

电力系统负荷建模

鞠平 马大强 著

水利电力出版社

电力系统负荷建模

鞠平 马大强 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

北京市地矿局印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 6印张 131千字

1995年6月第一版 1995年6月北京第一次印刷

印数 0001—3110册

ISBN 7-120-02360-8/TM·628

定价 6.70元

前 言

电力负荷是电力系统的重要组成部分。在电力系统的设计、运行、分析中，如何正确地模拟负荷，建立负荷的模型，是国内外广大电力科学工作者所深为关心的问题，由来已久。

由于负荷的复杂性、分散性和随机性等特点，建立完全精确的负荷模型，是一个不易解决的难题。但逐步建立更加接近真实情况的负荷模型，则是可能的，也是电力工作者所深感兴趣的问题之一。

多年来，电力科学工作者有关负荷问题的研究成果，大多数散见于各种期刊杂志，迄今未见汇编成书，成为一本系统地介绍负荷问题的专著。作者有鉴于此，爱就自己近年来对负荷问题研究的成果，主要是新的建模方法，结合国内外负荷问题研究的大量资料，写成此书，希望对关心这一课题的广大电力工作者有所裨益。

本书共分五章。第一章绪论，包括有关建模的数学基本知识的介绍，以便于读者阅读。第二章介绍基本负荷成分的工作特性及模型。第三章介绍电力负荷的静态模型。第四章介绍负荷的机理动态模型。第五章介绍负荷的非机理动态模型。各章中均附有实际例题以帮助读者理解。

本书旨在起抛砖引玉的作用。限于作者水平和实践经验，书中难免有不足或有待改进之处，尚希读者不吝指正。

本书由西安交通大学夏道止教授详细审阅，承提出许多宝贵意见，对提高本书质量大有裨益，深为感谢！本书的撰

写及研究工作，历经数年。期间得到了许多同事及朋友的鼓励和帮助，也离不开家庭的支持。在此，一并表示衷心的感谢！

作 者

1992 年 8 月

目 录

前 言

第一章 绪论	(1)
第一节 负荷建模概述	(1)
一、负荷建模的基本概念 二、负荷建模的重要性 三、负荷建模的困难性 四、历史回顾	
第二节 负荷模型的类型	(6)
第三节 负荷建模的两条途径	(7)
一、统计综合法 二、总体测辨法	
第四节 负荷建模的数学基础知识	(10)
一、差分方程的基本知识 二、连续时间状态方程的离散化 三、Z变换与离散传递函数 四、概率论与随机过程基础知识	
第五节 系统辨识原理	(25)
一、最小二乘法 二、卡尔曼滤波器 三、负荷模型参数辨识的通用方法——NLR法	
第二章 电力负荷基本成分的特性与模型	(38)
第一节 电阻型负荷	(38)
第二节 放电式灯泡、电弧炉及换流器	(39)
一、放电式灯泡 二、电弧炉 三、换流器	
第三节 异步电动机	(43)
一、电磁暂态模型 二、机电暂态模型 三、机械暂态模型 四、静态特性	
第三章 电力负荷的静态模型	(54)
第一节 几种常见的负荷静态模型	(54)
第二节 根据统计资料确定负荷静态模型	(56)
一、基本步骤 二、几种常见负荷的静态特征系数 三、同一母线上负荷静态特征系数的综合 四、传输元件的影响 五、算例	

六、应用实例

第三节 根据稳态试验数据确定静态负荷模型 (66)

- 一、试验数据的获取 二、由试验数据确定静态模型参数 三、应用实例之一 四、应用实例之二 五、国外部分地区负荷特性测量值

第四节 根据在线采集数据确定静态负荷模型初步 (83)

- 一、在线采集数据 二、静态特征系数的估计

第四章 电力负荷的机理动态模型 (88)

第一节 根据统计资料确定机理动态模型 (88)

- 一、基本原理 二、等值成一台电动机 三、等值成两台电动机 四、应用举例

第二节 机理动态模型参数辨识的 CWLS 法 (97)

- 一、基本步骤 二、CWLS 法 三、应用 CWLS 法估计等值电动机参数 四、仿真算例 五、应用实例

第五章 电力负荷的非机理动态模型 (111)

第一节 非机理动态模型的概念 (111)

第二节 电力负荷的线性动态模型 (113)

- 一、一阶线性动态模型 二、高阶线性动态模型 三、线性动态模型的参数辨识 四、线性动态模型不同形式之间的转换 五、根据线性动态模型确定静态特征系数 六、仿真算例 七、实验室试验 八、现场试验

第三节 电力负荷的非线性 H 模型 (148)

- 一、基本概念 二、H 模型的结构 三、H 模型的参数辨识 四、H 模型的转换 五、仿真算例 六、应用实例

第四节 电力负荷的动静综合模型 (160)

- 一、动静综合模型的结构 二、动静参数的辨识 三、模型转换 四、仿真算例 五、应用实例

第五节 电力负荷特性的微机型测辨装置 (169)

- 一、装置的功能 二、配置的硬件 三、装置的软件 四、应用中的实际考虑 五、应用实例

参考文献 (181)

第一章 绪 论

第一节 负 荷 建 模 概 述

一、负荷建模的基本概念

电力系统是由发电厂、电力网及电力负荷三大部分组成的能量生产、传输和使用系统。发电厂是电能的发出者，这些电能经高压输电网及低压配电网被传送到各个用户，并由安装在用户处的用电设备所消耗。电力负荷就是这些用电设备的总称，其中有时也包括配电网络，并简称为负荷。

电力系统中有各式各样的负荷，可以从不同的角度进行分类。从用电部门来看，可以分为城市民用负荷、商业负荷、农业负荷、工业负荷及其它负荷。城市民用负荷主要是城市居民的家用电器负荷。商业和工业负荷是为商业与工业服务的负荷。农业负荷是农村所有负荷的统称，包括农村民用电、生产与排灌用电及农村商业用电等。其它负荷包括市政用电、公用事业用电、政府办公用电、铁路与电车用电等等。

家用电器大致有如下几类。

- 1) 照明电器：荧光灯、白炽灯；
- 2) 备餐电器：电炉、电饭锅、电烤箱、烤炉等等；
- 3) 洗熨电器：洗衣机、电熨斗、烘干机等；
- 4) 食品储存电器：电冰箱及其它冷冻设备；
- 5) 调温电器：电风扇、空调等；
- 6) 电视音响电器：收录机、电视机、录像机等。

工业负荷中电力设备种类更多，最主要的是感应电动机

和同步电动机，其它还有整流型负荷、电弧炉、阻抗型负荷（如工厂照明）等等。配电网主要有配电线路、变压器和补偿电容等。

负荷吸收的有功功率（ P ）及无功功率（ Q ）是随着负荷母线的电压（ U ）和频率（ f ）的变动而变化的，这就是负荷的电压、频率特性，用于描述负荷特性的数学方程称为负荷模型。建立负荷模型就是要确定描述负荷特性的数学方程的形式及其中的参数，简称为负荷建模。

二、负荷建模的重要性

电力负荷作为能量的消耗者，在电力系统的设计、分析与控制中有着重要影响。在进行电力系统分析时，不恰当地考虑负荷的模型，会使所得结果与系统实际情况不相一致，或偏乐观，或偏保守，从而构成系统的潜在危险或造成不必要的投资。

目前，数字模拟计算已成为电力系统设计、运行与控制中不可缺少的辅助手段。人们不但要求模拟计算结果是定性正确的，而且要求模拟计算结果是定量精确的。大量的计算与试验结果表明：负荷模型对电力系统动态行为的定量模拟结果影响很大^[1~4]，对潮流计算^[5]、短路计算、安全分析、电压稳定性^[6]等也有一定影响。在临界情况下，还有可能从根本上改变定性的结论。例如，澳大利亚的 Queensland 系统将理论计算与实测结果作了比较^[7]，发现用恒定阻抗表示负荷时两者相差较大，而当负荷的有功电压指数改为 1.4，无功电压指数改为 3.0 时，两者基本吻合。另一计算表明^[8]，当某负荷的频率相关成分提高到 40% 时，原来稳定的系统变成不稳定。因此，负荷的频率特性对系统稳定性也有显著影响。还有的研究报导^[9,30]，感应电动机对稳定极限的影响相当大，其

误差有时可高达 30%。此外，负荷特性对低频振荡也有很大影响^[31]。通过这些例子，对改进负荷模型的必要性便可见一斑。

在过去的几十年间，发电机及输电网络的建模已取得很大的发展。与之相比，负荷建模则发展较慢，显得有些不相匹配。显然，电力系统模拟计算精度的提高与发电机、输电网络及电力负荷三大部分的建模都有密切的关系。负荷模型的粗糙阻碍了整个系统模拟精度的进一步提高，并降低了改善发电机及输电网络模型的价值。因此，改进负荷模型具有一定的迫切性。

现代电力系统稳定分析常需把仿真的时间跨度增大，人们对低频率振荡、频率稳定、中长期稳定性等问题的兴趣日增。为此，更需研究相应的模型和算法，负荷模型当然也应考虑在内。

随着计算机技术的迅速发展，计算机的容量不断扩大，计算速度也不断提高。这就为采用更加精确、详细的负荷模型创造了条件。

总之，电力负荷是电力系统的重要组成部分，电力系统运行与控制中的大多数内容都与负荷问题有关。因此，负荷建模研究是电力系统运行与控制中的基础性课题，既具有非常重要的理论意义，又具有十分显著的工程实用价值。

三、负荷建模的困难性

诚然，建立每种用电设备的模型相对来说比较容易。但由于负荷是由成千上万个用电设备所组成的，各类用电设备的模型又不相同。在进行电力系统计算和分析时，既无必要、也不可能对所有用电设备都逐个加以精确地模拟。人们所关

心的是负荷群对外部系统所呈现的总体特性。因此，需要建立一个“总体”的负荷模型。这个模型应能代表某个地区（变电所）负荷群的总体外部特性。要达到这个目标，需克服一系列的困难，主要体现在以下几个方面。

1. 时变性及随机性

负荷特性是由组成负荷的各种用电设备的特性所决定的。负荷的组成与所在地区人民的生活水平、习惯、气候条件及工农业生产等情况有关。另外，各种用电设备的投切和负荷变化取决于用户本身的需要。显然，有些因素是随时间而变化的，有些因素甚至是随机的。这就导致负荷特性的时变性和随机性。

2. 分布性

所要研究的负荷群包含很多用户，它们分布在很大的区域。这些用户不可能都直接连接于枢纽母线，而是通过配电网连接的。因此，配电网的结构及参数会影响负荷模型。

3. 复杂性

负荷建模与发电厂建模不一样，因为发电机的类型大同小异，而负荷则包含着各种类型的用电设备，各类用电设备的特性不一致。

4. 不连续性

当电压或频率低于（或高于）某一范围时，有些用电设备的保护装置会自动动作，电动机可能停转，某些用电设备的特性也会发生变化。这就是说，随着电压（或频率）的变化，负荷特性可能发生突变。

5. 多样性

根据所研究问题的性质及其对计算精度的要求不同，人们对负荷模型的要求也不同。即使在同一研究问题中，对处

于同一系统中但在不同位置的负荷也可能采用不同的模型。

由于负荷建模的困难性及其重要性，这个问题被公认为电力系统中的难题之一，引起了广大电力科技工作者的关注。

四、历史回顾

50年代末到60年代中期，电力系统数字模拟计算处于发展初期。在这段时间内，负荷模型与其它电网元件一样，有过相当大的发展。人们不仅使用恒定阻抗、恒定电流、恒定功率来表示负荷，还提出了用静特性方程表示负荷，如多项式或幂函数方程。

这些模型的参数在当时是定性估计的。由此得到的负荷模型尽管不准确，但相对于当时粗略的发电机及其它模型以及人们对电网计算的定性要求来说还是相适应的。

到了60年代末及70年代初，发电机及其调节系统等模型都向前发展了一步，但负荷模型却因其困难性而在原有的水平上停滞不前。为了打破负荷建模研究上的困难局面，1976年美国电力研究所（EPRI）制定了一个庞大的研究计划。根据这个计划，研究工作将在美国和加拿大同时开展。整个工作经过了严密计划和组织，在理论、现场试验以及数据采集系统的软、硬件开发和数据处理程序等几个方面全面展开。在这项工作的推动下，1980年前后的几年里，负荷模型的研究又有了新的发展。在此期间，人们主要研究如何定量确定负荷模型的系数^[10,16,21]。

1982年10月，国际大电网会议（CIGRE-SC38-WG02）^[4]成立了有关负荷的工作小组，研究负荷建模及其动态特性。该小组认为，许多工程师对这个研究领域还比较陌生，而这个研究领域在电力系统分析中的重要性应该得到强调。1984年在芬兰召开的第八届电力系统计算会议（PSCC）将负荷建模

列为重要课题。尤为可喜的是，负荷建模问题也开始引起了我国电力工作者的重视，一些学者在这一研究领域作出了贡献^[23~36]。

第二节 负荷模型的类型

对负荷模型可以从多方面进行分类。

(1) 从模型是否反映负荷的动态特性来看，可以分为静态的 (SM) 和动态的 (DM)。

(2) 从模型导出的方式来看，可分为机理式 (PBM) 和输入/输出式 (IOM) 两种。

(3) 从模型是否线性化来看，可分为线性的 (LM) 和非线性的 (NLM)。

(4) 从模型是否与频率相关来看，可分为电压相关模型 (VDM) 和频率相关模型 (FDM)，与电压及频率均相关的模型属于后一类。

因此，负荷模型有多种，有必要对其进行选择。模型结构形式的选择，主要取决于模型的应用目的及对精度的要求，同时还要考虑模型处理的简单性和参数获取的方便性。模型的精确性和简单性之间往往存在着矛盾，因而有必要在两者之间进行权衡。

在选择模型时，可参考下列原则：

(1) 静态模型一般适用于以下情况：①稳态问题（如潮流计算）；②长期动态过程；③负荷中以静态成分为主，如商业、民用负荷。而在下列情况下，宜采用动态模型：①工业区；②负荷中包含大量感应电动机；③系统瓦解；④自励磁及次同步扭振；⑤为了改善稳定性而应用并联无功控制装置

的研究，等等。

(2) 当负荷中成分比较单一时，选择机理式模型较好。这种模型物理概念明确，能反映负荷的内部物理现象。而当负荷成分比较复杂时，宜选用输入/输出模型。这种模型结构简单、通用性强，可以反映负荷的外部总体特性。

(3) 当动态运行点偏离稳态运行点较小时，可选用线性模型，如静态稳定；这种模型便于分析、计算量少。而当动态运行点偏离稳态运行点较大时，宜采用非线性负荷模型，这种模型精度较高、计算量较大。

(4) 电力系统中频率变化比较缓慢。因此，在短期动态过程分析中，可不计及负荷频率特性。而在长期动态过程分析中则要计及。

(5) 由于恒定阻抗（恒定电流、恒定功率）模型处理方便、节省计算时间及内存空间，所以这种模型仍将经常被采用，特别是在没有系统数据可供建模之用以及负荷影响较小的场合。

第三节 负荷建模的两条途径

时至今日，人们已提出了不少负荷建模方法，这些方法可以归纳为两大类：一类是“统计综合法”，另一类是“总体测辨法”。

一、统计综合法

统计综合法的基本思想是将负荷看成个别用户的集合，先将这些用户的电器分类，并确定各种类型电器的平均特性，然后统计出各类电器所占的比重，最后综合得出总的负荷模型，其典型成果体现在 EPRI 联合研究集团开发研制的

LOADSYN 软件中。这套软件的理论部分是由美国 Texas 大学的 Arlington 分校负责的^[1], GE 和其它电力公司负责在电网上进行实验验证^[11,15]。现在许多国家的电力部门都采用这类办法^[2,13,14]。

在采用这类方法时, 需要 3 种数据资料: ①负荷组成及各类负荷所占的比重; ②配电网的参数; ③各类负荷的平均特性。一般来说, 后两种数据变化较小, 而第一种数据变化较大。

据文献报导^[1,2,4]: ①有功功率的电压特性系数随运行条件的变化较小, 从而使综合得到的有功电压特性与实际的比较吻合; 而无功功率的电压特性系数则变化较大, 使综合得到的无功电压特性与其试验结果相差较大; ②综合得到的频率特性与试验结果相差较大; ③对负荷动态特性也不能很好地模拟。

统计综合法是一种传统的做法, 比定性估计负荷参数前进了一大步。它不依赖现场试验, 花费的代价较小。但这种方法存在着下列问题:

(1) 需事先统计成千上万个用户的负荷组成及参数。这种统计工作不但耗时费力, 而且难以统计准确。

(2) 各类电器的“平均特性”难以确定。

(3) 统计综合工作不可能随时进行, 甚至不能经常进行。而负荷特性是经常变化的, 甚至变化很大^[16]。因此, 这种方法不能适应负荷特性的时变性。

(4) 对无功电压特性、频率特性及动态特性难以模拟准确。

(5) 负荷成分往往比较复杂, 包含的用电设备可达数十种^[4], 如电动机、电阻负荷、变压器、荧光灯等等。若将所有

这些类型的负荷都考虑进去,则因各类用电设备的模型不同,从而导致总的模型难以应用。随着负荷成分的日益复杂化,这个问题将更加突出。

二、总体测辨法

总体测辨法的基本思想是将负荷群看作一个整体,先从现场采集测量数据,然后确定负荷模型的结构,最后根据现场采集的数据辨识出模型参数,其典型成果体现在加拿大 Quebec 及 Ontario 水电研究所开发的在线监测装置上^[16,18,19]。他们设计了一套微机控制的实时数据采集系统,收集了大量的现场实测数据资料。在此基础上,离线或在线辨识出负荷特性系数。

总体测辨法是一种比较新颖的方法,目前正处于开发研究中。这种方法所必需的现场测量工作比较复杂,甚至会受到实际条件的限制,例如电压波动难以做到超过 10%。但与统计综合法相比,它具有如下优点:

(1) 无需知道各个用户的负荷组成及参数,不依赖于用户统计资料。

(2) 在负荷母线处长期装设测量装置,可以根据各个时刻的测量数据得到相应的负荷特性参数,从而解决了负荷特性的时变性问题。

(3) 有希望获得较好的参数估计值。

(4) 当负荷组成比较复杂时,仍可以用简单的输入/输出模型来描述。这种模型的参数易于辨识,模型结构统一,便于处理。

(5) 总体测辨法实质上是将负荷看作“灰色系统”或“黑色系统”,而现代系统理论为总体测辨法提供了有力的理论依据和分析工具。

第四节 负荷建模的数学基础知识

负荷建模所用到的数学基础知识主要是线性代数、动态系统、拉氏变换及变换、概率与数理统计等。由于线性代数的基本知识对于从事电力系统计算的人员都是熟悉的，故对此内容不再赘述。这里只介绍在负荷建模中时常用到的动态系统方程及变换、概率与数理统计等基础知识。

一、差分方程的基本知识

动态系统的模型可分为连续的和离散的两类，其差别在于加到系统上的信号，前者是连续的，而后者是离散的。由于连续信号可以用一个采样频率适宜的离散信号来表示，所以连续系统也可以用一个离散系统来近似。绝大部分系统辨识技术都是利用数字计算机获得结果的，所以采用离散系统模型更为适合，而差分方程是一种常见的形式。

设离散采样步长为 h ，第 k 个采样时刻 $t_k = kh$ 。又设单变量时不变线性系统的连续输入信号为 $u(t)$ ，输出信号为 $y(t)$ ，它们在第 k 个采样时刻的值分别为 $u(kh)$ 和 $y(kh)$ 。为了方便起见，离散时间 kh 通常简写为 k ，相应地， $u(kh)$ 简写为 $u(k)$ ， $y(kh)$ 简写为 $y(k)$ ，则离散时间差分方程表达式为

$$\begin{aligned} & y(k) + a_1 y(k-1) + \cdots + a_n y(k-n) \\ & = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \cdots + b_n u(k-n) \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中： a_j 和 b_j ($j=0, 1, \cdots, n$) 都是常数。这样的差分方程称为 n 阶的定常线性差分方程，也可简写为下列形式

$$y(k) + \sum_{j=1}^n a_j y(k-j) = \sum_{j=0}^n b_j u(k-j) \quad (1-2)$$

任何有限阶的差分方程都可以用移位算子来表示，其定义如下

(1) 向前移位算子 z : $zy(k) = y(k+1)$, 则

$$z^j y(k) = y(k+j) \quad (1-3a)$$

(2) 向后移位算子 z^{-1} : $z^{-1}y(k) = y(k-1)$, 则

$$z^{-j}y(k) = y(k-j) \quad (1-3b)$$

向后移位算子习惯上也称为延时算子，由式 (1-3b) 得

$$y(k-j) = z^{-j}y(k), u(k-j) = z^{-j}u(k) \quad (1-4)$$

故式 (1-2) 可写成

$$\left(1 + \sum_{j=1}^n a_j z^{-j}\right) y(k) = \left(\sum_{j=0}^n b_j z^{-j}\right) u(k) \quad (1-5)$$

$$\text{令 } A(z^{-1}) = 1 + \sum_{j=1}^n a_j z^{-j}, B(z^{-1}) = \sum_{j=0}^n b_j z^{-j}$$

则式 (1-5) 可简写为

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) \quad (1-6)$$

应该指出，引入移位算子后可使差分方程的书写更为简洁，其作用与连续系统中的微分算子相类似。

式 (1-5) 的描述也能推广到多输入多输出系统。设系统的输入信号有 m 个，输出信号为 r 个。定义输入向量 $U(k)$ 和输出向量 $Y(k)$ 为

$$U(k) = [u_1(k), u_2(k), \dots, u_m(k)]^t$$

$$Y(k) = [y_1(k), y_2(k), \dots, y_r(k)]^t$$

式中：上标“ t ”表示向量（或矩阵）的转置。那么，该系统可用如下向量差分方程来表示

$$Y(k) + \sum_{j=1}^n A_j Y(k-j) = \sum_{j=0}^n B_j U(k-j) \quad (1-7)$$

式中： A_j 及 B_j 分别是 $r \times r$ 阶及 $r \times m$ 阶的常数矩阵。式 (1-