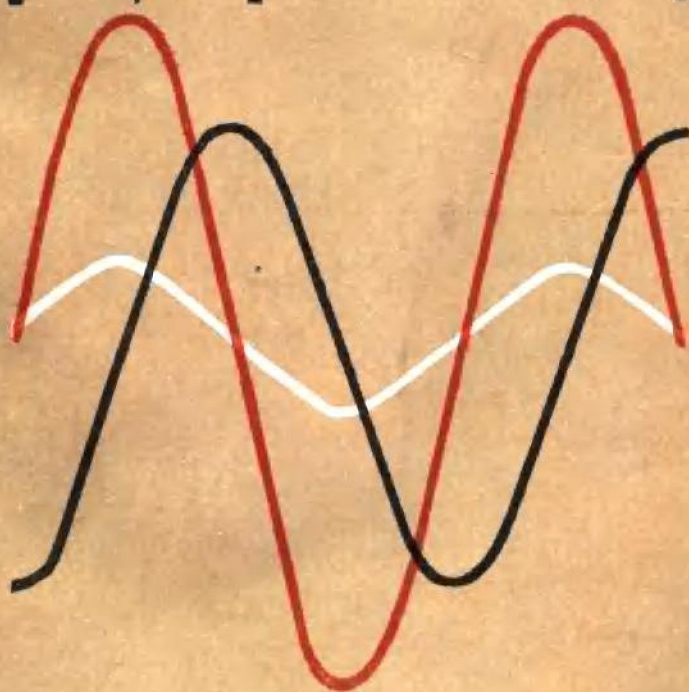


电力系统
稳定性的
直接法分析

邵洪洋 编著

水利电力出版社



内 容 提 要

本书分三篇计十一章，系统而扼要地介绍了近30年来在电力系统稳定性分析中李雅普诺夫(L)直接法的科研成果。第一篇基本理论的一、二、三章，阐述直接法的主要定义、定理和L函数的建立方法。第二篇简单系统的四、五、六章，分别介绍静态稳定、暂态稳定和计及调节器作用的暂态稳定。第三篇多机系统和大规模系统的七、八、九、十、十一章，依次介绍数学模型、L函数、稳定域、大规模互连系统和保留原始网络结构的系统稳定性等。

本书可供电力系统的科技人员和高校有关专业师生和研究生参考，亦可作电力系统专业教材用。

电力系统稳定性的直接法分析

邵洪洋 编著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 16.5印张 364千字

1991年1月第一版 1991年1月北京第一次印刷

印数 0001—2050册

ISBN 7-120-00895-1/TM·344

定价12.05元

前 言

直接法应用于分析电力系统稳定性已近30年，有关文献成万上千；然收集整理、勾玄提要、有机地融合为一书者，尚属少见。或言，要就一类正在迅速发展中的科技分支写而为书，是一桩冒险的事，这话不无道理。不过考虑到有可能使读者省却多方搜资之烦，而在较短时间内得以了解直接法在电力系统科研领域内近30年的基本成果总是好事，遂毅然为之，以供高校有关专业研究生、高年级生及电力系统运行管理、设计科研部门技术人员参考，亦可作教材之用。

全书分三篇。第一篇为李雅普诺夫(Liapunov, 简写为L)直接法基本理论，计三章：起始一章为引言，其次为有关直接法的主要定义和定理，再次是系统地介绍各种建立L函数的方法。第二篇为L方法在单机(对无限大节点)系统稳定分析中的应用，亦为三章，分别介绍静态稳定、不计和计及调节器作用的暂态稳定。第三篇为多机系统、大规模系统及保留原网络结构系统，共分五章：第七章研讨数学模型，第八章讨论多机系统的L函数，第九章关于稳定域的计算，第十章介绍大规模系统分解聚合中的加权和纯量L函数法及向量L函数法，第十一章保留原网结构的稳定性分析。有些节次打了星号(*)，表示其较难阅读或者其独立性较强，对阅读后文关系不大，初读时不妨从略。同步机双轴理论中d-q轴坐标的正向规定，一向不统一。本书有关章节亦随引用文献而异，一是尊重原文作者，二是考虑到有助于读者涉猎读物、开阔视野，显见学术界观点有种种差异，故

未强求一致。各章之间有联系，亦有一定的独立性；后者的目的，主要是为了阅读方便或为越章阅读提供条件，因而公式列写间有重复。总的说来，一篇内的各章关系较密；为此，于每篇之末附有少量习题。

书中引用了许多学者的专著，除于每章之末列出参考文献的名称外，于此再向他（她）们表示谢意。对于未能引用的大量优秀文献的作者，或虽已引用但未能恰如其分地表达出原作者的旨趣的，表示歉意。书中谬误或不妥之处，敬请读者指正。

笔者特别感谢能源部电力科学研究所名誉技术顾问，加拿大B.C大学名誉教授余耀南博士，他审阅了手稿并提出了许多宝贵意见。此外，还要对能源部提倡学术的精神表示感谢。

编著者

1989年5月

缩 略 字 语 义 表

<i>amp</i>	<i>amplitude</i> 波幅 (用于脚注)
<i>APP</i>	<i>Approximate</i> 近似
<i>ASIL</i>	<i>Asymptotic Stability in the Large</i> 大范围渐近稳定
<i>AUEP</i>	<i>Approximate Unstable Equilibrium Point</i> 近似不稳定平衡点
<i>Ave</i>	<i>Average</i> 平均 (用于脚注)
<i>CCA</i>	<i>Critical Clearing Angle</i> 临界清除角
<i>CCT</i>	<i>Critical Clearing Time</i> 临界清除时间
<i>COA</i>	<i>Center of Angle Reference</i> 角度中心参考系
<i>COI</i>	<i>Center of Inertia</i> 惯性中心
<i>Const.</i>	<i>Constant</i> 常数
<i>CPU</i>	<i>Central Processing Unit</i> 中央处理机
<i>Cr</i>	<i>Critical</i> 临界
<i>D-F-P</i>	<i>Davidon-Fletcher-Powell</i> 达维顿-弗累彻-包维尔
<i>diag</i>	<i>diagonal</i> 对角线
<i>eq</i>	<i>equivalent</i> 等效 (等值)
<i>exp</i>	<i>exponential</i> 指数
<i>Init</i>	<i>Initial</i> 初始 (见于脚注)
<i>KE</i>	<i>Kinetic Energy</i> 动能
<i>L</i>	<i>Lyapunov</i> 李雅普诺夫
<i>Lim</i>	<i>Limit</i> 极限
<i>MAR</i>	<i>Machine Angle Reference</i> 机组角参考系
<i>Mot</i>	<i>Motor</i> 电动机 (用于脚注)
<i>N-R</i>	<i>Newton-Raphson</i> 牛顿-拉夫逊
<i>N.L.</i>	<i>Nonlinear</i> 非线性

OTT	<i>Operational Transform Technique</i>	运算变换法
PDE	<i>Partial Differential Equation</i>	偏微分方程
PDF	<i>Positive Definite Function</i>	正定函数
PE	<i>Potential Energy</i>	位能
PEBS	<i>Potential Energy Boundary Surface</i>	位能边界 面
p.u.	<i>per unit value</i>	标么值
RAS	<i>Ragion of Asympotic Stability</i>	渐近稳定域
SBS	<i>Step By Step</i>	逐段计算
SEP	<i>Stable Equilibrium Point</i>	稳定平衡点
sp.u.	<i>special unit</i>	特别单位
Sta	<i>Static</i>	静态
TEF	<i>Topological Energy Function</i>	拓扑能量函数
TSI	<i>Transient Stability Index</i>	暂态稳定指标
UEP	<i>Unstable Equilibrium Point</i>	不稳定平衡点
VLF	<i>Vector Lyapunov Function</i>	向量李雅普诺夫函数
WSSLF	<i>Weighted Sum Scalar Lyapunov Function</i>	加 权和纯量李雅普诺夫函数

数 学 符 号

\forall : *for every, for all*; 对于每一个, 对于所有

\in : *belongs to, belonging to*, 属于

\ni : *Such that*; 以致, 使

\exists : *there exists*, 存在有

\subset : *is contained*; 包括在。 $\not\subset$: 不包括在

\supset : *Contains*; 包含。 $\not\supset$: 不包含

\cup : $A \cup B$, 表示集A和集B之并(集)

\cap : $A \cap B$, 表示集A和集B之交(集)

\implies : *implies, only if*; 蕴含, 仅当

如 $p \implies q$, 即表示由命题p可推得命题q; 它等值于由非q推得非p

\impliedby : *is implied by*; 被蕴含于。如 $p \impliedby q$ 表示由命题q可推得命题p

\iff : *if and only if (iff)*, 当且仅当。如 $p \iff q$ 表示当且仅当q成立时, p才成立; 它等值于p蕴含q和q蕴含p

举例: $\exists e \in G \ni Xe = eX = X \forall X \in G$

存在元素e, 属于G, 使 $Xe = eX = X$, 对每一属于G的X。

目 录

前言

缩略字语义表

数学符号

第一篇 李雅普诺夫直接法要义

第一章 引言	1
第一节 直接法为何受到重视	1
第二节 直接法应用于研究电力系统稳定性的发展过程	3
第三节 用直接法研究电力系统稳定性的前景瞻望	6
参考文献	9
第二章 定义和定理	18
第一节 关于稳定(性)的定义	18
第二节 直接法几个常用的定理	27
第三节 稳定性定理的几何说明	44
第四节* 非自主系统的稳定性定理	47
第五节 几点补充说明	49
第六节* 稳定性定理的引伸——拉萨尔方法	51
参考文献	59
第三章 李雅普诺夫函数的建立	6
第一节 线性定常系统或非线性系统的一次近似的L定理	61
第二节 非线性系统的L函数	66
第三节 初积分法	67
第四节* 二次型(克拉索夫斯基)法	69
第五节 舒尔兹—吉布生变量梯度法(基于求解偏微分方程的方法之一)	71

第六节*	祖波夫方法(基于求解偏微分方程的方法之二)	80
第七节	绝对稳定性与自动控制问题	92
第八节	波波夫定理	97
第九节*	鲁里叶-包斯特尼柯夫准则(单回路非线性直接控制系统)	105
第十节	李雅普诺夫-波波夫准则(单回路非线性间接控制系统)	107
第十一节	建立L函数的卡曼方法	112
第十二节	多回路非线性控制系统的穆尔-安德逊定理(一般化波波夫准则)	115
第十三节*	多回路非线性系统的阿纳德摩汉定理	120
参考文献		124
第一篇	习题	127

第二篇 单机(对无限大母线或节点) 系统的稳定性

第四章	静态稳定	129
第一节	单机系统	129
第二节	两有限容量机组的静态稳定	133
参考文献		137
第五章	暂态稳定	138
第一节	引言	138
第二节	初积分法	143
第三节	舒尔兹-吉布生变量梯度法	147
第四节*	祖波夫方法	150
第五节	波波夫方法	159
第六节	单机系统的有限吸引域	163
第七节*	同步电动机在突加负荷和冲击负荷情况下的暂态稳定性	165

参考文献	193
第六章 考虑调节器作用的暂态稳定性	196
第一节 单机系统、计及磁通衰减和调速器作用——能量法	196
第二节 单机系统、计及磁通衰减和调压器作用——能量法	206
第三节 单机系统、计及磁通衰减和调压器作用的李雅普诺夫-波波夫稳定性分析法	213
第四节 单机系统、计及调速器作用的有限吸引域	221
第五节 单机系统连同其调节器的高阶模型	236
参考文献	236
第二篇 习题	238

第三篇 多机系统、大规模互联系统及保留原网结构系统的稳定性

第七章 多机系统的数学模型	240
第一节 引言	240
第二节 运动方程	241
第三节 状态空间模型	248
第四节 以系统机组之一的角度为参考角 (MAR) 的状态空间模型	249
第五节 以角度中心 (COA 或 COI) 为参考角的状态空间模型	250
第六节 以故障后 SEP 作为原点的状态空间模型 (MAR 参考系)	254
第七节 以故障后 SEP 作为原点的状态空间模型 (COA 参考系)	278
参考文献	280
第八章 多机系统的 L 函数	282

第一节	以某一机组角为参考角 (MAR) 的能量型 L 函数	282
第二节	以惯性中心角 (角度中心, COA 或 COI) 为参考角 的能量型 L 函数	286
第三节	应用多变量波波夫准则建立不计转移电导的 L 函数	290
第四节	计及转移电导建立 L 函数的困难	304
第五节	应用多变量波波夫准则建立计及调压器作用的 L 函数	306
第六节*	应用变量梯度法建立多机系统计及调速器作用的 L 函数	309
	参考文献	317
第九章 多机系统稳定域的计算		323
第一节	引言	323
第二节	系统稳定域的计算方法	324
第三节	利用近似的 unstable 平衡点 (AUEP) 快速确定临 界能量 V_{cr}	337
第四节	暂态稳定计算新的改进方法	341
第五节	用于在线估计的暂态稳定指标 (TSI)	379
第六节	稳定域与静态稳定 (静稳定极限的 L 直接法 计算)	390
	参考文献	394
第十章 大规模电力系统稳定性研究的分解聚合 方法		400
第一节	引言	400
第二节	分解方法	402
第三节	聚合方法中的加权和纯量 L 函数 (WSSLF) 方法	409
第四节	吸引域	412
第五节	M 矩阵	412

第六节	吸引域的优化	415
第七节	<i>WSSLF</i> 在电力系统中的应用.....	417
第八节	聚合方法中的向量 <i>L</i> 函数方法 (<i>VL</i> <i>F</i>) (比较原理的应用)	428
第九节	<i>VL</i> <i>F</i> 法在电力系统中的应用	431
第十节*	用 <i>VL</i> <i>F</i> 法对大规模电力系统 (计及调速器作用) 作三个一组的分解方法	436
第十一节	系统分解聚合的其它类型	458
	参考文献	461
第十一章	保留原网结构 (模型) 系统及 <i>AC/DC</i> 系统的稳定性分析	466
第一节	保留原网结构的直接法分析	466
第二节	应用拓扑能量函数 (<i>TEF</i>) 于具有精细发电机模型的电力系统稳定的直接法分析	475
第三节	保留原网结构的割集稳定性准则	485
第四节	用能量函数法分析多机组 <i>AC/DC</i> 系统的暂态稳定性	500
	参考文献	510
第三篇	习题	513

第一篇 李雅普诺夫直接法要义

第一章 引言

第一节 直接法为何受到重视

李雅普诺夫 (Ляпунов, Lyapunov)① (1857~1918) 的经典性著作《关于运动稳定性的一般问题》的俄文原著发表于1892年^[1]。越15年, 法文译本于1907年问世^[2]。又过40余年, 美国普林斯顿大学始于1949年影印了法文译本。这本名著至今仍是世界各国专攻微分方程的重要参考文献。一位美国数学家曾说过, 在一定的意义上, 西方世界是在50年代中期重新发现了李雅普诺夫直接法, 这话是有一定道理的。

为什么李雅普诺夫直接法, 在相当长的一段时间内没有引起人们的重视? 这主要是因为当时的条件下, 它在工程实际上并不实用。而实用的则是和李雅普诺夫同一个年代的劳斯和胡尔维茨 (Routh-Hurwitz) (1895) 的代数法。胡尔维茨, 瑞士数学家, 他是应斯洛伐克的名教授和工程师斯陶道拉 (Stodola) 之请协助解决水轮机调速器的振动问题而提出判断稳定性的方法的。当然, 还有尼魁斯特 (Nyquist) 于1932年提出的频率法。这两种方法, 直到现在仍然是控制工程技术人员经常使用的有效方法。可是这些方法, 只适用

① 后文中常以L代李雅普诺夫。

于研究线性定常系统的稳定性。如果系统是非线性的，或是线性但为时变的系统，它们就不适用了。因此，近些年来随着现代控制理论的兴起，李雅普诺夫直接法重新引起了人们的注意，并且正在继续得到研究和发展的。时至今日，它在工程和物理科学中得到了广泛的应用，如电力系统、² 化学反应器、生态学、³ 生物学、经济学等等；且不再局限于由常微分方程所描述的系统的稳定性，还扩展到了差分方程和偏微分方程。1962年，贝尔曼(Bellman)提出了向量李雅普诺夫函数的概念^[3]。1966年，白利(Bailey)把它加以发展并应用于互联系统^[4]。再后，1970年和1977年乃至1983年，有米歇尔(Michel)关于复合系统和大规模动态系统的稳定性论著^[5,6,7]，以及西夹克(Siljak)大规模系统的稳定性的研究^[8](1972)。当然，还应该提到马特劳索夫(Matrosov)在向量L函数和比较原理方面的研究工作^[9]，等等。

直接法兴起的另一个原因，是数字计算机的应用。过去，要想找到判别稳定性的李雅普诺夫函数就要进行试探，要凭经验和技巧，因而这一直是这种方法难以推广的主要障碍。而今，这一障碍正在被数字机扫除，就象数字机把整个控制理论从频域又带回时域一样。用数字机不仅可以找到李雅普诺夫函数，而且还能找到系统的稳定域或吸引域，这就促使现代控制理论更加重视李雅普诺夫直接法了。

对于非专业数学的工程人员说来，有两本读物值得特别推荐。一是拉萨尔和利夫奇茨(Lasalle-Lefschetz)的《用李雅普诺夫直接法研究稳定性》^[10][1964年，由罗佐夫(Розов)译为俄文。笔者于1980年参照英俄两种版本译为中文，作为内部参考读物印行]。另一是哈恩(Hahn)的《李雅普诺夫直接法的理论和应用》(1958年，德文原著；1963年，英文译

本^[11])。

文献[59]列举了大规模系统(包括电力系统)研究领域内的有关直接法专著400余种,可供查阅。

第二节 直接法应用于研究电力系统稳定性的发展过程

1958年,雅柯-特里尼茨基(Янко-Триницкий)的《用新方法分析同步电动机在冲击负荷下的工况》一书,或者是将李雅普诺夫直接法应用于电力系统暂态稳定性的最早的文献^[12],其内容包括多机系统及调节励磁等。同年,由阿莱特(Aylett)提出的《电力系统的暂态稳定极限的能量积分判据》^[13]以及更早一些的马格纽逊(Magnusson)的《计算稳定性的暂态能量法》^[14](1947),可以说是接近李雅普诺夫直接法的边缘。阿莱特是用交流计算台验证他的理论的。1966年,格莱斯(Gless)、艾尔-阿巴德(El-Abiad)和纳格洋(Nagappan)分别发表了《应用李雅普诺夫直接法研究电力系统暂态稳定性》^[15]和《多机系统暂态稳定域》的论文^[16],开始了应用数字计算机的新纪元。初期的研究,如佛尔赛德(Fallside)和佩特(Patel)(1966)^[17],余耀南和翁苏里亚(Vongasuria)(1967)^[18]、西地格(Siddigee)(1968)^[19]、J.L.威廉斯(Willems)(1968)^[20]、饶(Rao)(1968)^[21]等人的著作,集中在应用不同的方法建立适用于电力系统的李雅普诺夫函数。如文献[17]用舒尔兹和吉布森(Schultz-Gibson)的变量梯度法,文献[18]用祖波夫(Zubov)方法,文献[19]用非自主系统的李雅普诺夫函数计及磁通衰减和调压器,等等。D.卡普里奥(Di.Caprio)和

萨考曼(Saccomanno)(1969)^[22]以及鲁德尔斯(Lu-ders)(1971)^[23]把问题的物理特性同数学模型紧密联系起来,对多机系统建立起一个能量型的李雅普诺夫函数。

1970年, J.L.威廉斯^[24]和J.C.威廉斯^[25], 派(Pai)和马汉(Mohan)以及饶(Rao)^[26]; 1972年, 派^[27]等人, 利用波波夫(Popov)准则, 提出建立李雅普诺夫函数的一整套方法。同时, 人们体会到应用于解决实际问题的重要的一环, 即临界清除时间的确定, 关键在于精确地计算故障后的吸引域。这一点, 首先在里班斯-巴维拉(Ribbens-Pavella)1971年的著作中得到很大的重视^[28]。可以说, 从70年代起, 电力系统暂态稳定性分析中的直接法的研究工作, 获得了迅速、蓬勃的发展, 许多高水平的论文不断出现。其中特别值得提出的是, 威廉斯(Willems)(1971)^[29]、里班斯-巴维拉(Ribbens-Pavella)(1971)^[30]、萨考曼诺(Saccomanno)(1973)^[31]和佛阿德(Fouad)(1975)^[32]等, 详尽地总结了直到1975年的成果。70年代末期, 不少科研工作者还进行了大量的理论性的探讨。日本的柿本直户、小泽安春、林宗明等(1978)^[33], 美国的阿塞(Athay)、舍克(Sherkey)、坡德莫(Podmore)和维马尼(Virmani)(1979)^[34], 比利时的里班斯-巴维拉(1979)^[35]等, 在求取实际可用的优异的计算结果方面, 获得了新的突破。文献[33]提出暂态稳定的新临界值, 并通过对鲁里叶(Lur'e)型李雅普诺夫函数加以数值修正、计及转移电导的影响。文献[34]引入关键或主导的不稳定平衡点的观点, 并通过李雅普诺夫稳定性理论中的不变集的概念, 提供计及故障动态轨线影响的原理。文献[35]对纯量李雅普诺夫函数和向量李雅普诺夫函数作了比较研究, 而且探讨了故障地点的影响。因此, 直接法曾经一度

被看作是学院式的作业，其结果具有保守性，电力界一直对其持怀疑态度；但在今天，不论是规划用的离线计算，还是安全监控用的在线计算，看法都有了明显的不同程度的改变。事实上，东京电力公司1975年就试用了直接法作在线安全监视^[36]；另一方面，研究大规模电力系统的分解聚合法也在兴起和发展，这方法先将系统分为若干子系统加以考虑，继之以聚合而研究整个系统的稳定性。

1978年，乔西克（Jocic）等提出了减少子系统的数目以改进分解方式并妥善处理转移电导的方法。此外，在摆脱电机经典模型的限制方面，也有了突破^[37]（当然，从实用观点来看，结果仍偏于保守）。1979年萨萨奇（Sasaki），1980年柿本直户、小泽安春、林宗明等，在多机系统中提出考虑磁通衰减的论著^[38,39]，是其开始。

进入80年代，各方面都有长足进展。在分解聚合法方面：1980年，有袁（Yuan）和森辛格（Schintinger）^[40]，阿拉奇（Araki）、迈特瓦勒（Metwally）和西夹克（Siljak）^[41]的文章。1981年，伯根（Bergen）和希尔（Hill）^[42]，阿塞（Athay）和孙（Sun）^[43]提出保留原网络结构的方法，可计及负载对频率或电压的非线性关系。保留原网络结构，还有另一个优点，即能以把直流高压输电线路的影响纳入稳定性分析中（1981）^[44]。在冲破电机经典模型计及自动调节器方面：1981年，柿本直户、小泽安春和林宗明发表了计入自动调压器的文章^[45]。1985年，沙班（Shaaban）和格鲁吉斯（Grujic）写文章用向量李雅普诺夫函数研究计及调速器影响的大规模系统^[46]。于在线稳定估计和应急计算方面，里本斯、巴维拉等提出暂态稳定指标^[47,48]。在改进计算方法、减少内存、提高计算速度方面，1984年柿本直