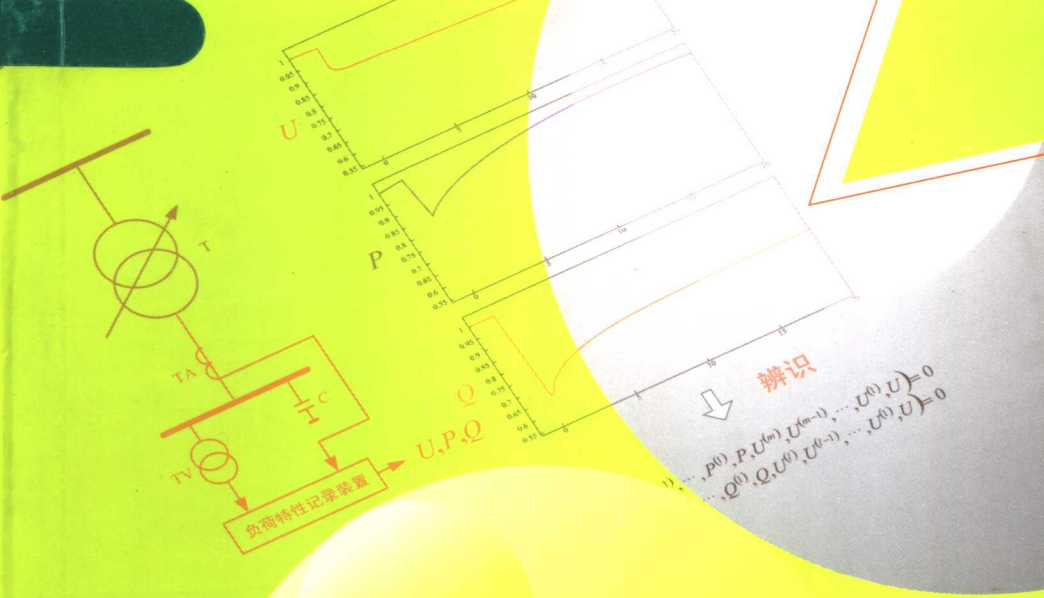




电力系统 负荷模型辨识

□ 章健 编著

Dianli Xitong
Fuhe Moxing yu Bianshi

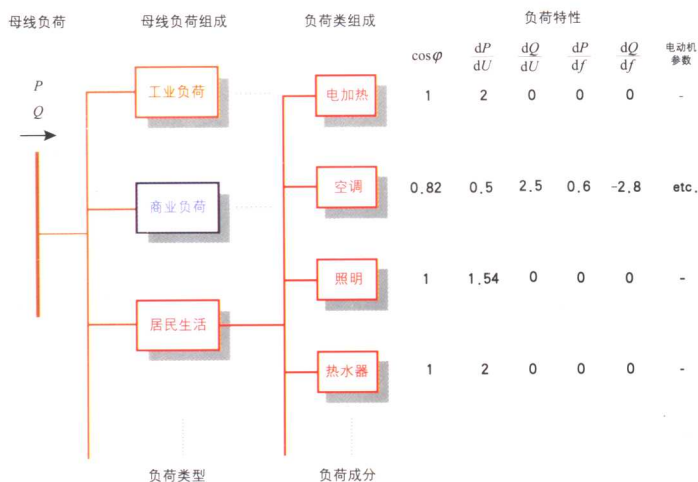


中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力系统 负荷模型辨识

□ 章健 编著

Dianli Xitong
Fuhe Moxing yu Bianshi



ISBN 978-7-5083-6058-4



9 787508 360584 >

定价：15.00元

2007

TM715/2

2007

电力系统负荷模型 辨识

*D*ianli Xitong
Fuhe Moxing yu Bianshi

□ 章健 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书全面介绍了电力系统负荷模型及其辨识方法。全书共分九章,第一章介绍了负荷建模的研究历史、负荷建模中的一些概念和术语、负荷模型对电力系统分析的影响、负荷模型在国内外电力系统分析中的使用情况、建模中应该考虑的因素和统计综合法与总体测辨法两种重要的负荷建模方法;第二章介绍负荷模型辨识中常用到的最小二乘法和各种非线性优化算法;第三章介绍常用的电力系统静态负荷模型与参数辨识算法;第四章介绍感应电动机负荷模型、感应电动机模型参数辨识算法以及感应电动机典型参数;第五章介绍线性系统形式负荷模型与参数辨识,内容包括线性离散形式和连续形式的负荷模型与参数辨识及不同形式模型的相互转换;第六章主要介绍现代数据拟合技术在复杂非线性负荷特性描述中的应用,介绍了人工神经网络、支持向量机、模糊神经网络负荷模型与辨识,也介绍了传统的样条函数模型在负荷建模中的应用;第七章介绍负荷特性的分类与综合,着重介绍基于多组实测数据的离散形式和连续形式的负荷模型参数综合辨识算法;第八章介绍统计综合法负荷建模方法、动态静态负荷特性的统计集结算法;第九章简单介绍负荷特性测辨系统的硬件与软件实现;附录是 IEEE 负荷建模工作组列出的有关负荷模型。

本书可供从事电力系统分析相关工作的人员使用,也可供相关专业大中专院校师生学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统负荷模型与辨识/章健编著. —北京:中国
电力出版社, 2007
ISBN 978-7-5083-6058-4

I. 电… II. 章… III. 电力系统-负荷(电)-研究
IV. TM715

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 140653 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>)
北京博图彩色印刷有限公司印刷
各地新华书店经售

*

2007 年 9 月第一版 2007 年 9 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 6.625 印张 175 千字
印数 0001—3000 册 定价 15.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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



电力系统数字仿真已深入电力系统规划、设计、调度、运行等领域，数字仿真结果准确与否是影响这些领域能否正确决策的重要因素之一。随着我国主要电网的全国性互联进程的推进，电网规模不断扩大，复杂程度越来越高，电网的动态稳定性及电压稳定性问题更加突出。负荷模型对电力系统数字仿真结果的影响已不容忽视。

负荷不是一个具体的单个设备，而是众多用电设备和用户的综合对象，由于其非线性、时变性、变结构性、组成成分差异性造成的特性差异、各用电设备在大幅度电压和频率变化激励下的响应特性未知等，使得其建模较之发电机、励磁系统、原动机调速系统等这些单一的结构固定的元件和系统建模困难得多。虽然国内外学者和工程技术人员已进行了大量研究与实践，取得了很多理论和应用成果，但仍然有许多问题没有得到解决。并且大量的成果分布于发表的论文中，全面系统介绍负荷建模的著作也还很少。作者近十几年来一直从事电力系统负荷建模的研究，参加过一些国家自然科学基金、省自然科学基金和网省电力公司有关电力负荷建模的科研项目，对电力负荷特性辨识的研究有一定的体会。为了给从事该领域研究的学者提供一些思路，为了与同行学者进行交流，为了让相关研究方向的学者加深对电力负

荷建模的了解，作者在总结国内外近年研究成果的基础上完成了本书。书中主要介绍了有关负荷模型的具体辨识算法和用到的一些数值计算方法或理论。也涉及了有关负荷建模方法论层次的问题，但由于这一课题的复杂性，涉及的还不够深入，这也是目前负荷建模中解决的还不够好的问题，也是今后要重点研究的内容。期望本书的出版能够起到抛砖引玉的作用，也期望有更多的学者参与到这个研究领域中来，为攻克这一难题做出贡献。

本书的问世，不只是作者的努力结果，而且还凝结了许多人的成果。作者在撰写过程中，参考和引用了大量的国内外有关文献和研究成果，在此对所涉及的专家学者表示衷心的感谢。

感谢华北电力大学贺仁睦教授引领作者进入负荷建模的研究领域，并给予了长期以来的指导、关心和帮助。

感谢研究生张锋、徐敏、刘甲庆在程序编制与算例中所做的工作。感谢王雷涛等研究生在资料收集、文字处理和书稿校对中所做的工作。

由于时间仓促，加之作者的水平和实践经验有限，书中难免有不当之处甚至错误，恳请专家与读者批评、指正。

章健

2007年6月



前言

第一章 电力负荷建模概述	1
第一节 电力负荷建模的发展	1
第二节 负荷建模的基本概念	5
第三节 负荷模型对电力系统分析的影响	12
第四节 负荷模型在电力系统中的使用情况	15
第五节 负荷建模中应考虑的因素	19
第六节 负荷建模方法	24
第二章 数据拟合与最优化方法基础	30
第一节 数据拟合	30
第二节 最优化算法	34
第三章 静态负荷模型与参数辨识	44
第一节 静态负荷模型	44
第二节 静态负荷模型参数辨识	46
第四章 感应电动机负荷模型与参数辨识	52
第一节 感应电动机负荷模型	52
第二节 感应电动机负荷模型的参数辨识	59
第三节 感应电动机负荷模型的典型参数	63
第五章 线性动态系统形式负荷模型与辨识	65
第一节 离散系统模型与辨识	65
第二节 连续系统模型与辨识	77
第三节 不同形式模型之间的互相转换	84

第六章 模型结构未知的复杂负荷特性的描述	88
第一节 人工神经网络负荷模型	88
第二节 支持向量机负荷模型	95
第三节 模糊负荷模型	107
第四节 样条函数负荷模型	114
第七章 电力负荷特性的分类与综合	123
第一节 电力负荷动态特性分类与综合的必要性	123
第二节 离散系统差分方程形式负荷模型参数综合 算法	128
第三节 连续系统状态方程形式负荷模型参数综合 算法	130
第四节 动态负荷特性综合建模实例	132
第五节 电力负荷特性分类方法概述	139
第八章 统计综合法负荷建模	141
第一节 统计综合法负荷建模的基本过程	141
第二节 统计综合法静态负荷建模	148
第三节 统计综合法动态负荷建模	156
第九章 负荷特性测辨系统	166
第一节 负荷特性数据采集系统	166
第二节 负荷特性测辨系统的软件配置	171
第三节 负荷特性辨识软件开发平台的选择	175
附录 IEEE Task Force 负荷建模工作组列出的典型 负荷模型	178
参考文献	190

第一章

电力负荷建模概述

第一节 电力负荷建模的发展

电力系统各元件的数学模型及由其构成的全系统数学模型是数字仿真的基础，其准确与否直接影响着仿真的结果和以仿真结果为基础而产生的决策方案，进而关系到决策方案实施所产生的经济效益和社会效益。长期以来，人们对于发电机、调速系统、励磁系统、变压器、输电线路等元件在行为机理和现场实测方面进行了深入研究，提出了适应不同仿真精度要求的数学模型。而对于作为电力系统中重要模型之一的负荷模型投入的研究不够。在目前电力系统仿真计算中，使用的负荷模型也是比较粗糙的。这种粗糙的负荷模型与精确的发电机、调速系统、励磁系统、网络元件模型的不协调状况，从总体上讲，将使后者的精确性难以发挥其应有的作用，从而降低系统仿真分析的可信程度，并且会造成过于悲观或乐观的分析结果，给电力的生产与发展带来巨大的损失。

若负荷特性描述的不准确而产生悲观的分析结果，则在规划设计方面将会因不必要的加强系统结构和反事故措施而投入过多的资金，造成浪费。在运行方面因采取过分保守的策略而限制了功率传输的极限，使设备得不到充分利用。

若负荷模型不准确而产生乐观的分析结果，则在规划设计方面将会导致系统反事故措施投入资金不足，从而产生不合理的系统规划方案，给以后的系统运行造成不便，甚至是潜在的危险。在运行方面将导致系统运行于失稳的临界状态或疏于防范造成事故。

随着我国主要电网的全国性互联进程的推进，电网规模不断扩大，复杂程度越来越高，电网的动态稳定性及电压稳定性问题

总之,在过去的30年中,电力负荷建模基本上是沿着统计综合法和总体测辨法这两条线路不断发展和完善的,已分别取得了许多可喜的成果,并且一些研究成果已经直接应用于实际系统的仿真计算。但是,准确的负荷建模由于如下原因仍是一项特别困难的工作,这是因为:

(1) 构成负荷的大量用电设备存在很大差异,负荷特性是这些大量特性相差很大的用电设备相互联系和作用的总体表现,并非哪一种具体的用电设备的特性所能描述的。

(2) 构成负荷的用电设备和用户分布于整个配电网,而不是直接连接于负荷所在母线。因此,配电网结构、参数、无功补偿和发电厂等对负荷的特性会有影响。

(3) 负荷具有很强的随机性、变结构性和时变性,即负荷会随用户随机的启停、时间、季节、气候等而变化。

(4) 建模时通常缺乏准确的负荷构成信息。

(5) 很多用电设备的特性,特别是大幅度电压、频率变化下的特性难以确定。

因此,在今后的电力负荷建模研究中,仍需要电力系统辨识工作者们付出艰苦的努力。

第二节 负荷建模的基本概念

本节介绍与负荷建模有关的一些定义、概念和术语。

1. 负荷 (LOAD)

负荷在电力工程专业领域中具有几种意思,几种不同的对象在字面上都称为负荷。负荷可以是:

(1) 一种连接于电力系统中的用电设备。

(2) 连接于电力系统中的所有用电设备所吸收的总功率(有功和无功功率)。

(3) 母线负荷。是系统的一部分,在整个系统中不详细表示其构成,而是以吸收功率的一个等值对象接于母线来表示。

(4) 发电机组的出力。

负荷建模中研究的负荷就是上述 (3) 所指的负荷。

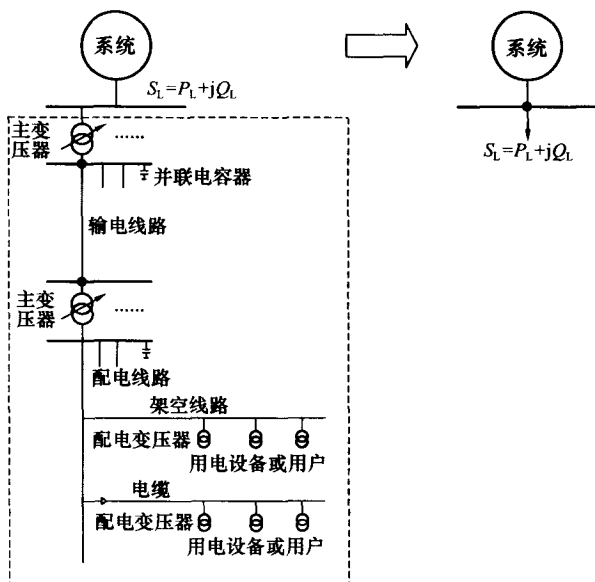


图 1-1 母线负荷示意图

母线负荷示意图如图 1-1 所示，负荷建模中涉及的母线负荷不仅是连接于电网上的用电设备，而且还包括：变电站主变压器、输电线路、配电线路、配电变压器、并联电容器、电压调节器等。

负荷建模术语说明示意图如图 1-2 所示。

2. 负荷成分 (LOAD COMPONENT)

某一类所有用电设备的集合，例如，水加热、空调、荧光灯等。

3. 负荷类型 (LOAD CLASS)

负荷的分类，例如居民生活、商业、工业等。在负荷建模中，特别是统计综合法负荷建模中，要将负荷分成几种类型，同

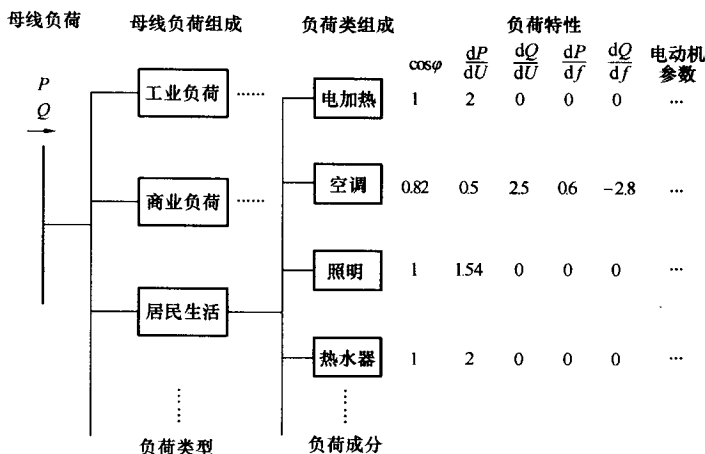


图 1-2 负荷建模术语说明示意图

一类负荷的组成及特性是相似的。

4. 负荷组成 (LOAD COMPOSITION)

某负荷成分占负荷的百分数或比例，这一术语适用于母线负荷或某种负荷类项。例如，母线负荷的居民生活、商业负荷、工业负荷组成比例，居民生活类负荷中空调设备、照明设备、电加热设备的组成比例。

5. 负荷类型混合 (LOAD CLASS MIX)

某类型的负荷占母线负荷的百分数或比例。

6. 负荷特性 (LOAD CHARACTERISTIC)

负荷模型的参数集合，例如，功率因数、有功随电压变化的参数等，反映了负荷的行为。这一术语可以用于用电设备、负荷成分、负荷类型、母线负荷。

7. 负荷模型 (LOAD MODEL)

描述流入母线的功率（有功和无功）或电流与母线电压幅值和频率之间关系的数学表达式。

8. 静态负荷模型 (STATIC LOAD MODEL)

静态负荷模型描述同一时刻有功功率及无功功率与母线电压

幅值和频率之间的关系。静态模型是无记忆的，某时刻响应只与同一时刻的激励有关，而与历史激励和响应无关，也就是即时的。静态负荷模型用代数方程来表示。除了描述诸如电阻性负荷等本身就是即时的对象或系统外，也可以近似描述动态负荷，例如电动机驱动的负荷等。

9. 动态负荷模型 (DYNAMIC LOAD MODEL)

动态负荷描述当前有功及无功功率与当前和历史电压幅值和频率之间的关系。动态负荷模型是有记忆的，某时刻响应除了与同一时刻的激励有关，而与历史激励和响应也有关系。动态负荷模型用差分方程和微分方程来表示。

10. 恒阻抗负荷模型 (CONSTANT IMPEDANCE LOAD MODEL)

功率随电压幅值平方变化而变化的静态负荷模型称为恒阻抗负荷模型，也称为恒导纳负荷模型。

11. 恒电流负荷模型 (CONSTANT CURRENT LOAD MODEL)

功率随电压幅值变化而变化的静态负荷模型，称为恒电流负荷模型，是电压幅值的一次函数。

12. 恒功率负荷模型 (CONSTANT POWER LOAD MODEL)

功率不随电压幅值变化的静态负荷模型，称为恒功率模型。因为诸如电动机和电子设备这样的恒功率负荷在电压低于一定值（典型的为 80%~90% 额定值）之后不再具有恒定功率的特性了，因此通常考虑在电压低于一定值之后将恒定功率负荷模型或其他静态负荷模型变为恒阻抗模型或从电网中切除。

13. 多项式负荷模型 (POLYNOMIAL LOAD MODEL)

功率与电压幅值的关系用多项式表示的静态负荷模型，称为多项式模型。多项式模型形式为

$$P = P_0 \left[a_p \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_p \left(\frac{U}{U_0} \right) + c_p \right]$$

$$Q = Q_0 \left[a_q \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_q \left(\frac{U}{U_0} \right) + c_q \right] \quad (1-1)$$

模型参数为 a_p , b_p , c_p , a_q , b_q , c_q 和负荷的功率因数。该模型也称为 ZIP 模型, 因为它是由恒阻抗 (Z)、恒电流 (I) 和恒功率 (P) 构成的。如果该模型是用于描述某用电设备的, 则 U_0 是额定电压, P_0 、 Q_0 是用电设备在额定电压下吸收的功率。如果该模型用于描述母线负荷, 则 U_0 、 P_0 、 Q_0 通常取系统初始运行条件下的值。

14. 幂函数负荷模型 (EXPONENTIAL LOAD MODEL)

功率与电压幅值的关系用幂函数式表示的静态负荷模型, 称为幂函数模型。幂函数模型形式为

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{np} \\ Q &= Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{nq} \end{aligned} \quad (1-2)$$

有时模型中含有两个以上不同幂指数的项。模型的参数为幂指数 np 、 nq 和功率因数。可以看出, 当设这些幂指数分别为 0、1 和 2 时, 则模型分别代表的是恒功率、恒电流和恒阻抗负荷模型。其他幂指数值可以表示不同类型负荷元件的综合特性。对一些类型的负荷来说幂指数甚至可能会大于 2 或小于 0, 这些数值也是合理的。

15. 随频率变化的负荷模型 (FREQUENCY-DEPENDENT LOAD MODEL)

这种静态负荷模型中含有与频率有关的部分。通常用如下式子乘以多项式或幂函数负荷模型

$$[1 + a_f(f - f_0)] \quad (1-3)$$

式中 f ——母线电压的频率;

f_0 ——额定频率;

a_f ——模型中频率的灵敏度参数。

16. EPRI LOADSYN 静态负荷模型 (EPRI LOADSYN LOAD MODEL)

在 EPRI LOADSYN 程序中使用的静态负荷模型为

$$P = P_0 \left\{ P_{a1} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{K_{pv1}} [1 + K_{pf1} (f - f_0)] + (1 - P_{a1}) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{K_{pv2}} \right\} \quad (1-4)$$

$$Q = P_0 \left\{ Q_{a1} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{K_{qv1}} [1 + K_{qf1} (f - f_0)] + \left(\frac{Q_0}{P_0} - Q_{a1} \right) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{K_{qv2}} [1 + K_{qf2} (f - f_0)] \right\} \quad (1-5)$$

式中 P_{a1} ——有功负荷中与频率有关的那部分负荷所占的比例；

Q_{a1} ——无功负荷系数，即未经补偿的无功负荷与有功负荷之比；

K_{pv1} ——有功功率负荷中与频率有关项的电压指数；

K_{pv2} ——有功功率负荷中与频率无关项的电压指数；

K_{qv1} ——未经补偿的无功功率负荷项的电压指数；

K_{qv2} ——无功补偿项的电压指数；

K_{pf1} ——有功功率负荷的频率敏感系数；

K_{qf1} ——未经补偿的无功功率负荷的频率敏感系数；

K_{qf2} ——无功补偿项的频率敏感系数；

U ——母线实际电压；

P_0 ——负荷初始状态吸收有功功率（潮流计算得）；

Q_0 ——负荷初始状态吸收无功功率（潮流计算得）。

有功负荷模型由两项组成，一项与频率有关，另一项则与频率无关；无功负荷模型的第一项描述的是所有用户吸收的无功功率，是未经补偿的无功负荷。第二项描述的是从母线到各负荷点之间的所用无功补偿和电网无功损耗的无功功率，建模时若不计电网的影响，即认为所有负荷和补偿设备都直接接到母线上时，则第二项就是无功补偿项。

17. EPRI ETMSP 静态负荷模型 (EPRI ETMSP LOAD MODEL)

在 EPRI 中期暂态稳定计算中采用的一般形式的负荷模型为

$$\frac{P}{P_{frac} P_0} = P_{px} \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + P_{pi} \left(\frac{U}{U_0} \right) + P_{pw} + P_{pl} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{npv1} (1 + K_{pf1} \Delta f) \\ + P_{p2} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{npv2} (1 + K_{pf2} \Delta f) \quad (1-6)$$

$$P_{pw} = 1 - (P_{pi} + P_{px} + P_{pl} + P_{p2}) \quad (1-7)$$

$$\frac{Q}{Q_{frac} Q_0} = Q_{qx} \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + Q_{qi} \left(\frac{U}{U_0} \right) + Q_{qw} + Q_{ql} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{npv1} (1 + K_{qf1} \Delta f) \\ + Q_{q2} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{npv2} (1 + K_{qf2} \Delta f) \quad (1-8)$$

$$Q_{qw} = 1 - (Q_{qi} + Q_{qx} + Q_{ql} + Q_{q2}) \quad (1-9)$$

式中 P_0 、 Q_0 ——初始负荷有功功率、无功功率；

P_{frac} 、 Q_{frac} ——母线负荷中静态负荷的比例；

P_{px} 、 Q_{qx} ——负荷的恒阻抗部分的比例；

P_{pi} 、 Q_{qi} ——负荷的恒电流部分的比例；

P_{pw} 、 Q_{qw} ——负荷的恒功率部分的比例。

上述有功和无功负荷模型中的第 4、5 项为负荷的频率特性项。

18. 感应电动机负荷模型 (INDUCTION MOTOR)

在电力系统动态仿真计算中，通常动态负荷模型采用感应电动机模型。一般将所有电动机的特性用一台或两台电动机来等值。电动机模型的参数可以通过集结算法获得，可以采用典型参数 (IEEE Task Force 负荷建模工作组的推荐值、国内教材推荐值、综合计算软件包推荐值等)，也可以通过参数辨识方法获得。电动机模型包括只考虑机械暂态的一阶模型、附加考虑转子电暂态的三阶模型、附加考虑定转子

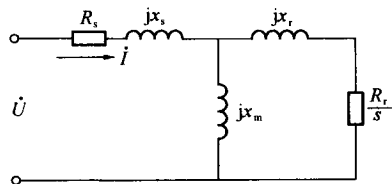


图 1-3 感应电动机等值电路

电暂态的五阶模型等。

在电力系统计算中基本上只用一阶和三阶感应电动机负荷模型，五阶模型一般仅在单台电动机动态分析与控制研究中使用。感应电动机等值电路如图 1-3 所示，式 (1-10) ~ 式 (1-12) 为一阶感应电动机的数学模型，IEEE 负荷建模工作组推荐的典型参数见第四章。

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H} [T_e(s) - T_m(\omega_m)] \quad (1-10)$$

$$T_m = T_{m0} [A\omega_m^2 + B\omega_m + C + D\omega_m^{\alpha_m}] \quad (1-11)$$

$$C = 1 - (A + B + D) \quad (1-12)$$

图 1-3 中和式 (1-10) ~ 式 (1-12) 中， R_s 为定子绕组电阻； x_s 为定子绕组漏抗； x_m 为励磁电抗； R_r 为转子电阻； x_r 为转子漏抗； ω_m 为电动机转速； H 为惯性常数； $T_m(\omega_m)$ 为机械转矩，是转速的函数， A 、 B 、 C 、 D 、 α_m 为机械转矩特性参数； $T_e(s)$ 为电磁转矩，是滑差的函数。

第三节 负荷模型对电力系统分析的影响

目前，由于受实际现场实验的限制，负荷特性对电力系统行为影响的研究主要还是通过计算机仿真计算来进行的。大量仿真计算表明：负荷模型的变化对系统暂态稳定、小信号动态稳定、电压稳定及潮流计算的结果具有不同程度的影响，在临界情况下，计算结果会发生质的变化。

1. 负荷模型对潮流计算的影响

IEEE 负荷建模工作组 1988 年在北美电力系统的 85 个企业调查结果显示，在事故前、后的静态潮流计算中，绝大多数采用恒功率负荷模型，仅有少数采用功率依电压变化的负荷模型。仿真计算实践表明，当电网运行条件良好时，节点电压运行于额定值附近，采用恒功率负荷模型的潮流计算一般不存在收敛性问题。但对于运行条件恶化的电网，例如故障后断开线路或切除发