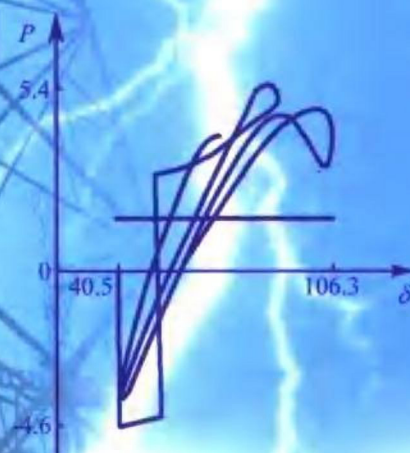
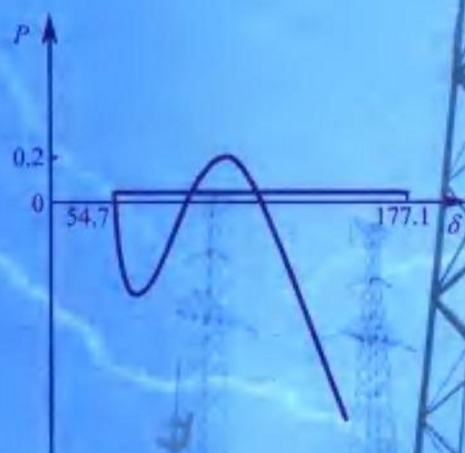
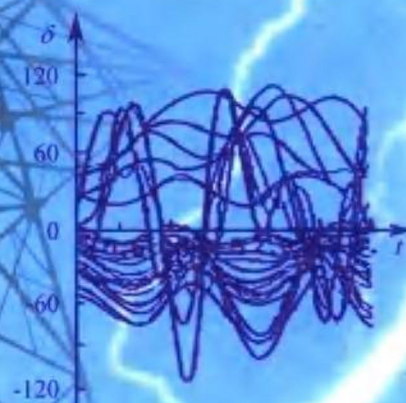
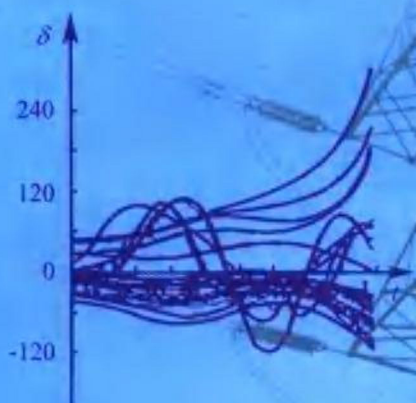


薛禹胜 著

运动稳定性量化理论

非自治非线性多刚体系统的稳定性分析

QUANTITATIVE STUDY OF GENERAL MOTION STABILITY
AND AN EXAMPLE ON POWER SYSTEM STABILITY



江苏科学技术出版社

QUANTITATIVE STUDY OF GENERAL MOTION STABILITY
AND AN EXAMPLE ON POWER SYSTEM STABILITY

运动稳定性量化理论

——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析

Hk71/08

薛禹胜

Yusheng XUE

江苏科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

运动稳定性量化理论：非自治非线性多刚体系统的
稳定性分析/薛禹胜著．—南京：江苏科学技术出版
社，1999.12

ISBN 7-5345-2959-X

I. 运... II. 薛... III. ①运动稳定性理论②运
动稳定性理论-应用 电力系统-系统暂态稳定-分析
IV. TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 52948 号

运动稳定性量化理论

——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析

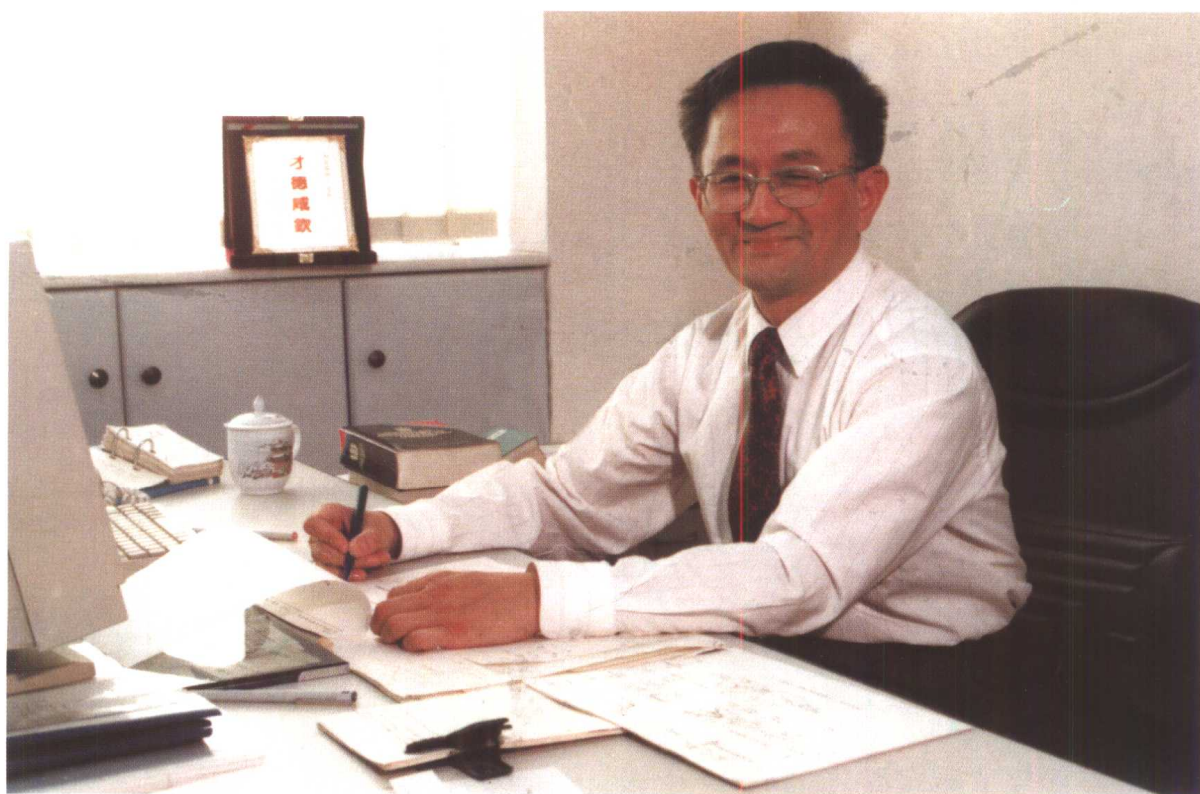
编 著 薛禹胜
策 划 孙广能
责任编辑 孙广能
特约编辑 王 青

出版发行 江苏科学技术出版社
(南京市中央路 165 号, 邮编: 210009)
经 销 江苏省新华书店
照 排 南京展望照排印刷有限公司
印 刷 丹阳教育印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 27.5
插 页 5
字 数 630 000
版 次 1999 年 12 月第 1 版
印 次 1999 年 12 月第 1 次印刷
印 数 1—2 000 册

标准书号 ISBN 7-5345-2959-X/TK·6
定 价 55.00 元(精)

图书如有印装质量问题,可随时向我社出版科调换。



薛禹胜 (XUE Yusheng), 1941年生, 祖籍: 江苏省无锡市。稳定性理论及电力系统自动化专家。

1963年山东工学院毕业, 1981年中国电力科学研究院获硕士学位, 1987年比利时列日大学获博士学位。1995年当选为中国工程院院士。现任国家电力公司电力自动化研究院总工程师(1994—), 《电力系统自动化》杂志主编, 上海交通大学兼职教授(1990—), 浙江大学兼职教授(1992—), 山东工业大学兼职教授(1994—), 武汉水利电力大学兼职教授(1995—), 东南大学兼职教授(1996—), 河海大学兼职教授(1996—), 华中理工大学兼职教授(1998—)。是中国电机工程学会理事(1999—), IEEE成员(1987—), 国际自动控制联合会(IFAC)电厂和电力系统控制委员会委员(1990—), 国际大电网组织第38委员会委员(1998—)。

作为电力系统暂态稳定定量分析的开拓者和学术带头人, 所创造的CCEBC理论开创了非自治系统运动稳定性的理论研究, 发明的EEAC理论是对电力系统暂态稳定快速分析这一世界性难题的重大突破, 是唯一得到严格证明的定量分析法, 不但极精确, 且比积分法求临界条件快数十倍, 还能提供其他方法不能提供的重要信息, 揭示了多机电力系统暂态失稳的本质及失稳模式随故障切除时间而变的机理。其软件包已成功地应用于中国电网, 是国际上电力系统在线暂态安全分析的首例, 获国家科技进步一等奖。从1992年开始就在法国电网规划中应用EEAC。美国电力科学研究院的软件支持中心和跨国软件公司也已将此技术引入国际电力界。

曾获1977年全国科学大会奖, 1991年度能源部科技进步理论成果一等奖, 1994年度能源部科技进步应用成果一等奖, 1996年度国家科技进步一等奖。

内 容 简 介

非自治系统的稳定性理论研究至今几乎仍是空白,构造具有工程意义稳定域的李雅普诺夫函数几乎不可能。虽然数值积分法可以精确地给出非自治系统的受扰轨迹,并按经验定性地判断该轨迹是否稳定,但既缺乏稳定裕度和稳定域的概念,又无法揭示稳定问题的机理。本书给出非自治非线性多刚体运动系统稳定性的严格充要条件——互补群群际能量壁垒准则(complementary-cluster energy-barrier criterion,缩写为CCEBC)。该理论通过严格的保稳降维变换将积分空间映射到评估空间,开创了轨迹稳定性的量化分析方法,适用于任意多刚体运动系统的大扰动稳定性评估和任意参变量极限值的求取。它清晰地反映了失稳的机理,发现并解释了非线性系统的许多特有现象。已经在国内外电力系统暂态稳定分析和控制工程的各方面得到实际应用的扩展等面积准则(EEAC)就是这样的一个范例。本专著的内容全部是作者及其研究小组在1986年~1999年期间的研究成果,特别是国家自然科学基金资助项目(59577002)、国家电力公司重点科研项目(B953015及1999 SPKJ 010-20)、国家重点基础研究专项经费资助项目“我国电力大系统灾变防治和经济运行的重大科学问题的研究”(G1998020301)中的成果。全书分为两篇,第1篇提出普遍适用于非自治非线性多刚体运动系统的稳定性理论CCEBC,推导普遍性的结论,并给出由多个弹簧构成的系统实例;第2篇介绍这个理论在电力系统暂态稳定分析和控制中的具体体现和工程应用。

本书可供与稳定性理论及分析有关专业的大学生、研究生、教师及研究人员参考,特别对于电力系统专业的有关人员具有重要价值。

ABSTRACT

Numerical integration can not give quantitative stability information. Lyapunov functions provide sole sufficient condition for autonomous systems stability, and it is very difficult to develop Lyapunov functions with meaningful stability domain for a dissipative system, or a nonautonomous system, or a multi-rigid-body system. The sole exception is the equal-area criterion limited to a Hamilton system of two-rigid-body.

This book introduces complementary-cluster energy-barrier criterion (CCEBC) which is a rigorous theory and quantitative method for general motion stability of any non-conservative and nonautonomous systems. CCEBC integrates the whole dynamic equations in the multi-rigid-body space with as detailed models and scenarios as needed, then divides the whole disturbed trajectory into complementary-subset in all possible ways. For each pair of complementary clusters, the trajectories within either cluster are aggregated into an equivalent trajectory at the inertia center of the relevant cluster, thus trajectories of the equivalent two-rigid-body system are formed. The applied mapping function is called complementary-cluster center-of-inertia(CCCOI) transformation. The necessary and sufficient conditions of stability of the multi-rigid-body system are rigorously preserved into the most critical image named as dominant image, whose stability margin is the minimum one among the margins of the all images. If and only if all CCCOI images are stable, the original system is stable. It can be proven that the margin of the dominant image represents the stability degree of the original multi-rigid-body system.

The extended equal-area criterion (EEAC) for power system stability, which has been used in many engineering projects, is just such an example. EEAC method has been proved to furnish a necessary and sufficient condition for stability of multimachine systems, and to be a rigorous direct method. The most critical CCCOI image among the all decides the critical mode and stability limits.

The outstanding performances of EEAC have been demonstrated by the on-line operation records in an EMS environment of Northeast China Power System since September 1992, and by off-line engineering services in about ten Chinese utilities and EDF France, and by commercialized software packages-TSAT and FASTEST.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 59577002), State Power Corporation of China (B953015 and 1999 SPKJ 010-20), and National Key Basic Research Special Fund of China (No. G1998020301).

致 读 者

社会主义的根本任务是发展生产力,而社会生产力的发展必须依靠科学技术。当今世界已进入新科技革命的时代,科学技术的进步不仅是世界经济发展、社会进步和国家富强的决定因素,也是实现我国社会主义现代化的关键。

科技出版工作肩负着促进科技进步,推动科学技术转化为生产力的历史使命。为了更好地贯彻党中央提出的“把经济建设转到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来”的战略决策,进一步落实中共江苏省委、江苏省人民政府作出的“科教兴省”的决定,江苏科学技术出版社于1988年倡议筹建江苏省科技著作出版基金。在江苏省人民政府、省委宣传部、省科委、省新闻出版局负责同志和有关单位的大力支持下,经省政府批准,由省科学技术委员会、省出版总社和江苏科学技术出版社共同筹集,于1990年正式建立了“江苏省金陵科技著作出版基金”,用作支持自然科学范围内的符合条件的优秀科技著作的出版补助。

我们希望江苏省金陵科技著作出版基金的建立,能为优秀科技著作在江苏省及时出版创造条件,以通过出版工作这一“中介”,充分发挥科学技术作为第一生产力的作用,更好地为我国社会主义现代化建设和“科教兴省”服务;并能带动我省科技图书提高质量,促进科技出版事业的发展和繁荣。

建立出版基金是社会主义出版工作在改革中出现的新生事物,期待得到各方面给予热情扶持,在实践中不断总结经验,使它逐步壮大和完善。更希望通过多种途径扩大这一基金,以支持更多的优秀科技著作的出版。

这次获得江苏省金陵科技著作出版基金补助出版的科技著作的顺利问世,还得到江苏联合信托投资公司的赞助和参加评审工作的教授、专家的大力支持,特此表示衷心感谢!

江苏省金陵科技著作出版基金管理委员会

前言

稳定性是力学系统的基本问题,也是社会、人口、经济、军事和生产实践中的重大课题,不能保证稳定的系统是谈不上其他品质的。大系统的稳定分析和控制不但是重大的基础科学研究,对于解决现实生活和生产中的问题也有特别重要的意义。如何在多刚体受扰轨迹中找到临界稳定的特征,如何定义和评估实际轨迹离开临界轨迹的“距离”,一直是数学界和控制理论界的难题,大扰动下的稳定分析至今仍停留在定性的水平上。

电力系统的安全供电对于社会文明和国民经济至关重要,而稳定性又是电力系统安全运行的关键。对此,世界各国均不乏惨痛教训。电力系统暂态稳定性问题在非线性理论和实践方面都具有代表性,其数学模型是强非线性的微分代数方程组,阶数可达数万,并带有连续和/或不连续的时变参数。大区电网的互联、电力市场的形成和发展使安全稳定的裕度越来越小,开发有量化和在线能力的暂态稳定分析和电压安全分析工具,以及相应的控制决策支持工具成为越来越迫切的需要。

笔者在 1986 年提出的扩展等面积准则(extended equal-area criterion,缩写为 EEAC)较完美地解决了这个问题。基于 EEAC 理论,笔者及其研究小组成功开发了世界上至今唯一的暂态稳定性定量分析商品软件,并成功地应用于国内外电力系统的多项工程中。最近,针对电力系统暂态稳定性分析的 EEAC 理论已经被拓广为适用于一般非自治非线性多刚体运动稳定性问题的量化理论——互补群群际能量壁垒准则(complementary-cluster energy-barrier criterion,缩写为 CCEBC)。

CCEBC 将多刚体运动系统稳定评估任务分解为在 $\mathbf{R}^n$ 中求取受扰轨迹和在 $\mathbf{R}^1$ 中对映射轨迹进行定量分析这两个子任务。用前者来保证模型的适用性和精度,用后者进行量化分析,并指导对稳定极限值的搜索,其中用互补群惯量中心相对运动(CCCOI-RM)变换来保证上述分解-聚合的求解框架的严格性。CCEBC 理论揭示了非自治非线性多刚体运动系统稳定性的机理和规律,严格地给出稳定的充分必要条件,并能预言某些尚未被发现的奇异现象的存在。孤立稳定域及由其引起的奇异吸引子现象、混沌现象、控制负效应等现象的发现和破译就是生动的例子。稳定研究中,相当成熟的建模理论和缺乏物理解释的数值积分法之间严重不协调的状况开始改观。

东北电网在 1993 年正式将能量管理系统中的 EEAC 模块交付给调度员日常使用,被国际大电网组织确认为世界上首例成功的在线暂态稳定分析工程,EEAC 在山东、山西和福建等电力企业的离线应用也已获得显著效益。有关成果曾获能源部 1991 年度科技进步理论成果一等奖,1994 年度能源部科技进步应用成果一等奖和 1996 年度国家科技进步一等奖。法国电力公司(EDF)从 1994 年以来,一直将 EEAC 用于其规划工作。EEAC 已经成为唯一能对大扰动稳定性作量化分析的商品软件进入国际市场,并被美国电力科学院的软件支持中心誉为“新一代的电力系统稳定分析软件”。

写一本关于 CCEBC 和 EEAC 理论及应用的专著是笔者很久以来的梦想。但一方面感

到理论尚未成熟,应用经验也欠丰富,另一方面也预见到写作的难度,故曾多次谢绝了出版社的约稿。当真正开始提笔时,才悟到实际的困难仍然被大大地低估了。要对非自治非线性多刚体运动系统稳定性这个理论难题做出全面的论述,笔者在知识面和数学功底上都感到力不从心;这类稳定性分析的量化研究几乎还是一片空白,如何对 CCEBC 理论给出令人信服的证明,深感缺乏形式化的能力;另外,CCEBC 的研究方式是如此地不同于已有的稳定性理论,没有任何类似的描述框架可做参考,这对笔者的条理性 and 表达能力也是一个巨大的挑战。反复斟酌后,本书定位为了一本介绍用 CCEBC 定量理论来研究非自治非线性系统(例如电力系统)运动稳定性的学术专著。它既不是对这个领域的全面概括,也不具体论述电力系统暂态稳定分析的其他各种直接法,而仅限于笔者及其研究小组的研究成果。本书的前半部分是工程师在解决实际问题的基础上努力扩展其概念外延的一次尝试,而后半部分介绍 CCEBC 理论框架在实际电力系统中的工程应用,其中有不少首次发表的研究成果。

虽然 CCEBC 只涉及了非自治非线性稳定性理论的一隅,并且远未完善,但毕竟开创了一条崭新的研究途径。笔者认为,利用数值积分技术来拓广稳定性理论的研究途径,是稳定性理论研究的发展方向之一,也是计算机技术发展的必然结果。希望本书能反映笔者的以下体会:一方面,工程实践为理论研究提供了机会和灵感;另一方面,探索自然规律的根本目的是在实际应用中更好地驾驭自然。正是这样的不断循环和升华,创造了当代的科技,也是开创未来的动力。

没有笔者所在的电力自动化研究院(NARI)及其归属的国家电力公司的支持,没有研究小组全体成员的努力,EEAC 不可能在短短 10 年内就从工程猜想演变为严格的理论,从学术研究进入广泛的工业应用,从算法的改进发展到国际商品化软件包,从电力系统拓广到一般性运动系统。本书的部分内容曾多次在国内外的学术会议、研究生课程、工程师短训班上使用过,EEAC 和 CCEBC 的发展极大地得益于这些广泛的讨论。笔者特别感谢 EEAC 早期软件的使用者,他们的胆识和大度为这株幼苗留出了生存的空间,而他们的应用又促进了 EEAC 的成长。

本书内容反映了在已完成的国家自然科学基金资助项目(59577002),国家电力公司科研项目(B953015)中取得的成果,也包含正在进行中的国家电力公司科研项目(1999 SPKJ 010-20)和国家重点基础研究专项经费资助项目“我国电力大系统灾变防治和经济运行的重大科学问题的研究”的子课题“稳定机理及鲁棒性”(G1998020301)的成果。感谢江苏科学技术出版社 4 年来锲而不舍地鼓励笔者及早地将阶段性成果写成书,以推动学科和该成果的发展。

没有万能的方法,CCEBC 也不可能例外。这本书的目的之一正是为了和更多的学者共同探讨其局限性,寻找对策,并努力拓广有关的理论和应用。征途决非平坦,必须一步一个脚印地去拼搏,对本书的任何评论和指正都是其中重要的一步。

薛禹胜

1999 年 7 月

图 表 清 单

图 1-1	受扰轨迹与稳定域	3
图 1-2	受扰轨迹稳定性的工程判断	8
图 1-3	定性稳定分析的局限性	10
图 1-4	暂态稳定分析的实践和需要之间的差距	11
图 2-1	若 R^n 中有 UPG, 则对应的 R^2 中必有 UPG	13
图 2-2	若 R^n 中没有 UPG, 则 R^2 中一定也没有 UPG	15
图 2-3	CCCOI-RM 变换的图解	17
图 2-4	复杂动态的 CCCOI-RM 变换	20
图 3-1	首摆失稳相轨迹	27
图 3-2	非自治因素对 NRP 位置坐标值的影响	27
图 3-3	减速后的多摆失稳相轨迹	28
图 3-4	加速后的多摆失稳相轨迹	29
图 3-5	相平面上的稳定相轨迹	30
图 4-1	参数稳定裕度与轨迹稳定裕度	33
图 4-2	函数不光滑引起的不收敛	35
图 4-3	有效的稳定分析要求稳定的充分条件与必要条件相同	35
图 4-4	$\gamma-\omega$ 扩展相平面的特性	38
图 4-5	加速度-速度平面上的首摆失稳轨迹	39
图 4-6	加速度-速度平面上的偶次多摆失稳轨迹	39
图 4-7	加速度-速度平面上的奇次多摆失稳轨迹	40
图 4-8	加速度-速度平面上的稳定轨迹	40
图 4-9	$\gamma-\delta$ 扩展相平面	43
图 4-10	$P-\delta$ 扩展相平面	44
图 4-11	外力-位置平面上的首摆失稳轨迹	46
图 4-12	单刚体首摆失稳时的能量关系	46
图 4-13	外力-位置平面上的偶次多摆失稳轨迹	47
图 4-14	单刚体反向首摆稳定时的能量关系	47
图 4-15	单刚体正向第 2 摆失稳时的能量关系	47
图 4-16	外力-位置平面上的奇次多摆失稳轨迹	48
图 4-17	单刚体正向首摆失稳时的能量关系	48
图 4-18	单刚体反向第 2 摆失稳时的能量关系	48
图 4-19	单刚体正向第 3 摆失稳时的能量关系	48
图 4-20	外力-位置平面上的稳定轨迹	49
图 4-21	$ P_m - P_e $ 的非单调性	49
图 4-22	稳定轨迹的能量裕度(当 FEP 处于恢复力下降阶段时)	52
图 4-23	稳定轨迹的能量裕度(当 FEP 处于恢复力上升阶段时)	52

图 5-1	CCCOI-RM 变换的实现	58
图 5-2	失稳轨迹的裕度计算	60
图 5-3	稳定轨迹的裕度计算	60
图 5-4	利用 $\mathbf{R}^1$ 中的稳定裕度概念来量化 $\mathbf{R}^n$ 中的稳定性	61
图 5-5	轨迹裕度最小值规则和参数稳定裕度最小值规则	65
图 5-6	稳定信息的产生和提取	66
图 6-1	TM 参变序列与 CM	69
图 6-2	前摆和后摆能吸收的最大动能 $A_{\text{dec. max}}$	70
图 6-3	第 2 摆的轨迹稳定裕度	71
图 6-4	$\mathbf{R}^n \rightarrow n \times \mathbf{R}^1$ 线性保秩变换	75
图 6-5	临界模式的识别问题具有迭代的本质	78
图 6-6	识别主导模式的混合框架	79
图 6-7	识别主导模式的框图	80
图 6-8	主导模式的识别	81
图 7-1	保守的两刚体运动系统的轨迹特点	87
图 7-2	两刚体耗散系统的轨迹特点	88
图 7-3	多刚体及其 $\mathbf{R}^1$ 映象的轨迹特点	90
图 7-4	近似的哈密顿系统	91
图 7-5	非哈密顿校正相当于在映象的 $P-\delta$ 曲线上加调制	93
图 7-6	稳定裕度的时变校正	94
图 7-7	失稳模式在参数空间中的分布	98
图 7-8	NARI(由 ISD 引起的邻域吸引子)现象	99
图 9-1	CCEBC 的精确性(东北电网 1991 年运行方式 38°-133 三相短路)	104
图 9-2	CCEBC 的有效性	108
图 10-1	质点减速力的性质	112
图 10-2	相图的结构随 α 而变的情况	114
图 10-3	按轨迹形态划分相平面($\alpha=0.25$)	114
图 10-4	稳定裕度 η 与故障清除时间 τ 的关系图	114
图 10-5	失稳模式在 τ 轴上的分布	115
图 10-6	首摆临界失稳轨迹	115
图 10-7	首摆临界失稳的相轨迹	115
图 10-8	外力-位置平面上的首摆失稳轨迹	115
图 10-9	第 2 摆临界失稳轨迹	116
图 10-10	第 2 摆临界失稳时的相轨迹图	116
图 10-11	外力-位置平面上的第 2 摆临界失稳轨迹	116
图 10-12	临界稳定受扰轨迹	117
图 10-13	稳定的相轨迹图	117
图 10-14	外力-位置平面上的稳定轨迹	117
图 10-15	受激单质点弹簧系统中的基本运动模式	118
图 10-16	受激单质点弹簧系统的混沌运动	119
图 10-17	稳定裕度 η 与故障清除时间 τ 的关系图($D=0.1$)	120
图 10-18	不同 τ 值下的 $P_e(\delta)$ 轨迹	121
图 10-19	若 $P_{ep}(\delta_r) - P_{ed}(\delta_r)$ 的符号可能随 τ 而变, 则 $\eta(\tau)$ 为非单调函数	121
图 10-20	动态鞍点 δ_{DSP1} 与清除时间 τ 的关系	122

图 10-21	动态鞍点 δ_{DSP2} 与清除时间 τ 的关系	122
图 10-22	耗散项对首摆临界失稳 $P-\delta$ 轨迹的影响	123
图 10-23	耗散项对第 2 摆临界失稳 $P-\delta$ 轨迹的影响	123
图 10-24	有耗散项时的稳定轨迹 $P-\delta$	124
图 10-25	$UM: \{S_i, N_i\}$ 及 η 与 τ 的关系	125
图 10-26	失稳模式在 τ 轴上的分布情况	126
图 10-27	在 $\delta-t$ 平面上至少需要 18 s 的受扰轨迹才能发现失稳	126
图 10-28	在 $P-\delta$ 平面上只需要 13.25 s 的轨迹就可以判定系统的失稳	126
图 10-29	外力-位置平面上的第 2 摆失稳轨迹	127
图 10-30	$\tau=1.844$ s 时的 $P-\delta$ 扩展相轨迹图	127
图 10-31	系统轨迹时间响应曲线	127
图 10-32	外力-位置平面上的第 4 摆失稳的轨迹	128
图 10-33	失稳模式在参数空间中的分布	129
图 10-34	失稳模式对于参数的极其敏感性	129
图 11-1	电力系统的安全稳定域	133
图 11-2	电力系统暂态安全稳定性的分类	135
图 11-3	电力系统运行状态及其转移(根据文献[56]修改)	135
图 11-4	预防控制、紧急控制以及它们的协调	137
图 12-1	TSA 任务的分解和求解	140
图 12-2	电力系统的模型框架	141
图 12-3	按经验提取稳定性定性信息	148
图 13-1	等面积准则	149
图 13-2	OMIB 系统及其功角曲线	150
图 13-3	计及转移电导或本地负荷时的 OMIB 功角曲线	151
图 13-4	哈密顿 OMIB 系统的 TSA	153
图 13-5	EAC 和李雅普诺夫方法	157
图 14-1	第 2 摆(反向)失稳	159
图 14-2	参考机不同则运动方向相反	160
图 14-3	时变 OMIB 系统的 UEP 和 DSP	163
图 14-4	调压器并未改变 UEP 却影响了稳定性	163
图 14-5	非自治 OMIB 系统在稳定时的稳定裕度	164
图 15-1	降阶与积分	168
图 15-2	将观察空间与积分空间分离	171
图 16-1	从求解空间到观察空间的参量映射, $\mathbf{R}^n \rightarrow E(\mathbf{R}^2) \rightarrow E(\mathbf{R}^1)$	176
图 16-2	多机系统不稳时的特征	176
图 16-3	多机系统稳定时的特征	177
图 16-4	参数空间中的分岔情况	181
图 16-5	CCCOI-RM 映射的步长和内插函数	185
图 17-1	IEEAC	187
图 17-2	IEEAC 的稳定不变性	188
图 17-3	映象 $P-\delta$ 曲线的获取	189
图 17-4	映象 $P-\delta$ 曲线的不连续性	190
图 17-5	切机对映象曲线的影响	191
图 18-1	泰勒级数截尾补偿系数 α 的影响	204

图 18-2	第 2 摆失稳的机理 $A_{\text{dec.2}}^{\text{max}} - A_{\text{inc.2}} < 0$	208
图 18-3	第 2 摆失稳的必要条件 $P_m < P_{\text{cp}}$, 此时 $A_{\text{dec.2}}^{\text{max}} < A_{\text{inc.2}}^{\text{max}}$, 且有 $t_{\text{c.2}} < t_{\text{c.1}}$	208
图 18-4	第 2 摆失稳的充分条件, $A_{\text{dec.2}}^{\text{max}} < A_{\text{inc.2}}^{\text{max}}$	209
图 18-5	第 2 摆稳定性与 $P_m - P_{\text{cp}}$ 的关系	210
图 18-6	多时段故障的例子	212
图 18-7	一阶 AVR 模型的例子	215
图 19-1	正弦预报的误差方向	222
图 19-2	分段的同调近似	224
图 19-3	SEEAC 中的同调近似	224
图 19-4	分段的同调近似可以减少误差	224
图 19-5	典型两群失稳动态下的主导 $P_e(\delta)$ 曲线	225
图 19-6	非两群动态下的主导 $P_e(\delta)$ 曲线的实例	225
图 19-7	非两群动态下的主导 $P_e(\delta)$ 曲线	226
图 19-8	单段正弦预报的 $\delta-t$ 误差和 $P-\delta$ 误差	227
图 19-9	分段正弦预报的 $\delta-t$ 误差三角形和 $P-\delta$ 误差三角形	227
图 19-10	时变校正量的符号	228
图 19-11	分段正弦预报的步长	230
图 19-12	DEEAC 的稳定裕度	230
图 19-13	DEEAC 算法过程	231
图 20-1	$\frac{\partial \eta}{\partial P_{\text{ms}}}$ 与有关偏导数的关系	239
图 20-2	$S_P^{(2)}_{\text{ms}}$ 与有关偏导数的关系	241
图 21-1	τ 影响 η 的两种途径	256
图 21-2	群内不同调算例的摇摆曲线	257
图 21-3	消耗在群内等值自电导上的电功率变化量与群内的非同调性指标的关系	258
图 21-4	群际传输电功率的变化(华中网算例)	259
图 21-5	群际传输电功率的变化(东北网算例)	259
图 21-6	故障切除时间为 0.32 s 时的系统摇摆曲线和功角曲线	266
图 21-7	故障切除时间为 0.38 s 时的系统摇摆曲线和功角曲线	266
图 21-8	故障切除时间为 0.47 s 时的系统摇摆曲线和功角曲线	266
图 21-9	故障切除时间为 0.50 s 时的系统摇摆曲线和功角曲线	267
图 21-10	故障切除时间为 0.70 s 时的系统摇摆曲线和功角曲线	267
图 22-1	不同的参数值对应于不同的主导模式	269
图 22-2	盲目的轨迹迭代	273
图 22-3	参数临界群的穷尽式识别	274
图 22-4	参数临界群的智能识别	275
图 22-5	主导模式的识别	278
图 23-1	EEAC 算法框架	283
图 23-2	用 IEEAC 得到的一些 $P(\delta)$ 映象实例	285
图 23-3	EEAC 算法之间的信息接口	286
图 24-1	暂态电压稳定算例的转矩-滑差曲线	291
图 24-2	暂态电压稳定算例的感应电动机节点电压变化曲线	291
图 24-3	暂态电压失稳算例的转矩-滑差曲线	292
图 24-4	暂态电压失稳算例的感应电动机节点电压变化曲线	292

图 24-5	描述暂态电压可接受性的二元表	294
图 24-6	η - λ 曲线	294
图 25-1	临界群中的全部发电机均被 T 激励时的传递函数	304
图 25-2	临界群的等值发电机被 T 激励	304
图 25-3	仅激励主导群中的 1 台机(G34)	304
图 25-4	同时激励主导群中的各机(G33 和 G34)	305
图 26-1	精确的暂态稳定分析必须基于完整的受扰轨迹	307
图 26-2	τ 值对稳定裕度的影响	310
图 26-3	IID 及 ISD 现象(东北电网)	311
图 26-4	故障切除时间为 0.48 s 时的系统稳定	312
图 26-5	故障切除时间为 0.52 s 时,4 台机第 4 摆失稳	312
图 26-6	故障切除时间为 0.54 s 时的系统再次稳定	312
图 26-7	故障切除时间为 0.55 s 时,另外 4 台机首摆失稳	313
图 26-8	系统的单线图	314
图 26-9	η 在 τ 轴上的分布图	314
图 26-10	故障切除时间为 0.550 s 时的系统稳定	315
图 26-11	故障切除时间为 0.570 s 时的失稳模式 $UM: \{S_2, 5\}$	315
图 26-12	故障切除时间为 0.580 s 时的失稳模式 $UM: \{S_1, 7\}$	315
图 26-13	故障切除时间为 0.600 s 时系统再次稳定	315
图 26-14	故障切除时间为 0.610 s 时的系统摇摆曲线和功角曲线	316
图 26-15	NARI 的实例	316
图 26-16	$\tau=0.380$ s 时,两机系统稳定	318
图 26-17	$\tau=0.455$ s 时,两机系统正向失步 1 周后反向失稳	319
图 26-18	$\tau=0.460$ s 时,两机系统故障后失步 2 周自行再同步	319
图 26-19	$\tau=0.490$ s 时,两机系统正向失步 3 周后反向失稳	319
图 26-20	$\tau=0.510$ s 时,两机系统故障后失步 4 周自行再同步	320
图 26-21	$\tau=0.610$ s 时,两机系统故障中失步 1 周自行再同步	320
图 26-22	经典模型多机系统失步后自同步中的混沌	324
图 26-23	稳定控制的机理	326
图 26-24	切负荷对稳定裕度的影响	331
图 26-25	切除主导群中的机组对于稳定性的影响	332
图 26-26	切机的实例	333
图 27-1	定性暂态稳定分析与定量暂态稳定分析	336
图 27-2	稳定控制中的分析任务	338
图 27-3	为什么说真正的实时计算并不现实	339
图 27-4	稳定控制的信息瓶颈	342
图 27-5	EEAC 软件在线环境	351
图 27-6	EEAC 在线软件的实时数据流程	351
图 27-7	稳定分析的输出信息	352
图 27-8	发电功率空间的稳定域	353
图 27-9	切负荷可能引起 η 的非单调性变化	356
图 27-10	最优解的搜索过程	357
图 27-11	紧急控制框架	361
图 27-12	在线预计算紧急控制系统	362

图 A-1	CCCOI-RM 变换和 CCCOA-RM 变换的结果比较	372
图 A-2	有界包络距离的示意图	374
图 A-3	CCCOI-RM 变换和 city-block 变换的结果相近的算例	375
图 A-4	CCCOI-RM 变换和 city-block 变换的结果相差较大的算例	375
表 5-1	积分空间与观察空间	66
表 10-1	CCT 估计值的精度评估	128
表 16-1	$E(\mathbf{R}^1)$ 和 $\mathbf{R}^*$ 的互补性	182
表 16-2	模型聚合和轨迹聚合	184
表 16-3	EEAC 的不同形式	185
表 23-1	EEAC 算法的粗框图	287
表 26-1	等值 3 机 4 节点系统参数表	314
表 26-2	再同步现象在 τ 轴上的分布	320
表 26-3	多机系统自同步的不同动态模式在 τ 轴上的分布	325
表 27-1	CIGRE TF38-02-09 的 32 个试题	345
表 27-2	EEAC 在 16 个中国实际电力系统上的仿真精度统计表	346
表 27-3	EEAC 在某 186 机, 1 430 节点的实际电力系统上的仿真精度	347
表 27-4	EDF 对软件速度的测试结果	349
表 27-5	全网扫描 CCT 计算误差的算例数分布	353
表 27-6	计算时间统计	353
表 27-7	对稳定性进行量化的重要性	358
表 27-8	台州电厂可供采用的紧急控制措施	359
表 27-9	浙江电力系统决策结果	359
表 27-10	并行加速比测试结果	364
表 27-11	南方系统单个预想故障的计算时间	365
表 27-12	二滩系统单个预想故障的计算时间	365

符号及缩写

数 学 符 号

$\in$	$i \in S, i$ 属于集 S
$\notin$	$i \notin S, i$ 不属于集 S
$\cap$	交集
$\cup$	并集
$\emptyset$	空集
E	全集
$\Rightarrow$	蕴涵
$\Leftrightarrow$	$A \Leftrightarrow B$, 当且仅当 A 成立时, B 才成立
$\rightarrow$	映射到
$\sum$	求和
$\forall$	对于所有的

一 般 符 号

A	一对互补子集中的余下子集
A_{acc}	加速面积
A_{dec}	减速面积
A_{dec}	动能减少面积
$A_{\text{dec}}^{\text{UEP}}$	UEP 处的 A_{dec}
$\{A_i, 2\}$	S_i 的第 2 摆反向失稳模式
$\{A_i, \text{大于 } 2 \text{ 的偶数}\}$	S_i 的多摆反向失稳模式
A_{inc}	动能增加面积
d 轴	直轴
D	阻尼因子
$E = E_k + E_p$	由动能和势能组成的总能量
E_d'	电抗 X_d' 后面的电势
$E_{k, \text{DSP}}$	DSP 处的暂态动能
$E_k(\tau_g^+)$	映象 OMIB 系统在 τ_g^+ 时的实际动能
E_{lim}	临界值 $E_{\text{dec. max}}$
E_Q	q 轴同步阻抗后的虚构电势
$E(\mathbf{R}^1)$	$\mathbf{R}^1$ 映象的全集
$E(\mathbf{R}^2)$	$\mathbf{R}^2$ 映象的全集
f	非运动状态变量的非线性微分函数
$G_{ij}(B_{ij})$	支路 ij 的电导(电纳)
H_i	感应电动机的惯性常数

i, j, k, l	n 个刚体中的一个
J	代价指标
M	等值系统的广义惯量
$\{m_D, m_P\}$	再同步中在故障中和故障后失步的周期数
M_m	感应电动机的初始机械功率
$M_{e, \max}$	感应电动机的初始电磁功率的最大值
M_s (或 M_a)	S (或 A) 群的等值广义惯量
M_T	整个系统的广义总惯量;
N_c	参数 α 的临界摆次
N_s	稳定轨迹的主导摆次
N_t	主导摆次
N_u	失稳轨迹的主导摆次
P	力 (或力矩)
P_{acc}	加速力 (即不平衡力)
P_c	正弦电功率沿水平方向的偏移量
P_{dec}	减速力 ($-P_{acc}$)
P_e	广义制动力 (或力矩或功率)
$P_{IF,1}^{\min}(P_{IF,1}^{\max})$	最小可能不稳定 (最大可能稳定) 的联络线功率
P_m	广义驱动力 (或力矩或功率)
$P_{\max}$	正弦电功率的幅值
P_{ub}	不平衡力 (即加速力)
P_{ub}^H	哈密顿系统的不平衡力
$P_{ub}^{TC}(\delta)$	不平衡力的时间校正量
q 轴	交轴
$\mathbf{R}^1$	单刚体空间
$\mathbf{R}^2$	两刚体空间
$\mathbf{R}^n$	多 (n) 刚体空间
S	滑差
S	一对互补子集中的领前子集
S_c	参数 α 的临界群
$\{S_c, N_c\}$	参数 α 的临界模式
$\{S_t, 1\}$	S_t 的首摆正向失稳模式
$\{S_t, \text{大于 } 1 \text{ 的奇数}\}$	S_t 的多摆正向失稳模式
S_s	稳定轨迹的主导群
$\{S_s, N_s\}$	稳定轨迹的主导模式
S_t	主导群
$\{S_t, N_t\}$	轨迹模式
S_u	失稳轨迹的主导群
$\{S_u, N_u\}$	失稳轨迹的主导模式
S_α	η 对参数 α 的一阶灵敏度系数
$S_\alpha^{(2)}$	η 对参数 α 的二阶灵敏度系数
t_c	临界清除时间
t_c^{DE}	DEEAC 求得的 CCT