



国家电网公司
电力科技著作出版项目

智能电网关键技术丛书

智能电网广域监测分析 与控制技术

中国电力科学研究院 组编

王英涛 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

智能电网关键技术丛书

智能电网广域监测分析 与控制技术

中国电力科学研究院 组编

王英涛 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

加强智能电网关键技术的研发,共同推进智能电网建设与技术发展,对推动我国产业结构调整,加快经济发展方式转变和培养战略新兴产业具有重要意义。在当前各企业日益关注智能电网的时期,《智能电网关键技术丛书》的出版恰逢其时,可给各方研究提供有益的借鉴,避免设备创新风险,促进社会进步。

本分册为《智能电网广域监测分析与控制技术》,包括绪论、WAMS 及其测量原理、基于 WAMS 的电力系统动态监测原理、基于 WAMS 的状态估计、基于 WAMS 的系统辨识技术、基于 WAMS 的暂态稳定预测方法以及电网广域控制技术。

本丛书可供从事智能电网研究、运行、开发、管理人员与设备制造、研制技术人员,以及相关专业人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能电网广域监测分析与控制技术 / 王英涛主编; 中国电力科学研究院组编. —北京: 中国电力出版社, 2014.12

(智能电网关键技术丛书)

ISBN 978-7-5123-5560-6

I. ①智… II. ①王… ②中… III. ①智能控制-电网
IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 173941 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 12 月第一版 2014 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 9.25 印张 160 千字

印数 0001—1500 册 定价 38.00 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

编 委 会

主 编 王英涛

编写人员 侯俊贤 张传凯

序

进入 21 世纪后,大规模开发利用化石能源带来的能源危机、环境危机凸显,建立在化石能源基础上的电力工业面临重大挑战,新一轮能源变革正在世界范围内蓬勃兴起。世界范围内电力系统面临如下问题:一是应对大型风能、太阳能等可再生能源发电快速增长对电网的挑战;二是适应小容量分布式电源、电动汽车等对用电结构产生变化的影响;三是适应政府节能减排管制和低碳经济发展的需要;四是网络技术向以能源体系为代表的实体经济渗透和新产业革命的推动。欧美发达国家从应对气候变化、保障能源供应安全、促进经济增长的需要出发,相继提出和建设智能电网。实际上,智能电网正是应对这些重大需求而产生的,是世界电力工业发展的新趋势。

我国高度重视智能电网研究和建设,国务院总理李克强 2014 年主持召开节能减排及应对气候变化工作会议时指出“控制能源消费总量,提高使用效率,调整优化能源结构,积极发展风电、核电、水电、光伏发电等清洁能源和节能环保产业,开工一批新项目,大力推广分布式能源,发展智能电网。”国家科学技术部 2012 年适时启动智能电网重大专题研究,大力推动智能电网关键技术研究和应用示范。国家电网公司 2009 年根据电网建设的整体需要和智能电网顶层设计,率先启动了智能电网的研究、应用示范与工程建设;开展了智能变电站的持续实践,研制完成了智能电网调度控制系统、输电线路状态监测系统并得到广泛应用;构建了规模大、数据处理能力强的用电信息采集系统及电动汽车充换电服务网络;建成了中新天津生态城、张北风光储输等一批智能电网综合示范工程。

实施智能电网发展战略不仅能使用户获得高安全性、高可靠性、高质量、高效率 and 价格合理的电力供应,还能提高国家的能源安全、改善环境、推动可

持续发展，同时能够激励市场不断创新，从而提高国家的经济竞争力。智能电网是新一轮能源革命的基础平台，对能源革命具有全局性和根本性的推动作用。未来的智能电网，适应大型风电、光伏发电及分布式电源大规模接入，形成广泛覆盖、清洁高效的电力资源配置体系，具有强大的电力资源配置能力；电力网、互联网、物联网等相互融合，构成功能灵活互动的社会公共服务平台，广泛支持配置社会公共服务资源；汇集和分析电力系统广域数据和知识，自动预判、识别电网典型故障和风险，保障电网安全可靠运行；促进用户与各类用电设备广泛交互、与电网双向互动，支撑智能家庭、智能楼宇、智能小区、智慧城市建设，推动生产、生活智慧化。

中国电力科学研究院在智能电网关键技术研究、国际国内标准制定、试验检测能力建设等方面开展了卓有成效的科研工作，为了总结相关技术成果和实践经验，推动我国智能电网技术进步，为我国智能电网建设提供有益参考，特组织专家编写了本套丛书。

本套丛书的编撰出版，凝聚了电网一线科研工作者的汗水和心血。通过本套丛书的出版，希望更多的人士关注、关心智能电网并投身于智能电网的研究和建设中来，共同打造一个安全高效、清洁环保、友好互动的智能电网，并推动构建智能便捷的生产生活新模式。



2014年11月

前言

我国自 2009 年正式启动智能电网技术研究和试点示范工作以来,在智能电网关键技术研究、国际国内标准制定、应用示范工程及试验检测能力建设等方面取得了一系列重大成果。为总结智能电网技术研究与应用成果,分析我国智能电网技术发展趋势,与电力科技教育、电力企业及产业公司分享研究成果,中国电力科学研究院组织专家编写了本套丛书。

本套丛书在编写原则上,突出以智能电网诸环节关键技术为核心,优选丛书选题;在内容定位上,突出技术先进性、前瞻性和实用性,并涵盖了智能电网相关技术领域的新知识、新方法、新技术、新设备(系统);在写作方式上,做到深入浅出,既有深入的理论分析和技术解剖,也有典型案例介绍和效果分析。

本套丛书涵盖输变电、配用电及储能等智能电网技术,按照专业技术领域分成 7 个分册,即《输电线路建设技术》《智能高压设备》《智能配电与用电技术基础》《智能电网用电技术》《智能电网与电动汽车》《智能电网广域监测分析与控制技术》《大规模储能技术及其在电力系统中的应用》。本套丛书既可作为电力企业运行管理专业员工系统学习智能电网技术的专业书籍,也可作为高等院校电气自动化专业师生的教学、学习用书,同时还可供智能电网产品研发工程师参考,实现一书多用。

本分册是《智能电网广域监测分析与控制技术》,主要内容如下:第一章对广域测量系统进行了介绍,第二章对广域测量系统测量原理进行了介绍,第三章对基于广域测量系统的电力系统动态监测原理进行了介绍,第四章对基于广域测量系统的状态估计进行了介绍,第五章对基于广域测量系统的系统辨识技术进行了介绍,第六章对基于广域测量系统的暂态稳定预测方法进行了介绍,

第七章对电网广域控制技术进行了介绍。

由于编写时间仓促，书中难免存在疏漏之处，恳请各位专家和读者提出宝贵意见，使之不断完善。

编 者

2014年11月

目 录

序
前言

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
第二节 WAMS 发展现状	3
第三节 基于 WAMS 的电力系统动态监测研究现状	4
第四节 基于 WAMS 的高级应用功能研究现状	6
第五节 小结	11
第二章 WAMS 及其测量原理	13
第一节 WAMS 框架及关键技术	13
第二节 WAMS 测量数据概述	22
第三节 WAMS 测量数据处理方法	28
第四节 WAMS 测量数据性能分析	33
第五节 小结	38
第三章 基于 WAMS 的电力系统动态监测原理	40
第一节 基于 WAMS 的电力系统动态监测原理	40
第二节 PMU 布点的理论及算法	40
第三节 小结	46
第四章 基于 WAMS 的状态估计	47
第一节 状态估计的方法	47
第二节 状态量合理性检验	48
第三节 基于 WAMS 的静态状态估计	50
第四节 基于 WAMS 的递推状态估计	52
第五节 WAMS 和 SCADA 的混合状态估计	54
第六节 数值试验结果	61

第七节 小结	66
第五章 基于 WAMS 的系统辨识技术	67
第一节 概述	67
第二节 基于 WAMS 的系统辨识原理	68
第三节 静态数学模型的辨识	73
第四节 具有动态特性的数学模型辨识技术	76
第五节 数值仿真试验	79
第六节 小结	84
第六章 基于 WAMS 的暂态稳定预测方法	85
第一节 概述	85
第二节 基于 WAMS 的暂态稳定计算原理	86
第三节 快速暂态稳定计算程序	89
第四节 基于详细模型的稳定计算	97
第五节 数字仿真试验	105
第六节 小结	110
第七章 电网广域控制技术	111
第一节 概述	111
第二节 广域失步控制方法	113
第三节 广域控制系统	118
第四节 原理及系统验证	120
第五节 小结	123
附录 A IEEE 节点系统示意	124
附录 B 同调性动态等值方法简介	125
索引	130
参考文献	132

绪 论

第一节 引 言

一、WAMS 的提出

大区电网互联实现了区域电网之间互为备用、紧急事故支援、促进电力市场开发等联网效益。但随着电网规模的扩大、电网结构的复杂化,以及各种新型输电技术的采用,使得电力系统的动态行为更加复杂。根据联网系统现状及规划电网的研究成果,我国互联电网发展过程中主要面临如下技术问题。

(1) 互联电网送电距离较长、电压支撑薄弱,各部分间振荡模式多表现为较低频率的负阻尼或弱阻尼,易造成系统的低频振荡及系统的动态不稳定。

(2) 由于跨区域长距离集中送电的交流输电通道或交直流并联输电通道越来越多,因此受端系统外受电力比重加大,负荷中心动态电压支持不足,使得受端系统电压的调控难度越来越大。此外,在有些互联电网中受端负荷中心动态无功备用不足和送电通道过于集中,同时并存,这增加了电压崩溃事故发生的概率。

(3) 互联电网联络线发生的严重故障扰动影响范围扩大,系统功率振荡特征更为复杂,系统可能分成两个或以上的同调机群,使得系统电压、电流等电气量大幅度周期性波动,如果处理不好,会影响到整个互联电网的安全稳定性。

(4) 目前电力系统中使用的各种类型控制器,如发电机励磁及调速系统、新型无功补偿装置、可控串联补偿器、高压直流输电控制系统等,另外随着国民经济和社会生活的发展,负荷动态特性有了新的变化,使电力系统动态特性的复杂程度增加,这对互联电网的稳定分析及控制有着重要的影响。

以上因素使得互联电网必须加强全范围动态过程的监测、分析和控制,这主要由监测层面、分析层面和控制层面构成。

1. 监测层面

随着互联电网规模、结构和运行方式的变化，导致了电力系统动态特性的复杂性，因而需要一定的技术手段对电网动态过程进行实时监测、记录。主要包括以下内容：

(1) 加强电力系统动态过程的可观测性，能够实时、同步、广域监测电力系统的动态扰动过程。

(2) 完整监测、记录全网各种动态元件（负荷、发电机、静止无功补偿装置、柔性交流输电系统等）的动态响应，进行广域电力系统的机理、特性及事故分析，加强对互联电网的认识。

2. 分析层面

通过对互联电网的实时监测及分析，期望更深入的认识电网的物理特性及数学模型，并逐步实现电网动态稳定的实时分析。主要包括以下内容：

(1) 电力系统各种物理元件数学模型的辨识和校验。

(2) 电力系统控制装置的控制性能分析。

(3) 电力系统动态扰动过程分析。

(4) 电力系统稳定性分析。

3. 控制层面

基于对电网动态过程实时监测、分析，逐步建立在线预决策安稳控制系统；通过构建大系统协调稳定控制，优化电网控制装置的控制性能，以提高全局优化控制及紧急控制的协调性。主要包括电网优化控制和电网紧急控制两方面。

(1) 电网优化控制。通过全网动态可观及应用协调控制原理，实现电网无功电压控制、阻尼控制的协调和优化。另外，通过对控制器的全过程监测，对其控制过程进行辨识和验证，可进一步提高和优化控制器的控制性能。

(2) 电网紧急控制。使用时域仿真技术和稳定性量化等分析方法，实现电网状态的快速监测和暂态稳定滚动预测，进而可能实现电网大范围、自适应的紧急控制。

二、监控系统及技术评价

目前电网调度自动化系统(EMS/SCADA 系统)以监测电网稳态运行为主，不能够满足监测动态过程的要求，例如当电力系统发生低频振荡等动态扰动时，EMS/SCADA 系统不能够提供足够高时间分辨率的扰动数据。

故障信息管理系统能够提供电网扰动时的采样点数据，然而，电网动态扰动过程的分析往往需要对长时间记录的电压、电流等同步相量数据进行比对和分析，而故障录波器数据的时间目前还不能够同步，而且录波的时间较短，一

般适用于严重故障后的事故分析，不能够完全满足电网动态过程（尤其是长过程）的分析。

全系统范围动态过程监测与某个局部厂站的动态监测有很大的不同，其中最大的难点是电力系统动态元件分布地域广阔，而基于同步相量测量技术的广域测量系统（Wide Area Measurement System, WAMS）则为电力系统实时动态监测奠定了重要技术基础。

在广域测量系统的基础上，人们能够以时空高分辨率同步监测及分析电力系统的动态过程、物理机理以及稳定性等，进而为整个电力系统的优化控制以及紧急控制提供数据平台。

第二节 WAMS 发展现状

一、研究现状

WAMS 最早于 20 世纪 90 年代起源于美国。最近几年，在欧洲、美洲、东亚等国家陆续发展起来。

我国 WAMS 的研究和应用起步于 1995 年，中国电力科学研究院与其他单位合作开发了电力系统稳定监录系统，该系统由相量测量单元（PMU）、调制解调器、中央监控站、网络服务器及资料分析站等组成。我国目前已经在东北、华北、华东、西北、南方等区域电网，以及江苏、广东及河南等省级电网构筑了实时动态监测系统。

1. 子站发展情况

我国已经投运和拟投运的同步相量测量子站约 150 个，整体技术水平已经达到世界前列。WAMS 是使用基于 GPS 系统的统一时钟系统，子站的时钟同步误差不超过 $1\mu\text{s}$ ，相角测量精度为 $0.1^\circ \sim 1^\circ$ ，通信速度 20 次/s \sim 100 次/s，通信延迟 30 \sim 80ms。上送数据包括电压及电流相量、功率、频率、频率变化率、发电机内电势以及重要开关信号等。另外，还具备长期连续记录动态数据的功能，供电力系统调度运行单位使用。

2. 主站发展情况

WAMS 提供的动态信息为动态稳定的监测与控制提供了基础。目前 WAMS 主站具备长期连续存储动态数据的能力，并实现了实时频率特征分析、扰动识别、全网录波触发、仿真曲线对比、事故分析等应用功能。

为了适应互联电网实时动态监测的需要，WAMS 主站平台还应具备以下功能：①主站和 EMS/SCADA 系统等数据信息系统之间有通道和接口规范，实现

数据彼此校验及非时标信息和时标信息的相互融合。各个系统之间的接口设计需要保证灵活性、开放性、可靠性。② 为了对电力系统动态现象进行实时监测,满足动态监控的要求,WAMS的同步相量数据传输速度应具有良好的实时性。

主站平台包括前置机、实时数据库、历史数据库,以及和EMS等系统的交换技术及规约等问题。

3. 通信系统发展情况

光纤网络的发展为WAMS的构建及应用打下了良好的基础。为减小PMU和主站实时数据通信延时,可以通过全光纤通道,用以太网和异步传输模式(ATM)相结合的方式或者是数字专网,建立高实时性的全网相量信息实时传输通道。目前,WAMS的通信方式采用TCP/IP的方式,实现了PMU一点多发的通信功能。

二、待解决的问题

(1) 需要对WAMS测量技术进行系统理论化工作,这包括子站信号采集的类型及范围、主站测量数据处理流程设计、测量数据精度分析、误差修正等,以便为WAMS高级应用提供高速、准确、全面的测量数据。

(2) 由于人们对WAMS认识、理解还不够深刻,这造成在WAMS配置、应用功能开发等方面存在误区,因而需要进一步分析WAMS的本质、功用定位、信息安全以及系统框架等重要问题,为高级应用开发和系统的发展提供理论基础和发展方向。

第三节 基于WAMS的电力系统动态监测研究现状

一、PMU布点研究情况

WAMS动态监测主要通过布置PMU来实现,PMU的配置方法是基于对电力系统电气量(电压、电流相量)的观测角度,而对机电暂态过程的机械量(机械角等量)的研究较少。这些方法一般需要通过设置以经验为基础的各种规则来完成。相关研究观点如下。

(1) 基于电力系统线性量测模型。通过研究在引入PMU相关量测集后的增广关联矩阵的电力系统可观性拓扑分析方法,以保证系统结构完全可观性和最大量测数据冗余度为约束,以配置PMU数目最小为目标,形成了PMU最优配置问题,并应用禁忌搜索(TS)方法求解该问题,保证了全局寻优。

(2) 半搜索和模拟退火法相结合的PMU最优配置方法。通过采用以节点邻接支路个数为启发原则的拓扑搜索配置方法来提供初值。

(3) 非支配分类遗传算法。通过寻找 PMU 最优配置的一种 Pareto——最优解，将配置过程分为预处理和动态配置阶段，减小搜索空间。

(4) 以电力系统状态完全可观测和 PMU 数目最小为目标，以基于启发式搜索配置方法为初始方案，然后用模拟退火校核与配置方法进行配置方案验证和修正的 PMU 配置算法。

二、基于 WAMS 的状态估计研究情况

目前 WAMS 在状态估计中的应用，一般是通过 PMU 的测量值来提高数据采集与监视控制系统 (SCADA) 状态估计的测量精度。相关研究情况如下。

(1) Thorp 和 Phadke 等人研究电压相量测量在状态估计中的应用时，取电压幅值和相角的观测方程分别为 $V_m = V_e$ 和 $\theta_m = \theta_e$ ，其中 V_m 和 θ_m 分别为电压相量的幅值测量值和相角测量值； V_e 和 θ_e 分别为电压相量的幅值估计值和相角估计值。这种模型与传统状态估计模型中母线电压幅值测量值的用法完全相同，当在某条母线配置 PMU 时，量测方程中增加了上述的电压幅值和相角观测方程，量测雅可比矩阵只增加 2 行，且每行只有一个取值为 1 的非零元素。但这种模型只引入了 PMU 测量值的最少信息，因此对状态估计的改善不很明显。

(2) 在 SCADA 状态估计基础上，增加 PMU 量测的附加量测修正方程，进行混合计算。量测修正方程改写成

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_m \\ \Delta X_e \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

式(1-1)中 ΔX_m 和 ΔX_e 分别为配置 PMU 的母线电压相量的状态偏差和没有配置 PMU 的母线电压相量的状态偏差。

(3) 在状态估计一般模型的基础上，建立部分节点电压相量可测时的状态估计模型，并针对不同的相角量测精度，采用两类不同的状态估计模型：① PMU 精度较低时，在增加量测量冗余度的同时，PMU 所在节点的电压相量仍然作为状态变量参与迭代；② PMU 精度足够高时，直接将 PMU 的量测值作为状态估计的状态解。

(4) 根据 EMS、WAMS 布点数量状况，相应提出两种不同状态估计的方法：① 以 EMS 的状态估计为主的混合状态估计。把 SCADA 和 PMU 的量测量混合在一个状态估计方程中进行计算，数值仿真结果表明，PMU 对状态估计的效果有很大改善。② 以 WAMS 为主的状态估计。将电力网络划分为若干个子区域，由 PMU 进行监测，各个 PMU 所在的子区域的状态估计是相互独立的，由此，用线性状态估计计算 PMU 所在母线的状态，由传统状态估计方法来估计

不可观测母线的状态，进而得到整个系统的状态估计。

这些状态估计的方法主要存在两个问题：① 没有考虑 PMU 失去同步信号后，如何进行状态估计；② 没有考虑到系统在动态扰动时，如何用 WAMS 来进行状态估计。

第四节 基于 WAMS 的高级应用功能研究现状

WAMS 为电网实时动态监控提供了信息平台，可以进一步对互联电网的动态过程特性进行分析和评估，辨识系统的失稳现象，向调度运行部门提供预警、预防控制的在线决策和紧急控制决策，提高电网安全运行水平。概括起来，基于 WAMS 的高级应用功能的研究内容包括电网动态监测、电网分析以及电网稳定控制等方面，其相互关系示意图如图 1-1 所示。

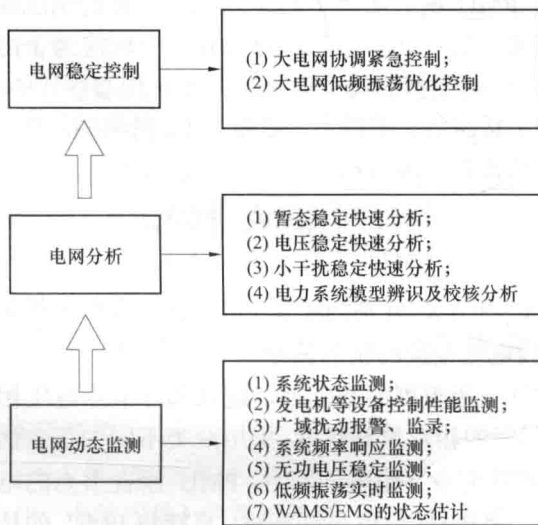


图 1-1 WAMS 研究内容及其相互关系示意图

一、基于 WAMS 的系统辨识研究现状

(1) 物理元件数学模型的辨识和校核。

1) 通过 WAMS 动态测量与数字仿真结果的分析，可以对数学模型和参数进行辨识和校核，提供更为准确的数学模型和参数，包括用于稳定分析的元素模型和负荷模型、用于各种稳定控制设计的降阶动态模型等，且能离线校验电力系统分析的结果，提高跨区电网计算分析的准确性。2003 年和 2004 年，

在东北电网大扰动试验中,基于东北电网 PMU 记录的系统动态数据,完成了稳定计算用的负荷模型和发电机励磁模型等的校验,所取得的结果对提高电力系统计算分析水平具有重要作用。

2) 基于同步相量测量的输电线路参数在线测量的方法。该方法是应用 GPS 卫星时钟为同步时钟的 PMU 测量线路的电压、电流同步相量,通过计算得到各序线路参数。

(2) 电力系统小扰动模式分析。基于 WAMS,应用数字信号处理、Prony 分析等模式辨识方法,抽取振荡模参数、振荡频率以及某振荡模的衰减系数,对区域间振荡模参数进行连续评估。

二、基于 WAMS 的暂态稳定性分析研究现状

目前的暂态稳定快速分析方法主要分为三种:① 基于知识经验的预测方法;② 直接法;③ 数值积分法。WAMS 为这三种方法的使用提供了信息平台。

(1) 基于离线分析经验和人工智能结合的稳定预测方法。为适应实时稳定分析的快速性,这种方法采用模式识别、决策树、神经网络和模糊推理等人工智能手段进行暂态稳定的快速预测。相关研究观点如下。

1) 通过对电力系统不同运行方式和不同故障的上万次仿真计算,形成稳定决策的决策树,随着训练集的变大,决策树的节点数和深度相应增加,基于决策树形成电压稳定的紧急控制措施。

2) 利用一种复合神经网络结构,来确定暂态稳定失稳切机和切负荷决策。神经网络由分类和决策部分组成,但这种方法受限于分类使用的样本数量,缺乏系统的方法。

3) 利用模糊神经网络进行电力系统暂态稳定预测,此方法具有较高的模式分类正确率和函数逼近精度,但对于复杂电力系统,因为训练样本数量庞大而较为困难。

这种方法主要特点是基于大量系统化的离线计算生成训练样本,然后用非样本集检验决策模型的正确性,在本质上与传统的策略表方法是一致的,并没有从电力系统的机理上进行研究,是一种基于知识的方法,存在着离线计算结果不能完全与实际运行方式一致的问题。

(2) 基于经验模型的功角曲线外推预测的稳定预测方法。这种稳定预测一般是利用自回归(AR)、多项式等功角曲线的经验数学模型,来预测功角的发展趋势,然后用预测功角大于某一个角度的门槛值来判断系统的稳定性。这种方法是一种依靠经验来总结系统失稳表征规律,缺乏理论上的证明。相关研究观点如下。