

庆祝中国工程院成立20周年（1994—2014）

中国工程院院士文集



电力系统安全域

余贻鑫 著

中国电力出版社



庆祝中国工程院成立20周年（1994—2014）

中国工程院院士文集



电力系统安全域

余贻鑫 著

中国电力出版社



内 容 提 要

《中国工程院院士文集》是中国工程院组织出版的丛书,收录了院士的传略、学术论著、中外论文及其目录、讲话文稿与科普作品等。本书为余贻鑫院士学术论文的汇编。

本书收录了余贻鑫院士自 1980 年代中期至今公开发表的、具有代表性的、与安全域相关的科研论文共 48 篇。全书分两篇,分别为理论篇和应用篇。理论篇共四章,分别为潮流安全域、保证暂态稳定的动态安全域、保证电压稳定的安全域、保证小扰动稳定的安全域;应用篇共六章,分别为概述、基于安全域的安全性评估和风险评估、基于安全域的成本优化与定价、基于安全域的安全性控制、基于安全域的机组启停和发电经济调度及基于安全域的电网扩展规划。

本书可供从事电力系统安全性与稳定性等相关研究的科研人员阅读,也可供高等院校电力系统专业师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统安全域 / 余贻鑫著. —北京: 中国电力出版社, 2014.10
(中国工程院院士文集)

ISBN 978-7-5123-5714-3

I. ①电… II. ①余… III. ①电力系统-安全管理-文集
IV. ①TM7-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 060239 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 10 月第一版 2014 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 32.75 印张 803 千字 4 插页

定价 120.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

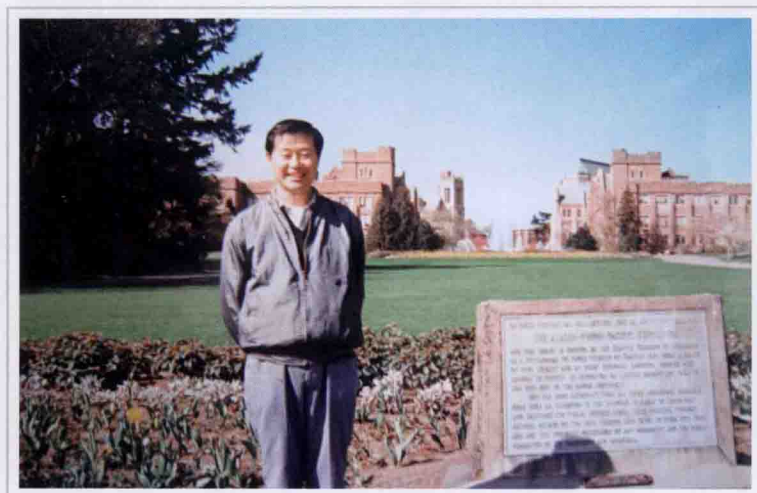
版 权 专 有 翻 印 必 究



作者近影



1981 年于加利福尼亚大学伯克利分校



1991 年于华盛顿大学



1996 年于日本九州



1997 年于日本九州工业大学开展讲座



2002 年与陈省身院士（坐）和吴复立教授（右立）合影



2009 年于天津大学北洋园



2004 年于美国电科院 (US EPRI) 做安全域研究阶段报告并与专家合影



2009 年 7 月于第一届智能电网论坛上做报告



2010 年 3 月于东京智能电网论坛



2012 年 4 月于北京参加中国—加拿大新能源与智能电网技术研讨会



2012 年 6 月于香港工程科学院参加智能电网会议

2002 年 10 月与课题
组成员攀登玉龙雪山



欢度元旦
天津大学余贻鑫教授课题组二零零六年元旦留念



2006 年元旦余贻鑫教授课题组合影



2010 年 10 月与研究生们讨论问题



1954 年天津大学入学注册照



1961 年与夫人黄纯华结婚照



1990 年全家福



1995 年秋与夫人于日本

1995 年与妻子黄纯华
教授于日本福冈海滩



2011 年与妻子黄纯华教授于加拿大班夫



2011 年与妻子和外孙女合影



2011 年全家摄于天大新园村住所大院

《中国工程院院士文集》总序

二〇一二年暮秋，中国工程院开始组织并陆续出版《中国工程院院士文集》系列丛书。《中国工程院院士文集》收录了院士的传略、学术论著、中外论文及其目录、讲话文稿与科普作品等。其中，既有早年初涉工程科技领域的学术论文，亦有成为学科领军人物后，学术观点日趋成熟的思想硕果。卷卷《文集》在手，众多院士数十载辛勤耕耘的学术人生跃然纸上，透过严谨的工程科技论文，院士笑谈宏论的生动形象历历在目。

中国工程院是中国工程科学技术界的最高荣誉性、咨询性学术机构，由院士组成，致力于促进工程科学技术事业的发展。作为工程科学技术方面的领军人物，院士们在各自的研究领域具有极高的学术造诣，为我国工程科技事业发展做出了重大的、创造性的成就和贡献。《中国工程院院士文集》既是院士们一生事业成果的凝练，也是他们高尚人格情操的写照。工程院出版史上能够留下这样丰富深刻的一笔，与有荣焉。

我向来以为，为中国工程院院士们组织出版《院士文集》之意义，贵在“真、善、美”三字。他们脚踏实地，放眼未来，自朴实的工程技术升华至引领学术前沿的至高境界，此谓其“真”；他们热爱祖国，提携后进，具有坚定的理想信念和高尚的人格魅力，此谓其“善”；他们治学严谨，著作等身，求真务实，科学创新，此谓其“美”。《院士文集》集真、善、美于一体，辩而不华，质而不俚，既有“居高声自远”之澹泊意蕴，又有“大济于苍生”之战略胸怀，斯人斯事，斯情斯志，令人阅后难忘。

读一本文集，犹如阅读一段院士的“攀登”高峰的人生。让我们翻开《中国工程院院士文集》，进入院士们的学术世界。愿后之览者，亦有感于斯文，体味院士们的学术历程。

徐匡迪

2012年7月

前言

长期以来，电力系统安全性和稳定性的分析方法，一般都是按指定场景（运行方式，即运行点）在一种或几种故障方式下，由仿真计算得出结果，称为逐点法。虽然迄今它仍然在电力系统分析中发挥巨大作用并成为主流，但它难以对电力系统的运行状态给出整体评价，如运行点在各个方向上离稳定边界有多远，或稳定储备有多大。

安全域的方法是在逐点法基础上发展起来的新方法，它从域的角度出发考虑问题，描述的是整体可安全稳定运行的区域。系统运行点与安全域边界的相对关系，可提供安全裕度和最优控制信息，能使电力系统实时安全性监视、防御与控制更科学、更有效。

本文集讨论的安全域所定义的空间包括：由全部节点的注入有功功率和无功功率组成的节点注入功率空间；发电机节点用 $P-V$ ，负荷节点用 $P-Q$ 表示的决策空间；用系统中某个割集上的有功功率和无功功率组成的割集功率空间。这样的空间，其安全域便于监视与控制。在假设无功就地平衡的情况下，上述空间均可以简化为有功功率空间。

本文集中所讨论的全部安全域的边界是由系统的网络拓扑唯一确定的，不随运行状态（如节点注入）变化。因此，对于既定的网络拓扑与既定的预想事故，仅需计算一次安全域边界，将其参数（如超平面系数）存于数据库中，供以后计算选用即可，不会增加在线使用的计算负担。基于这一事实，我们虽然也在研究计算各种安全域边界的解析方法，但是采用离线仿真求出大量临界点，进而用拟合法求出安全域边界数学表达式的方法，完全不会影响其在线应用时的计算速度，同时解析法与拟合法可以混合使用，提高了前者的精度，减少了后者的计算负担。

大量的研究表明，注入功率空间和决策功率空间上保证线路电流和节点电压不越限的实用静态安全域边界、注入功率空间和决策功率空间上保证暂态稳定的实用动态安全域边界、注入功率空间或割集功率空间上保证静态电压稳定（即由鞍节分岔点组成）的安全域边界，以及注入功率空间和决策功率空间上（由 Hopf 分岔点组成）保证小扰动稳定性的实用安全域边界，均可以用一个或少数几个超平面（hyperplane，简记为 HP）近似表示。相应的安全性约束的数学描述是个线性组合不等式，这是实用安全域方法的核心。

需要指出的是，在安全域研究工作初期，有两项工作十分有意义：一是基于解耦潮流所

给出的分别保证线路热稳定性和保证节点电压不越限的有功安全域和无功安全域的超多面体表达式，其概念和表达形式都十分简明，有利于对潮流安全域整体的把握；二是注入功率空间上保证暂态稳定的动态安全域的超平面表达式的获得，使我看到了实用安全域方法的希望，坚定了我持续开展实用安全域研究的信心，因为曾以为安全域的数学描述可能是十分复杂和难以应用的。

为防止连锁停电事故的发生，已提出了增强电网态势感知的任务，而安全监视可视化是增强电网态势感知的强有力手段。本文集所提出的安全域边界的超平面描述，使可视化易于实现。

在电力系统优化潮流、安全性定价、机组启停、安全性综合控制和中长期规划等最优化问题中，综合地计及暂态稳定、电压稳定等约束，而又不影响决策速度的问题，始终是个难题。而上述实用安全域边界的数学描述，为在这一大类电力系统最优化问题中各种安全稳定约束的计及带来了巨大便利。这是由于电力系统中许多优化问题的目标函数的变量包含着节点注入的有功功率和无功功率，而安全域给出的约束条件是由相同变量组成的显式不等式描述的，从而使优化问题的求解算法变得极其简易。

最后需要强调的是，超平面形式表达的安全域可使概率安全性估计的计算负担极大降低，因为通常 n 维概率密度函数的 n 重体积分只能用蒙特卡罗法处理，而它可把 n 维概率密度函数的 n 重体积分简化为极其简单的解析计算。

本文集所收集的论文全部是在我指导下，由本人的研究生完成的，所以在这里我要特别感谢他们！其中，有些人还在继续发展这一方法，愿他们取得更大成功。最后还应指出的是，秦超博士及我的在读学生们做了许多文稿汇集工作，没有他们的努力，本书难以在短时间内出版。

余贻鑫

2014年3月

自述

一、求学 立志 坚持

1. 求学之路

1936年，我出生在北京市密云县。家里的教育是忠厚传家久、诗书继世长。父亲长期在政府机关任职员，十分重视让子女得到良好的学校教育。密云县是一座北面临山、西面临水的古城。西城外，离城墙不远处，从北向南流过宽大的白河，夏季河水滔滔，冬季厚厚的冰面也有半里多宽。西城根下沿河边有白坝和黑坝，黑坝河段要比白坝河段深许多，河边是很宽的沙滩，因为沙中含金矿，沙滩在阳光照耀下闪烁发光，这是孩子们夏天游泳的好地方。那时密云城南门外有个面积很大的菜园，这里小河渠纵横交错，并有许多大树，倒了的树横在渠上就成了小桥，夏日虽骄阳似火，但走在小桥上，乘着树的阴凉，听着菜农打水灌溉时吟咏的高亢小调，着实给人天堂般的感受。童年的这些美好回忆至今时常在我的脑海里浮现，形成了我酷爱大自然的个性。

我的小学时光是在密云县第一中心小学度过的，当时学校门口有一块匾，上面写着“有志者事竟成”，虽然当时我还不不太懂得其中的含义，但这一校训是我后来成长的座右铭。1948年秋季在北京辅仁中学（1951年后更名为北京第十三中学）开始了我中学生涯。学校与原辅仁大学北南相连，校园本来是个清朝的贝勒府，典型的王府大院建筑，它的对面是恭王府，周边环境古穆典雅。这地区住着许多名人，在我上学仅十分钟的路程中，总要从画家徐悲鸿的门口走过。对名人们事迹的耳濡目染，在我年幼的心灵里埋下了向往的种子。这所中学师资力量异常雄厚，老师们渊博的学问和生动的课堂讲授，成了同学们多年以后相聚时议论的主题。我最难忘的是数学老师孙梅生先生讲的立体几何，上课时他让学生们合上书本，专注地听他讲授，他先在黑板上画一立体几何图形，然后在课堂里绕着同学边走边讲起来，真是声声入耳，心传神授，严密的数学逻辑论述全部清晰地刻在了我们的脑海里。当时这所中学的足球运动开展得很好，从初中起我交了几位酷爱足球的好朋友，在校的课余时间大多用来踢足球，这使得自幼不太强壮的我，身体

逐渐地好了起来，为日后的学习和工作提供了重要保障。那时学校在一个学期中间有两次月考，记得初中二年级时，有一次对学生家长展示月考试卷，老师把分数高的摆在上面，同一分数的若不止一人，则座位号低的学生试卷摆在上面。由于当时我在班上个头还偏小、座号偏低，因而我的多门考卷都摆在了最上面。此事被前去参观的一位亲戚看到后，转告给了我母亲，母亲虽然平时很忙，不大过问孩子们的学习，但她听到这位亲戚的转告后显得异常高兴，这也激发了我的学习热情与信心，事实上对我来说，努力学习是从这时期才真正开始的。初中毕业时我被以 5% 左右的比例保送到了本校高中。中学阶段我打下了扎实的数理化基础，以致 1954 年我在天津大学电力系一年级入学时，被指派为数理化三科的课代表，后来被选为班长。当时天津大学电力系在第六教学楼，一进楼门有一横幅，上面写着“苏维埃政权加全国电气化=共产主义”，这一口号事实上成了我们这一批电气工程专业学生长期为之奋斗的理想。大学期间正赶上我国制定了“十二年科学发展规划”，提出了“向科学进军”的口号，这时我已立志要成为一名优秀的电力工程师，所以在大学的 4 年里学习一直刻苦努力。我的大学本科阶段正是向苏联学习的高峰时期，无论是教材、上大课、习题课、实验和实习的内容都非常充实，管理非常严格。学校为电力系配备了很好的老师。数学老师张静如教授讲起课来抑扬顿挫、有板有眼，物理老师李金鄂教授把物理讲得十分生动形象。当时的系主任陈荫谷是原西南联大的教授，天津大学建校时从南开大学合过来的，为学生开设电机学。当时的发电厂电力网和电力系统教研室除了从北洋大学合过来的徐庆春教授和王钦仁教授外，还有一批年富力强、学术上已有相当名气的讲师，如后来任天津大学校长的教育家、当时教电力系统课的吴咏诗和著名的继电保护专家贺家李等。受吴咏诗等老师的影响，我本科期间就对电力系统这门科学产生了浓厚的兴趣。

大学期间所受教育的最大收获是使我开始认识到，对于一个科学家思想修养是基本的，要培植心灵的气象，使自己的心宇更大器，只有这样人生的步子才能走得更坚实。在后来长期的教学与科研实践中，我进一步加深了这一认识。因为只有这样，一个人所在的群体才能更和谐，科学事业的成功才有保证。

2. 开始学术生涯

1958 年大学毕业时，我被留校任助教，兼电机教研室秘书，辅导本科学生的电机学，同时开始参与电力系统动态模拟实验室的设计。正当我准备寒假过后开电机学课程时，学校于 1959 年 11 月突然通知我：“学校决定你立即脱产读徐庆春教授的研究生”。当时，我没有丝毫的犹疑就接受了这一决定，回想起来除了服从组织的安排和工作一年多深感理论基础需要强化之外，与初中一年级寒假期间在辅仁中学校园里见到报考辅仁大学的

研究生入学考试时的好奇记忆不无关联。徐庆春教授是当时的教研室主任，在我们本科即将毕业前几个月，他从苏联莫斯科动力学院进修回国，回国后就发起在天津大学建立电力系统动态模拟实验室，得到了水电部的拨款，于1958年底开始启动，我有幸一开始就参与了这一工作。调我做研究生应该是徐庆春教授起主导作用，这使我成为天津大学电气工程与自动化学院的第一位研究生。在徐庆春教授的指导下，我受到研究生的科班训练，建立起严谨治学的学风和积极创新的意识，是我向科学进军的一大里程碑。

1959年11月研究生入学后，学校为这一班13名研究生开设了俄语、复变函数和数理方程等课程，我们扎实地学了半年。但从1960年春夏之交开始，受超声波等技改浪潮的影响，我被安排与电机专业本科生下厂参加技改，在厂里待了几个月，然后又下乡抗旱救灾，接着就开始了困难时期，前后加起来近半年没在学校。研究生课程复课也不知道，张敬如教授等开设的数学解析课只听了末尾，下厂后的俄语课则全部缺席。后来困难时期来临，学校要求学生严格卧床休息，这一时期成为我自学补课的好时机。结果数学考试得了优，俄语在两届研究生90余人的考试中得了最高分96分。

由于是本专业第一个研究生，再加上徐庆春教授当时得了肝炎，许多安排要靠自己发挥主观能动性，包括拟订自己的研究生学习计划和到外单位借用实验装置，这些锻炼了我后来独立组织科研工作的能力。我的研究生论文是《同期发电机再同期的研究》，主要研究工具是模拟计算机。论文的一部分提出了同期发电机再同期的实用判据，作为一篇学术论文在1963年的中国电机工程学会代表大会上宣读，并被收入论文选集。这次会议使我认识了许多电力系统界的前辈和老师，使自己开始步入了电力系统学术界，并开始立志要成为一名优秀的科学技术专家。最难忘的是会议全体代表在中南海受到了毛泽东、周恩来、朱德、刘少奇等众多党和国家领导人的接见，合影照片多年来一直摆在我的身边，鼓舞我在直面向科学进军中所遇到的各种困难，从不畏缩，奋勇拼搏。

电力大系统的研究需要模拟与仿真工具。从1964年起中国开始研究刘家峡—西安330kV输电系统的技术问题，为此，在北京良乡召开了330kV输电科研会议，我参加了会议。会议之后，我开始了电磁与机电暂态过程数字计算机仿真的研究，与中国科学院华北计算站合作，以一个带中继的三机电力系统为研究对象，模型中计及了输电线路的电磁暂态过程、同步电机Park方程、励磁系统模拟和同步电机转子纵轴磁路饱和的影响，以及调速系统的模型——这样的模型在当时是先进的。当时中国科学院华北计算站的计算机是电子管的，内存只有 2×4096 个存储单元，我们用机器代码编写，由于内存太小，要把程序编进去十分艰难。通过一年多的努力，得到了一些结果，还写出了两篇论文。“文化大革命”开始后只得中断，论文的清样也被天津大学学报送还作者“保存”。半途而废，甚感遗憾。