



高 严 主 编

# 面向21世纪

## 电力科学技术 讲座



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

197338

TM-53

G205

# 面向 21 世纪 电力科学技术讲座

高 严 主编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

**图书在版编目 (CIP) 数据**

面向 21 世纪电力科学技术讲座/高严主编. 北京: 中国电力出版社, 2000.10

ISBN 7-5083-0431-4

I. 面... II. 高... III. 电力工业-工业技术-普及读物  
IV. T-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 48684 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

三河实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2001 年 1 月第一版 2001 年 1 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 36.75 印张 837 千字  
印数 00001—10000 册 定价 48.00 元

**版 权 专 有 翻 印 必 究**

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

# 《面向 21 世纪电力科学技术讲座》

## 编 委 会

主 编 高 严

编委会成员 (按姓氏笔画排序)

毛文杰 史大桢 邴凤山 邹范湘 张克让 张晓鲁  
陆延昌 周大兵 宗 健 郭 灏 程忠智 曾庆禹  
詹仲晦 翟若愚

办公室成员

全晓华 苏竹荆

# 《面向 21 世纪电力科学技术讲座》

## 序 言

千年更替，世纪之交，充满机遇和挑战的 21 世纪即将到来。

江泽民总书记指出：“科学技术是第一生产力，是经济和社会发展的决定性因素。未来世界各国的综合国力竞争，将越来越首先表现为科技实力的竞争。我们要在下个世纪实现社会主义现代化和中华民族的伟大复兴，必须大力提高全民族的科学文化素质。”

面向 21 世纪，国家电力公司将以邓小平“科学是第一生产力”和江泽民“三个代表”的重要思想为指导，围绕将国家电力公司建成国际一流企业的目标，进一步突出科技进步、技术创新的动力作用，大力推进技术创新战略的实施，切实增强技术创新能力，全面提高国家电力公司科技水平、综合实力和国际竞争力。

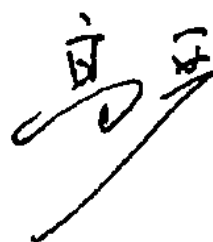
科学是人类一切知识的基础，加强科学技术普及工作，进一步提高国家电力公司全体员工的科学文化素质是国家电力公司加快科技进步和技术创新表基本的支撑条件。根据当前国家电力公司干部队伍和科技人员现状以及电力工业科学技术发展水平，由国家电力公司、中国电机工程学会、中国水力发电工程学会共同组织电力行业若干位院士、专家撰写了《面向 21 世纪电力科学技术讲座》这样一本面向新世纪的科普读物。

江泽民总书记指出：“广大干部特别是领导干部要带头学习科学知识，自觉用科学思想武装自己，树立科学精神，掌握科学方法，做领导经济、科技和其他各项工作的内行，同时要切实抓好科普工作。”“我们的中、高级干部不可能成为某一领域或某一学科的专家，但完全可以做到知识面相对广一些、深一些，甚至在某些方面有所专长。否则，就不能算是一个合格的、称职的领导者”。应当看到，现代科学技术的发展日新月异，新发明、新理论层出不穷，知识更新异常迅速。加强学习现代科学技术是当前我们领导干部和工程技术人员的重要任务。无论是学社会科学的还是学自然科学的，无论是毕业年一点的还是近几年走出校门的，都有重新学习的必要。在世纪之初，国家电力公司的科技发展将紧密结合中国电力工业和公司发展的需要，以高质量的满足社会发展和人民生活用电为目标，积极发展电网控制技术、洁净煤发电技术、水电工程技术、新能源发电技术、节能降耗技术、减人增效技术、

信息工程技术等，为电力重大工程建设、技术改造、优化产业结构、提高经济效益、保持可持续发展提供技术支撑。我们每一位在电力行业特别是在领导岗位上工作的同志，都应该认识到在即将到来的知识经济时代，我们所面临的新知识，新技术的挑战，认识到科技造步与技术创新对电力工业发展的重要作用。

《面向 21 世纪电力科学技术讲座》涉及的专题都是当前以及今后一个时期我国电力科技发展的重要课题，对于领导干部了解电力科技现状，掌握电力科技发展动向十分必要，值得一读。

抓住机遇，迎接挑战，积极推动科技进步和技术创新，是国家电力公司全体员工，特别是领导干部、工程技术人员义不容辞的责任。让我们在不断学习中更新知识结构，提高自身素质，为推进中国电力工业的可持续发展和实现国家电力公司跨世纪发展战略而努力奋斗！

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of two characters: '高' (Gao) and '亚' (Ya), which together read '高亚' (Gao Ya).

## 编写说明

江泽民总书记指出：“我们要坚持用科学思想、科学精神武装全党同志和全国人民，努力提高全社会的科学文化水平。”

随着科学技术日新月异的飞速发展，科学技术普及工作的重要性，被越来越多的人所认识。如何尽快提高电力系统广大员工的科学文化素养，让科学技术尽快地为广大员工所了解和掌握，对推动电力科技进步和促进电力工业发展，显得十分重要。

为了普及科学技术知识，迎接 21 世纪新科技革命的挑战，早在 1997 年中国电机工程学会科普工作委员会的有关领导和专家就建议组织电力行业的两院院士、权威专家，主要面向电力系统各级领导干部、工程技术人员，撰写一部介绍电力工业在新世纪之初，已经遇到和将要遇到的新技术、新课题的科技讲座，帮助各级领导干部、工程技术人员了解掌握电力新技术、新信息。这一倡议，得到了当时电力工业部以及国家电力公司的大力支持。并成立了由科技司（国家电力公司科技环保部）牵头、部办公厅、中国电机工程学会、中国水力发电工程学会、中国电力出版社参加的工作班子。

在历时近三载的编辑工作中，原电力部和国家电力公司领导对此项工作给予了高度重视。根据领导指示，编委会邀请了电力行业 8 位两院院士、近 30 位专家结合世界电力先进技术和我国当前以及今后一个时期电力科技发展的重点方向，撰写并编辑了《面向 21 世纪电力科学技术讲座》一书。该书汇集了火电、输变电、水电、核电等电力科技新技术、新成果，反映了当代电力科技动态，可作为今后一个时期电力系统各级领导干部和工程技术人员以及广大技术工人知识更新的培训教材和参考读物。

与此同时，我们还摄制了与《讲座》内容相配套的音像教材（VCD），与本书同时由中国电力出版社出版发行。

在本书即将出版之际，对给予我们工作大力支持的两院院士、专家、学者谨致以深深的谢意！向所有关心、支持和参与本书编辑出版、音像摄制的领导和工作人员表示衷心的感谢。

参与本书编辑工作的同志还有吴伟、冷喜武、陈书康、丁雁等同志。

本书难免存在缺点和不足，请广大读者批评指正。

《面向 21 世纪电力科学技术讲座》编委会

2000 年 11 月

# 目 录

序言  
编写说明

## 目 录

|                                    |               |
|------------------------------------|---------------|
| 数字电力系统 (DPS) ——新世纪电力系统科技发展方向 ..... | 卢 强 [3]       |
| 优质能源送千里 可靠电力进万家                    |               |
| ——21 世纪输配电技术展望 .....               | 郑健超 [11]      |
| 全国电网互联及联网关键技术 .....                | 周孝信 [22]      |
| 电力市场化和电网互联对稳定分析技术的挑战 .....         | 薛禹胜 [33]      |
| 电力系统自动化领域具有重要变革性                   |               |
| 影响的三项新技术 .....                     | 韩英铎 王 强 [70]  |
| 面向新世纪高电压技术学科发展的几点思考 .....          | 关志成 [97]      |
| 特高压输电技术 .....                      | 陆宠惠 [103]     |
| 电气设备状态监测与故障诊断技术 .....              | 朱德恒 谈克雄 [123] |
| 输变电设备在线监测技术 .....                  | 蔡国雄 [146]     |
| 超导技术在 21 世纪电力系统中的应用展望 .....        | 程时杰 唐跃进 [164] |
| 21 世纪配电技术展望 .....                  | 陈警众 [186]     |
| 把握世界通信发展趋势 确立电力通信发展战略 .....        | 丁道齐 [203]     |
| 21 世纪的信息高速公路——电子信息技术与电力信息化 .....   | 王继业 [223]     |

## 目 录

|                        |                   |
|------------------------|-------------------|
| 21 世纪发电新技术 .....       | 黄其励 [251]         |
| 核电发展的现状和前景 .....       | 左 湖 [278]         |
| 洁净煤燃烧发电技术 .....        | 岑可法 骆仲浚 方梦祥 [297] |
| 燃煤的燃气—蒸汽联合循环发电技术 ..... | 焦树建 [314]         |
| 超临界机组的发展和关键技术 .....    | 危师让 陈听宽 [333]     |
| 大容量热电联产机组技术 .....      | 张培基 [352]         |
| 大型火力发电机组自动控制技术 .....   | 刘吉臻 [374]         |
| 大机组仿真机技术 .....         | 王兵树 [395]         |

|                        |               |
|------------------------|---------------|
| 大机组故障的预诊断技术和寿命预测 ..... | 李自力 黄秀珠 [422] |
|------------------------|---------------|

## 水 力 电 站

|                               |                   |
|-------------------------------|-------------------|
| 中国水电资源开发的现状与展望 .....          | 何 璟 [453]         |
| 大型水轮发电机组的现状与展望 .....          | 袁达夫 熊胜辉 易卜吉 [470] |
| 抽水蓄能电站 .....                  | 曹楚生 [487]         |
| 水电站筑坝新技术——碾压混凝土坝 .....        | 林伯诰 [499]         |
| 混凝土面板堆石坝进展综述 .....            | 蒋国澄 [517]         |
| 水利水电建设中的泥沙问题研究 .....          | 张 仁 [537]         |
| 水电厂综合自动化及“无人值班”(少人值守)技术 ..... | 王德宽 [559]         |

---

# 电 气 技 术

---



# 数字电力系统(DPS)

——新世纪电力系统科技发展方向

卢 强

清华大学

## 1 数字电力系统的定义与内涵

电力系统是由原动机、发电机、电力网络、负荷、控制中心等组成的。原来的电力网络是不可控的。近年来,随着电力电子技术的发展,FACTS设备引入了电力网,使电力网络也变成是可控的了。在电力系统增加灵活性的同时,也增加了它的复杂性。图1表示的是两个大区域网络互连的电力系统。在它们之上还有高一级的调度中心。这可以说是多区互连电力系统的一个一般的结构形式。

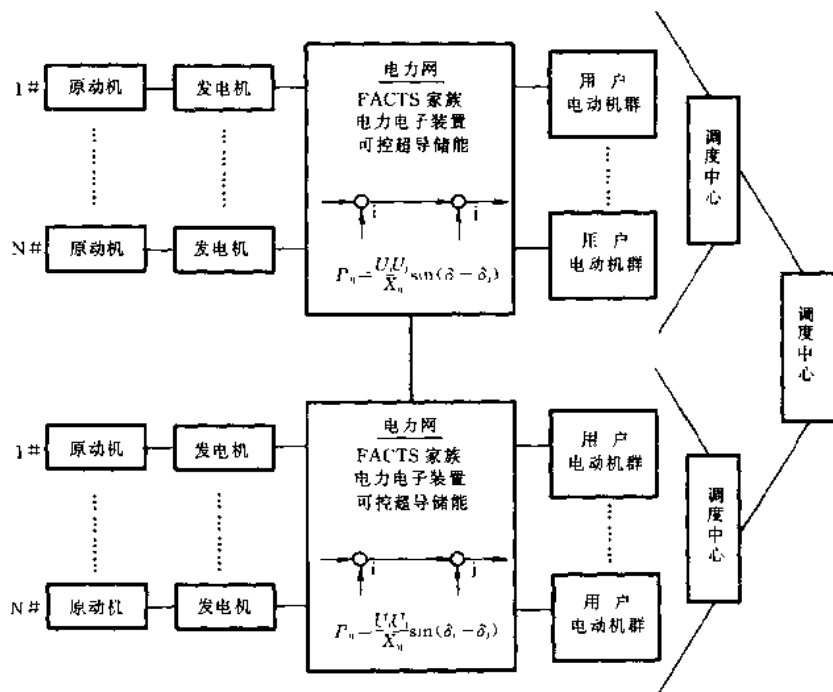


图1 大区域电力系统结构

在这里我将提出数字电力系统(Digital Power System)的概念。首先让我们给数字电力系统一个定义:它是某一实际运行的电力系统的物理结构、物理特性、技术性能、经济管理、环保指标、人员状况、科教活动等数字地形象化地实时地描述与再现。如果做到了

这一点，就可以说我们建立了该实际电力系统的数字电力系统。仅仅给出一个简单的定义是不够的，让我们来讨论这个定义所包含的内容。某个电力系统的数字电力系统可能包含以下内容与功能：

- 电力系统的物理结构（也即真实结构）的其各组成部件（单元）及整体的物理性能、运行方式和运营策略、管理的模式、人员的信息等；

- 电力系统的各个元件、各个网络、各节点的实时状态变量（State Variables）；
- 各种自动控制装置的动作特性（包括继电保护装置）；
- 发电厂、变电所的主要设备的“健康”状态；
- 经济结构、市场信息。

21 世纪，中国的电力市场必然要实行。将来的电价类似股票那样是要波动的、变化的，比如半个小时刷新一次电价。电力市场的出现提出了新的问题，这就是这里所说的“经济结构和市场的信息”包含的内容。

- 影响电力系统安全的特殊自然环境：

比如某一条超高压线路正处于落雷区或者台风袭击中，可能造成灾害。数字电力系统应能及时提示运行人员给予特别关注，以免发生重大灾难。

- 科技管理阶层、技术人员管理信息。
- 环保指标和环保设备投入及运行情况；

21 世纪，我国环保指标和环保问题将被提到非常重要的高度，关系到是不是可持续发展的问題。我国环保法将对于不能达到环保要求的工厂、企业给予重罚。环保设备的水平 and 设备情况，也应该由 DPS 实时地通报。

- 电力系统的各个环节的实时效率：

热力系统、汽轮机、发电机系统、网络损耗、用户、电压等环节的效率，数字电力系统应实时显报。

- 重要的信息：

比如人才的信息、科教活动的信息在数字电力系统中应该有所记录和通报。

## 2 数字电力系统能做什么

### 2.1 管理和决策的科学化

朱镕基总理在 MIT 做报告后，有人问他目前中国最缺什么，他立即回答：“管理。”所以要利用 DPS 来帮助我国电力系统实现管理和决策的科学化。借助 DPS 可知晓管理层下达的指令在实际电力系统中产生什么样的效果，这就是“指令效果反馈”。有了这样的反馈，管理层可以进一步改进管理和决策，使得效率提高。此外，电力系统是分层的，每一层要向上一级管理层通报信息。有了数字电力系统就能很快地把这些信息及时收集起来，加以科学处理，向上一级通报，最终目的是实现全系统的高效管理。这就是 DPS 所含有的高级 MIS（管理信息系统）功能。

### 2.2 安全稳定性的实时评估与改善

对于电力系统最重要的是运行的安全性，这个问题在全世界均未得到很好解决。我国

电力系统也出现过稳定破坏的重大事故。本世纪，美国发生过六、七次大范围灾难性的稳定破坏停电事故，这告诫我们要更加关注电力系统的安全与稳定问题。

首先要实时地对系统进行安全评估。在系统正常运行时，应该给出“忧患预告”，实时告知系统薄弱所在，需给以特别注意。系统的实时稳定域的变化和状态点所处位置应予以实时显现。实际上电力系统是有一个稳定域的，而这个稳定域是随运行情况的变化而改变的，但因为没有 DPS，运行人员不能看到它。稳定域的实时变化和状态点在稳定域中的运动轨迹可借助 DPS 图形化地显示。同时，还可给出改善安全稳定性的建议和策略。有了数字电力系统，我们可以不断地对电力系统的安全性进行再评估、再调整，以达到最佳的安全运行状态。

### **2.3 经济运行策略制定和实行**

在日常运行中，DPS 可给出在满足安全稳定约束条件下、在市场化运行规则指导下的全系统的经济运行策略（这里讲的经济运行不是“自私”的经济运行，它必须考虑环保指标的确保），在正常运行时，DPS 应该给出使运行状态恶化的因素的提示。例如某一个节点的电压指标在下降，或者某两个主要节点之间的功率角在不断扩大等等。虽然没有发生事故，DPS 应该告诉人们恶化的原因以及应该采取的措施。这就是说在正常运行时候，DPS 将对系统经济指标作实时显报，即不断地给出现时系统整体经济效率、网络损耗和热效率等信息，并且给出如何减少损耗、提高效率的建议和方案。

### **2.4 紧急控制的实施**

我们知道在电力系统遭受故障后，可通过紧急控制来加以镇定，以达到保持安全运行的目的。DPS 可告知运行人员，故障发生的地点以及何种故障，如是单相短路，重合闸是否成功等等。故障后，电力系统要进入暂态过程，暂态过程中的重要发电机组的摇摆曲线应能借助 DPS 加以显示，并给出采取何种紧急控制的建议。在最紧急的情况下，DPS 亦可越过调度人员而直接施行控制，称“越权紧急控制”。但 DPS 的这种越权要有严格规定，只有在最必要情况下才能实行。经过在 DPS 建议下的调度人员的或 DPS 的直接紧急控制，最后使电力系统状态重新回到安全稳定域内。

### **2.5 最适解列方案实施**

对于一个电力系统，无论采取多么好的控制，如果把干扰视为一个球的话，球的半径超过一定限度时，电力系统的稳定将会遭到破坏。这时，DPS 将给出最佳的解列方案。把一个系统分解成几个独立的孤岛。解列后的系统，每一个孤岛上的电源和负荷应该是基本平衡的。不要像美国 1996 年的事故那样，有的孤岛主要是电源，有的孤岛主要是负荷，这样会扩大事故。

### **2.6 最速恢复策略制定**

系统解列以后，DPS 将给出最佳的恢复策略的建议，将以流程图的形式给出恢复操作程序。

### **2.7 科学研究、系统规划设计**

DPS 在电力系统科学研究和系统规划设计中将起重要作用，譬如对于正在规划设计中的三峡电力系统要做一系列的研究工作。我们曾经在俄罗斯一个 70 多台模拟发电机组

的物理模拟电力系统中进行三峡系统的研究工作。事实上，有了 DPS，我们就可以利用它对现实的和未来的系统进行深入细致的研究。

图 2 给出了数字电力系统的图像化的思考。在图的右边是一个运行中的电力系统，图的左边是一个 DPS。DPS 通过实时数据通信和通信，跟踪这个实时的电力系统。如上

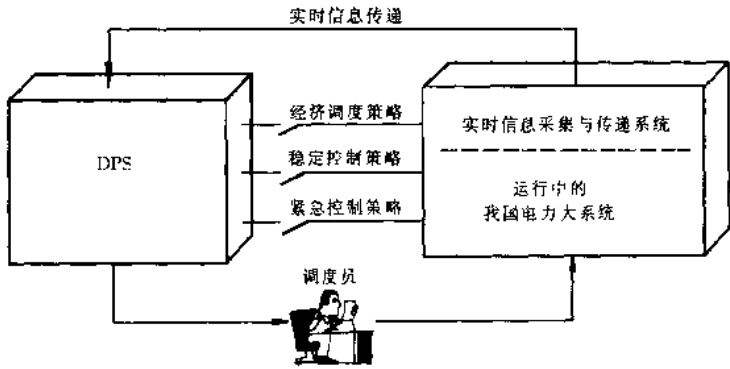


图 2 数字电力系统

所述，DPS 在正常运行时给出建议，通过调度人员进行闭环；在最紧急的情况下，将紧急地不通过调度人员进行闭环，然后再“通知”调度人员，刚才进行了什么操作，产生了什么效果等。如果没有 DPS（现在的系统就是这样），调度管理人员在运行中是相当盲目的，发生突然故障后他们不知道电力系统中发生了什么问题，产生什么后果，稳定域如何变化，状态点在稳定域的什么位置。如果发生了故障，调度人员茫然不知所措，甚至进行误操作，1996 年、1997 年美国西部电力系统发生事故后的情况就是如此。如果有 DPS 的帮助，电力系统运行的安全性和稳定性会得到极大的提高。

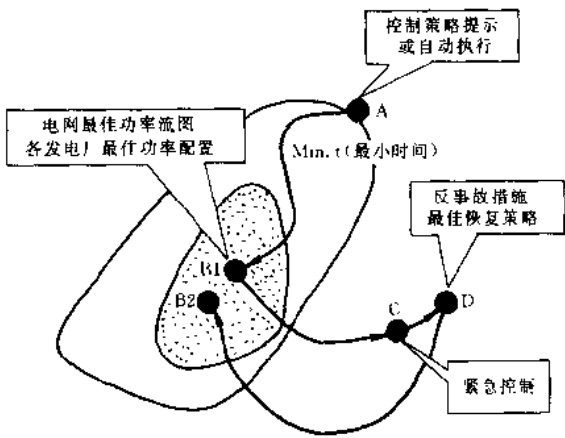


图 3 稳定域示意图

现在让我们对以上所述的内容用图形化的方式加以概括。图 3 表示出一个电力系统某一时刻的稳定域。调度运行人员在调度中心中依靠 DPS 能够实时地看到立体的稳定域。实际电力的稳定域和状态点在域中的位置都是不断变化的。运行条件恶化或系统发生故障，稳定域就会缩小，状态点也会向域的边界移动。如果状态点处于危险的位置（见图 3 点 A），这时 DPS 应及时给出控制策略或按产生的控制策略自动闭环执行，以使状态点

在最短时间内回到安全区域（见图 3 点 B1）。如果在更危急的情况下，状态点已经移到稳定域的边缘（图 3 点 C），DPS 应能采取紧急控制策略，使之回到安全区（图 3 点 B2）。抑或，从理论上看来，系统已失去稳定（见图 3 点 D），DPS 将采取反事故措施或采取最

适合解列方案和最佳恢复策略, 使该电力系统状态回到安全区 (见图 3)。至于在正常情况下 (见图 3), DPS 应给出按经济运行策略和按照电力市场经济法则, 调节各发电机组功率配置等, 这也是我们常说的最佳潮流的运行法则。

以上这些任务都是 DPS 应该, 且能完成的。

### 3 基础性研究

为了实现 DPS 需要有相当的基础性研究成果作为支撑, 需要有新理论和新算法。

#### 3.1 整体模型

动态电力系统是用非线性微分方程来描述的。由于 FACTS 设备的投入, 电力网络中的动态设备更多了, 整个电力系统微分方程的阶数提高了。此外电力系统网络的潮流方程是大规模非线性代数方程组。把这两个方程组联立起来后就组成了大规模奇异非线性动态大系统, 这个整体模型在数学上称作 DAE 问题 (Differential and Algebraic Equation problems), 见图 4。高维非线性 DAE 问题至今在理论上还是个重要的挑战。

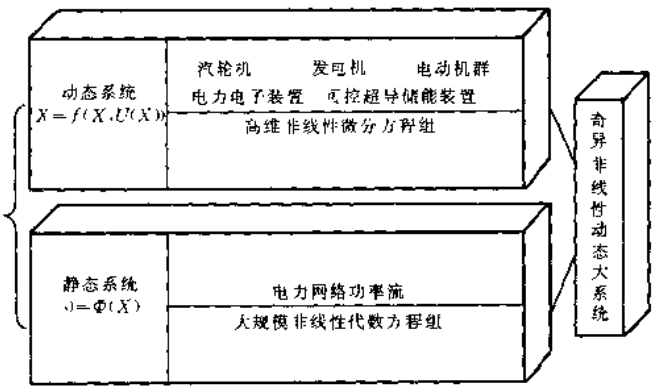


图 4 整体模型

#### 3.2 整体稳定性测度论

要研究电力系统各个层面相互作用的规律和对稳定性的影响, 必须研究稳定域的拓扑结构、稳定域边界及其影响因素, 所以要对运行中的电力系统的稳定域进行实时测度。

#### 3.3 稳定性在线实时评价方法体系

如上所述电力系统稳定性问题是一个高维的 DAE 问题, 这就要求对高维 DAE 模型采取降阶或简约化的方法, 可能的方法是发展一套中心流型 (Central Manifold) 方法。利用中心流型和微分动力学的 Poisson 括号法来研究中心流型的稳定性可能是有效的。我们还要发展大规模数值科学计算方法, 可能用到基于辛几何 (Symplectic Geometry) 算法的并行计算方法。在辛几何算法方面, 中国科学院的冯康院士开创的学派到现在为止仍然在世界上处于领先地位。

#### 3.4 混杂系统的多目标优化调度理论

混杂系统 (Hybrid System) 是系统科学领域中新提出的概念和理论。电力系统是一

个标准的混杂系统，它的上层（调度中心）给出的调度决策主要是逻辑性的操作指令，而下层控制（如发电机的励磁和调速控制）主要是连续型的。如何将不同性质的上层和下层控制恰当地对合起来，以达到电力系统的多目标优化控制的目的，这是一个重要理论问题和应用问题。

至于电力系统的多目标控制，说到底就是安全稳定性与经济性的双目标控制。进入按电力市场机制运行后，人们主要考虑的是它的经济问题，即各个投资体的赢利问题以及如何降低电价等问题，很少考虑安全和稳定的问题。要为市场化运作的电力系统提供安全稳定的保障，这是一个新的极具挑战性的课题，现在是该结束安全稳定和经济调度割裂的时候了。进入电力市场以后，电力系统的潮流的随机性加大了，将通过 DPS 绘出相适应的保证系统安全运行的调度策略，这是一个新的问题。我认为美国 1996 年以来的大停电事故和马来西亚的大停电事故，和他们对于在电力市场化运行下的安全稳定性没有加以综合考虑是有密切关系的。

### 3.5 区域性紧急暂稳控制

电力系统区域性的紧急控制问题在世界上并未解决，目前只能针对某一系统通过大量的仿真计算，得到该系统区域紧急控制的一些规则：譬如说如果在某地发生短路，就相应地在哪些厂切几台机，哪些地方切一些负荷等等。人们只是根据经验和仿真结果得到一些策略，但实际的电力系统状态是千变万化的，单靠仿真得到的几条策略是不够的，所以要研究区域性紧急控制理论。现在没有现成理论可寻，我主张研究和发展 Hamilton 系统和广义 Hamilton 系统理论以建立一套电力系统的区域紧急控制的理论，可以把切机和切负荷都看作是能量的注入，只不过是正的符号的能量或负的符号的能量而已。基于这个观点有可能发展一套基于广义 Hamilton 理论和方法的电力系统区域紧急控制的理论和方法。

### 3.6 巨大的软件工程

以上所讲的是一个巨大的软件工程，美国副总统戈尔曾经提出数字地球的概念。这个数字地球可以用作研究全球气象情况、厄尔尼诺现象以及世界资源、森林、环境等。这给我们建立数字电力系统以启发。当然，数字地球这样一个巨大的软件工程要世界各国来共同去完成，同样，DPS 也是一个相当大的软件工程。现有的软件成果，不能废弃，要加以利用，还要把新理论的成果软件化，同时，我们要发展高可视化建模的问题。任何一个最优秀的调度人员，每分钟给他 2000 个新的数据组成的数据表，都不可能进行任何有效的处理，而图像化的处理却可使人“一目了然”。我们要尽量创造性地利用多媒体的技术，还要借用虚拟现实技术的有用的思路来建立 DPS。

## 4 硬件支撑

我们在两年多以前，曾经有建立 DPS 的想法，但是直到最近，才提出这个概念，因为 DPS 需要硬件来支持，并需要超大规模的 PC 机网络。为什么要用超大规模的 PC 机网络呢？第一，因为 PC 机价格便宜，比专用芯片便宜很多，便于推广和使用。第二，这样一个超大规模的 PC 机网络最近已经由清华大学计算机系研制成功。我们现在有了硬件支持，再提出 DPS，具有更高的可行性。