



电网



RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

[法] J. Pouget 著
李文沅 译

重 庆 大 学 出 版 社

样书

内 容 简 介

本书译自法国电力公司部主任，法国高等电气学院兼职教授，安培奖金获得者J. Pouget所著《RÉSEAUX ÉLECTRIQUES》一书。本书除介绍电力系统的一般理论外，主要涉及到电源模型，负荷模型，经济调度，状态估计，缺电量评估、电网规划，电力系统经济学，能量学；以及标准化理论，概率统计分析，最优化理论、图论、随机几何和计算机信息处理等在电力系统中的应用。既有较高的理论水平，又包含非常丰富的实际知识。阅读本书可以开拓读者的眼界，扩展读者的思路。

在写作方法与内容取舍上，本书与传统的电力系统教科书相比，具有明显的特点：写法新颖，涉及内容广泛，反映了直至80年代初期法国在电网方面的许多实际研究成果。

本书可作大专院校电力专业的研究生教材，也可供大专院校有关专业师生和电力系统工作者参考。

电 网

(法)J. Pouget著 李文沅译

责任编辑 贾肇武

※

重庆大学出版社出版

新华书店重庆发行所发行

中国科学技术情报研究所重庆分所印刷厂印刷

※

开本：787×1092 1/16 印张：15.5 字数：387千

1988年6月第1版

1988年6月第1次印刷

印数：1-3000

标准书号：ISBN7-5624-0084-9
TM·7

定价：2.60元

前 言

这本书共有十七章，再加上一些附录。

每章包括四个部份，在附注中分别用R, D, P, S表示（例如D7表示“见本章阐述7”；3-D7表示见第三章阐述7）。

1. 概述（用R表示）：列举重要的概念。

2. 阐述（用D表示）：或者是概述中某些概念的进一步说明，或者是题外的有助于理解问题的比方，或者是有意义的例子。本书的核心在这些阐述部份。

3. 问题（用P表示）：可能是数值上的例子或方法上的细节。我们有意地作了简化，因而常常可用手算求解，只是在有“乘积和斜坡”〔1〕（1-D3）的地方才用得着计算机。计算机程序经常比公式更实用，然而用大家熟知的术语所表示的公式却带给我们实现软件的捷径。对这些公式的进一步研究将是一般的补充的问题。我们要指明一点：这第三部份给出的只是提供进一步思考的一些路子，有些问题是明显无解的。

4. 文献（用S表示）：指出更为丰富的资料的出处。在这些文献中，我们未列出Cahen, Henriet, Ailleret和Pélissier等人的优秀教程。这些教程的坚实的电工理论，是无懈可击的。

本书并没有创见什么新的东西，只不过是文献中的思想加以重新整理而已。更确切地说，只是摘抄和引证参考文献，在这里井蛙鼓噪一下。

老子劝告那些忘乎所以的作者，大概有这样的话：“教者不知，知者不教。”

当然，编辑这些章节将会得到Pascal的劝慰，他几乎这样说道：“不要对我说，在这篇电气方面的论文中什么新鲜玩意也没有，思路总是不同的。”

在繁多的著作和高等电气学院学生的知识需求之间，这些章节就象是在能源和能耗之间一样，只是一个联接网络。它相当简略，可以说具有两重性，一个倾向，它注意了：

——能量学

——计算机模型

另一个倾向是相反的，本书未必严谨：

——它既不很具有“经济性”（由于写法或考虑上的犹豫不决，直接降低了本书独特风格的荣耀感）；

——它又不很具有条理性（我情愿给出说明原理的例子，而没有顾及重复或类同）。

同时，我们知道，所有的问题中，现今的许多提法很快将会变得不那么新鲜了。

法国电力公司部主任、安培（A.M.Ampere）奖金获得者

J. Pouget（浦雪）

译者注：

- 〔1〕 作者在这里用了他们在科研工作中的一句口头话，“乘积和斜坡”意味着用较多的数据作详细的模拟计算。

PREFACE POUR L' EDITION CHINOÏSE

C'est un grand honneur de présenter cet ouvrage aux étudiants, professeurs et ingénieurs chinois.

Il représente une amplification du cours donné à l'Ecole Supérieure d'Electricité de 1972 à 1983.

Il représente surtout les efforts d'une équipe à la Direction des Etudes et Recherches d' EDF, qui eut la chance, face à des questions inextricables, de disposer d'une puissance de calcul accrue vers 1965.

L'empereur Yu le Grand rencontra le même problème de canaliser une puissance énorme. Celle des ordinateurs dits de la 3^e génération risquait d'être aussi débordante que les tourbillons dévastateurs du Fleuve Jaune.

Cette équipe, où le mathématicien le plus remarquable fut J.C. Dodu, erra plus modestement que l'Empereur Hydraulicien.

Mais, comme lui, pendant longtemps, elle repassa plusieurs fois, sans pouvoir guère s'y arrêter, devant son point de départ.

Comment modéliser les études de réseaux électriques, dragon de complexité?

La bête fut quelque peu apprivoisée, car aux congrès PSCC ou CIGRE, vers 1972, des ingénieurs américains faisaient état de leurs résultats obtenus par les modèles probabilistes d'EDF, principal objet de ce livre.

Celui-ci ne serait-ce qu'à cause du grand nombre d'étudiants non français à l'Ecole Supérieure d'Electricité, visait une vague universalité (à ce propos, les mentions de Zhuang Zi ou des Royaumes Combattants, par exemple, figuraient dès la première édition).

Universalité, bien que les exemples soient surtout tirés de l'expérience EDF. Cet établissement a une taille comparable à celle des compagnies d'électricité de pays plus puissants que la France (car ces compagnies sont nombreuses à se partager le marché). Cette dimension lui pose des problèmes d'optimisation parmi les tout premiers du monde, par la difficulté et donc par l'intérêt.

Il est significatif que EDF ait été la première compagnie à utiliser la notion de défaillance (chapitre 12) dans ses décisions (sous l'impulsion de M. Boiteux). A l'époque (vers 1965), les ingénieurs responsables américains ou soviétiques ont souri de cette démarche jugée inadéquate (pour des motifs dont la différence est intéressante). Quinze ans plus tard, tous les ouvrages relatifs au sujet (américains ou soviétiques) calculent des défaillances.

D'autres parties du livre sont plus démodées. Le chapitre 2 (prévisions de consommation) en est un exemple; on utilise maintenant les séries chronologiques. Sur la théorie de la normalisation, M. Ailleret a étendu sa théorie au delà

de l'annexe I.

L'auteur est bien incapable d'utiliser les tirages aléatoires du Livre des Transmutations (易经) pour deviner comment les chercheurs chinois feront évoluer ce domaine. Mais, avec l'immensité (en km, générateurs d'instabilité), avec la dissémination des réserves hydraulique (la continuation des exploits de Yu, par d'autres moyens, en GWH), avec les concentrations de puissance (en MW), la gestion électrique de l'empire des Han débordera de problèmes d'une taille et d'une complexité encore inégalées, pour lesquels les ingénieurs chinois devront inventer des méthodes nouvelles (sur des ordinateurs plus évolués).

Parmi les nombreux chercheurs chinois, venus travailler à EDF, je voudrais remercier 李廷祥 (de la New Brunswick Electric Power Commission, au Canada), 姜树德 (de la Deuxième Direction Hydro-Electrique du Ministère de l'Electricité dans le Shan Xi), et surtout 李文沅 (de l'Université de Chong Qing). Ce dernier, face à un texte ingrat et souvent erroné, a été le traducteur scrupuleux et infatigable et il a dénoué beaucoup des noeuds de ce réseau embrouillé.

浦 雪

Joseph Pouget

juillet 1985

中译本序

很荣幸能够把这本书介绍给中国的学生、教授和工程师们。

这本书是1972年至1983年我在高等电气学院所授课程内容的一个扩充。它代表了法国电力公司研究及发展局的一支研究队伍的集体成果。大约在1965年，面对着错综复杂的问题，这支队伍有幸能够运用更大计算能力的计算机。

大禹皇帝从前也曾遇到过类似的困难问题，即要疏通异乎寻常的大水流。这样大的问题，即使使用所谓第三代计算机，计算量也会像黄河的滚滚旋涡那样汹涌澎湃。

我们这支研究队伍中，有很著名的数学家J.C.Dodu，但比起大禹这个水利家皇帝来，还是逊色得多。不过，他们也像大禹皇帝一样，在他们的出发点面前，长期以来多次反复试验而不敢怠慢。这个出发点就是：

怎样才能使电网研究这条复杂的龙实现模型化？

终于这条龙有点被驯服了。1972年，在电力系统计算会议（PSCC）和国际大电网会议（CIGRE）上，法国电力公司通过概率模型所获得的研究成果受到美国工程师们的重视。这些成果正是本书的主要内容。

只是因为高等电气学院有许多非法籍的学生，所以这本书还是要考虑到具有一定的普遍性（顺便指出，书中所用庄子的提法，即战国问题，从第一版开始就有了它应有的地位）。

尽管书中的例子主要来自法国电力公司的经验，但是仍不失普遍意义。法国电力公司的规模可与那些比法国更大的国家中的电力公司相提并论（因为在那些国家是多个公司共同来供给电力用户的）。由于在这样的供电规模上问题的困难性，以及利益方面的原因，法国电力公司是世界上最早提出优化问题的几个公司之一。

有意义的是，法国电力公司最早在决策中使用了缺电量的概念（见第12章）（根据M. Boiteux的提议）。在当时（1965年），美国和苏联的专责工程师们都取笑这个评价方法，认为是不适宜的（他们的反对意见，理由完全不同，这很有意思）。可是15年之后，所有与这方面有关的文章（不论是美国的或者是苏联的）都要计算缺电量了。

本书的其它部份没有那么新颖。例如第2章，负荷预测方面，我们现在已使用时间序列的方法。关于标准化理论，M. Ailleret已经有了新的进展，而不只是附录I中的那些内容了。

作者不可能从《易经》中断章取义就能推断出中国的研究者们将在这个领域内作出怎样的发展。但是，由于面积辽阔（从距离上说，有发电机的不稳定性问题），水力资源密布（从能源上说，要以其它各种方式，继续大禹的开发工作），以及用户集中（从功率使用上说），中国的电力管理充分呈现出规模宏大和无可比拟的复杂等问题。对这些问题，中国的工程师们应该在进一步发展的计算机基础上发明出新的方法。

许多中国研究者曾经来法国电力公司工作过。在他们中间，我愿意感谢李廷祥（加拿大新不伦瑞克电力委员会），姜树德（陕西：中央电力部水电二局）。尤其要感谢李文沅（重庆大学），面对这本令人生畏而又时常有误印的书，他是一个一丝不苟和不知疲倦的译者，他解决了纷繁内容中的许多难点。

JOSEPH POUGET（浦雪）

1985年7月

译者的话

法国电力公司研究局J. Pouget先生的这本书，虽然是在法国高等电气学院任兼职教授时所用的教材，但是在写法和内容上与传统的电力系统教科书（包括英美的书）有较大不同。写法颇为新颖，内容相当广泛，涉及到直至80年代法国电网方面的许多实际研究成果，而且其中不少模型在法国电网目前的运行实践和规划方案中继续采用。这是大多数教科书所做不到的。

作者是一位长期从事电网研究又处于负责地位的工程师，他是法国安培奖金获得者，写书时是高等电气学院（法国最有名的工科大学之一）的兼职教授。这使得本书既有较高的理论水平，又含有丰富的实际知识。许多内容都是本书独有的。作者在“前言”中说，他只是摘抄和引证参考文献。实际上应指出，由于他的谦虚，凡是他自己的文章均未在参考文献中列入，而且凡是他与别人合写的文章，也都略去了自己的名字。除了正文的章节以外，例如附录Ⅲ，关于电网设备元件价值的定义，是作者在电力系统经济学方面提出的一个新观点；附录Ⅴ中作者关于能量贮存的见解，曾在1976年国际热能贮存会议上被大会公认为具有指导意义。而附录Ⅵ和附录Ⅶ，则是作者在法兰西高级科学研究院上演讲的摘要。

本书所涉及的不仅仅是电力系统的一般理论，它还涉及到电力系统经济学，能量学，标准化理论，概率统计分析，最优化理论，图论，随机几何，能网几何以及计算机信息处理等方面的大量知识。因此作为我国大学电力系统专业高年级学生，研究生和电力系统工作者的参考书，可以使我们开拓眼界，扩展思路，了解许多新问题和新的处理方法。同时通过本书，也可以使我们看到直至80年代初，法国电网研究的实际水平，以及法国电力系统的大学生教材如何与电网研究的实际内容紧密相联。

本书叙述十分简略，文中又用到一些法国电力公司使用的行话。凡是语言上和内容上的疑难之处，我在翻译时均向作者本人亲自作了请教，力图使译文符合作者原意。为了更接近国内通常的使用习惯，征得作者的同意，对书中个别字母或数学表达式作了调换或局部变动。在适当的地方，为了帮助读者理解，给出了译者注（放在每章之后，而在原文处用方括号中的数字标出）。曾发现一些印刷错误，经作者核实认可，在译文中已一一作了订正。译书最后给出了书中有关人名的简单注释目录。

翻译中，我曾得到作者的许多帮助和指教，给我介绍有关的参考资料及书籍，尤其是他花费了宝贵的时间，多次向我解释原意。而且在初译稿完成时，他又高兴地专门写了“中译本序”。这些热情的支持使我为之感动。另外，我还得到重庆大学江泽佳教授和顾乐观教授的鼓励和支持。尤其是重庆大学秦翼鸿教授和徐国禹教授为译本的最终定稿进行了认真细致的校核，并提出了宝贵的修改意见。在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于译者的水平所限，译文中肯定还有误解和不当之处，望读者批评指正。

译者 李文沅

1985年6月于巴黎

1987年5月修改于重庆

目 录

前言

中译本序

译者的话

第一章	电网研究的必要性及要点	(1)
第二章	负荷	(7)
第三章	热力发电	(16)
第四章	水力发电	(27)
第五章	阻抗、价格及其它量	(39)
第六章	技术经济概要	(50)
第七章	暂态现象有关的问题	(57)
第八章	潮流方程及其计算机处理	(72)
第九章	传输图	(87)
第十章	经济调度问题	(100)
第十一章	超高压电网的运行	(106)
第十二章	缺电量及其估计	(117)
第十三章	超高压及高压电网的规划	(129)
第十四章	中压及低压电网的规划	(147)
第十五章	城市区域供电	(158)
第十六章	直流输电	(168)
第十七章	电压问题	(172)
附录 I	标准化理论	(184)
附录 II	最优化数学概述	(188)
附录 III	价值定义	(203)
附录 IV	发电系统分析的有关问题	(207)
附录 V	谐频分析及能量贮存	(210)
附录 VI	Monge 问题	(215)
附录 VII	能量网络几何学	(219)
附录 VIII	随机几何学	(229)

第一章 电网研究的必要性及要点

概 述 R

· 电网的运行和发展显示出十分复杂的实际情况。

电网是电赖以存在的电能系统的一个组成部份。在对各种现象进行描述的过程中，这个部份无论从运行上或从规划上说，都是最新最实际的。

在发电和用电之间，电网是必不可少的环节。最令人引以自豪的核电站得以投建，而送出它的功率则应归功于建立数公里的不那么壮观的三相铝合金网络。这两个决策，尤其是后一个决策，就是电网的问题。

电气专家们凭经验在不同方面的各个层次上设计了这个复杂的电网：

- 电压水平（输电网，供电网，配电网），
- 正常工况和暂态工况，
- 涉及国家利益或地方利益的传输功率，
- 多年预测，以及年度预测，周预测，日预测，
- 可变化范围的一系列约束：供电的连续性，频率，电压，短路，稳定性。

电网的复杂性要求重视下列各点：

- 了解运筹学的各种问题，
- 在数学和计算机的使用上作出选择（在程序中数学用量应该适度以获得经济效益），
- 在技术和经济之间进行探索，
- 考虑数据的问题（估计、简化、不确定性）（D2）
- 习惯于采用近似，在如此纷繁的实际问题中，每个工程师应该学会“粗”一些，在“乘积和斜坡”〔1〕上适可而止（D3）。

在这个领域内，科学是为那些在各个细小方面也很敏感的探索者所掌握的。合理的努力还远未成功，有些问题变得陈腐了，但另外的一些问题仍然很复杂（如热电价格的等级和发电方式的多样性）。

为了从以下三个相互联系的方面来描述：

- 发电，
- 电网，
- 负荷，

我们将强调：

- 能量问题，
- 正常运行工况。

电网的演变，尤其是大的传输网，常常经历了有代表性的一条线路所形成的三部曲（D4）。从一个水电站的建造出发，我们能看到电网有输电和联络两种功能（13-D6）。

阐述 D

D1 全书中，我们总是游弋于两个观点之间：

生产（运行观点）：如何把今天已有的系统管理得更好？

规划（投资观点）：在未来的年月，如何改进系统？

所有的规划模型都应该包括对电网运行的描述（可能是非常简化的描述）。

D2 在电网研究中，计算机为解决诸如“科学计算”这样的难题已经提供了一条捷径。

例如，400个节点电网的潮流问题，计算时间按年依次为：

3h （在Bull Gamma AET机上） ……（1958年）

10min （在IBM 704机上） ……（1961年）

10s （在IBM 7094机上） ……（1964年）

1s （在CDC 6600机上） ……（1970年）

而为了描述一个系统的数据管理，反而需要一个很大的工作量（工程师人数×小时数）。大量的数据及其不确定性，使经济目标表现为平坦的不定区域，这把寻优的意义给抹杀了。

因此，即使在火箭导航方面很成功的方法（卡尔曼滤波），用到这里，为了使电网自动化运行略有改进，也显得无济于事。

D3 “乘积和斜坡”[1]

我们形成问题的方式，在开始时常常是将数据组织成只作简单的计算，如：

$$a_1 + a_2 \text{ 或者 } a \times b,$$

然后，第2步，我们可以用稍微多一点的数据，于是可以作以下计算：

$$a_1 b_1 + a_2 \quad (\text{精确了一些})$$

最后，我们才试验有无必要作“乘积和”计算：

$$\sum a_i b_i$$

D4 电力线路形成的三种状况

α) 一个地区的水电设备超过了需要（位置较远）。这时一条联络线就能保证多余功率的系统性传输。例如挪威电网或Quèbec-Hydro公司电网。

β) 已经没有安装水电设备的可能性，我们只好在日益增长的负荷附近安装热电设备，需要联络线连接热电和水电区域。有的联络线，常常只是在故障的时候或者为了减少使用费用高的热电而利用水电功率的时候，才偶尔起传输作用。阿尔卑斯和Renne地区的情况就是如此。

γ) 负荷继续增加，即使在水电区域也安装热电设备。这样我们力图实现抽水蓄能。此时联络线的作用是进行补偿的，但更加不可预见的和短距离的传输。

可以区分电网的传输作用和联络作用，但是对线路极少地区的电网规划，这两种作用可以用一种方法建立模型（13-D6，13-D7）。

D5 法国电力公司的电压等级

到1975年底，法国电力公司通过各种电压的电网向用户供电：

单位kV	单位km	
400	6222	} 超高压
225	22640	

土200(直流)	158	} 高 压
150	6526	
从100到35	35941	
从30到17	147500	} 中 压
从15到0.5	255500	
低电压	558000	低 压

根据用户连接的电压等级和合同特点，我们可以将用户分为三组（头两组主要是工业用户），各组耗电量的情况差不多是：

	用户数量	总合同功率	耗电量
高电压	537(包括法国铁路)	9.84GW[2]	48.16TWh[2]
中电压	124,180	19.09	47.78
低电压	21,363,000	113	51.5

有340,000个中压/低压变电站。

D6 反映投资和运行特征的基本数字（法国电力公司为例）

管理帐目上几个年度的资产统计表明了以下的投资额：（单位MF*，即百万法朗）

	水电	热电	核电	输电	配电
1973年	843	1140	893	821	2392
1974年	835	1106	1999	860	2529
1975年	976	1157	3783	1183	2730
1976年	776	947	5782	1134	3124
1977年	672	483	7249	1115	2446

由上述数字，我们可以看到电网相对于发电的投资比例，见右边的两列数字，这里输电网和配电网以90kV作为分界。

我们可以把上面的投资额与下面表示生产情况的数字加以对照：（单位MF）

	燃料费用	原始酬金和捐税	税外营业值
1973年	1913	6147	17686
1974年	5111	7277	21573
1975年	5743	8655	25906
1976年	7372	9892	31685
1977年	8493	11269	36158

1977年的耗电量是207TWh（在1975年为181TWh），其中核电为17TWh，水电部份是80.5TWh，这是随机的，取决于水电生产指数，在1977年其值为1.28，这是很有利的一年，而在特别干旱的1976年，为0.83，仅仅发水电48.7TWh。

最大发电功率在12月份或1月份，在1977年为34.5GW（在1975年为31.7GW）。

D7 各种能图

我们可以用许多方式来表示能源和负荷之间的能量流程。

如果我们想表明人类利用能量的情况，可以表示为图1-1（S5）。

如果我们强调把能量转换成电的方式，则可以表示为图1-2。

注*：本书采用单位，除个别为法国单位外，均是法定单位

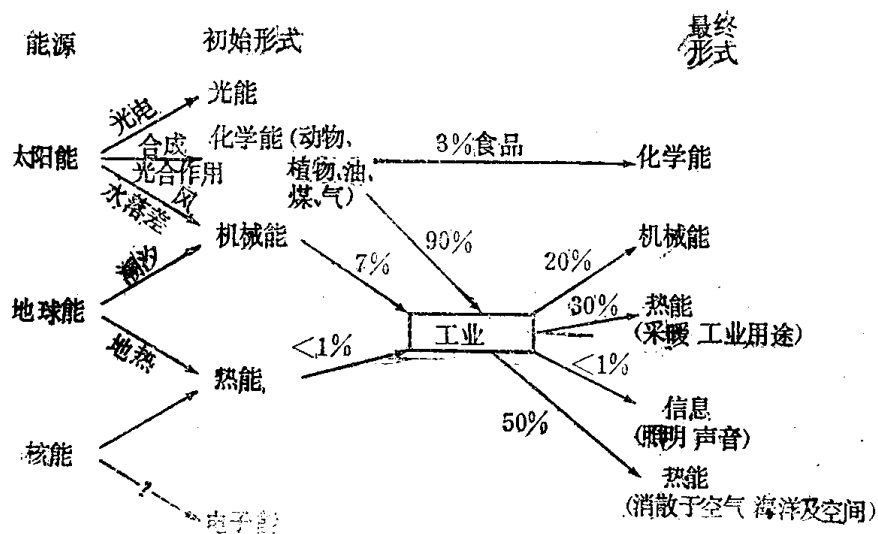


图1-1 人类利用能量的能图

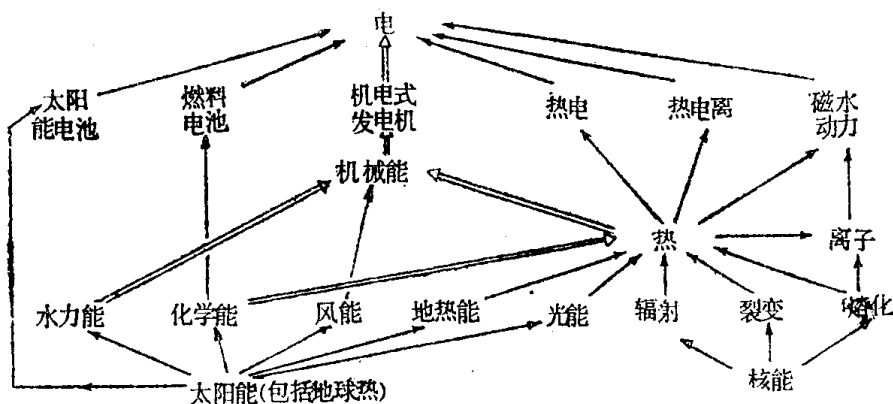


图1-2 能量转换成电的能图

可以看到，在可能的各种通道中，只有双线通道才是电力公司所使用的。

我们用GJ (10亿焦耳)，TWh (10⁹度)，tec* (煤当量吨) 和tep** (石油当量吨) 来量度能量值。

$$1\text{G tec} = 3000\text{TWh}$$

$$1\text{ tep} = 1.5\text{tec}.$$

在1970年，人类消耗7.5G tec，其中20%是以电能的形式耗掉的。而每个居民的耗量为：

世界平均值 2.14 tec

在法国 4 tec

在美国 12 tec

在1970年所消耗的这7.5G tec中，其原始的能量形式是：

煤 占 30%

石油占 45%

煤气占 19%

水力占 5%

注：*tec国际单位：一吨煤的发热量。

**tep国际单位：一吨石油的发热量。

太阳每年送到地球上的能量是 $1.9 \times 10^{16} \text{Gtec}$ ，或者说是实际消耗($1\text{kW}/\text{m}^2$)的20,000倍。

最后，我们用第三个能图(图1-3)来表明其传输方式，电网不过是其中一部份罢了。能量传输常常与其它的过程混在一起，如贮藏，转换等。

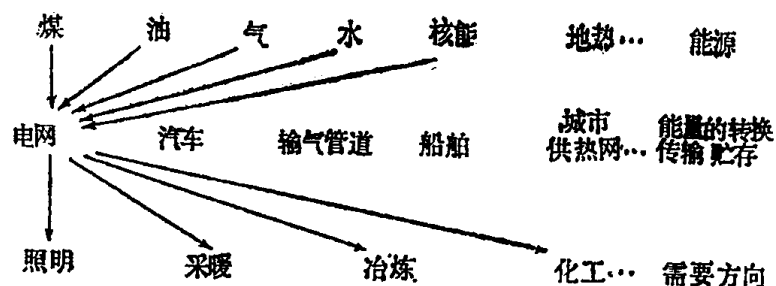


图1-3 能量传输方式的能图

D8 时间层次举例

涉及到热电机运行问题的时间分类如下：

调节器作用	功频调节	经济调度	机组起动	机组维修
不到一秒(s)	几秒(s)	几分(min)	几小时(h)	月

我们看到要使一个发电机组，在某一给定时刻以某一功率运行的话，从一次调节(调节器)往上考虑，需要一系列的决策过程(未列出“建设”这个环节)。

问题 P

P1 将地球-月亮之间的距离和法国电力公司各电网的长度加以比较。

P2 在D7的能图中，怎样表示出了各种能源是相互可以替代的？

P3 铁路运煤的价值和输电价值的比较：

假定输送1MW，输送距离L km，时间每年7000h。那么对这7000MWh能量的传送有两个方案：

a) 大约2500吨煤供给耗煤比热为2160Kcal/kWh的一个热力电站。煤的热功当量为 $C = 6500\text{kcal/kg}$ 。输电价格为0.04MF/TWh·km。

β) 用火车运输相应的煤量，其价格是：

$$10 \left(\frac{L}{100} \right)^{-0.5} \text{Cent}^*/\text{t} \cdot \text{km}$$

答案：当 $L=100$ 时，输煤价为10Cent/t·km，此时输电就不如火车运煤。但是对于 $C=4500$ 的劣质煤来说，在当地电厂烧掉，用电的方式来传输就划得来了。

同样，对于 $c=1000\text{kcal}/\text{m}^3$ 的高炉煤气(生产1KWh能量要 2.5m^3)，它的传送价值是 $2 \times 10^{-3}\text{Cent}/\text{km} \cdot \text{m}^3$ ，只有当传送量很大时(差不多每年为 $3 \times 10^9\text{m}^3$)在长距离上输送煤气才是经济的。

P4 完成D7中第三个能图。

P5 生物学上的优化(S3)：仔细看下面两个优化例子的示意网络图，证实在人体循环系统中的两种关系。

a) 见图1-4，血管AB半径为 r_0 ，分支血管半径为 r_1 ，血送到C，分支与主血管交角 θ 。当满足关系

注：*生丁(cent)，法国货币单位：1生丁(Cent) = (1/100) 法郎

$$\cos\theta = \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^4$$

时, 使血阻

$$\frac{\lambda_0}{r_0^4} + \frac{\lambda_1}{r_1^4}$$

取极小值。

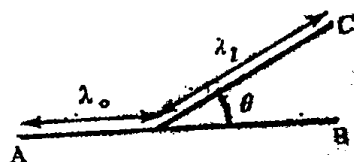


图1-4 问题P5的的附图(a)

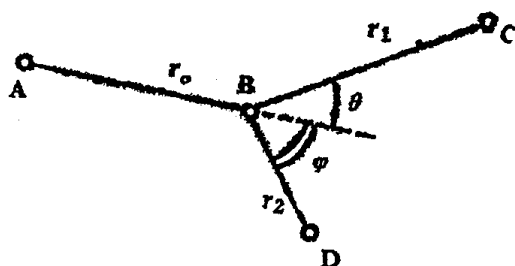


图1-5 问题p5的附图(β)

β) 见图1-5, 一条血管从A来, 在到达C和D前于B处分叉, 如果半径满足关系 $r_0^8 = r_1^8 + r_2^8$, 则当:

$$\cos\theta = \frac{r_0^4 + r_1^4 - r_2^4}{2r_0^2 r_1^2} \quad \cos\varphi = \frac{r_0^4 + r_2^4 - r_1^4}{2r_0^2 r_2^2}$$

时最优。〔3〕

参考文献 S

- S1. Direction Production-Transport, EdF. Statistiques 1973-1977.
- S2. EdF. Rapport d'activité 1973-1977.
- S3. R. ROSEN. Optimality principles in biology. Butterworths.
- S4. BONNEFILLE. ADERP, avril 1975.
- S5. LE GOFF. Laboratoire des sciences du génie chimique Nancy, septembre 1976.
- S6. AILLERET. L'énergie jusqu'en l'an 2000. RGE avril 1974.
- S7. MARCHETTI. Hydrogène et énergie. Chemical economy and engineering review, janvier 1973.
- S8. MAGNIEN. GODIN. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. RGE, juin 1976.

译者注.

- 〔1〕 见前言译者注〔1〕
- 〔2〕 国际通用符号: $k=10^3$, $M=10^6$, $G=10^9$, $T=10^{12}$
- 〔3〕 这个问题的目的仅仅是说明优化问题存在于各个领域, 并不要读者作实际计算。

第二章 负 荷

概 述 R

为了判断电网的状态和规划它的发展，应该对负荷有所分析。

用于经济目的的负荷预测是用能量来表示的，而对于电网运行则应转换为功率来表示。线路的传输能力也用功率表示。

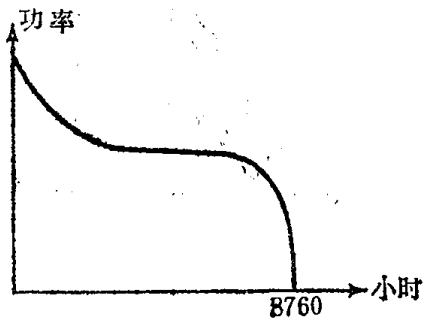


图2-1 负荷持续时间曲线

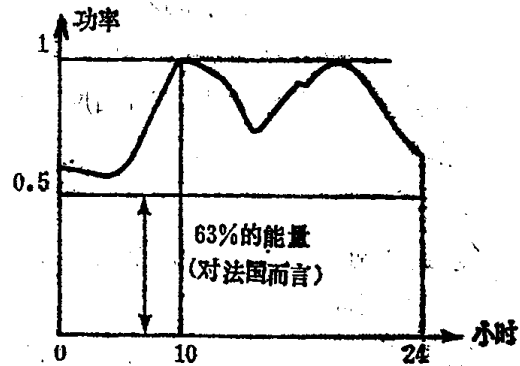


图2-2 日负荷曲线

根据不同问题的需要，我们或者使用非时间顺序的负荷持续曲线（年度或周曲线），或者使用比行政区划大一点的地区实际负荷曲线（常为日曲线）。

我们也通过分类来分析负荷。

不论用外推法与否，预测往往与实际不符（D1）。

最好的外推法计及下面几点：

α) 从过去的统计数字中，用复线性回归法滤出温度的影响（D2）。

β) 我们把已确认是互相独立的下列参量分开：

N_j 对应于j年的工作日数

S_{ij} 第i月或第i周的季节系数

t_j 趋势系数

π_{hij} 第h小时的时功率标么值

γ) 根据预测的能量 W_j 用下式计算功率：

$$P_{hij} = \frac{W_j}{N_j} s_{ij} t_j \frac{\pi_{hij}}{24}$$

对于长期预测来说（>5年），使用上述公式应通过分类分析法来实现（D3）。

我们承认，对T年的预测会有均方差为 $0.02\sqrt{T}$ 的不确定性（指 W_j 而言）。对三年或者四年来说，这个不确定性的数量级与温度的影响相同。

对于狭小地区的负荷预测，困难是很多的。随机负荷出现日期的不确定性对于配电网规划影响极大。

就短期运行而言，很难减少电力的供应（D4）。

在长期运行中，负荷的弹性可能取决于采暖（D5）和电气车辆（D6）的发展情况。看

起来在很长一段时期内，能量消耗 E_T 的增长必然服从公式： $\log E_T = a + \beta T$ （9年或10年重复一次）。公式 $\log E_T = a + \beta T - \gamma T^2$ 所表明规律更为精确（即使那些能耗增长很快的国家针对刚过去的几年来计算，此公式也是可行的）。

阐述 D

D1 马尾曲线 (S1)

把外推法用于过去的不同时期，就可以对外推法有所认识了。我们所得的一组马尾曲线，可说明外推法有最小的不确定性，这是用过去预测未来的方法。（见图2-3，从A出发，这是实际上实现的点，向相反方向外推，可以得到点B'，而实际上实现的点是B）。

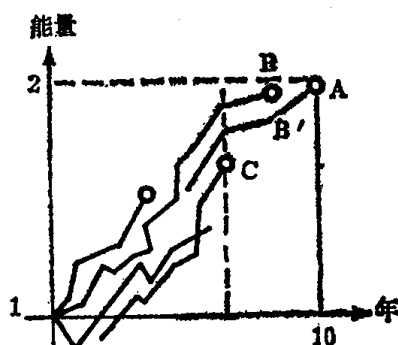


图2-3 马尾曲线

D2 复回归分析 (为了在季节系数 s_{ij} 中滤出温度的影响)

我们用以下公式 $s'_{ij} = s^0_{ij} + pj + g\Delta\theta_j$

其中 p 是季节系数随年的变化率， g 是季节系数对相对于平均温度的温度差 $\Delta\theta_j$ 的灵敏度。

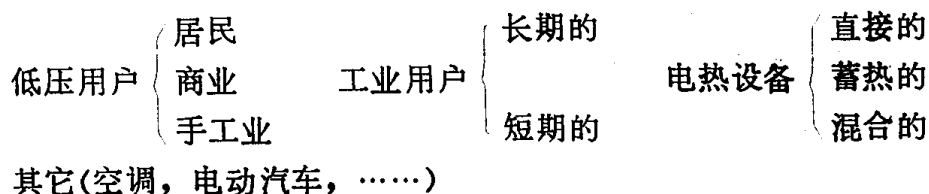
通过求所有研究年度的残差平方总和 $\sum_j (s_{ij} - s'_{ij})^2$ 之最小值，来确定回归分析模型中的参数 s^0_{ij} ， p ， g （最小二乘法(S5)）。这样得到方程组：

$$\begin{aligned} \sum_j (s_{ij} - s^0_{ij} - pj - g\Delta\theta_j) &= 0 \\ \sum_j (s_{ij} - s^0_{ij} - pj - g\Delta\theta_j)j &= 0 \\ \sum_j (s_{ij} - s^0_{ij} - pj - g\Delta\theta_j)\Delta\theta_j &= 0 \end{aligned}$$

对法国可求得 $g = -5 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ 。一月份温差为 4°C ，因此在温度影响下，功率有2%的误差变化。随着电热设备增加， g 也增加。

D3 分类模型

如果我们按分类分析负荷，预测就可以得到改进。



我们对这些用户使用不同的系数。上述分类模型用于法国电力公司地方电网 (CIME) [1]，得到了非常好的印证结果(S3)。

D4 电力负荷的短期弹性

过去的经验表明，我们力图减少10%的电能消耗，但是却面临着极大的困难。

a) 分配：限额分配比敞开供应要麻烦得多，因为用户只顾使用方便，只是在最后才能受到惩罚。需要频繁地抄表以及在电力紧张时期(如干旱时)及时知道耗电是否已经超过。

b) 频率下降：20%的过载就使得频率降低1Hz。由此令人遗憾的事就发生了，机器运转

变慢，效率降低，法国国家铁路的信号出现麻烦，热电厂的附属设备有不能投入的危险。

假如有意地把频率降低达半小时，消耗(开始可能降低1%或2%)反会上升。实际上，工作设备运转更慢，但是工作时间相应地要加长，这是因为效率已经变低了(例如用水泵往水池里灌水时的情况)。

γ) 电压下降：电压是一个比频率的影响要局部一些的因素，只可能影响到某些点上。电压降低5%，照明用户光通量降低20%，灯泡的能耗少8%。大多数用户不能工作。然而如果其中十二分之一的用户再开一盏灯，则耗电量会超过原先的值。

δ) 停电：这涉及到拉闸限电，但也是很困难的。用户会在有电供应的时候尽量使用，而且重要用户和其他用户日益成为不能分割的用户区。

D5 电热设备的影响

各种类型电热设备的作用正如在冬天的日负荷曲线上所表示的那样。

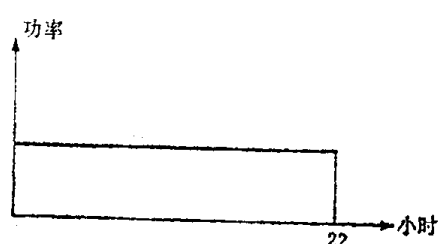


图2-4 直接的电热设备负荷曲线

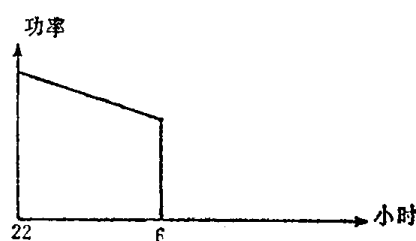


图2-5 蓄热的电热设备负荷曲线

假定电热设备有一些发展，例如电热设备1985年将耗电24TWh或者31TWh或者42TWh(即总耗电的10%)，而且随冬天气温的变化耗电也有所增加，负荷曲线的峰值点将位于晚间(仅针对耗电达42TWh的假设以及气温为 -7°C 时)。

相反，在法国，空调不可能有什么影响。

假如我们把温度概率曲线加以归并(巴黎地区)， 15°C 及其以下的(对应于电热设备)归为一起， 18°C 及其以上的归在一起(对应于空调)，则差别很大。度数与天数的乘积差15倍。

D6 电气车辆

在1971年，法国的碳氢液态燃料(18Mt)提供“轴”能量消耗为42TWh。

计及电机的效率，蓄电池的再充电和线路损失，电提供的“轴”能量为70TWh(发电量的二分之一)。

以电供能使我们略为节省一点原始能源，因为1kWh的汽油相当于在热电厂燃烧0.83 kWh的燃料。

但是就单位重量的能量而论(kWh/kg)，蓄电池和汽油之间的比数为75，实际上蓄电池本身占去了车辆三分之一的重量。

电气车辆的行程只有汽油车辆的四分之一，因此，在城市，电气车辆逐渐被淘汰。在走500m平地时，电气车辆往往浪费动能，因为此时电动机是不减速运行的。

D7 负荷模型

假如对所考虑的负荷，只要一个信息，我们选择一年内所达到的峰值点。确定电网规模的就是这个信息。(但是巴黎-阿尔卑的线路却可能常在峰值以下低载运行，11=S1)。

如果要两个数据，则我们用梯形来描述年负荷。但是有些计算(如算缺电量)需要更为精确的对负荷点的描述。