上首先是一个崭新的方向。本书一方面探讨和总结传统的规则的束流传输网络的基本特性及其控制方法;另一方面探索具有小世界和无标度特性的复杂束流传输网络的新特性及其控制新方法。我们把驾驭强流束晕与探索网络科学既独立又交叉的两个前沿科学自然融合在一起,突出显示了两个学科的重要性、关联性和交叉性,从而使人们能够更深刻地理解、运用和驾驭它们,以促进强流束物理与网络科学这一新兴交叉科学的发展和应用。

探索网络科学是本书的最重要的内容。在世纪之交(1998—1999),科学家冲破了长期的传统图论(随机图论)的束缚,在复杂网络的研究中取得了突破性进展,其里程碑的标志是两项重要的发现:小世界网络和无标度网络。众所周知,在自然界和人类社会生活中网络无处不在,21 世纪人类进入了网络信息时代,它与数学、物理科学、复杂性科学、非线性科学、计算机与信息科学、生命科学、社会和经济科学等众多学科广泛交叉,引起了国内外不同学科对网络科学的高度重视和普遍参与,由此诞生了一门广泛的、交叉的新兴科学——网络科学。它不仅将为人们提供认识真实世界的复杂性的全新的科学知识和视角,而且将成为改造客观世界的新的方法论和有力武器。网络科学的一系列新发现正在国内外引发一场网络革命,与 20 世纪 60 年代混沌科学引起的第三次物理学革命,交融在一起,提供了一种新的科学发展观和方法论,使简单性与复杂性、确定性与随机性、有序性与无序性再次达到了自然和谐的统一,人类的认识产生了一次新的飞跃。当前,网络科学的研究极大地促进了复杂系统的研究和发展,已经成为当今复杂系统和复杂性科学研究中最受关注和最具挑战性的科学前沿课题之一。网络科学的诞生,既适应了现代网络信息时代的需要,又符合 21 世纪复杂科学研究的大趋势,验证了 20 世纪伟大的思想家、理论物理学家史蒂芬·霍金的预言:“21 世纪将是复杂性的世纪”。科学史证明,任何科学的新发现和新突破都离不开时代背景和科学环境。20 世纪 90 年代以来,由于计算机、互联网和高科技等科学技术的迅猛发展,不断完善的各种数据库,使人们比以往任何

时候都能够更容易更快捷地获取所需的各种信息和资源,促使人类阔步进入了网络信息新时代,网络科学在信息时代中发挥着越来越重要的作用,人类生活因此发生了巨大的变化。当前各个领域的科学家正在积极合作,在理论和实际应用两大方面深入探索网络科学的奥秘,推进各种复杂网络的广泛应用。

近年来,国内外召开了一系列复杂网络学术会议。从2004年至2008年分别召开了四届“全国网络科学学术论坛”和“全国复杂网络会议”。美国、欧洲、亚洲(包括中国、韩国、新加坡等)和澳大利亚等都召开了各类国际网络学术会议,即使是在国际非线性科学、复杂性科学和交叉科学等各类会议上,网络科学也都成为令人感兴趣的和最活跃的一个重要专题。网络科学研究涉及军事、经济、通信、工程技术、社会、政治、经济和管理等众多领域,正在深入揭示前所未有的理论和技术问题,并不断地向着更高层次发展。

正是在上述研究背景下,为了适应前沿课题交叉发展的需要,本书把国内外关注的两个前沿科学:强流束晕与网络科学,紧密结合起来,从网络科学的新方法和新观点出发,分析国内外丰富的科学信息,吸取网络科学的新思想,集成作者及其课题组多年来在强流束晕-混沌控制以及网络科学探索所取得的主要成果,精炼而成本书。该书是作者2002年出版的《驾驭混沌与发展高新技术》专著的姐妹篇。概括起来,本书进一步体现出以下四个特色:一、新颖性和先进性:全书内容既结合原子能科学技术重要课题,又体现了当前国内外前沿课题的研究热点和主要进展。二、多学科与交叉性:鉴于网络科学的广泛性,本书试图与非线性科学、复杂性科学密切结合,既重点突出,又深入浅出。三、先导性和前瞻性:前沿课题层出不穷,发展迅猛,本书意在高屋建瓴,开阔视野。四、基础性与应用性,束晕-混沌课题和网络科学不仅属于基础性研究,而且极具应用性,已日益成为高新技术领域新的生长点,本书意为应用提供理论和技术基础。

全书总共有12章,全书组织结构分三大部分:前五章是两大课题的基础理论篇,中间五章是研究成果篇,后面两章是整个课题展望篇。第1~2章论述束流传输网络线中束晕-混沌概念、基本动力学基本理论及实验研究概况。第3章概述网络科学发展的简史、研究特点、基本概念、

主要类型、理论模型分类及相关理论方法。第4~5章描述若干典型的无权网络、有权网络模型:规则网络、确定性网络、随机图模型、小世界网络、无标度网络,以及实证研究概况。第6章总结了统一混合网络模型三部曲的基本思想、理论方法、无权和有权混合模型的主要特性。第7章总结传统的强流传输网络(BTN)中束晕-混沌的若干控制方法。第8章探讨具有小世界和无标度拓扑的BTN中束晕的同步与控制方法,包括通常的控制和多目标分区控制方法。第9章论述复杂网络的完全同步和部分同步及提高同步化能力的几种途径。第10章描述了微观网络——量子信息网络和纳米网络。第11章概述了网络科学的若干重要课题和发展方向。第12章指出了面临的挑战性课题,展望了应用发展前景。

在撰写书稿时,作者尽量融基础性、学术性、应用性与前瞻性于一体,以便能够开拓广大视野,了解新兴的交叉学科,促进广泛交流。无疑,前沿科学发展迅速,内容新颖、文献浩瀚,本人学识有限,难免有不足和不当之处,期盼国内外同行不吝指正,将不尽感谢。



2008年5月16日写于北京

目 录

第 1 章 强流束晕-混沌概论——一类规则网络问题	(1)
1.1 规则网络——传统的束流传输网络	(1)
1.2 强流束晕-混沌现象及其基本概念	(4)
1.3 强流离子束物理与技术问题	(10)
1.4 与洁净核能的关系	(13)
1.5 基本动力学及其特性	(18)
参考文献	(23)
第 2 章 束晕-混沌的基本理论及实验研究	(25)
2.0 引言	(25)
2.1 空间电荷效应	(26)
2.2 传输矩阵理论	(27)
2.3 丝化过程	(30)
2.4 粒子-束核相互作用	(30)
2.5 非线性共振	(33)
2.6 共振引起混沌	(35)
2.7 正则变换方法	(38)
2.8 三维离子束形成束晕-混沌的理论	(40)
2.9 多粒子模拟模型和基本方法	(47)
2.10 强流束晕的实验研究	(49)
2.11 本章小结	(54)
参考文献	(55)
第 3 章 网络科学概论	(57)
3.1 网络发展简史	(57)
3.2 网络科学的研究特点	(62)
3.3 网络的基本概念与特征量	(64)
3.4 复杂网络类型和理论模型分类	(77)
3.5 网络科学涉及的相关理论方法	(80)
3.6 统计物理方法	(80)

3.7	网络自组织特征量	(82)
3.8	幂函数指数的一个应用例子	(85)
3.9	熵与幂指数 γ 之间的一般关系	(86)
3.10	量子网络与玻色-爱因斯坦凝聚	(88)
3.11	复杂网络谱结构	(91)
3.12	网络结构对称性	(93)
	参考文献	(96)
第 4 章	若干类型的无权网络模型	(100)
4.1	随机图模型	(100)
4.2	一般随机网络	(104)
4.3	一个应用例子	(106)
4.4	小世界网络	(107)
4.5	无标度网络	(110)
4.6	确定性网络	(115)
	参考文献	(121)
第 5 章	若干典型的有权网络模型	(125)
5.1	若干类型的实际网络	(125)
5.2	若干典型的有权网络理论模型	(129)
5.3	加权网络的演化模型	(132)
	参考文献	(136)
第 6 章	统一的混合网络模型	(139)
6.1	自然社会的多样性与和谐统一-混合的普遍性	(139)
6.2	大统一混合网络模型的基本思想和框架	(141)
6.3	第一部曲:和谐统一的混合择优模型	(143)
6.4	第二部曲:无权大统一混合模型	(154)
6.5	第二部曲:有权大统一混合模型	(158)
6.6	第三部曲:具有变速增长的统一混合模型	(162)
6.7	讨论与总结	(168)
	参考文献	(170)
第 7 章	传统的强流传输网络中束晕-混沌的控制方法	(172)
7.1	非线性控制的定性分析	(172)
7.2	束晕-混沌的数值模拟	(173)

7.3	非线性可控性定理	(175)
7.4	小波反馈控制法	(179)
7.5	小波反馈形式的推广	(185)
7.6	小波反馈的多周期离散(脉冲)控制	(186)
7.7	变结构控制法	(188)
7.8	延迟反馈控制方法	(191)
7.9	参数自适应控制法	(195)
7.10	正比参数微分自适应控制	(199)
7.11	神经网络自适应控制法	(203)
7.12	孤立波函数控制方法	(207)
7.13	总结与展望	(209)
	参考文献	(212)
第8章 具有小世界和无标度拓扑的 BTN 中束晕的同步与控制		(215)
8.1	同步的基本概念	(216)
8.2	同步判据	(217)
8.3	可对角化 Lapalcian 矩阵 L	(218)
8.4	网络分类	(219)
8.5	不可对角化的 Lapalcian 矩阵 L	(219)
8.6	规则网络的完全同步和若干典型的规则网络	(221)
8.7	一类规则束流传输网络的同步	(223)
8.8	具有小世界拓扑结构的束流传输网络	(230)
8.9	SW-BTN 中同步的线性耦合控制	(232)
8.10	WS-BTN 中同步的噪声控制方法	(233)
8.11	SF-BTN 中同步的噪声驱动控制	(235)
8.12	WS-BTN 和 SF-BTN 中的周期稳定控制	(236)
8.13	SF-BTN 中的全局耦合分区牵制控制方法	(237)
8.14	基于 SW-BTN 和 SF-BTN 系统的牵制控制	(239)
8.15	SF-BTN 系统中的不同平衡点的分区控制	(242)
8.16	结论和简单讨论	(244)
	参考文献	(245)
第9章 复杂网络同步的若干研究进展		(247)
9.1	群聚系数对同步能力的影响	(247)

9.2	网络的异质性对网络同步的影响	(248)
9.3	确定性因素对网络同步的影响	(249)
9.4	同步最优网络与同步优先网络	(250)
9.5	不对称加权 SF 网络的同步化能力	(253)
9.6	不对称对加权网络同步性能的影响	(254)
9.7	耦合动力学网络的部分同步	(256)
9.8	多对称性网络中的部分同步	(261)
9.9	稀疏连接的时空系统的同步	(262)
9.10	主要结论	(264)
	参考文献	(265)
第 10 章	探索微观网络:量子相干网络与纳米网络	(268)
10.1	量子相干网络的理论基础	(268)
10.2	纳米网络连接	(271)
10.3	量子信息网络	(272)
10.4	量子计算	(273)
10.5	量子信息密度隐形传输	(274)
10.6	量子高斯信道	(275)
10.7	量子信息网络连接	(277)
10.8	量子信息网络的度分布	(279)
10.9	讨论和结论	(282)
	参考文献	(284)
第 11 章	网络科学的若干重要课题	(285)
11.0	引言	(285)
11.1	动态复杂网络——生物体群集及其协调控制	(286)
11.2	复杂网络上的博弈问题	(292)
11.3	网络上的交通流与信息流问题	(301)
11.4	网络上的传播问题	(302)
11.5	网络上的级联动力学	(304)
11.6	高科技网络	(305)
11.7	军事需求的网络科学课题	(309)
11.8	复杂网络的安全问题	(313)
11.9	复杂网络的非平衡统计方法	(314)
	参考文献	(317)

第 12 章 挑战和展望 (322)

12.1 挑战性的问题..... (322)

12.2 网络科学的展望:应用发展前景 (325)

参考文献..... (327)

致谢 (327)