

电源规划与数学模型

张 奔 何大愚 主 编

能 源 出 版 社

内 容 提 要

本书是电力规划方法和数学模型的综合参考书。全书共分二篇十五章。第一篇为规划篇，主要论述电力规划中的一般理论问题，包括宏观经济及国力预测，负荷需求，技术经济比较方法、电力电网基本理论、可靠性分析，无功平衡以及能源问题。第二篇为模型篇，包括六个各有特色的电源优化模型，电源模型和能源模型。本书中阐述的理论方法和数学模型成功地用于三峡工程研究论证中。此研究成果曾获中国社会科学院1987年优秀科研成果奖，具有较高的学术水平和应用价值。

本书可供能源及电力科研、规划，设计、生产、管理等部门的工程技术人员和管理干部参考，也可作为大专院校数学用参考书。



电源规划与数学模型

张 奔 何大愚 主编

能源出版社出版

新华书店发行

北京怀柔燕文印刷厂印制

787×1092 1/32开本 19.06 印张 399千字

1989年12月第一版

1989年12月第一次印刷

印数 1—1,000 册

ISBN7-80018-155-3/TB·9

定价：14.00元

前 言

能源是国民经济的重要组成部分，它和交通运输，原材料一起成为我国基础工业，理应先行，但几十年来，我国加工工业的增长速度高于基础工业的增长，结果造成缺能少电的局面。电能具有使用输送方便、效率高等优点，是发展工业、农业、科学技术和提高人民物质文化生活水平的重要物质基础。因此电能占国家能源的比重，能说明该国的工业化水平和技术进步情况。据不完全统计，我国电力工业从1949年到1981年，由于工程报废，停建缓建和政策性失误等等损失高达11.27亿元，占同期总投资的2%，其中由于总体规划跟不上，前期工作薄弱，建设安排不当等原因造成的损失约7亿元，所以加强电力工业的规划，提出有科学预见的电力发展规划是很重要的问题。

几年来，结合国家重点攻关项目的研究和论证，我们组织了中国社会科学院技术经济研究所、西安交通大学电机系、清华大学电机系，能源部电力科学研究院系统所四个单位几十人参加的能源与电力规划研究，形成了自然科学与社会科学理论相结合的多学科的联合协作攻关。电力系统规划又采取了常规的电力电量平衡方法和数学优化模型的方法，互相验证。在模型方法中，我们采用了统一原始数据和资料，用不同思路来建立各有特点的模型，最后进行多方案的分析与论证，得到了较好的成效。

为了深入研究以三峡工程为中心的統一电力系统，我们又从五个层次、六个地区、五个方向进行了多方案研究。第一层次从宏观决策出发，对我国宏观经济的发展与国力预测

以及电力负荷的需求，进行了研究，它是电力规划的基础；第二个层次是从全区能源的平衡，重点是煤炭、运输与火电的发展，论证我国以火电为主的电力规划的主要问题；第三个层次是从流域综合利用出发，得出整个流域的上下游、干支流水电优化排序，而不是笼统的“先支后干”；第四个层次是电源优化，水、火电站的协同发展。第五个层次是各个电站本身的有关技术经济开发问题。我们研究的长江三峡开发涉及到西南（主要是四川水电的开发）、华中、华东地区，又由于补偿调节关系，又涉及到广西红水河，西北黄河上游的电力联系的补偿调节以及决定的西北与华北联网问题。此外，我们还从宏观经济、运输条件、环境容量、河流的总体开发和能源的内部结构五个方面进行了研究。

本书是在结合三峡巨型工程论证和研究的基础上，经过研究人员的努力，总结出来的一本理论与实践密切相结合的书。本书第一篇是规划篇它包括我国电力工业的基本理论和重要问题，第二篇是模型篇；它包括六个方面的电力能源模型。参加本书编写的作者有：。第一章：张奔、纪雯、；第二章：何大愚、纪雯；第三章：丁功阳、曲桂贤、张征考、张奔；第四、五章：张奔；第六章：王德生、郭剑波，张力平；第七、八章：张奔；第九章：李为正、姚愉芳、第十章：王锡凡；第十一章：相年德、金爱中；第十二章：郭元、孙元章；第十三章：郑姜特、叶运良，周孝信；徐征雄、列肇旭、谷碧泉、唐纹；第十四章：李为正、姚愉芳；第十五章：吴中习。

由于时间所限，国家“七五”科研攻关课题还在扩大和深入研究中，缺点和错误难免，恳请同志们批评指正。

张 奔

1988年10月于北京

目 录

第一篇 电源规划

第一章 国民经济发展与电力负荷预测

- 第一节 国民经济发展与电力负荷的关系····· (1)
- 第二节 电力负荷预测的方法····· (3)
- 第三节 负荷结构与特性····· (7)
- 第四节 电力负荷预测中要注意的几个问题····· (13)
- 第五节 我国投资规模预测····· (15)

第二章 我国电力系统的规划和发展

- 第一节 我国电力规划的概况····· (20)
- 第二节 我国电力系统的发展····· (27)
- 第三节 电力系统规划的基本原则····· (33)
- 第四节 负荷曲线的编制····· (35)
- 第五节 电力电量平衡····· (38)

第三章 建设项目的经济评价和技术经济比较方法

- 第一节 建设项目经济评价的目的和意义····· (57)
- 第二节 建设项目经济评价的原则····· (59)
- 第三节 方案比较方法····· (64)
- 第四节 案例分析····· (69)
- 第五节 敏感性分析····· (77)
- 第六节 技术经济一般评价方法及电力计算
规范····· (78)

第四章 电源规划

- 第一节 电站分类····· (88)
- 第二节 火电厂厂址选择····· (89)

第三节	凝汽式电站	(93)
第四节	热电站和燃气轮机电站	(107)
第五节	核电站	(115)
第六节	水电站	(120)
第七节	抽水蓄能电站	(138)
第八节	运煤与输电问题	(140)
第九节	最优电源结构的经济数学模型论证	(142)

第五章 电网规划

第一节	电网规划要点	(147)
第二节	电网的形成与发展	(152)
第三节	输电线技术经济论证	(158)
第四节	最佳输电参数的技术经济论证	(164)
第五节	交直流送电的技术经济比较	(170)
第六节	系统间联网效益的计算及模型	(174)

第六章 电力系统可靠性分析及无功规划

第一节	发电系统可靠性模型	(177)
第二节	输电系统可靠性分析	(216)
第三节	电力系统无功规划	(238)

第七章 我国能源形势及电力系统规划

第一节	能源规划的意义	(265)
第二节	我国煤炭情况	(267)
第三节	煤炭运输问题	(272)
第四节	我国石油天然气情况	(280)
第五节	水电站的补偿调节	(286)
第六节	我国电力工业目前的发展	(289)
第七节	水火电站的宏观经济问题	(293)
第八节	我国电力工业今后的发展	(296)

第九节 能源与环境问题	(299)
-------------------	---------

第二篇

第八章 能源与电力模型发展概况

第一节 国外模型发展 概况·····	(305)
第二节 国内能源模型的 发展·····	(307)
第三节 国内模型发展 概况·····	(308)

第九章 电源优化模型

第一节 MARKAL模型在电源优化模型中的应用	(313)
第二节 MARKAL模型软件在电源优化模 型中的应用·····	(326)
第三节 MARKAL模型在三峡工程动能经济效益论证 分析中的应用	(339)

第十章 按发电厂优化的电源规划模型

第一节 概述	(357)
第二节 模型结构	(359)
第三节 电源投资决策的数学模型	(364)
第四节 电源投资决策模型的算法	(370)
第五节 生产优化模型与典型日运行方式 模型	(381)
第六节 电源优化程序JASPI应用举例·····	(385)

第十一章 电源发展规划的数学模型

第一节 概述	(402)
第二节 电源规划数学模型	(405)
第三节 随机生产模拟·····	(414)

第四节	互联系统的随机生产模拟·····	(427)
第五节	软件的功能·····	(429)
第十二章	电源优化数学模型	
第一节	混合整数规划数学模型 ·····	(430)
第二节	基本数学模型 ·····	(432)
第三节	计算方法与程序框图 ·····	(449)
第十三章	输电规划及其数学模型	
第一节	概论 ·····	(454)
第二节	输电规划的若干技术原则 ·····	(458)
第三节	线性潮流估计 ·····	(468)
第四节	直流潮流法和灵敏度分析 ·····	(488)
第五节	输电系统规划的计算机辅助设计 ·····	(504)
第六节	分解协调法求解电网结构的优化 问题 ·····	(516)
第七节	多阶段多目标的长距离输电规划 问题 ·····	(538)
第八节	结 束 语·····	(563)
第十四章	能源优化模型	
第一节	MRESM模型的研制背景与实用性 ···	(569)
第二节	MRESM模型的数学结构 ·····	(580)
第三节	MRESM模型的软件系统 ·····	(592)
第四节	MRESM模型的应用·····	(603)
第十五章	数学规划方法简介	
第一节	线性规划及其计算方法 ·····	(607)
第二节	整数规划及其计算方法 ·····	(623)
第三节	非线性规划及其计算方法 ·····	(628)
第四节	动态规划及其计算方法 ·····	(641)

第一章 国民经济发展与电力负荷预测

第一节 国民经济发展与电力负荷的关系

一、电力工业发展是国民经济发展的一部分

国民经济的发展速度直接影响对电力的要求量，也就直接影响电力工业的发展速度，因此必须在国家确定的经济和社会发展的奋斗目标、发展战略和方针政策指导下进行电力负荷预测。反之，也就要求国家确定的目标、战略和方针政策必须符合经济和社会发展的客观规律。在研究社会主义经济有计划、按比例发展时，应该看到电力工业必须超前发展这一客观需要。

电力工业发展要符合国民经济发展的需要，必须与工农业发展相协调。近年来，往往采用电力弹性系数来衡量分析相互之间的比例关系。电力弹性系数是指用电量的年平均递增率和工农业总产值年平均递增率的比值。对电力弹性系数的决策使用必须认真研究，否则必然导致失误。

我国各历史时期的电力弹性系数为：

三年恢复时期（1950～1952年）	1.02
第一个五年计划（1953～1957年）	1.96

第二个五年计划（1958～1962）

工农业总产值下降 1.6%，而用电量增长率为 18.2%。

三年调整时期（1963～1965年）	0.93
第三个五年计划（1966～1970年）	1.41
第四个五年计划（1971～1975年）	1.07
第五个五年计划（1976～1980年）	1.24
第六个五年计划（1981～1985年）	0.61

从历史的实际可以看出，我国尽管长期处于缺电局面，但电力工业仍是与其他工农业相关发展着。第二个五年计划与三年调整时期有其客观的特殊原因。第六个五年计划电力弹性系数下降表明了生产发展尤其是乡镇企业（用电少、产值高）发展较快，但也显示出缺电更为严重，用电量受到极大限制，对此广大人民群众是有深切体会的。

再从完成计划的实际来看，电力工业发展与国民经济发展是同步的。第一个五年计划国民经济计划提前一年完成，电量计划提前一年零三个月完成；第二个五年计划提前三年完成，电量计划也是提前三年完成，最近的第六个五年计划提前一年完成，电量计划则是提前一年多完成。由历史推算将来，中央提出到2000年，工农业总产值将比1980年翻两番，那末，电力工业至少也得翻两番。

二、切实认识目前电网现状及供需矛盾

我国是个发展中的社会主义国家，建设四个现代化所需的原始资金积累，只有依靠人民群众的劳动和现有企业的增产增收。长期以来，由于电力不足，很多城市的工厂停三开四，或停四开三（指一周）。因此现在实测的用电量并不是

用户的真正的用电量，如果电力充足，即使不建新厂，现有企业充分发挥潜力也可使生产增长 $1/4$ 或 $1/4$ 以上，故在电力负荷预测中必须充分考虑这一点。

第二节 电力负荷预测的方法

预测方法只是一种工具，单一的或几种组合的方法都不能保证预测一定是准确的，因此搞预测的人员必须具备如何选定预测方法的知识 and 判断力。有许多理论上的预测方法，多有其变化规律和内在的联系。预测方法一般有单耗法、外推法和相关法等。

一、单耗法

在国家有关部门确定了多工业产品产量之后，运用单耗法计算远景负荷是比较可靠的。用电量等于产品产量乘以单耗。但此法仅适用于有产品产量的用户。其他无产量数值的用户则可采用上涨速度进行推算。未来用电量等于现在用电量乘以上涨速度。以此作为单耗法负荷预测的补充。

二、外推法

外推法是假定未来的增量是过去增长模式的继续，利用一组按年代排列的数据，然后根据时间(自变量)来预测电力的发展趋势，寻找一个基本的的变化规律。此法的第一步是将数据画成曲线，据此选择恰当的预测方法，如年平均增长率法、直线法(最小二乘法)、数学的增长曲线法、以及经过处理或未处理的历史数据图解法。

年平均增长率法就是计算第一年对第 n 年的年平均增长

率：

$$P_n = (1+k) nP \quad (1-1)$$

式中 k 为增长率。

直线法就是将一组历史统计数据，画在坐标纸上，如果图上的各点，其趋势是一直线，则可以用下式表达：

$$Y = a + bx \quad (1-2)$$

式中 a 是 $x=0$ 时 Y 在 Y 轴上的交点， b 是直线的斜率。

现在的问题是这条直线有不同的连法，结果可以得出不同的 a 和 b ，也就是选用什么样的 a 和 b ，使这条直线的近似程度较好。解决该问题可用最小二乘法求 a 和 b 。

假设在 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 点处，其 Y 的实际值与公式计算值之间的偏差为 $a + bx_1 - Y_1, a + bx_2 - Y_2, \dots, a + bx_n - Y_n$ ，这些偏差为正、负或零。

要使所画的直线最接近，就要使多点的偏差最小，也就是使所有的偏差都很小。画不同的直线把各点的偏差加起来，比较哪条线的偏差和为最小。但这样也有问题，因为偏差有正有负，不能互相抵销，因此即使偏差和很小，也不能保证各个偏差都很小。为了解决偏差有正有负的矛盾，可以把各个点的偏差平方以后再加起来，也就是：

$$\begin{aligned} S &= (a + bx_1 - Y_1)^2 + (a + bx_2 - Y_2)^2 + \dots \\ &= \sum_{h=1}^n (a + bx_k - Y_k)^2 \quad (1-3) \end{aligned}$$

从数学上可以证明，当 S 为最小时，各条直线中以该直线近似程度为最好。偏差的平方(S)为最小时，称为最小二乘法。用此法可求出 a 和 b 值。

由(1-3)式可看出， $X_1, Y_1, X_2, Y_2, \dots$ 为已知

数，而 a 、 b 为复数值；为求 s 最小值，需满足：

$$\frac{\partial s}{\partial a} = 0 \text{ 和 } \frac{\partial s}{\partial b} = 0$$

$$\text{即 } \begin{cases} 2(a + bx_1 - Y_1) + 2(a + bx_2 - Y_2) + \dots \\ + 2(a + bx_n - Y_n) = 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

$$\begin{cases} 2(a + bx_1 - Y_1)x_1 + 2(a + bx_2 - Y_2)x_2 + \dots \\ + 2(a + bx_n - Y_n)x_n = 0 \end{cases} \quad (1-6)$$

$$\begin{cases} ha + b \sum X - \sum Y = 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

$$\begin{cases} a \sum X + b \sum X^2 - \sum XY = 0 \end{cases} \quad (1-8)$$

$$\therefore a = \frac{\sum Y - b \sum X}{n} \quad (1-9)$$

$$\frac{\sum Y - b \sum X}{n} \cdot \sum X + b \sum X^2 - \sum XY = 0 \quad (1-10)$$

$$(\sum Y - b \sum X) \sum X + bn \sum X^2 = n \sum XY \quad (1-11)$$

$$b [n \sum X^2 - (\sum X)^2] = n \sum XY - \sum X \sum Y \quad (1-12)$$

$$\therefore b = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (1-13)$$

由于用电量发展趋势使直线变化甚少，从数学上看变化趋势往往与某一函数相似，如指数、双曲线、抛物线等。为了便于分析，把函数线性化，需采用 $\log/\log$ 法

$$\text{如 } Y = ax^n \quad (a, n > 0) \quad (1-14)$$

$$\log Y = \log a + n \log x \quad (1-15)$$

其形式与 $Y = A + nX$ 相似，只是用对数坐标而已。

三、相关法

是确定电力负荷与所选定的有关因素之间的关系。在分析历史数据时会发现被预测的电量与某些量（如经济变量、

社会经济因素、人口、收入、家用电器的普及程度)之间有一定的关系,也可以看作因果关系,采用数学方法来描述的此种因果关系,就可对电力负荷进行预测。

相关法包括相关和简单回归法(一元回归法)。经济模型法(简单的和复杂的)、线性规划法等。

彼此相关是指二个或二个以上的变量值相互有关,这种关系本身只能表明它们之间的正比反比变化,不说明相关原因。

用曲线表示的相关关系,等作回归,曲线就是回归线。如果所预测的量取决于二个或二个以上自变量时,就称多元回归。

简单回归(一元回归)指回归线是一条直线(即自变量与因变量之间的关系用一条直线来描述。即: $Y=a+bX$ 。在形式上与外推法中的直线法相似,不同的仅是这里的变量不是时间,而是经济因素(如人口、国民收入、国民生产总值等)。如果电力负荷与自变量之间为非线性关系,则上述表达式可化为对数值,同样 a 、 b 系数可用前述的最小二乘法求出。

值得注意的是这些相关关系虽有高度的统计意义,但没有逻辑关系。

由于预测本身并不准确,而负荷预测又是整个规划中的一部分,所以在整个规划过程中设法克服一些不确定因素是很重要的。预测中要考虑以下几点:

- 一、负荷预测值与实际情况作对比检验;
- 二、工作的每一阶段检查负荷预测值是否需作修正;
- 三、远景负荷水平不宜只采用一种预测值,而应根据工作需要确定几种水平给以敏感性分析,以免与将来的实际值相差太多。

第三节 负荷结构与特性

一、电力负荷的分类

电力负荷预测总值是由各类负荷预计合成的，因此把电力负荷的分类按行业划分一般为：

（一）工业负荷：煤炭、石油、黑色冶金、有色冶金、机械、化学、建筑材料、纺织、造纸、食品以及其他。大多数为二班制或三班制生产，属于较平稳的用电负荷；

（二）农业负荷，其中以排灌用电影响较大，排灌负荷比重大时会直接影响全网夏季负荷与冬季负荷的比重；

（三）交通运输负荷：以电气化铁道为主；

（四）市政生活用电：过去以照明居首，现在随着生活水平的提高、生活方式的改变，必须考虑电视机、电冰箱、空调等用电负荷的增加。

二、电力负荷特性

电力负荷随时都在变化，虽然变化无常，但根据历史记录和负荷分析，仍具有一定的规律性。

（一）随季节变化而变化：从全国来看，一般来说，夏季负荷要低一些，但南方有的电网，由于夏季温度高，空冷负荷大，加上防汛灌溉，夏季最大负荷比冬季最大负荷要高。

（二）随生产性质不同而变化：化工、冶炼属连续性生产，负荷稳定，除夏季安排检修外，变化不大，日负荷率接近100%。加工工业三班制的，除交接班负荷较轻外，比较均衡；一班制的负荷集中在白天，形成上午9~10时的高峰

负荷。

(三) 随天气变化而变化：阴天下雨，白天的照明增加，系统负荷上升。暴风雨时，露天煤矿负荷立即下降，雨停后需排水，负荷上升又快又大。

农业负荷，随雨水多寡而变，或排、或灌或停、或用。一个省的用电量可相差几亿度之多、

傍晚时，灯负荷增加很快，用电量比例不大，但负荷比例较大，形成一日的最大负荷。

(四) 随作息时间而变化：深夜是全日负荷的低谷，中午和下班时也出现马鞍形的低负荷情况。

星期日一般比正常日低1%~2%，春节时负荷最轻要下降20%以上，但晚高峰时灯负荷不仅没减少，而由于家家大放光明，还要增加很多。

精彩的电视剧和球赛实况，对用电负荷也有影响，随着电视机的普及，应重视这一因素，华北电网已达10万kW左右。

政治性的活动对负荷也有影响。水泵、风机、轧钢负荷忽上忽下，随时都在变化。

以上说明电力系统负荷变化的原因。为满足负荷变化要求，电力系统的发电功率也必须相应增减，以保持平衡。

三、电力负荷特性指标

表示负荷特性的几个主要指标如下所述、

(一) 日负荷率：为日平均负荷与日最大负荷之比，通常用 r 表示。

$$r = \frac{P_{pj}}{P_{zd}} \quad (1-1)$$

式中 P_{pj} ——日平均负荷，等于日发电量除以24小时；

P_{zd} ——日最大负荷。

(二) 日最小负荷率：为日最小负荷与日最大负荷之比，通常用 β 表示。

$$\beta = \frac{P_{2x}}{P_{2d}} \quad (1-2)$$

式中 P_{2x} ——日最小负荷。

(三) 月不均衡负荷率：表示全年12个月的平均负荷总和与月最大负荷日的平均负荷总和的比值，用 σ 表示。

$$\sigma = \frac{\frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} P_{ypj}}{\sum_{j=1}^{12} P_{yzd} \cdot p_j} \quad (1-3)$$

式中 P_{ypj} ——月平均负荷：

$P_{yzd} \cdot p_j$ ——月最大负荷日的平均负荷。

(四) 季不均衡负荷率：为全年12个月最大负荷日的最大负荷与最大负荷平均的比值，用 ρ 表示。

$$\rho = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{yzd}}{12 P_{nzd}} \quad (1-4)$$

式中 P_{yzd} ——各月最大负荷：

P_{nzd} ——年最大负荷。

(五) 负荷的静态下降（上升）系数：为夏季最大负荷与冬季最大负荷的比值，用 K_{xj} 表示。