

清 华 大 学

综 合 论 文 训 练

题目：基于聚类算法的电力综合负荷次
主导参数分析

系 别：信息学院自动化系

专 业：自动化

姓 名：刘小非

指导教师：曹军威 教授

2012 年 5 月 17 日

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

(涉密的学位论文在解密后应遵守此规定)

签 名： _____ 导师签名： _____ 日 期： _____

中文摘要

本文首先介绍了电力系统仿真的基本知识以及面临的主要问题，从而引出了电力系统仿真中的一项对效果影响极大的技术——负荷建模。

本文随后介绍了一种两阶段法的负荷建模方法。该方法定义了负荷模型中的四个主导参数，并通过辨识四个主导参数，而将其他次主导参数用典型值取代，从而进行负荷建模。

但是在实际应用中，仅辨识负荷模型的四个主导参数对于负荷模型的实用性来说是不够的，然而另一方面，具体辨识次主导参数又面临着很大困难。本文通过分析得出了次主导参数对于负荷模型准确度的重要性，并且搭建仿真系统，以次主导参数中的定子电抗为例，考察了定子电抗的变化对于负荷扰动响应外特性的影响。

以此为特征，本文提出了通过聚类分析方法来进行负荷模型以次主导参数为依据的分类。即不辨识精确值，转而进行较为粗糙但是实时性更好的参数区间划分，将次主导参数可能取值的区间划分为几段，每段作为聚类的一个类别。整个方法分为两个步骤，第一步是聚类，将未知参数的样本点聚类为不同类别构成训练集，第二步是新样本分类，即基于已经聚类的训练集对新样本点进行分类。

通过分析，本文所选取的基本特征是负荷在扰动故障发生期间的无功响应的衰减时间常数。通过数学模型的理论分析以及仿真实验的检验确认了这一方法的准确性之后，本课题设计了样本集的构建方法并获取了样本集。在样本集的基础上，本文通过实验验证了方法中两个步骤的准确性。

关键词：电力系统仿真；负荷建模；次主导参数；聚类分析；

ABSTRACT

At first, this paper introduces the basic knowledge of power system simulation and the main problem facing this technology. Then, load modeling, one technology which has great effect on power system simulation, is introduced.

After that, a two-stage load modeling method is introduced. This method defines four main parameters in load model. By identifying those four parameter and set other parameters as typical value, this method gets a complete load model.

However, in actual application, only identifying four main parameters is not enough for the practicability of load modeling. On the other hand, the identification of numerical values of the four main parameters is facing great difficulty. Via mathematic analysis and simulation method, this paper draws the importance of so called “Secondary Dynamic Parameter”. Using one of the secondary dynamic parameters – stator reactance as an example, this paper builds a simulation system to analysis the influence of the variation of stator reactance on power load output characteristics in a situation of disturbance.

Based on such output characteristics, this paper put forward the method of using clustering analysis to classify load model on terms of secondary parameters. That is to say, instead of the identification of exact value, this paper finishes the division of parameter interval, and classifies the possible parameter interval into several group, every group is defined as a class in clustering algorithm. The whole method is divided into two steps. The first step is clustering, that is to cluster sample points with unknown secondary parameters and create the training set, in which all of the points has a class. The second step is classifying, that is to classify new samples with unknown parameters using the training set.

Based on preliminary works, this paper chooses the dumping time constant of reactive power of power loads during disturbance as the basic characteristic for clustering. Mathematic analysis and simulation experiments have verified such choice. After that, this paper designs simulation experiments to get enough samples. Based on the samples, this paper verified the effectiveness of above method.

Key words: Power system simulation; Load modeling; secondary dynamic parameter; Clustering;

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 电力系统负荷辨识概述	2
1.2.1 电力系统建模	2
1.2.2 负荷建模技术	3
1.3 本文结构和主要内容安排	5
第 2 章 实验平台、研究基础和研究路线	6
2.1 仿真实验基础平台和案例系统建模	6
2.2 分步综合负荷主导参数辨识算法简介	10
2.3 分步综合负荷主导参数辨识算法不足分析	11
2.4 本文研究路线设计	14
第 3 章 相关理论分析	16
3.1 综合负荷基本模型	16
3.2 动负荷部分初值解算	17
3.3 非线性微分方程差分化	19
第 4 章 聚类算法与分类算法基础	23
4.1 算法介绍	23
4.1.1 C 均值算法	23
4.1.2 k-近邻法及应用	25
4.2 应用原理	26
4.2.1 C 均值算法 c 值的选择	26
4.2.2 总体实验流程设计	28
第 5 章 仿真分析	29
5.1 实验准备	29
5.1.1 仿真实验设计	29
5.1.2 特征选择和提取方法	31
5.1.3 增加负荷节点位置	36
5.2 理论分析的仿真验证	37
5.3 样本点获取	38
5.4 结果分析	44
5.4.1 聚类算法	44
5.4.2 测试集分类算法验证	48
第 6 章 总结	49
插图索引	51

表格索引	53
参考文献	54
致谢	55
声 明	56
附录 A 外文资料的书面翻译	57

第1章 引言

1.1 研究背景

近年来，我国经济的高速发展伴随着对电力资源越来越大的需求。然而，我国可用于发电的能源的地理分布与电力负荷的分布存在不匹配，能源充足但是缺乏开发的西部地区的发展相对落后于能源缺乏的东部沿海地区，从而催生了西电东送这一输电战略的产生^{[1]-[2]}。这样的背景下，中国的电力系统逐步实现了大规模互联，输电的容量快速扩大，同时输电距离也显著增加了。大规模电力系统以及复杂的运行操作过程，使得整个系统对于控制、扰动分析以及故障预测的技术要求也进一步提高。

电力系统仿真^{[3]-[4]}是解决电力系统问题的实用工具之一。电力系统仿真采用了电子计算机技术，以数学模型模拟电力系统的物理过程，采用数值计算的方法对系统的运行过程进行研究。以电力系统仿真为代表的电力系统稳定分析与控制技术经过了三个发展阶段：离线、“准”在线与在线。

其中，离线仿真技术已经较为成熟，并得到广泛应用。在实际电力系统中，离线仿真技术可以用于确定电力系统的规划方案、设计运行方式、计算控制参数、进行故障分析。此外，该技术也可以用于电力部门人员的培训。然而，由于电力系统结构和运行工况的复杂性和时变性，以及电网信息系统的局限性，离线的采集数据和真实的电力系统差别很大，通过量测数据分析所得的电网稳态运行状况与实际运行系统差距甚大，更不用说电网动态、暂态信息与模型参数，因此，这种情况下无法保证分析的稳态条件以及参数与实际相符，为了保证安全性，分析结果具有很大的保守度。作为过渡阶段的“准”在线仿真，随着EMS^[5]的出现，在线稳定分析计算得以实现，能够保证分析的稳态条件与实际情况相符，分析结果的准确性有所提高。但是由于无法观测得到系统的动态特性，其模型参数仍然采用离线计算参数，因而分析结果与实际情况依然相差较大。

在线仿真技术对于之前技术局限性有弥补作用。然而受限于仿真速度和实时性要求，在线仿真技术规模较小，针对大电网的仿真需要在高电压等级上进行简化，从而使得其实际应用价值受到了很大局限。

目前，我国电力系统已经具备了先进的量测、控制装置，从而为电力系统的

大规模实时仿真提供了硬件条件。目前普遍的在线数据的获取系统有两类，分别是基于SCADA/EMS的广域静态信息获取和基于WAMS的广域动态信息获取。随着WAMS的发展和物联网^[6]的提出，系统的动态特性变得可观，为实现在线测辨和控制提供了基础平台，有望使得稳定分析得以在正确的稳态条件和模型参数基础上进行，潜在效益巨大。本文所研究的负荷建模，即是基于WAMS系统所获得的广域动态信息来进行的。

1.2 电力系统负荷辨识概述

1.2.1 电力系统建模

一般的电力系统由三部分组成，图 1.1 以三线图的形式简单表示^[7]：

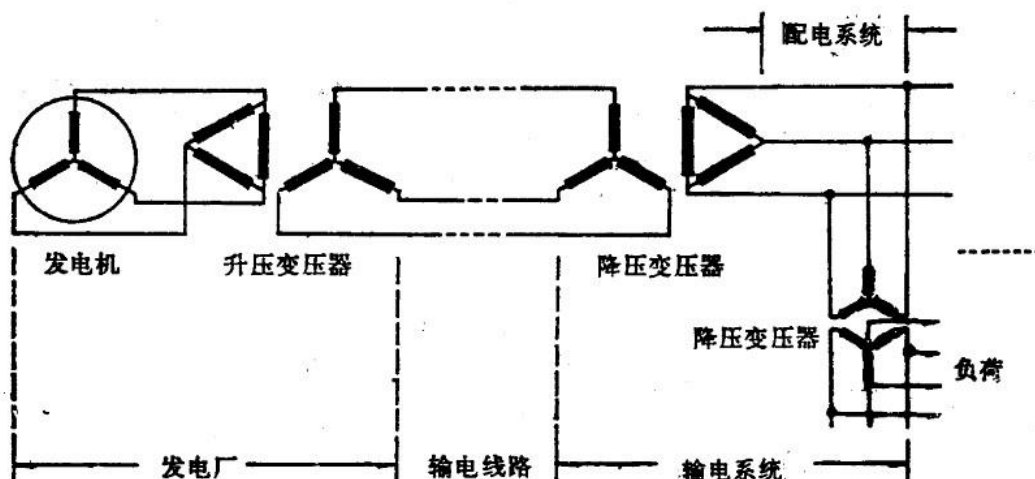


图 1.1 电力系统示意图

从上图可以概括，电力系统的三大部分构成为：

- (1) 发电机：电能的产生部分。
- (2) 电力网：电能的输送部分。
- (3) 负荷：电能的消耗部分。

对于电力系统建模，一般是对其三个部分分别建模，之后组合成为统一的整体。在对电力系统各个部分建模时，无论是从操作性还是从实用性角度，都不会逐一对每个电气元件进行建模，而是将同一地区一个群的元件进行等效^[8]。集群的选择，例如其分区以及位于哪个电压等级上，需要能够代表某个地区电气元件的总体外部特性，并符合实际工程应用精度的要求。

三个电力系统三大部分的建模技术中，发电机和电力网两个部分的建模已经

逐渐趋于成熟。相比之下，负荷建模面临着负荷本身随时间变化且变化随机，负荷分散必须通过配电网相连，负荷本身类型的复杂性，负荷特性的不连续性以及多样性等困难^[9]，因此发展相对来说要缓慢许多。负荷建模的滞后发展阻碍了整个电力系统建模准确性的提高，降低了其他部分模型的实用价值。因此，现阶段对于负荷建模的研究是三个部分建模研究中最迫切的部分。出于复杂性的考虑，本文暂不研究对于负荷群的选择，而是考虑在给定系统中，如何根据各负荷群节点的总体量测数据，构建合适的负荷模型。具体来说，负荷群会消耗一定的有功、无功功率，其消耗多少与入端电压和频率有直接关系，这种关系被称为其电压、频率特性，负荷模型就是用来说明这种关系的数学方程。负荷建模的含义即为确定数学方程的表现形式及方程中各个参数的具体数值。

1.2.2 负荷建模技术

目前为止，有两类主流的负荷建模发展路线^[10]。一类是“综合统计法”，其大体思路是将负荷视为各种不同种类电器的集合，建模过程中，先对每一类电器的特性进行求取，之后计算每类电器在总负荷中的比例，从而计算出最后的负荷模型。另一类负荷建模的方法是“总体测辨法”，其大体思路是选择一个电压等级下的负荷群，确定这个群的负荷的模型结构，也即是数学方程的形式，之后通过电力系统量测结果，确定该结构中各个参数的值。这类较为新颖的方法正处于开发研究中，先进的量测技术为这类测量数据依赖性大的建模方法提供了可能。

在“总体测辨法”中，对于负荷模型的选择有多种不同类别。负荷模型的分方法有很多种，例如从模型是否反映负荷的动态特性可以分为静态负荷模型和动态负荷模型；从模型的具体结构可以分为机理性模型和非机理性模型。本文选择的模型是现在电力科学中应用较为广泛的机理性负荷动态模型，即为感应电动机以及恒定阻抗负荷的并联，其模型结构如下图所示：

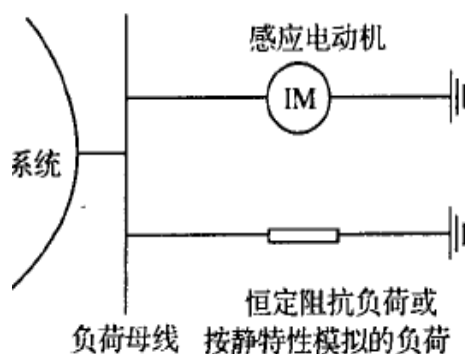


图 1.2 机理性负荷动态模型

如文献[11]中所述，恒定阻抗负荷模型是一种静负荷模型，在这种模型中有功功率直接跟随电压幅值的平方变化，是电力系统中一种常用的模型。这种负荷也被称为是恒导纳负荷模型。

感应电机是电力系统中的一个关键成分。感应电机模型基于一个感应电力的物理特征，能够代表静负荷模型在故障情况下不能表征的动态响应。感应电机模型有许多形式。一般来说，三阶模型对于暂态稳定性研究已经足够了，三阶模型也是电机学界经常采用的模型。其等效电路如图 3 所示。

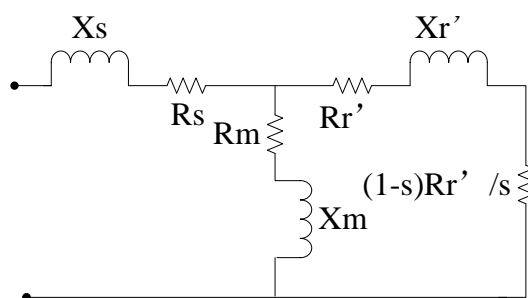


图 1.3 感应电动机机理模型结构

综上所述，本文对于负荷建模的研究正是基于如上所示的模型结构。对于这种模型结构来说，其模型参数主要包括：静负荷百分比 P_{ct} 、电动机初始滑差 s_0 、转子电阻 R_r 、电动机惯性时间常数 H_2 ，励磁电抗 X_m 、转子电阻 X_r 、定子电阻 X_s 等。本课题的研究目标，是在一种现有的负荷辨识算法的基础上进行改进，从而获得更为准确的负荷辨识算法。

本课题所采用的基础算法，将在第 2.2 节中进行详细阐述。简要来说，该基础算法通过数值分析和仿真实验，确定负荷模型的所有参数中，有四个参数为主导参数。基础算法认为，仅辨识这四个参数，而将其他参数(即次主导参数)用典型值代替，即可以构建负荷要求的负荷模型。但是进一步的实验和灵敏度分析表明，在次主导参数的真实值和典型值的差异较为明显的时候，尤其是次主导参数的真实值偏小的时候，基础算法的辨识效果并不理想。以改进基础算法为出发点，本课题旨在通过对负荷小扰动响应外特性的分析，对其进行聚类分析后粗糙确定次主导的取值，从而改进负荷模型的参数辨识，取得更为理想，更符合实际应用需求的负荷模型参数。作为事例，本课题选择的研究对象为次主导参数之一的定子电抗。之所以选择聚类算法，是因为次主导参数和外特性没有直接对应的数值计算方法，智能搜索算法又存在搜索空间过大的问题。而采用聚类算法可以获取

相对来说较为好的计算速度，以及实用的改进空间。

1.3 本文结构和主要内容安排

本论文共分为6章。

第1章为即本章引言部分，主要介绍项目所产生的背景、项目的需求及本课题中所用到的系统和负荷模型的相关设定。第2章介绍本课题的研究路线和采用的实验平台PSD-BPA的一些说明和用法。第3章通过数学推导从理论上分析次主导参数对于负荷模型响应外特性的影响。第4章介绍本课题所选取的聚类算法和分类方法以及应用原理。第5章通过实际案例分析并改进聚类算法。第6章是全文的总结章节。

第2章 实验平台、研究基础和研究路线

2.1 仿真实验基础平台和案例系统建模

本课题所应用的仿真软件，为PSD-BPA电力系统分析软件，下面简要对其进行介绍。

BPA是世界上一套应用广泛的电力系统分析软件工具，最初是美国邦纳维尔电力局（英文全称Bonneville Power Administration，即是BPA的来源）于20世纪60年代开发而成。BPA程序被我国能源部电力科学研究院引进后，加入了中国电力系统应用需要的功能组件，使其符合本地的使用需求，从而产生了PSD-BPA。其中，PSD是Power System Department的简称，也即是PSD-BPA这个软件缩写的来源。

PSD-BPA软件有许多用于电力系统运行模拟和响应、参数曲线绘制的功能程序^[12]。该软件具有可以进行大规模的计算、效率高、计算结果稳定性好、功能完善等特点，因此在我国电力系统的科学研究中得到了广泛应用。

本课题中主要应用的是其潮流计算和暂态稳定计算两个功能程序。下面简要对这两个功能进行介绍：

在电力科学中^[7]，潮流指的是电力系统在稳态情况下的各点的电压分布与功率分布。所谓潮流计算，指的是在一定的电力系统连接拓扑结构以及电力系统运行条件下，计算出电力系统的稳定状态，如各母线上的电压（包括幅值大小和相角）、发电机以及负荷的功率流入流出分布以及输电线路以及其他地方的功耗。潮流计算的结果是后续暂态稳定计算的基础。

PSD-BPA的潮流计算简图如下：

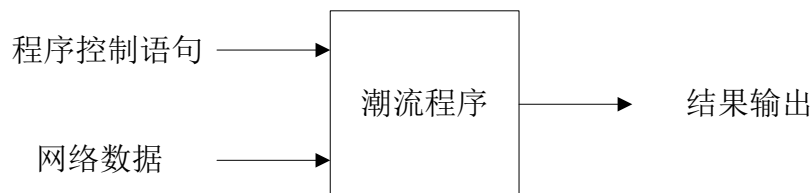


图 2.1 PSD-BPA 潮流计算简图

上图中，程序控制语句为程序工程命名，确定在潮流计算中用到了哪些功能，同时选择输入文件和输出文件的路径，仿真数据的存入和读出。网络数据由节点(BUS)数据和支路(LINE)数据，用来表征进行仿真实验所采用的系统结果。本课题所采用的潮流程序的实例如下所示：

```
(POWERFLOW,CASEID=IEEE14,PROJECT=TEST)
/P_OUTPUT_LIST,FULL\
/SOL_ITER,DECOUPLED=2,NEWTON=15,OPITM=0\
/RPT_SORT=ZONE\
/NEW_BASE,FILE=IEEE14v3.BSE\
/PF_MAP,FILE = IEEE14.MAP\
/NETWORK_DATA\
```

图2.2-a 程序控制语句

```
B      BUS-24    100  17.24 0.77
B      BUS-34    100  17.24 0.77
```

图2.2-b 实验用负荷模型容量大小设计

```
L      BUS-14    100  BUS-24    100                .02001
L      BUS-14    100  BUS-34    100                .02001
```

图2.2-c 负荷接入设计

图 2.2 PSD-BPA 潮流程序示例

在PSD-BPA中，各个功能语句被称为“卡”，每张卡的名称用一个英文字母来表示。如图5-b和图5-c中所示的分别是两张B卡，即节点交流数据卡，用于表示负荷的静态功率；以及两张L卡，即对称线路数据卡，用于表征负荷接入母线节点情况，后续章节中会陆续介绍这两种卡在仿真实验中的基本用途。

对于整个系统的拓扑结构来说，PSD-BPA中自带了一些常用的IEEE标准的电力系统结构图，在程序控制语句中声明之后可以直接调用。电力系统结构图表示了各个母线节点之间的连接关系，以及发电机的挂接位置。整个系统的拓扑结构对于本课题中许多后续实验结果的分析均有重要意义。特别是由于本课题所采用的系统为小系统，拓扑结构对于仿真实验结果所带来的影响更为明显。

本课题中，网络数据所表示的是IEEE标准的14母线节点系统，其结构图如下图所示：

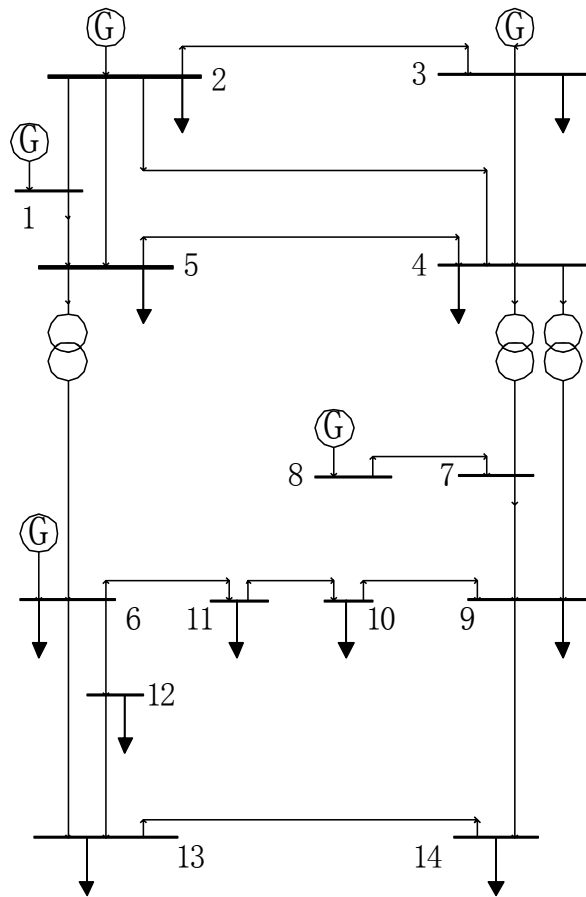


图 2.3 IEEE 标准 14 节点系统

后文中所提到的实验系统均指如上图所示的系统。

通过潮流计算，PSD-BPA将输出上述系统在稳定状态下的潮流情况。上图所给出的，是系统的框架图。网络数据除了再现该框架图外，也设定了各个发电机（即上图中标G处）的容量，以及各个母线节点（即上图中标数字处）的负荷容量大小。具体的设计方法在图5中有初略展示，由于软件具体应用不是本课题的重点，故此处不对其具体电机学意义进行展开。

后续实验的暂态稳定分析将以潮流计算的结果为基础进行。即生成了系统的稳定工作点后，在稳定工作点附近进行扰动，从而分析系统性质的这一控制理论思想的研究思路。具体到实验中，即是通过暂态稳定程序，在电力系统中设计不同位置不同大小的扰动，通过量测负荷节点的响应情况获取负荷模型辨识所必须的数据。

在引入电力系统暂态稳定计算之前，首先必须介绍电力系统的一些相关知识。现代电力系统中的发电机采用的都是同步发电机。亦即是说，同一个系统中的所

有发电机转子的电气角速度必须相等，才能保证系统的正常工作。要确保这一点，各个发电机的输入功率应该等于输出功率。如果因为某种原因，比如负荷的接入或者切除，电力输电网段上发生故障，从而使得发电机的输入、输出功率失衡，这种状态就称为扰动。暂态稳定计算就是在扰动情况下，计算电力系统中的发电机是否能保持同步运行。发电机能否保持同步运行一般以发电机转子之间相对位置角能否趋向于同一稳态值为依据。如果能，则电力系统是暂态稳定的，如果不能，则电力系统是暂态不稳定的。设计实验时，为了获取可用的负荷辨识数据，一般将系统设计为暂态稳定的系统，利用系统在扰动发生到切除，以及扰动切除后的回复过程这两段时间，来对各个负荷节点进行建模。

整个程序的示意图如下图所示：

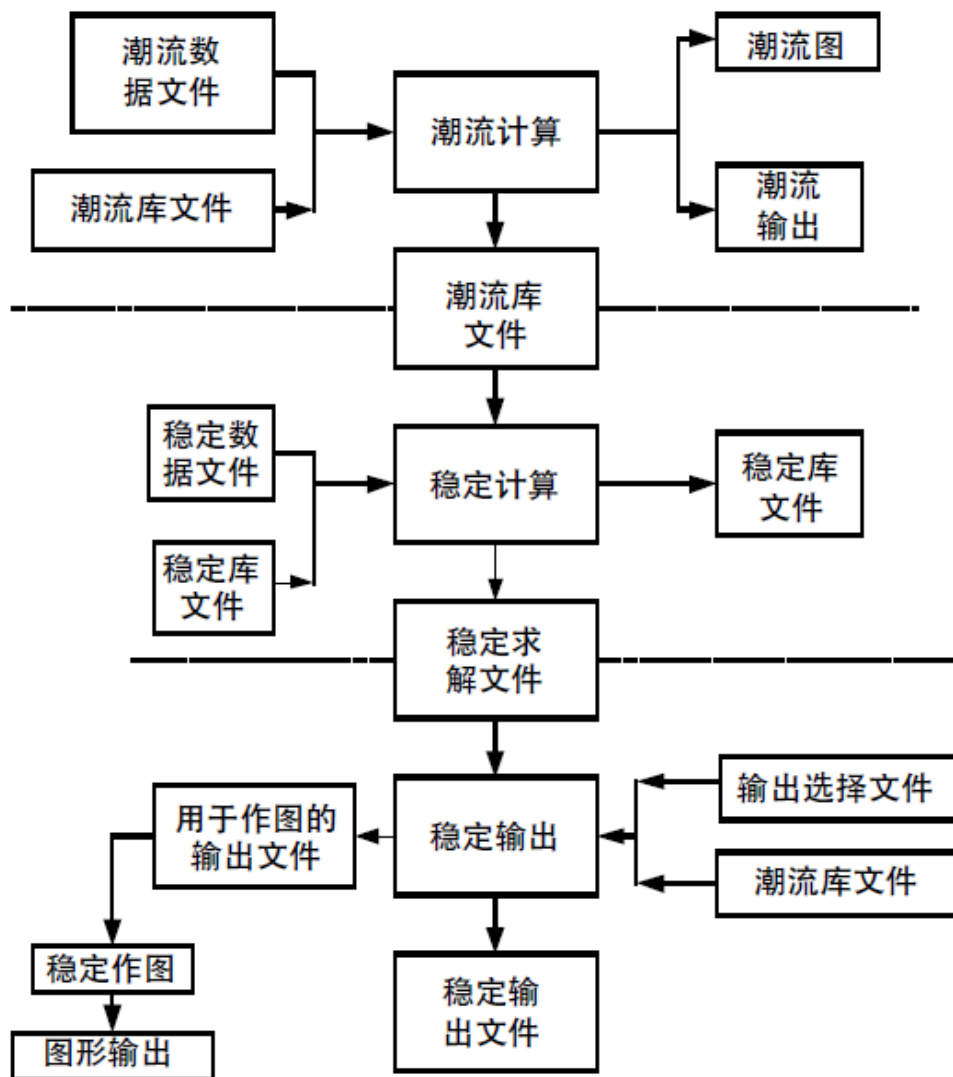


图 2.4 BPA 程序总框图

在输出选择文件中，与本课题相关的、最主要需要设定的有三部分内容，其一是扰动设计，即设计扰动发生的位置与大小；其二是负荷模型参数设计，即设计如1.2.2节中所述的负荷模型中各个参数的具体数值；其三是负荷节点在系统中位置和接入情况的设计。后面会对这些内容有更进一步的说明。

2.2 分步综合负荷主导参数辨识算法简介

本课题的算法改进的基础算法基于文献[13]中介绍的负荷模型的主导参数在线辨识算法。原文通过数学分析和物理概念的推导，得出在机理性负荷动态模型中的所有参数中，有四个参数是主导参数，分别是静负荷百分比 P_{ct} 、电动机初始滑差 s_0 、转子电阻 R_r 、电动机惯性时间常数 H_2 。由于四维参数空间搜索的复杂性，原算法采用了两阶段法，首先利用“0+”响应辨识静负荷百分比 P_{ct} 和电动机内电势角的解析方法，随后再这一步的基础上，利用基于Volterra模型和模式识别的多项式时间算法完整辨识四个主导参数。关于其他次主导参数，如果在辨识过程中有过应用，包括最后整体模型的搭建，均采用电力系统的典型值代替。整体算法的框架如下图所示：

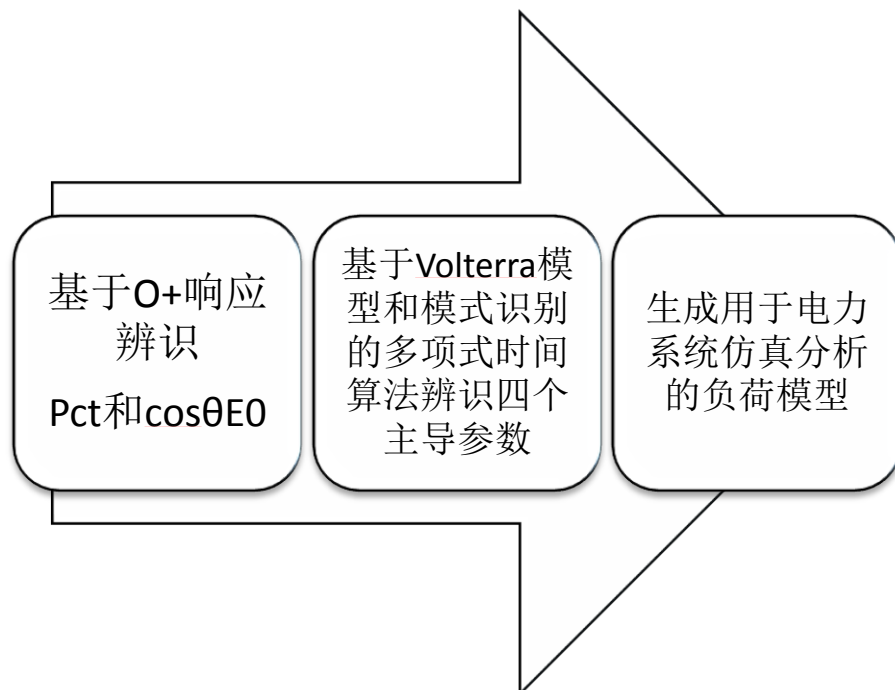


图 2.5 基础算法流程

通过数值仿真和某实际地区电网的仿真结果验证，算法在次主导参数和典型值差别在一定范围内时具有符合实际应用条件的快速性和有效性。然而，对于次

主导参数和典型值差别较为明显的负荷节点，算法所得出的负荷模型参数准确性则并不那么理想。该情况将在下一小节中进行分析。

2.3 分步综合负荷主导参数辨识算法不足分析

为了控制变量，本课题考虑先以次主导参数中定子电抗 X_s 为例，所分析的节点为实验系统中 14 号母线上的负荷。为了控制变量，采用的是在 14 号母线上挂接并联两个综合负荷模型的方法。这样可以保证两个综合负荷的输入电压一致。为了体现次主导参数在辨识中的作用，对两个负荷模型的参数做出如下设定：

编号	H ₂	Pct	E _{MWS}	R _s	X _s	X _m	R _r	X _r
1	2	40%	20	0.0116	0.095	3.50	0.020	0.12
2	2	40%	20	0.0116	0.295	3.50	0.020	0.12

如上所示，两个负荷模型参数除了定子电抗外均是相等的，也位于同一位置。需要说明的是，PSD-BPA 暂态稳定分析所需要输入的负荷模型参数和上文所提到的负荷模型参数不完全相同，二者之间可以互相转换。同时，PSD-BPA 所采用的负荷模型参数的具体数值并非国际标准单位，而是无单位的标么值。

设计在 9 号母线和 7 号母线之间的连接线发生一次持续 5ms 的三相金属短路故障。采用 PSD-BPA 的暂态稳定分析程序进行仿真计算之后，得到两个负荷在故障以及之后的恢复过程中，母线有功和无功功率的变化情况，如下图所示：

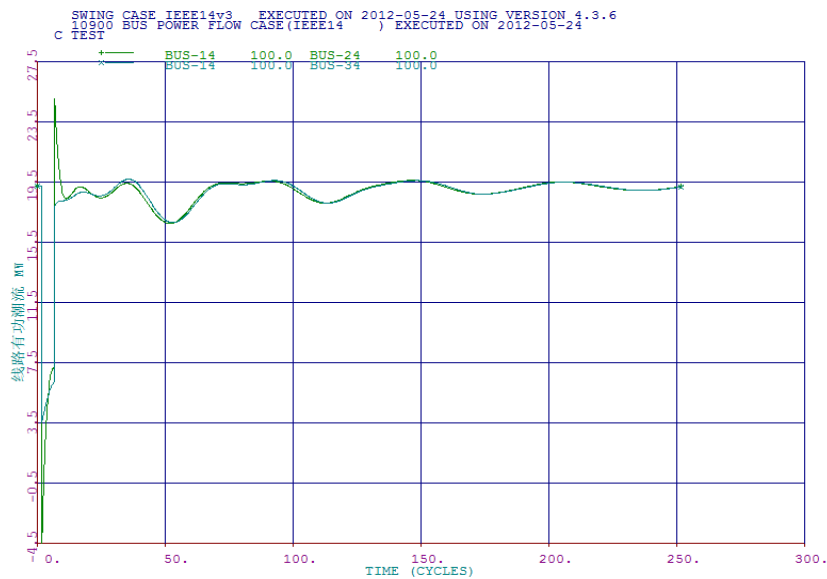


图 2.6 故障期间有功功率变化对比

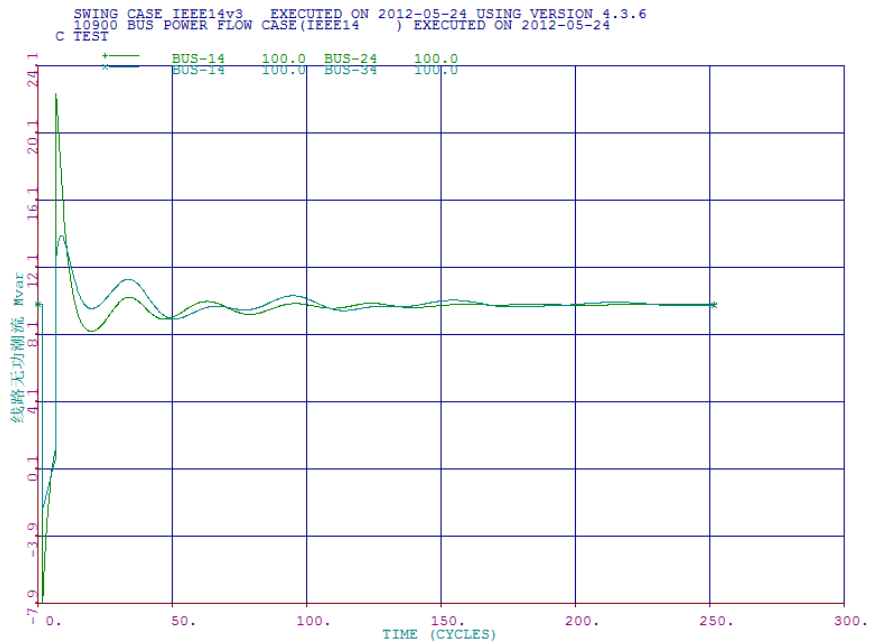


图 2.7 故障期间无功功率变化对比

可以看出，二者在动态响应的外特性上有着明显差别。将二者的仿真计算结果作为输入数据，采用文献[13]总所述的算法进行辨识，可以得到如下所述的辨识结果：

编号	Pct	R_r	s_0	H_2
1	19.6381%	0.0378	0.0052	1.5323
2	35.3709%	0.0182	0.0096	2.3134

注：由于非主导参数均采用了典型值，辨识结果只显示算法中定义四个主导参数。

分析上述辨识结果，可以看出，当次主导参数等于设定的典型值时(如编号为 2 的负荷)，除去 PSD-BPA 的设定中不存在的电动机初始滑差 s_0 ，原辨识算法的结果在数值上和真实结果吻合较好，但是当次主导参数和设定的典型值差别大时，辨识结果已经出现了明显偏差。

为了进一步说明这一点，可以将非典型参数情况下辨识得到的主导参数带回原系统进行检验。具体的检验方法是，在同一个母线节点上挂接两个负荷，其中一个的数值是真实值，另一个的参数数值则用辨识结果取代。采用同样的扰动，运行暂态稳定分析程序之后，观察真实参数下的系统和辨识参数下的系统的响应之间差异的大小，从而确认辨识结果的好坏。这种确认辨识结果好坏的方法是一

种常用的手段。

作为代表，观察无功响应在两种辨识结果下的区别：

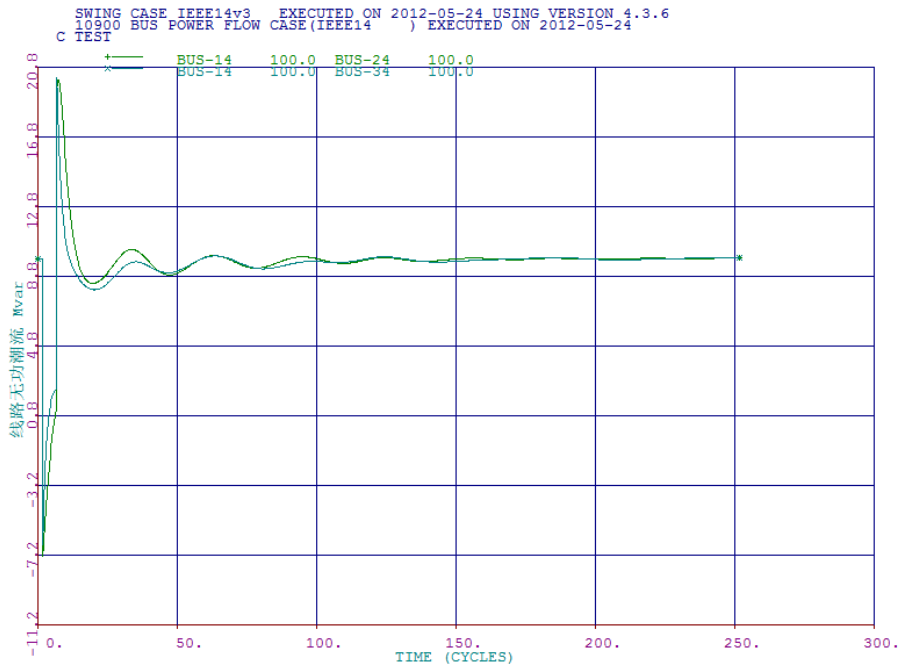


图 2.8 非典型次主导参数真实结果与辨识结果对比

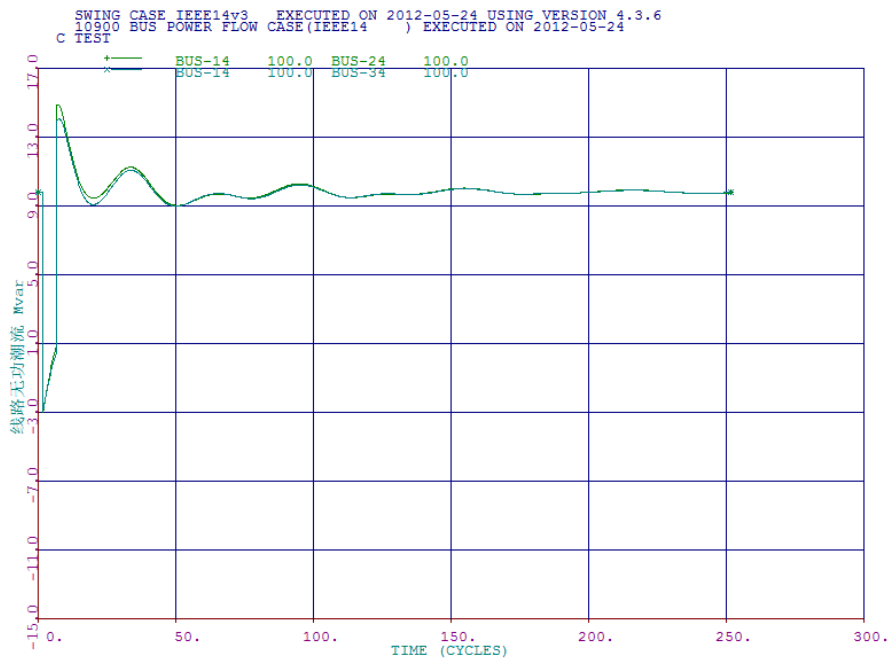


图 2.9 典型次主导参数真实结果与辨识结果对比

观察以上两幅图，可以看出：当次主导参数为典型值的时候，真实参数和辨

识结果参数模型的无功潮流响应非常接近，即原算法可以取得较为理想的辨识结果；而当次主导参数为非典型值的时候，真实参数和辨识结果参数模型的无功潮流响应差别较大，尤其是在故障发生期间的响应差别尤其明显，此时的辨识结果应用于实际电力系统会存在一定的风险。

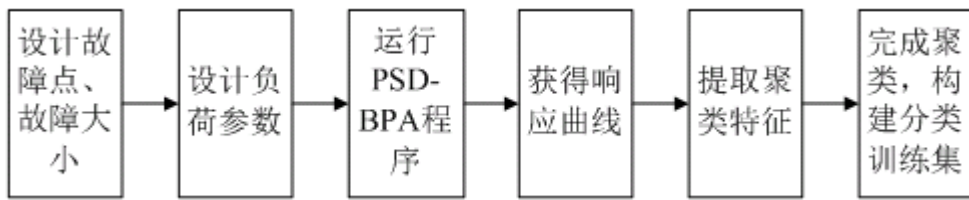
通过上述分析，可以看出在进行在线辨识算法的时候，仅仅考虑四个主导参数的辨识很有可能是不够的。但是，增加需要辨识的参数空间的维度面临许多困难。目前没有直接计算次主导参数的多项式算法，采用启发式搜索算法又会使得算法所需要的计算时间以指数规模显著增加，从而不能符合负荷参数辨识的实时性需求。

2.4 本文研究路线设计

因此，本课题考虑采用较为粗糙但是实时性特性好的聚类方法，不是算出本次主导参数的具体数值，而是将样本次主导参数划分为几类，也就是说改变了原来算法中次主导参数仅有典型值一类这种设计，从而在一定程度上提高辨识算法的准确性。

设计分为两步，第一步为样本分类未知聚类算法，用于构建训练样本集；第二步为新样本的分类过程，在第一步构建的训练样本集的基础上将测试样本的分类，用于观察算法的准确性。聚类算法的基础是特征的提取。观察图 9、图 10 中所示的两个负荷外特性响应，可以看出二者的主要区别集中在三个部分，一是故障发生期间有功功率以及无功功率的衰减时间常数，其表现是定子电抗越小，系统的衰减速度越快。二是故障发生瞬间和故障切除瞬间的无功尖峰幅值，其表现是定子电抗越小，无功尖峰幅值越高。三是故障发生后无功振荡模态的个数和振荡频率。以上三个区别，都可以作为聚类算法特征提取的切入点。

详细来说，本课题的仿真实验设计思路是：通过PSD-BPA仿真得到的负荷节点的外特性数据(例如电压与无功响应曲线)，提取外特性数据获得聚类算法需要的特征，并且根据特征对样本集中所有负荷的次主导参数大小进行分类。聚类完成之后，即获得了第二步新样本分类所需的已知分类的训练样本集。之后另取一部分样本作为测试集，以训练样本集为基础，采用分类算法对测试集的次主导参数加以分类。将采用辨识算法得到的负荷模型参数按如前所述的方法反带回 PSD-BPA程序，作为负荷模型的参数，比较真实参数模型和辨识参数模型在扰动响应上的区别，从而确定辨识算法的好坏。



课题两部分仿真实验的设计流程分别如下图所示：

图2.10-a 聚类算法部分

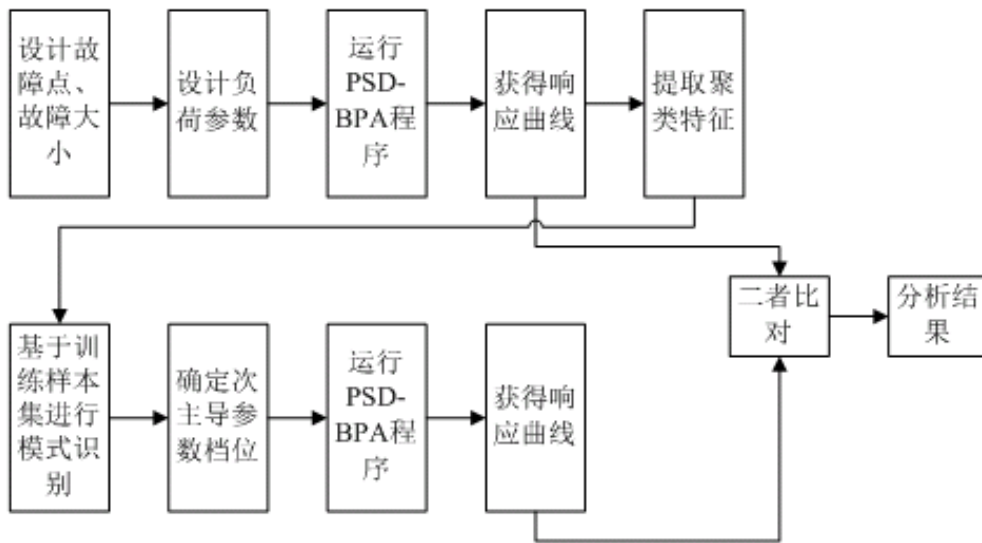


图 2.10-b 新样本分类过程

图 2.10 仿真实验设计思路

第 3 章 相关理论分析

3.1 综合负荷基本模型

通过初步的仿真实验,可以看出次主导参数定子电抗 X_s 与负荷响应的外特性之前存在明显联系。其中,由于无功尖峰幅值大小和负荷大小和故障大小间存在关联,不便于直接用于聚类所需的数值分析,而故障发生后无功振荡模态的个数和振荡频率的分析,需要取得较长时间的电网数据后才可以进行计算,不利于负荷模型参数的实时获取,故本课题中优先考虑进行的是故障发生期间有功功率以及无功功率的衰减时间常数的分析。

为了对衰减时间常数进行理论分析,在本课题中首先考虑到控制理论中的系统矩阵特征值分析法。电动机的系统模型可近似等效为一个三阶系统,列出系统的状态方程组表示后,将其线性化,则可以通过求取系统矩阵的特征值,取倒数求出系统的衰减、振荡的时间常数和幅值。具体计算方法如下所述:

在如 1.2 节所示的负荷模型中,电机学界所普遍采用的电动机部分的数学模型如下:

$$\begin{cases} \frac{dE_d}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E_d + (X - X')I_q] - 2\pi f_0(\omega_r - 1)E_q \\ \frac{dE_q}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E_q - (X - X')I_d] + 2\pi f_0(\omega_r - 1)E_d \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2T_j} (T_E - T_M) \end{cases}$$

系统的三个状态量分别为: d、q 轴电势 E_d 、 E_q , 二者共同表征电动机内电势的幅值和相位; 异步电机的标么转速 ω_r 。除了前文中提到的负荷模型中的一些相关参数, 其他物理量的物理意义如下所示:

f_0 : 我国电力系统工频 50Hz

I_d 、 I_q : d、q 轴电流

T_E : 电磁转矩

T_M : 机械转矩

T_j : 即电动机惯性时间常数 H_2

且由电机学，有如下表达式：

$$\omega_r = 1 - s$$

$$X = X_s + X_m$$

$$X' = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}$$

$$T_0' = \frac{X_m + X_r}{2\pi f_0 R_r}$$

$$T_E = E_d I_d + E_q I_q$$

$$T_M = (A\omega_r^2 + B\omega_r + C)T_0'$$

$$A\omega_0^2 + B\omega_0 + C = 1$$

$$T_J = \frac{2E_{WMS}}{MVABSE}$$

并有 I_d 、 I_q 的计算表达式，如下：

$$I_d = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_d - E_d) + X'(U_q - E_q)]$$

$$I_q = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_q - E_q) + X'(U_d - E_d)]$$

其中 A、B、C 为机械转矩系数，C 由 A、B 确定后通过标么转速初值与 A、B、C 的关系求得。MVABASE 为马达的基准功率值， E_{MWS} 为马达的动能。 U_d 、 U_q 是定子 d、q 轴电压。s 为滑差。

3.2 动负荷部分初值解算

以电机学中负荷模型的典型参数作为例子演示特征值分析流程。典型参数组如下所示：

$$E_{MWS}=20, MVABASE = 20, R_s=0.0116, X_s=0.295, X_m=3.50, R_r=0.02, X_r=0.12,$$

$$A=1, B=0$$

考虑与 PSD-BPA 软件同步，以下的所有计算所采用的均为标么值。
将上述典型参数代入表达式，有：

$$R_s = 0.0116$$

$$X = X_s + X_m = 0.295 + 0.576 = 0.871$$

$$X' = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r} = 0.295 + \frac{0.576 \times 0.12}{0.576 + 0.12} = 0.3943$$

$$T_0' = \frac{X_m + X_r}{2\pi f_0 R_r} = \frac{0.576 + 0.12}{2\pi \times 50 \times 0.02} = 0.5761$$

$$T_J = \frac{2E_{WMS}}{MVABSE} = 2$$

由于原数学模型是非线性模型，无法直接进行特征值分析，故必须对其进行局部线性化。考虑到实际实验中所采用的故障是小扰动故障，不会使得系统的状态量偏离稳定值太远，故可以进行局部线性化是合理的。局部线性化的具体方法即为泰勒展开。

为了进行局部线性化，首先必须计算系统三个状态量的初值。

由电机学原理，在进行状态量初值计算之前必须给出稳态电压值。为了辅助分析，本课题采用预先设计的系统，进行潮流计算后得出用于计算的电压值。此后根据求得的电压值进行初始滑差计算，代入潮流计算所算出的初始电压 $V=0.872$ ，根据电机学公式，有：

$$X_{rm} = X_r + X_m;$$

$$X_{sm} = X_s + X_m;$$

$$X_p = X_s X_r + X_s X_m + X_m X_r;$$

$$A' = R_s^2 + X_{sm}^2;$$

$$B' = 2R_s X_m^2;$$

$$C' = X_p^2 + R_s^2 X_{rm}^2;$$

$$A = \frac{A'P}{V^2} - R_s;$$

$$B = \frac{B'P}{V^2} - X_m^2;$$

$$C = \frac{C'P}{V^2} - R_s X_{rm}^2;$$

$$R = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A};$$

$$s_0 = \frac{R_r}{R};$$

注：此处的 A、B、C 是计算过程中的临时变量，与之前表示负荷模型性质的 A、B、C 不同。

之后，得到状态量 ω_r 初始值

$$\omega_0 = 1 - s_0 = 0.9892$$

系数

$$C = 1 - \omega_0^2 = 0.0215$$

初始时，状态量导数均为 0，认为将电压向量投影到 q 轴上，由于是初值计算，则可以认为：

$$U_q = V, U_d = 0;$$

联立以下四个方程进行状态量初值求解：

$$\begin{cases} \frac{dE_d}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E_d + (X - X')I_q] - 2\pi f_0 (\omega_r - 1)E_q \\ \frac{dE_q}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E_q - (X - X')I_d] + 2\pi f_0 (\omega_r - 1)E_d \\ I_d = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_d - E_d) + X'(U_q - E_q)] \\ I_q = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_q - E_q) - X'(U_d - E_d)] \end{cases}$$

将 d、q 轴电流的表达式带入上面两式，整理后有：

$$\begin{cases} \frac{X - X'}{R_s^2 + X'^2} R_s U_q = -(1 + \frac{X - X'}{R_s^2 + X'^2} X')E_d + [\frac{X - X'}{R_s^2 + X'^2} R_s - 2\pi f_0 T_0'(\omega_r - 1)]E_q \\ -\frac{X - X'}{R_s^2 + X'^2} X' U_q = -(1 + \frac{X - X'}{R_s^2 + X'^2} X')E_q + [2\pi f_0 T_0'(\omega_r - 1) - \frac{X - X'}{R_s^2 + X'^2} R_s]E_d \end{cases}$$

带入 U_q 在故障发生瞬间的值 0.872， U_d 初值 0，计算可得：

$$E_{d0} = 0.0896$$

$$E_{q0} = 0.8057$$

3.3 非线性微分方程差分化

带入稳态值，对原状态方程

$$\begin{cases} \frac{dE_d}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E_d + (X - X')I_q] - 2\pi f_0(\omega_r - 1)E_q \\ \frac{dE_q}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E_q - (X - X')I_d] + 2\pi f_0(\omega_r - 1)E_d \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2T_j} (T_E - T_M) \end{cases}$$

带入 d、q 轴电流的具体表达式：

$$\begin{cases} \frac{dE_d}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E_d + \frac{X - X'}{R_s^2 + X'^2} (-R_s E_q + X' E_d)] - 2\pi f_0(\omega_r - 1)E_q \\ \frac{dE_q}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E_q - \frac{X - X'}{R_s^2 + X'^2} (-R_s E_d - X' E_q)] + 2\pi f_0(\omega_r - 1)E_d \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2T_j} [-\frac{R_s}{R_s^2 + X'^2} E_d^2 - \frac{R_s}{R_s^2 + X'^2} E_q^2 + E_d \frac{1}{R_s^2 + X'^2} X' U_q \\ + E_q \frac{1}{R_s^2 + X'^2} R_s U_q - (A\omega^2 + B\omega + C)T_0] \end{cases}$$

记为

$$\dot{x} = f(x) + \bar{b}$$

其中

$$x = [E_d \quad E_q \quad \omega]^T$$

为系统状态方程的三个状态量。

而 f(x) 的具体含义为：

$$f(x) = \begin{cases} -\frac{1}{T_0} (1 + \frac{X - X'}{R_s^2 + X'^2} X') E_d + [\frac{1}{T_0} \frac{X - X'}{R_s^2 + X'^2} R_s + 2\pi f_0] E_q - 2\pi f_0 \omega_r E_q \\ -[2\pi f_0 + \frac{1}{T_0} \frac{X - X'}{R_s^2 + X'^2} R_s] E_d - \frac{1}{T_0} (1 + \frac{X - X'}{R_s^2 + X'^2} X') E_q + 2\pi f_0 \omega_r E_d \\ \frac{1}{2T_j} [-\frac{R_s}{R_s^2 + X'^2} E_d^2 - \frac{R_s}{R_s^2 + X'^2} E_q^2 + E_d \frac{X' U_q}{R_s^2 + X'^2} + E_q \frac{R_s U_q}{R_s^2 + X'^2} - \omega^2 T_0] \end{cases}$$

将 f(x) 简记为

$$f(x) = \begin{cases} A_1 E_d + A_2 E_q + A_3 \omega_r E_q \\ A_4 E_d + A_5 E_q + A_6 \omega_r E_d \\ A_7 E_d^2 + A_8 E_q^2 + A_9 \omega_r^2 + A_{10} E_d + A_{11} E_q \end{cases}$$

根据以上计算出的稳定点，对于 $f(x)$ 在稳定点进行泰勒级数展开

$$f(x) \approx \begin{cases} A_1 E_{d0} + A_2 E_{q0} + A_3 \omega_{r0} E_{q0} + A_1 \Delta E_d + (A_2 + A_3 \omega_{r0}) \Delta E_q + A_3 E_{q0} \Delta \omega_r \\ A_4 E_{d0} + A_5 E_{q0} + A_6 \omega_{r0} E_{d0} + (A_4 + A_6 \omega_{r0}) \Delta E_d + A_5 \Delta E_q + A_6 E_{d0} \Delta \omega_r \\ A_7 E_{d0}^2 + A_8 E_{q0}^2 + A_9 \omega_r^2 + (2A_7 E_{d0} + A_{10}) \Delta E_d + (2A_8 E_{q0} + A_{11}) \Delta E_q + 2A_9 \omega_{r0} \Delta \omega_r \end{cases} \quad (*)$$

将(*)式记为

$$A_0 + Cx$$

采用 matlab 自带的 eig 函数，即可分析 C 矩阵的特征值。

首先考虑的是观察其特征值，分析从理论上系统的扰动响应应该是由哪些模态组成的。

实例参数组所得的特征值结果如下所示：

-10.5322 + 7.5056i	0	0
0	-10.5322 - 7.5056i	0
0	0	-11.1538

可以看出，原系统的响应特征由一个二阶衰减振荡模态和一个一阶衰减模态组成。考虑到二阶模态离原点较远，故在故障发生期间其特性相较一阶衰减模态显著性差。可以认为系统在故障发生期间主要体现出一阶衰减模态的衰减时间系数属性。而从理论角度分析，衰减时间常数的值，即为 C 矩阵特征值的负倒数。

考虑实际参数的范围，取定子电抗 X_s 的值从 0.095 到 0.295，间隔 0.01 取点，绘制出代表系统的一阶衰减环节的特征值随着定子电抗变化的曲线图，如下图所示：

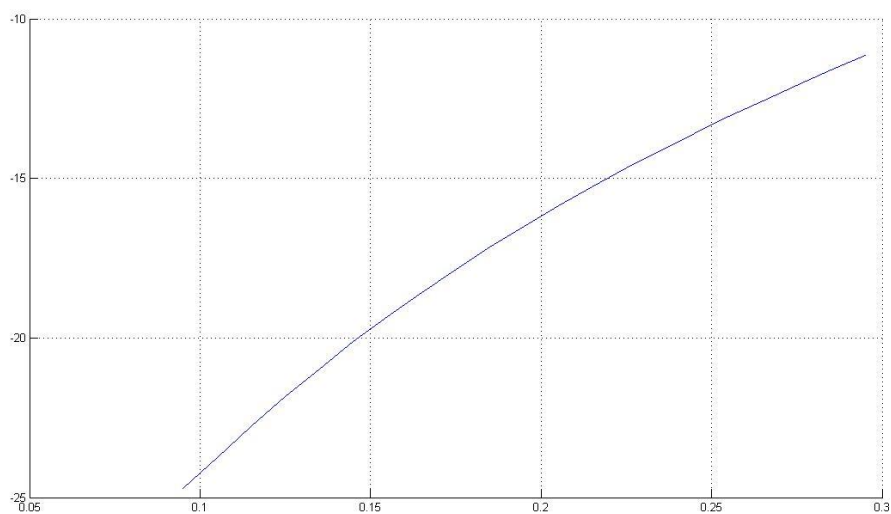


图 3.1 特征值-定子电抗关系图

观察上图，可以看出系统矩阵特征值随着定子电抗的减小呈现出非线性减小的关系，且定子电抗越小，其减小的斜率越大。即定子电抗越小，系统的衰减速度越快，并且这种衰减速度的变化不是线性的。这一理论分析结果和初步的实验现象是吻合的，并为后续的实验工作提供了理论基础。

第 4 章 聚类算法与分类算法基础

4.1 算法介绍

本课题最终选择的聚类算法为 C 均值聚类算法，获得样本集之后的分类方法为 k 近邻法。

聚类问题的基础是原始信息的获取，以及分类特征的选择。在本课题中，原始信息就是 WAMS 系统所采集的负荷母线在扰动情况下的电压、有功功率、无功功率等响应曲线，如何在原始信息的基础上提取并构建聚类 and 后续分类算法所需要的样本集，也即是如何在原始信息的基础上计算出负荷的衰减时间常数的问题，将在 5.3 节进行介绍。

在介绍算法选择的原因和应用原理之前，首先简单阐述 C 均值聚类算法和 k 近邻分类算法的原理^[16]。

4.1.1 C 均值算法

C 均值算法是一种基于样本之间相似程度来进行聚类的聚类方法。也就是说，这种方法根据样本之间的某种距离或者相似性度量的关系来定义聚类，把这种相似的样本归为同一类，而把不相似的样本分到不同的类中。C 均值聚类算法的基本思路是，想办法将样本集合划分为 c 个类别，使得用这 c 个类别的每类内部的平均值来代表此类所有样本的时候所得到的在相似度意义下的误差最小。

该算法的重要标准就是最小误差平方和准则。

若 N_i 是第 i 类聚类 Γ_i 中的样本数目，y 代表样本， \mathbf{m}_i 是这类样本的均值，即有

$$m_i = \frac{1}{N_i} \sum_{y \in \Gamma_i} y$$

把每一类中的各样本与均值间的误差平方和相加后得到总的误差平方和

$$J_e = \sum_{i=1}^c \sum_{y \in \Gamma_i} \|y - m_i\|^2$$

J_e 即是误差平方和的聚类准则。最小化 J_e 的聚类就是在误差平方和准则下产生的最优聚类结果。 J_e 无法用解析的方式最小化，只能通过迭代的方法，不断调整样本类别的归属来求解。

调整每个样本的归属都应该遵循如下的准则：

如果把任一样本 y 从第 i 类聚类 Γ_i 中移到第 j 类聚类 Γ_j 中，其他类别不受影响，此时两类的均值分别变为：

$$m_i' = m_i + \frac{1}{N_i - 1} [m_i - y]$$

$$m_j' = m_j + \frac{1}{N_j + 1} [y - m_j]$$

此时，两类的类间误差平方和也分别变为

$$J_i' = J_i + \frac{N_i}{N_i - 1} \|m_i - y\|^2$$

$$J_j' = J_j + \frac{N_j}{N_j + 1} \|m_j - y\|^2$$

由于其他类不变，则总误差平方和的变化仅取决于以上两类的误差平方和的变化情况。 y 从第 i 类聚类 Γ_i 中移到第 j 类聚类 Γ_j 中，显然会导致第 i 类聚类 Γ_i 的误差平方和变小，而第 j 类聚类 Γ_j 的误差平方和变大。判断这一移动是否优化了整体结果的标志即是判断第 i 类聚类 Γ_i 的误差平方和的减小量是否大于第 j 类聚类 Γ_j 的误差平方和的增加量。

如果有

$$\frac{N_i}{N_i - 1} \|m_i - y\|^2 > \frac{N_j}{N_j + 1} \|m_j - y\|^2$$

那么这一步移动就优化了整个结果，则这一步移动可以进行，否则就不能进行。

C 均值算法的步骤如下：

(1) 按照一定方法将样本划分为 c 类，记为 Γ_i , $i=1, \dots, c$ ，并计算每类的平均值 m_i 和总体误差的大小 J_e 。

(2) 抽出一个样本 y ，假设此时有 $y \in \Gamma_i$ 。

(3) 如果第 i 类只有一个样本，就回到上一步，否则继续。

(4) 计算 ρ_j ，公式如下：

$$\rho_i = \frac{N_i}{N_i - 1} \|m_i - y\|^2$$

$$\rho_j = \frac{N_j}{N_j + 1} \|m_j - y\|^2, j \neq i$$

(5) 找寻 ρ_j 中的最小的数，记此时 $j=k$ ，如果 ρ_k 比 ρ_i 要小，则将 y 从第 i 类聚类中移到第 j 类聚类中。

(6) 再算一次各类平均值和总误差。

(7) 如果连续迭代一定次数后误差不改变，就终止算法，不然就回到(2)。

可以看出这是一个局部搜索算法，不能保证找到全局最优解，优化的结果受到初始划分和样本调整顺序的影响。C 均值算法的样本初始划分的并没有公认最好的方法，通常来说是先选择 c 个样本点作为初始核心，根据相似度将其他样本划分到各类中，初始样本点的选择方法也不是唯一的，一般有：根据经验选择代表点；将全部数据随机分类；用“密度”法选择代表点；按样本天然的排列顺序或者将样本随机排序并取前 c 个点作为代表点等等。

在本课题中，由于有理论分析作为基础，可以考虑将理论分析的结果作为代表点，在第 5 章中会说明，理论分析和实际仿真结果之间存在一定差异，但差异并不是很明显，故可以将理论分析的结果作为初始代表点，从而提高算法的效率和准确性。

选定初始代表点之后，就开始对所有样本进行初始划分，常用的初始划分方式很多，本课题选择的方法是：在代表点选定之后，每个代表点作为一类，对剩下的样本，计算它们和代表点的相似度，并分到最近的代表点所成的类中，然后重新对这类中的所有样本点求平均值，作为新的代表点。这样依次计算完所有的样本点之后，初始划分就完成了。

4.1.2 k-近邻法及应用

由于电网负荷的数据是实时获取更新的，不可能也没有必要在每次获得新的电网数据之后都重新运行一次聚类算法对所有样本进行分类。本课题的思路是在获取足够量的样本集之后，以该样本集作为训练样本集，通过 C 均值聚类算法对训练集进行聚类，从而获取分类准则和各样本的类别。每一类的样本对应的就是次主导参数数值的一个档位，以此作为之后次主导参数聚类的依据。之后获取的未知类别的电网负荷数据之后，通过分类算法将该样本划归到一类中，从而获取其定子电抗的具体数值。

k-近邻法是针对最近邻分类方法的改进。最近邻分类方法的基本思路是，有了一些已知类别的样本集之后，对于一个未知类别的新样本点，把它逐一与已知样本进行比较，找出距离其最近的已知样本，以这个已知样本的类别作为新样本的类别。在实际应用中，由于样本数值的随机性和干扰的问题，

把决策建立在一个最近的样本上有一定风险。因此采用投票机制，即选择 k 个离新样本点最近的训练样本点，用它们的类别投票决定新样本的类别，这种方法被称为 k -近邻法。按照数学方法可以将 k -近邻法进行如下表述：

通过 C 均值聚类算法计算之后，设有 N 个训练样本属于 c 个类 $\omega_i, i=1, \dots, c$ ，考察新样本 x 在训练样本集中的前 k 个近邻，设其中有 k_i 个属于 ω_i 类，则 ω_i 类的判别函数为

$$g_i(x) = k_i, i=1, \dots, c$$

决策规则为

$$\text{若 } g_k(x) = \max_{i=1, \dots, c} g_i(x), \text{ 则 } x \in \omega_k$$

4.2 应用原理

在实际应用中， C 均值算法的 c 值和 k 近邻法的 k 值均需要进行选择。其中， k 值的选择可以等到获取足够的样本集后通过实验的错误率来进行调整，将会在第 5 章中设计，下面首先介绍的是 c 值的获取方式。

4.2.1 C 均值算法 c 值的选择

首先是 c 值的选择，以及 c 均值算法中初始样本点的选取。观察第 3.1 节中绘制的特征值-定子电抗关系图，可以看出二者之间的关系并不是线性的，为了更直观地观察这一现象，绘制特征值增量随着定子电抗的增大而变化的关系曲线：

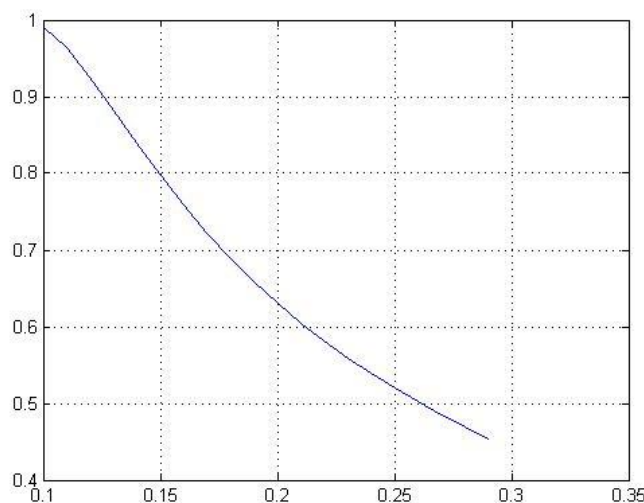


图 4.1 特征值增量-定子电抗关系图

可以看出，特征值增量随着定子电抗的增加是逐渐减小的。也即是说，定子电抗越小，其变化对于系统特征值的影响越大，亦即是其变化对于负荷辨识结果的准确性的影响也越大。从这一角度来看，在进行定子电抗分类的时候，定子电抗小的地方档位应该更密集，而定子电抗大的地方档位应当更稀疏。从而使得相邻各档间特征值之差较为均匀。

在本课题中，确认分档模式的思路如下：

由于特征值-定子电抗关系曲线是通过离散取点计算出来的，每个点的定子电抗之间的差别是 0.01，即自变量的取值为：

$X_s=0.095:0.01:0.295$ 共 21 个采样点。为了下文叙述的简便，将这些定子电抗值对应的采样点分别记为 $X(i)$ ， $i=1,\dots,21$ 。

分档计算的程序流程图：

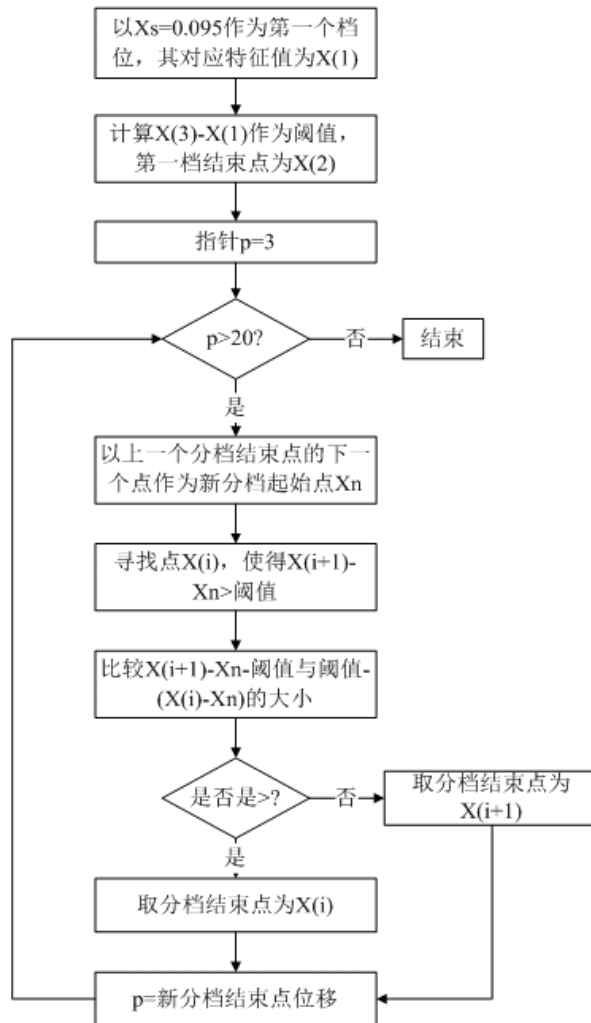


图 4.2 分档程序流程图

举例来说，令 $X_s=0.095$ 对应的特征值为 $X(1)$ ，有 $X_s=0.095+0.01 \times 2=0.125$ 对应的特征值为 $X(3)$ ，尝试设置阈值为 $X(3)-X(1)= 1.9550$ 。则有第一个分档点为 $X(1)$ ，对应定子电抗 0.095 ，下一个分档点为 $X(3)$ ，对应定子电抗为 0.115 。

进行迭代计算时，算出 $X(6)-X(3) > 1.9550$ 。

此时，计算出：

$$1.9550 - X(5) - X(3) = 0.1481 < X(6) - X(3) - 1.9550 = 0.6906$$

从而可以得出下一个分档点为 $X(5)$ ，对应定子电抗为 0.135 。

如此循环计算，可以算出在这种算法和阈值选取方法下分档，一共可以获得 8 个分档点，分别是 $X(1), X(3), X(5), X(7), X(10), X(13), X(17), X(21)$ 。对应的定子电抗为 $0.095, 0.115, 0.135, 0.155, 0.185, 0.215, 0.255, 0.295$ 。

如上所述的分档结果在数量和分布上还是较为合适的，因此刚开始尝试选取阈值为 $X(3)-X(1)$ 是较为合适的。

4.2.2 总体实验流程设计

如前所述，可以大致画出本课题的总体实验流程思路，如下图所示：

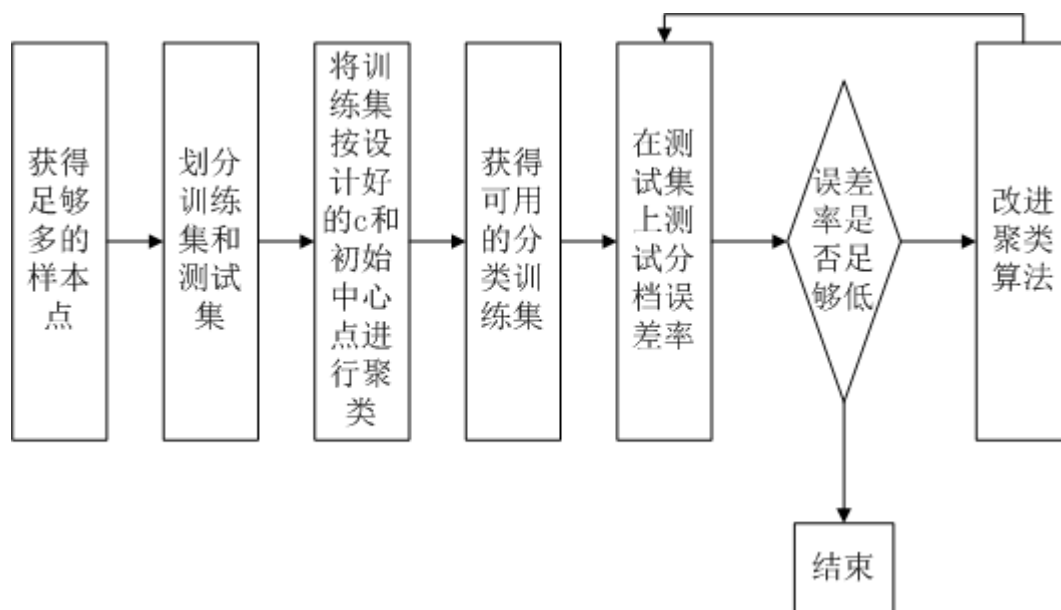


图 4.3 实验设计思路

后续的大规模实验将总体按此思路进行。

第 5 章 仿真分析

5.1 实验准备

5.1.1 仿真实验设计

聚类算法实现首先需要获取足够数量的样本集，从而用于克服噪声和数值计算误差的影响。

获取样本集时，为了简化实验过程，不改变系统的稳态工作点，即系统的潮流计算仅需进行一次即可。因此主要需要设计的是暂态稳定分析程序。其中两部分内容是实验设计所需要考虑的重点，一为故障选择，二为负荷节点位置选择。

PSD-BPA 中关于故障设计的程序语句如下图所示：

```
. (10)12#母线5周波三相金属短路故障
.故障线路始端 故障线路终端 故障类型 时间 故障电阻 故障电抗 故障形式
LS BUS-12 100. BUS-6 100 9 50. .50000 10 0 3 1 1 .00 .00
LS BUS-12 100. BUS-6 100 -9 65. .50000 10 0 3 1 1 .00 .00
```

图 5.1 PSD-BPA 故障设计语句

从上图可以看出，一次扰动是有两条语句确定的，第一条表示故障发生的时间，第二条表示故障结束的时间，单位均为 ms。本课题中所指的故障发生期间就是这段时间，在外特性上，其始末端的表现是有功功率和无功功率的骤降与骤升。

其中两处 BUS-*代表故障发生处的选择，即故障发生在两个母线节点的连接处。实际实验过程中，发现所选择的两个母线节点上不能直接挂接发电机，否则会出现衰减时间常数计算的结果异常，例如所计算出的衰减时间常数为负的情况。同时，所选择的故障发生点距离发电机越远，则其仿真结果越接近理论分析。

考虑选择远离发电机的点对于实际应用是符合的。其一，本课题构建的系统为小系统，而实际的电力系统要远大于实验系统，故大部分负荷节点和电力系统发电机之间会间隔复杂的网络连接，从而不受发电机的干扰，故在实际系统中的负荷母线采样，基本上都可以获得远离发电机的负荷数据。其二，本课题的实验系统在 PSD-BPA 中选择的发电机是不带二次调速的，仅带有一次调频，即发电机的输出频率在其输出功率变化的情况下并不是不变的，其有功功率-频率特性曲线如下图所示：

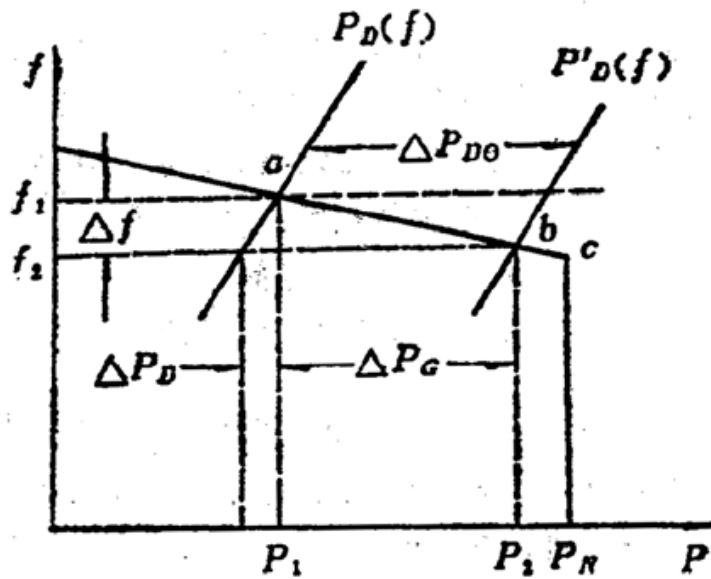


图 5.2 电力系统一次调频

这样的系统，在发生故障导致系统输入、输出功率不平衡的时候，系统的频率不可避免地会发生偏移，尤其是当故障发生在供给电功率的发电机端时，故障所带来的功率突变对发电机的影响比较严重，系统的频率变化也较为明显，故在靠近发电机的节点处系统自身外特性的体现会受到较为严重的干扰。而真实的电力系统，其发电机组往往是带有二次调频的，其功频特性如下图所示：

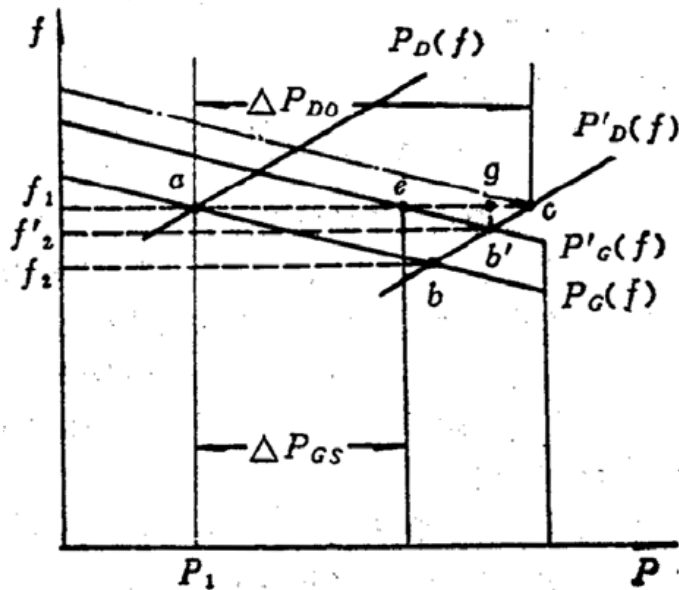


图 5.3 电力系统二次调频

这样的系统，当功率出现失衡时，对于同样的功率变化，系统自身的频率变化不是那么明显，因此可以削弱发电机端的一场情况。

故障类型为电力系统中常见的复故障。

故障的时间长度和故障电阻以及故障电抗之间需要配合，才能达到较好的仿真效果。偏离系统稳定点太远时，系统会呈现出强非线性，故本课题的实验考虑采用的是小扰动，即电压、功率跌落幅值小。为了实现这一点，必须设置较大的故障电抗，使得系统呈现明显感性。在实际电力系统中，由于扰动常发生在较低等级的负荷母线，反映到建模位置的较高等级负荷母线时，由于输电线上分布的电感，使得故障阻抗呈现出明显的感性成为一种正常现象。故本课题的所采取的实验设计方法是合理的。由于采用了小扰动，系统的频率跌落小，从而外特性响应曲线的变化范围小。尤其是针对定子电抗较大的情况，在 PSD-BPA 的计算功能并不十分完善的情况下，很容易在响应曲线中出现台阶和水平线的现象，这样的曲线对于衰减时间常数的确定造成了较为明显的阻碍。本课题所采用的对应方法即是延长故障时间到 15ms，从而平滑数值计算的误差，同时提取更多的系统信息。这一情况对于实际系统的应用如何处理还需要进一步考虑。

5.1.2 特征选择和提取方法

由前文所述，提取聚类分析用的特征时优先考虑的是故障期间有功以及无功的衰减时间常数。

针对是进行无功分析还是有功分析这一问题，在本课题实验的初期，采用的方法是用 matlab 自带的 cftool 工具箱对故障期间的有功功率时间响应曲线进行直接的数值拟合。

但是在之后大规模进行不同故障点的测试时，发现故障期间的有功响应曲线并不一定是初步实验所获取的曲线模式，而出现了多种响应模式，其中比较典型的故障期间有功响应分为正常情况、异常情况和衰减情况三类，其各自的有功响应曲线如下图所示：

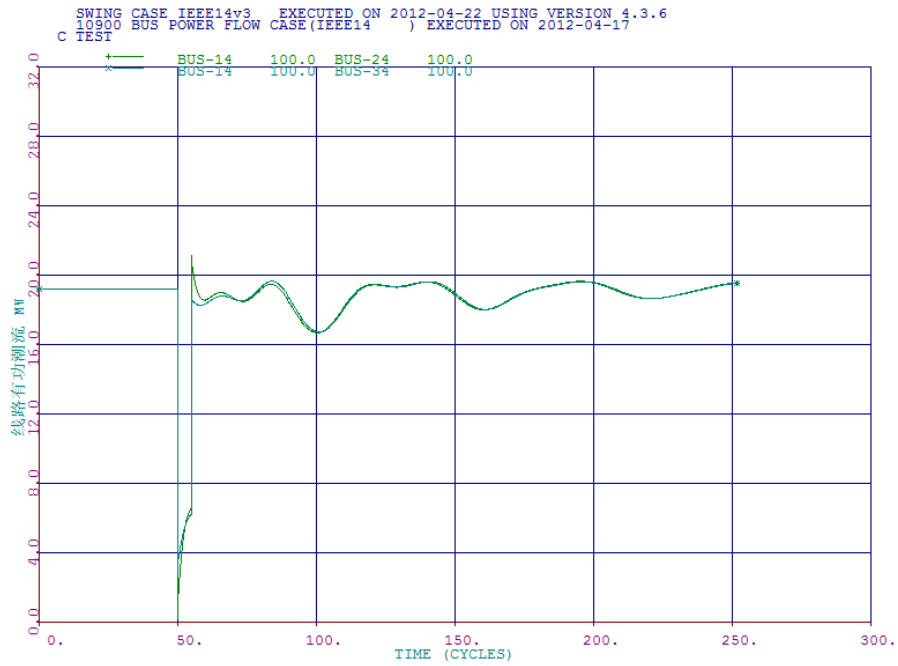


图 5.4 理想情况

此种情况下响应曲线和初步实验相同，便于提取整个系统在故障期间的衰减时间常数。

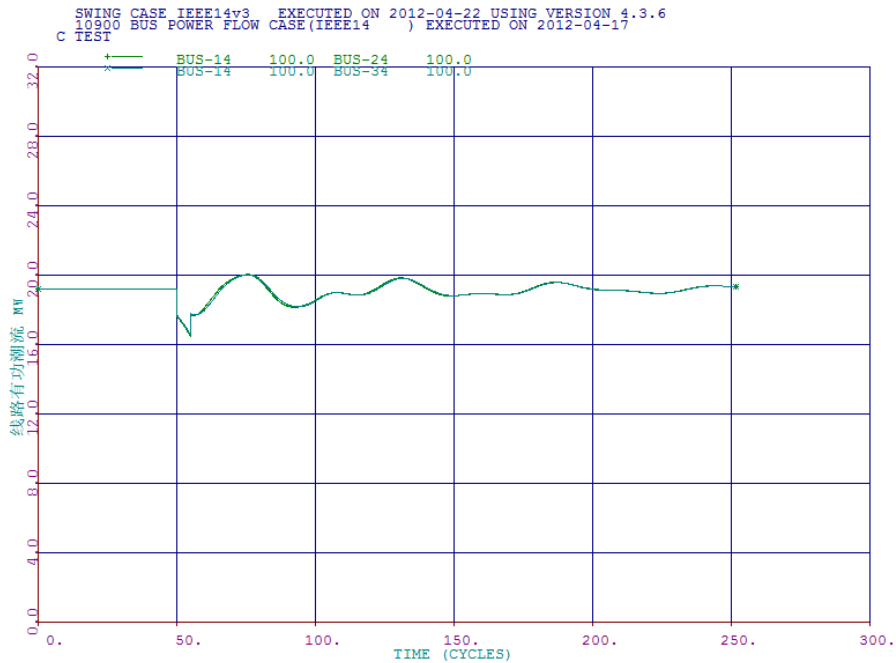


图 5.5 异常情况

此种情况下响应曲线和初步实验相比沿水平轴翻转。

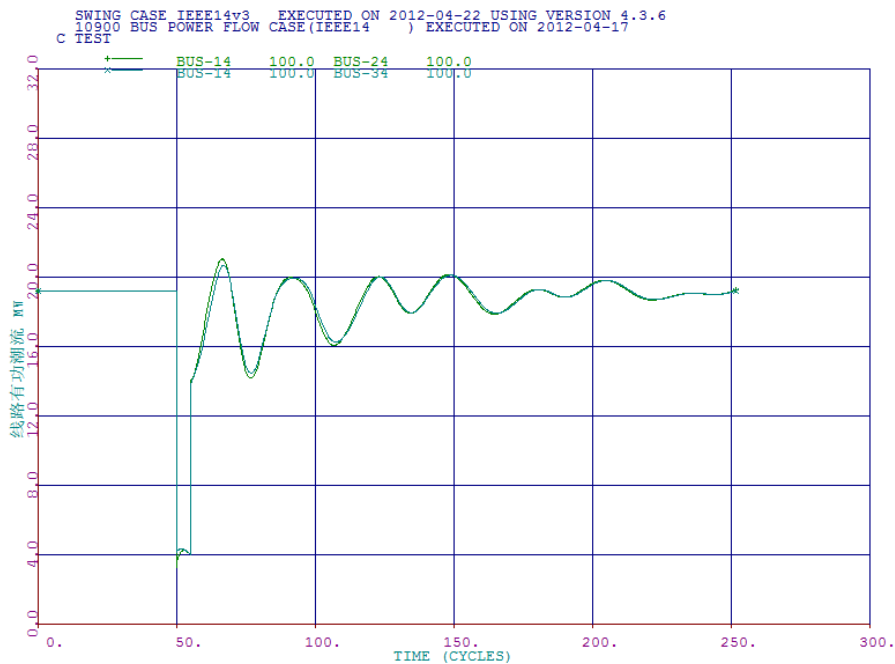


图 5.6 衰减过度情况

此种情况下响应曲线先增加后减少。

发生上述情况的原因，初步分析可能是因为静负荷的影响过于明显，系统的衰减速度过快导致振荡模态提前体现，也有可能是因为故障期间电压的变化导致有功功率的变化。同时，相对于无功功率来说，有功功率因为牵涉到电动机功率传递的问题，机理要更为复杂，更加难以分析和调整。

考虑到上述情况，最后在仿真实验获取数据集的时候放弃了有功功率响应曲线的分析，而转为采用对无功功率在故障期间响应曲线的分析。这是由于无功功率在这段期间的响应更便于分析。

同时，为了剔除电压在故障期间的变化对于无功功率衰减时间常数分析的影响，本课题最终采用 matlab 中系统辨识工具箱。即“`ident`”命令。下面简要对本课题的使用方法进行描述：

系统辨识有三大要素，一为输入输出数据，本课题中，输入数据位负荷的输入电压，输出数据位负荷的无功功率，考察二者之间的关系，从而确定系统的衰减时间常数；二为模型类的选择，本课题中选择的是是一阶的惯性环节，这一选择与故障发生期间主要体现的是一阶衰减这一现象是吻合的，实际辨识也验证了这一模型选择方式的正确性；三为评价准则，而评价准则的计算在系统辨识工具箱中自带，具体会在后文提到。

Matlab 系统辨识工具箱的主界面图如下图所示：

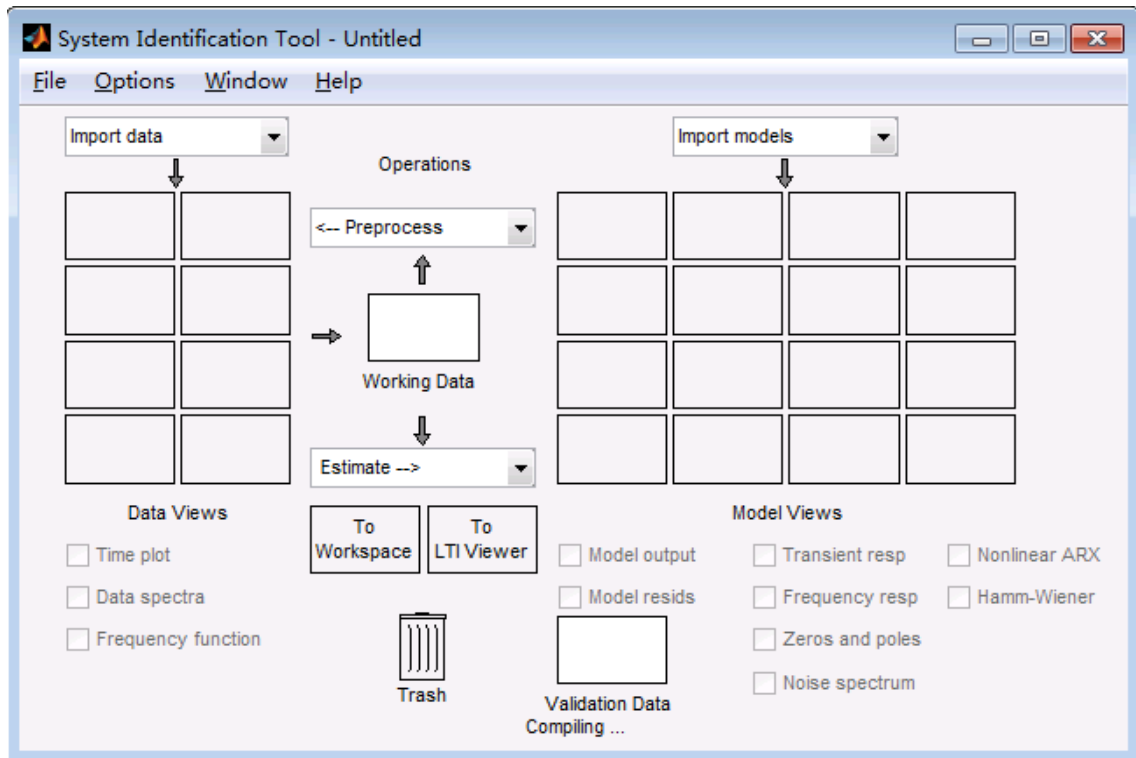


图 5.7 主界面

输入需要辨识的数据(并调整采样时间与 WAMS 系统实际采样系统相同，同为 0.004s)。如下图所示：

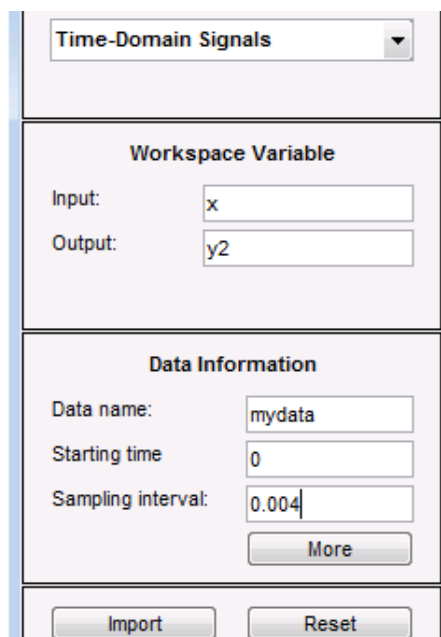


图 5.8 数据导入

之后选择 **Process models**，即过程仿真。由于在故障发生期间主要体现的是一阶衰减环节，故在选择过程仿真模型时仅需选择一节惯性环节模型即可。主要需要观察的就是下图中 **Tp1** 的辨识。

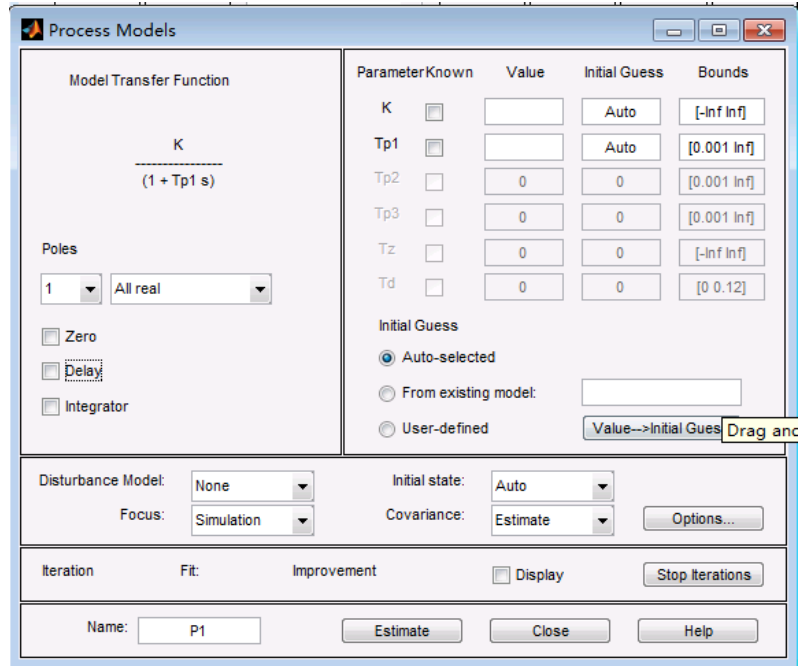


图 5.9 辨识模型选择

直接进行辨识后会得到如下所示的辨识结果图：

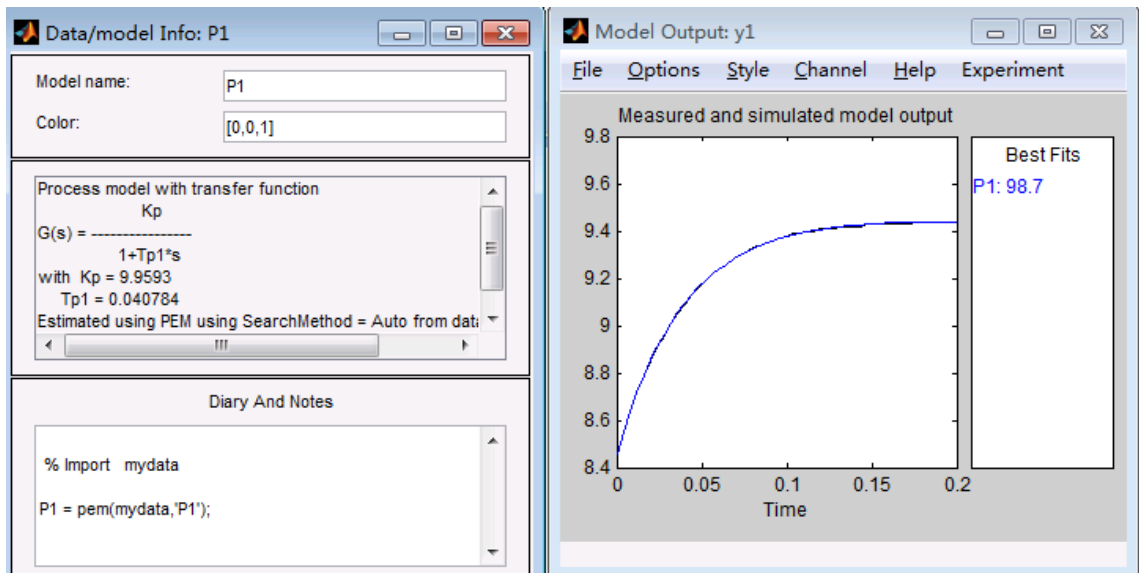


图 5.10 辨识结果

由于进行拟合时，拟合结果和取点有一定关系，如果选取的区间不合适，会导致拟合结果和真实值相差太远。确定该次辨识结果是正确的方法即是观察有图

模型输出的 Best Fits 参数，该参数的最大值为 100，即辨识模型与输入输出数据完全吻合。实际辨识中由于数值计算误差和仿真数据误差等问题，完全吻合很难达到。本课题中设定如果参数在 90 以上，则认为这次系统辨识的结果是可用的，否则就重新选取辨识区间或者改用稳定性更好的辨识算法(变换辨识算法可以在 Process Models 功能里选择)。进行区间选择调整后，所有一阶衰减模型的 Best Fits 参数都能达到 90 以上，这也说明了之前选择该模型的合理性。

以上，即是本课题的聚类算法和后续分类算法的特征选择和提取方法的概述。

5.1.3 增加负荷节点位置

由于理论分析的简化性，理论分析的结果和仿真实验之间还是存在一定的差异，理论计算出的定子电抗和衰减时间常数之间的关系并不能直接用于实际。因此，本课题选择采用聚类方法这一非监督性模式识别的方法来获取定子电抗的存档准则。

为了验证其实用性，首先要获取足够的样本集。由于本课题采用的实验系统偏小，能够增加的故障发生点数量有限，因此需要通过增加测试的负荷节点的位置来获取更多数量的样本点。

负荷节点的安放较故障点的设计要简单很多，其分为三个步骤：

前两个步骤的改动涉及到潮流计算，需要改动 PSD-BPA 的潮流计算文件，具体内容如下：

首先是交流节点数据卡，如下：

```
B      BUS-24   100  19.24  9.77
B      BUS-34   100  19.24  9.77
```

分别设计了两个负荷节点，其中上图右边的两个数字所表示的是恒定有功负荷以及恒定无功负荷。

第二步是对称线路数据卡

```
L      BUS-12   100  BUS-24   100          .02001
L      BUS-12   100  BUS-34   100          .02001
```

表示的是符合接入的母线位置。

设计完负荷节点后，需要运行潮流程序，观察负荷节点在稳定时其输入电压是否过低(即是否低于 0.85 标么值)。如果没有，则这组负荷节点设计的是合理的。如果低于该值，则认为线路电压不足，说明恒定负荷过大，需要减小恒定负荷之后再行尝试。

第三步的改动涉及到 swi 卡的改动，简单来说就是改变其线路输出：

```
LH
L      BUS-12  100  BUS-24  100          3  3
L      BUS-12  100  BUS-34  100          3  3
```

如上图，第一个“BUS-”后加上接入负荷的母线编号即可。
 以上即完成了测试负荷位置的变更。之所以采用变更输出的负荷位置的方式而不是直接添加，是考虑到当输出的负荷信息过多的时候输出文件会过大，文件处理速度减慢。

5.2 理论分析的仿真验证

在进行后续的分类算法之前，首先需要验证的是之前理论分析的合理性。由于单次仿真实验的随机性，在验证理论算法时选取了进行六组实验并取平均的方法。实验概括如下：

选取 12 号节点为负荷位置，选取 6 种不同的故障并选取 4 组不同的定子电抗参数，分别仿真并进行系统辨识后得到各种情况下其无功功率在故障发生期间的衰减时间常数，并取倒数计算其对应特征值。其结果如下所示：

故障位置	定子电抗值			
	0.095	0.145	0.195	0.295
9vs7	23.31872	18.9883	15.96781	9.020386
12vs13	25.28765	20.53009	17.16561	12.61925
9vs14	24.09	19.31658	16.31029	11.52459
13vs14	24.09	19.31658	16.31029	11.52459
10vs11	23.26176	19.36558	14.85641	10.51845
9vs10	23.26176	19.36558	14.85641	10.51845
均值	23.88498	19.48045	15.91114	10.95429

上表中的故障位置表示的是故障会发生在两个负荷母线的连接线之间，如 9vs7 表示故障发生在 9 号母线和 7 号母线的连接线之间。

根据上述结果，将仿真实验的结果与之前理论分析的结果进行对比，可以绘制出如下曲线(其中蓝色曲线为理论值，红色曲线为仿真结果经过系统辨识之后所求得的值)：

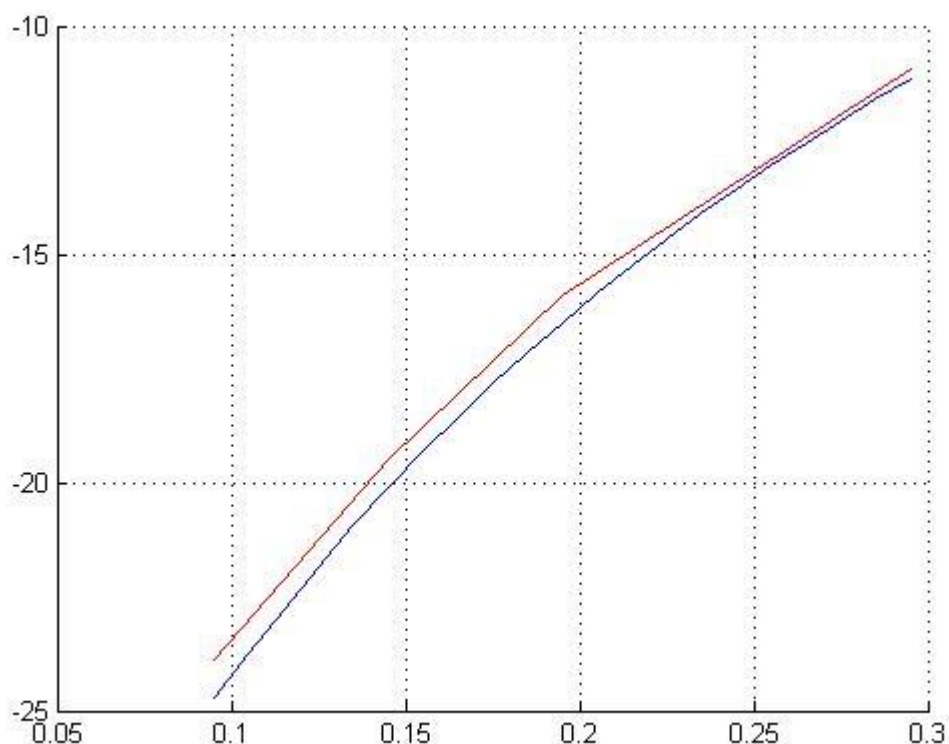


图 5.11 理论分析-仿真结果对比

观察上述结果，可以看出理论分析的结果和仿真结果基本是吻合的。之间存在的差异可能是因为系统本身是非线性的，而在理论分析的时候进行了局部线性化的处理，因此会存在如图所示的差异。计算过程中的误差也可能导致差异的存在。这一结果说明了理论分析的正确性，以及通过衰减时间常数对定子电抗进行辨识的合理性。

由上述结果可以看出，采用聚类的方法进行定子电抗参数的辨识是可行的。

5.3 样本点获取

上文介绍了负荷位置的设计方式以及扰动的的设计方式，通过这两种设计的组合可以获得足够的样本点。

本课题中，一共取了 4 组负荷位置，每组负荷位置中运行 6 种扰动。在每个负荷位置上均挂机两个负荷，和之前实验的形式一样，这是由于每次显示让个负荷的响应曲线易于对比并发现仿真过程是否出现了异常。两个负荷的定子电抗参数一共有 8 组，选取的是 4.2 节计算出来的 8 档电抗。这种选取方式是出于实验

目的性的考虑。大规模仿真实验的目的首先是为了计算聚类算法对于各档位定子电抗的区分度好坏。由于最终聚类算法将分为 8 档，而定子电抗数值并非分档点的负荷参数一定不能被分到真实值的档位，在这个环节考虑其聚类分档情况暂时是没有意义的，因而首先获取的是电抗值为分档点的负荷数据的分档情况。

通过仿真实验后可获得如下样本数据：

故障号	负荷位置	节点参数			
		0.095		0.115	
		时间常数	特征值	时间常数	特征值
9vs7	BUS12	0.042884	23.31872	0.049468	20.21509
12vs13	BUS12	0.039545	25.28765	0.044974	22.23507
9vs14	BUS12	0.041511	24.09	0.047959	20.85114
13vs14	BUS12	0.041511	24.09	0.047959	20.85114
10vs11	BUS12	0.042989	23.26176	0.047394	21.09972
9vs10	BUS12	0.042989	23.26176	0.047394	21.09972
9vs7	BUS14	0.044442	22.50124	0.049004	20.4065
12vs13	BUS14	0.041238	24.24948	0.046585	21.46614
9vs14	BUS14	0.044442	22.50124	0.043788	22.83731
13vs14	BUS14	0.038839	25.74732	0.043788	22.83731
10vs11	BUS14	0.043772	22.84565	0.049339	20.26794
9vs10	BUS14	0.044442	22.50124	0.049339	20.26794
9vs7	BUS4	0.044582	22.43058	0.049045	20.38944
12vs13	BUS4	0.04451	22.46686	0.048765	20.50651
9vs14	BUS4	0.043324	23.08189	0.048448	20.64069
13vs14	BUS4	0.043324	23.08189	0.048448	20.64069
10vs11	BUS4	0.043803	22.82949	0.047454	21.07304
9vs10	BUS4	0.043803	22.82949	0.047454	21.07304
9vs7	BUS5	0.042144	23.72817	0.04895	20.42901
12vs13	BUS5	0.037517	26.65458	0.039912	25.05512
9vs14	BUS5	0.041241	24.24771	0.044041	22.70611
13vs14	BUS5	0.041241	24.24771	0.044041	22.70611
10vs11	BUS5	0.043293	23.09842	0.04911	20.36245
9vs10	BUS5	0.043293	23.09842	0.04911	20.36245
故障号	负荷位置	节点参数			
		0.135		0.155	

		时间常数	特征值	时间常数	特征值
9vs7	BUS12	0.053378	18.73431	0.054556	18.32979
12vs13	BUS12	0.048778	20.50105	0.05029	19.88467
9vs14	BUS12	0.052046	19.21377	0.053066	18.84446
13vs14	BUS12	0.052046	19.21377	0.053066	18.84446
10vs11	BUS12	0.051935	19.25484	0.054636	18.30295
9vs10	BUS12	0.051935	19.25484	0.054636	18.30295
9vs7	BUS14	0.054911	18.21129	0.056029	17.8479
12vs13	BUS14	0.050568	19.77535	0.051267	19.50572
9vs14	BUS14	0.04758	21.01723	0.049821	20.07186
13vs14	BUS14	0.04758	21.01723	0.049821	20.07186
10vs11	BUS14	0.054913	18.21062	0.057156	17.49598
9vs10	BUS14	0.054913	18.21062	0.057156	17.49598
9vs7	BUS4	0.052257	19.13619	0.057347	17.4377
12vs13	BUS4	0.051433	19.44277	0.056176	17.8012
9vs14	BUS4	0.053401	18.72624	0.05636	17.74308
13vs14	BUS4	0.053401	18.72624	0.05636	17.74308
10vs11	BUS4	0.050611	19.75855	0.055137	18.13664
9vs10	BUS4	0.050611	19.75855	0.055137	18.13664
9vs7	BUS5	0.050143	19.94296	0.055911	17.88557
12vs13	BUS5	0.041751	23.95152	0.044838	22.30251
9vs14	BUS5	0.04793	20.86376	0.050752	19.70366
13vs14	BUS5	0.04793	20.86376	0.050752	19.70366
10vs11	BUS5	0.053027	18.85832	0.057005	17.54232
9vs10	BUS5	0.053027	18.85832	0.057005	17.54232
故障号	负荷位置	节点参数			
		0.185		0.215	
		时间常数	特征值	时间常数	特征值
9vs7	BUS12	0.060599	16.50192	0.06694	14.93875
12vs13	BUS12	0.056332	17.7519	0.058115	17.20726
9vs14	BUS12	0.05896	16.96065	0.06184	16.17076
13vs14	BUS12	0.05896	16.96065	0.06184	16.17076
10vs11	BUS12	0.065441	15.28094	0.067795	14.75035
9vs10	BUS12	0.065441	15.28094	0.067795	14.75035
9vs7	BUS14	0.065145	15.35037	0.070106	14.26411

12vs13	BUS14	0.05862	17.05902	0.058774	17.01433
9vs14	BUS14	0.054975	18.19009	0.058746	17.02244
13vs14	BUS14	0.054975	18.19009	0.058746	17.02244
10vs11	BUS14	0.065325	15.30808	0.068056	14.69378
9vs10	BUS14	0.065325	15.30808	0.068056	14.69378
9vs7	BUS4	0.061595	16.23508	0.068626	14.57174
12vs13	BUS4	0.061708	16.20535	0.067496	14.81569
9vs14	BUS4	0.059621	16.77261	0.067119	14.89891
13vs14	BUS4	0.059621	16.77261	0.067119	14.89891
10vs11	BUS4	0.061865	16.16423	0.069357	14.41816
9vs10	BUS4	0.061865	16.16423	0.069357	14.41816
9vs7	BUS5	0.061884	16.15927	0.068795	14.53594
12vs13	BUS5	0.048057	20.80862	0.052785	18.94478
9vs14	BUS5	0.054946	18.19969	0.062075	16.10954
13vs14	BUS5	0.054946	18.19969	0.062075	16.10954
10vs11	BUS5	0.064313	15.54896	0.067098	14.90357
9vs10	BUS5	0.064313	15.54896	0.067098	14.90357
故障号	负荷位置	节点参数			
		0.255		0.295	
		时间常数	特征值	时间常数	特征值
9vs7	BUS12	0.08618	11.60362	0.11086	9.020386
12vs13	BUS12	0.066189	15.10825	0.079244	12.61925
9vs14	BUS12	0.072277	13.83566	0.086771	11.52459
13vs14	BUS12	0.072277	13.83566	0.086771	11.52459
10vs11	BUS12	0.077885	12.83944	0.095071	10.51845
9vs10	BUS12	0.077885	12.83944	0.095071	10.51845
9vs7	BUS14	0.0782	12.78772	0.10489	9.533797
12vs13	BUS14	0.068777	14.53974	0.08098	12.34873
9vs14	BUS14	0.064808	15.43019	0.10489	9.533797
13vs14	BUS14	0.064808	15.43019	0.078661	12.71278
10vs11	BUS14	0.07714	12.96344	0.09714	10.29442
9vs10	BUS14	0.07714	12.96344	0.10489	9.533797
9vs7	BUS4	0.078849	12.68247	0.091399	10.94104
12vs13	BUS4	0.0747	13.38688	0.08214	12.17434
9vs14	BUS4	0.078745	12.69922	0.090266	11.07837

13vs14	BUS4	0.078745	12.69922	0.090266	11.07837
10vs11	BUS4	0.077211	12.95152	0.089385	11.18756
9vs10	BUS4	0.077211	12.95152	0.089385	11.18756
9vs7	BUS5	0.074165	13.48345	0.086077	11.61751
12vs13	BUS5	0.05857	17.07359	0.060137	16.6287
9vs14	BUS5	0.067846	14.73926	0.078474	12.74307
13vs14	BUS5	0.067846	14.73926	0.078474	12.74307
10vs11	BUS5	0.076192	13.12474	0.090862	11.0057
9vs10	BUS5	0.076192	13.12474	0.090862	11.0057

表 5.1 样本点的衰减时间常数和特征值表示

需要说明的是，在上述实验过程中所采用的故障大小并不是相同的，一般来说产生的是接地阻抗为标么值 10 的故障，但是有时会出现如下图所示的情况：

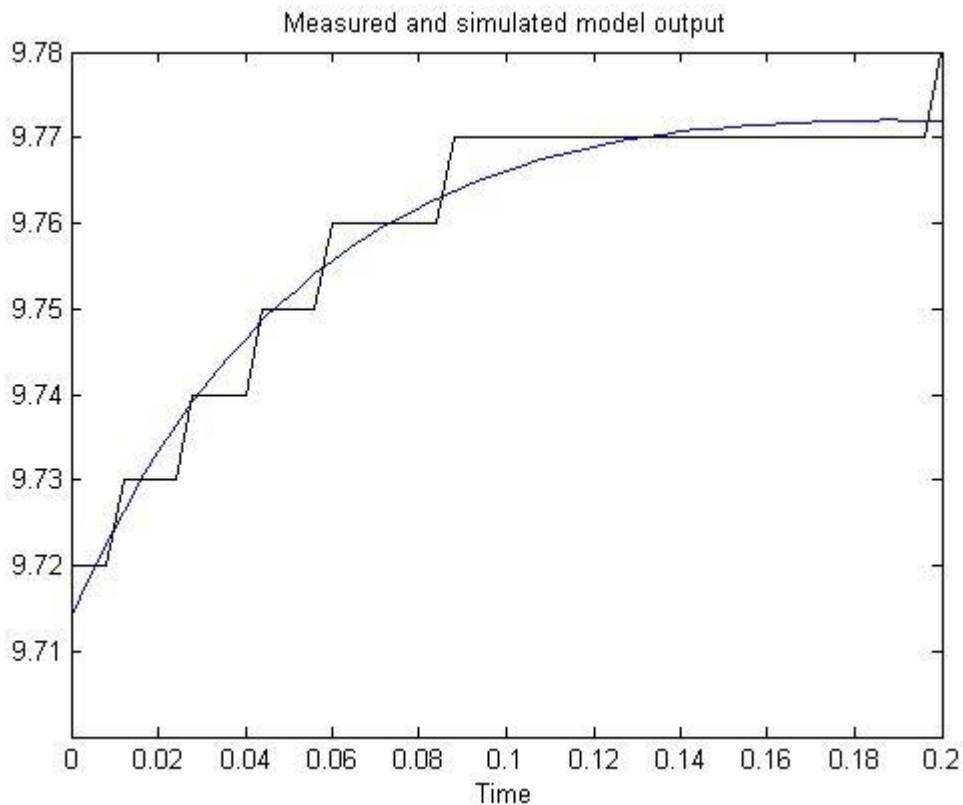


图 5.12 故障期间无功变化范围过小

如上图所示，整个故障期间的无功变化范围不超过 0.1MVar，属于很小的故障变化范围。这种变化范围所导致的结果就二十，由于 PSD-BPA 本身计算精度的局限性，输出曲线出现上图所示的明显台阶现象，而且对于本身衰减时间常数

越大的负荷，其无功变化越慢，因而其台阶现象也更加明显。这样的曲线会导致系统辨识不精确，Best Fits 参数无论如何选择辨识区间也无法达到 90 以上，同时由于本身计算不准确的问题，会导致仿真结果和真实应有的结果差别较大。而较为理想的故障跌落范围如下图所示：

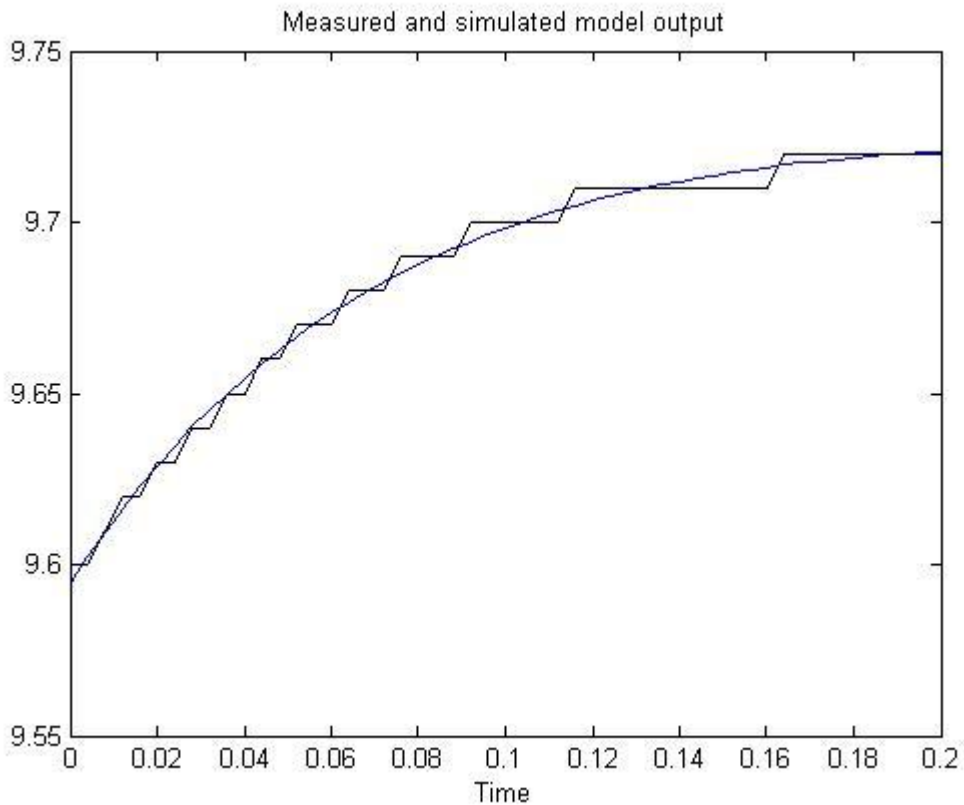


图 5.13 故障期间无功变化理想范围

如上图所示，整个故障期间的无功变化范围适中，不会产生因为无功变化范围过小而导致的大台阶，也不会因为无功变化范围过大而使得系统偏离稳定点太远，出现严重的非线性情况。

在实际实验中，为了不断调整无功的跌落范围，使其保持在理想范围之内，需要调整故障的接地阻抗，如下所示：

```
. (10)12#母线5周波三相金属短路故障
LS BUS-12 100. BUS-13 100      9   50. .00000  2      0 3 1 1 .00 .00
LS BUS-12 100. BUS-13 100     -9   65. .00000  2      0 3 1 1 .00 .00
```

调整此处

即调整接地阻抗参数，使得故障期间负荷节点的无功变化范围合适。需要调整的原因是，在电力系统中，距离故障发生点越远的节点，由于线路阻抗等原因，故障传递到该节点是所造成的影响也越小，即故障期间无功的变化范围也越小，从而导致仿真结果不理想。减小故障点接地阻抗能够使得故障期间电压跌落更加显著，从而故障期间的无功变化范围也更大。从理想情况来看，负荷在故障期间的无功衰减时间常数和故障的大小的关系不明显，并且这样的调整反而能够使得不同位置的故障传递到负荷节点的影响差异变小。

通过仿真实验获得的所有样本点并不能直接用于聚类分析，观察数据集，可以看出有部分样本点的衰减时间常数和同一定子电抗下其他样本点的衰减时间常数差异较为明显，这部分样本点在聚类分析中可以被认为是噪声。

例如以下这 6 组仿真实验结果：

故障号	负荷位置	节点	
		0.095	
		时间常数	特征值
9vs7	BUS12	0.042884	23.31872
12vs13	BUS12	0.039545	25.28765
9vs14	BUS12	0.041511	24.09
13vs14	BUS12	0.041511	24.09
10vs11	BUS12	0.042989	23.26176
9vs10	BUS12	0.042989	23.26176

当负荷位置在 12 号母线，且故障位置在 12 以及 13 号母线之间时，显然其衰减时间常数要和其他故障情况差别大。观察各组故障下时间常数的变化规律，不难看出，整体来说故障点离负荷越远时，衰减时间常数越大，即衰减越慢，而越靠近故障发生点的负荷其衰减速度越快。

由于本课题所采用的仿真系统是 14 节点的小系统，因而负荷节点与故障节点靠近这一情况较为容易发生。在实际系统中，负荷与故障节点在绝大部分情况下间隔复杂的电气连接，因此因为扰动而改变系统的衰减时间系数的可能性会明显下降。

5.4 结果分析

5.4.1 聚类算法

在后续的聚类实验过程中，为了正确分析聚类算法的性质，本课题从样本集

中剔除直接连接在故障线路两端的负荷所计算出的样本点。经过剔除后剩余的样本集大小为每档负荷 20 组，分为 8 档，一共有 160 个样本点。所采用的聚类算法和计算错误率算法流程图如下：

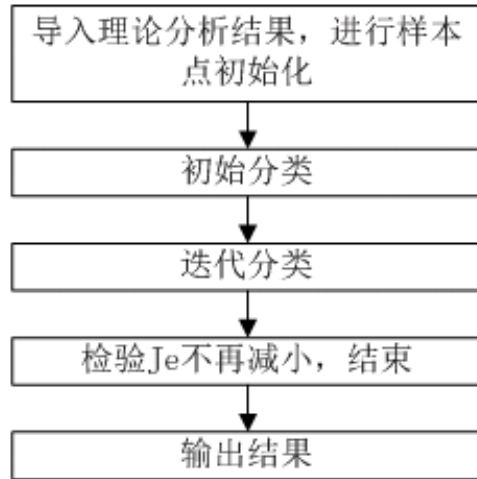


图 5.14 聚类分析程序流程

经过聚类分析之后的获得的数据结果如下所示：

样本编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
真实分类	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
聚类结果	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
样本编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
真实分类	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
聚类结果	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
样本编号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
真实分类	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
聚类结果	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
样本编号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
真实分类	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
聚类结果	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2
样本编号	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
真实分类	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
聚类结果	3	3	3	3	3	4	3	4	4	3
样本编号	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60

真实分类	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
聚类结果	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3
样本编号	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
真实分类	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
聚类结果	4	3	3	4	4	4	3	4	4	4
样本编号	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
真实分类	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
聚类结果	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4
样本编号	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
真实分类	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
聚类结果	5	5	5	6	6	6	5	6	6	5
样本编号	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
真实分类	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
聚类结果	5	5	5	5	5	5	4	4	6	6
样本编号	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
真实分类	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
聚类结果	6	5	5	6	6	6	5	6	6	6
样本编号	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
真实分类	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
聚类结果	6	6	6	6	6	6	5	5	6	6
样本编号	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
真实分类	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
聚类结果	8	7	7	7	7	7	6	7	7	7
样本编号	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
真实分类	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
聚类结果	7	7	7	7	7	7	6	6	7	7
样本编号	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
真实分类	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
聚类结果	8	8	8	8	8	8	7	8	8	8
样本编号	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
真实分类	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

聚类结果	7	8	8	8	8	8	7	7	8	8
------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

表 5.2 聚类结果比对

计算以上分类的各类以及总平均错误率，可以得到如下结果：

真实分类号	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
错误率	0%	10%	25%	25%	45%	25%	20%	20%	21.25%

表 5.3 聚类错误率计算

且在分类过程中，所有聚类结果和真实类别不相同的样本点，其聚类结果和真实类别之间的差别均在相邻两类之间，即如：真实分类号为 5 的样本点，其聚类结果可能是 4、5、6 三类中的一类。

绘制分类结果错误率和真实分类号之间的关系曲线，如下图所示：

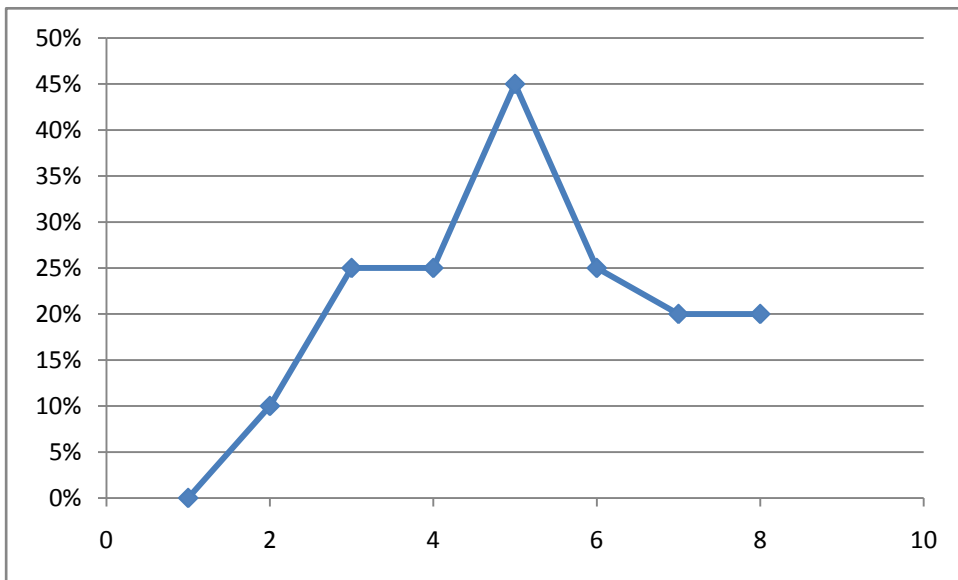


图 5.15 聚类结果错误率和真实分类号关系曲线

可以看出在中段的错误率比较高，造成这一结果的原因可能是由于本身由于系统规模偏小和各类电气原因所导致的。同时，这一结果可能和分段分档距离过进有关。在进行分档时，基于理论分析计算的结果，中段基本上是以特征值之差低于阈值的特征值点作为分档点，这就导致了两类之间比起始段和末段更容易重叠，从而导致了样本点之间因为各种随机性更容易发生错分现象的出现。

考察上述结果，可以看出聚类的结果基本上还是可以接受的。一方面，平均错误率不是很高，同时发生聚类结果与真实分类不符的样本点其错分类别也都在真实类别的相邻两个类别之间，也即是即使发生分类错误，所产生的定子电抗参数结果误差也比较小，从而对聚类结果的影响可以控制。

同时，样本集本身聚类的错误对于之后进行分类算法来说，其影响可以在一定程度上被减弱。这是由于之后的分类算法是以多个训练集样本为基础进行新样本的分类。因此，少数样本错分导致的样本集错误会被大部分样本的正确分类所削弱。

以平均值为例，以下是真实结果的平均值和聚类分析结果平均值的对比：

类别号	1	2	3	4	5	6	7	8
真实平均值	23.212	20.687	19.263	17.939	16.471	14.884	12.959	10.775
聚类平均值	23.263	20.871	19.251	18.217	16.299	15.102	13.240	11.079

如上图所示，二者之间在平均值角度上的区别较小，说明在合适的分类算法下，聚类结果能够作为可用的训练样本集。

5.4.2 测试集分类算法验证

为了初步验证构建样本集之后分类算法的可行性，下面随机抽取每类样本的 20 组样本点中的 15 组作为训练集，同时将剩下的 5 组样本作为测试集，观察 k 均值算法分类效果的好坏。在 k 近邻分类算法中，所有训练集样本的类别，均用上一节中聚类分析的结果带入。

由于训练样本集的大小过小，因此 k 值也应当对应选取较小值，故选取 k=3。

以下是分类算法的结果：

真实分类	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
识别分类	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
真实分类	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
识别分类	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
真实分类	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6
识别分类	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6
真实分类	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8
识别分类	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8

表 5.4 分类结果

也即是分类算法的正确率达到了 100%。

上述的样本取的是小样本集，不能代表整体正确率，但也说明了如果有合适的训练样本集，通过 k 近邻算法进行负荷的次主导参数分档聚类可以取得较好的效果。

第 6 章 总结

本课题考虑了电力系统建模中负荷建模部分的改进方法，旨在解决目前电力系统愈发复杂导致控制困难，先进的量测设备利用率过低，负荷建模技术不成熟等问题。

本课题的研究是基于清华大学电机系开发的一种两阶段的负荷辨识方法。在该方法中定义电力系统常用的综合负荷模型有四个主导参数，通过辨识这四个主导参数，而将其他参数取为典型值，即可获得较好的辨识结果。然而通过仿真实验表明，综合负荷模型中的一些所谓“次主导”参数，对于辨识结果的好坏也有着很大影响。

由于次主导参数直接辨识的复杂性，本课题考虑采用较为粗糙但是实时性好的聚类方法，将负荷按照次主导参数的不同分为几个档位。本课题以定子电抗这一次主导参数为例，整个课题所基于的仿真实验平台是由中国电力科学院引进并改进的 PSD-BPA 电力系统分析软件。数据的获取方式是扰动下的暂态稳定分析。设计算法由两个步骤组成，第一个步骤，获取样本定子电抗档位未知的样本集的扰动响应，并通过聚类方法将样本集分类，构建具有档位的训练样本集；第二个步骤，已知训练集的基础上，新加入采样点，并基于训练集对采样点按照次主导参数进行分类。

在进行大规模的样本点获取实验之前，首先通过仿真实验观察其对于负荷扰动响应外特性的影响，之后采用理论分析验证了仿真实验和理论分析的契合性。之后，经由仿真实验检验了理论分析的正确性。定子电抗体现在外特性上的一条重要性质是其对于系统在故障期间的衰减时间常数的影响，而衰减时间常数这一特征，就是本课题主要研究的特征。理论分析以及实际验证聚类算法应用于次主导参数分析的合理性是本课题的主要工作之一。

随后进行的是应用性的大规模仿真实验分析。整个仿真实验过程主要是围绕如何提取较好并且足够的样本点来分析衰减时间常数和定子电抗之间的直观联系，并且分析这种联系应用于聚类分析的可行性。通过 C 均值算法这一常用的聚类分析手段进行聚类后，分析聚类结果和真实档位之间的差别，从而确定了聚类方法的准确性。C 均值算法是整个实验过程的第一步，主要用于第二步的分类算法样本集的构建。第二步选取了 k 近邻法这一具体的分类方法，利用了样本集的特点，对新样本点进行分档。分档的结果表明了该方法的可行性。

本课题从理论和实验两个角度证实了采用分档聚类方法，通过扰动分析获取

数据，从而对负荷模型难以辨识的此主导参数进行大致辨识的可行性。然而这种方法具体应用于实际之前还有许多需要考虑和改进的地方。首先，衰减时间常数除了和负荷本身的属性有关，和负荷距离故障点的远近也有一定关系。然而，由于实验的限制，本课题所采用的仿真系统较小，因而不能充分分析二者之间的关系以及消除这种影响的方法。其次，训练样本集的选取和一些偏离大的样本的剔除对于聚类准确性的影响也存在着，获取足够的数据并在此基础上挑选合适训练样本集，也可以是后续工作之一。最后，本课题暂时仅考虑了定子电抗这一项次主导参数，其余次主导参数的外特性响应性质，彼此之间的耦合性也可以是研究工作之一。

插图索引

图 1.1 电力系统示意图	2
图 1.2 机理性负荷动态模型	3
图 1.3 感应电动机机理模型结构	4
图 2.1 PSD-BPA 潮流计算简图	6
图 2.2 PSD-BPA 潮流程序示例	7
图 2.3 IEEE 标准 14 节点系统.....	8
图 2.4 BPA 程序总框图.....	9
图 2.5 基础算法流程	10
图 2.6 故障期间有功功率变化对比	11
图 2.7 故障期间无功功率变化对比	12
图 2.8 非典型次主导参数真实结果与辨识结果对比	13
图 2.9 典型次主导参数真实结果与辨识结果对比	13
图 2.10 仿真实验设计思路	15
图 3.1 特征值-定子电抗关系图.....	22
图 4.1 特征值增量-定子电抗关系图.....	26
图 4.2 分档程序流程图	27
图 4.3 实验设计思路	28
图 5.1 PSD-BPA 故障设计语句	29
图 5.2 电力系统一次调频	30
图 5.3 电力系统二次调频	30
图 5.4 理想情况	32
图 5.5 异常情况	32

图 5.6 衰减过度情况	33
图 5.7 主界面	34
图 5.8 数据导入	34
图 5.9 辨识模型选择	35
图 5.10 辨识结果	35
图 5.11 理论分析-仿真结果对比	38
图 5.12 故障期间无功变化范围过小	42
图 5.13 故障期间无功变化理想范围	43
图 5.14 聚类分析程序流程	45
图 5.15 聚类结果错误率和真实分类号关系曲线	47

表格索引

表 5.1 样本点的衰减时间常数和特征值表示	42
表 5.2 聚类结果比对	47
表 5.3 聚类错误率计算	47
表 5.4 分类结果	48

参考文献

- [1] 李俊峰, 高虎等. 2007 中国风电发展报告[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [2] 郑宝森, 郭日彩. 中国互联电网的发展[J]. 电网技术, 2003, 27 (2): 1-3
- [3] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (17): 66-70
- [4] 吕涛. 电力系统仿真软件的运用与比较[D]. 浙江: 浙江大学, 2005.
- [5] 栗向鑫, 罗亚洲, 赵冬雯. 现代电网智能调度系统的比较分析与研究[J]. 华北电力技术, 2012, (3) : 63-70
- [6] 王保云. 物联网技术研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23 (12) : 1-7
- [7] 孙宏斌, 姜齐荣, 周荣光, 陈刚. 电力系统分析: 上册[C]. 北京: 清华大学电机工程与应用电子技术系, 2008.
- [8] 鞠平. 电力系统中负荷建模研究概观[J]. 河海大学科技情报, 1990, 10 (3) : 68-75
- [9] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[C]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [10] 章健. 电力系统负荷模型与辨识[C]. 北京: 中国电力出版社, 2007
- [11] Jia Hou. (2011). Load modeling practice in a smart grid environment. 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 7-13.
- [12] 百度百科. PSD[EB/OL]. [2012-06-06]. <http://baike.baidu.com/view/52118.htm>.
- [13] 印永华, 卜广全, 汤涌, 侯俊贤, 刘文焯. PSD-BPA 潮流程序用户手册[C]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005
- [14] 汤涌, 卜广全, 侯俊贤. PSD-BPA 暂态稳定程序[C]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005
- [15] 李立理. 综合负荷的主导参数辨识及暂态电压稳定评估与监测[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [16] 张学工. 模式识别 (第三版) [C]. 北京: 清华大学出版社, 2010.

致谢

首先感谢曹军威老师对我本科毕业设计的指导与帮助。从一开始选题的合理性和实用性分析，毕业设计过程中实验的设计思路，到最后论文的思路整理和表述方法修正，曹老师对于我的科研能力培养给予了很大帮助。

其次要感谢电机系的张树卿博士对于我本科毕业设计的帮助。由于我的本科毕业设计是一个跨学科的课题，自己在相关的电机学基础方面比较薄弱，在研究的过程常需要向张博士请教电机学知识和研究方法。

最后要感谢实验室的学长学姐以及同学这一个学期能和我一起讨论毕设的相关项目，敦促我更快更好地完成工作。

声 明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：_____ 日 期：_____

附录 A 外文资料的书面翻译

智能电网环境下的负荷建模

Load modeling practice in a smart grid environment

摘要：本文清晰地阐述了负荷建模的过程。包括负荷建模技术，在智能电网环境下提升负荷建模技术的需要，负荷建模的工业要求和负荷建模方法论。负荷建模过程被分为三部分进行介绍：数据采集，负荷聚合和负荷模型检验。综述典型的负荷模型和参数估计方法。

关键词：负荷建模；电力系统建模；负荷聚合

I. 引言

电力系统将来将会向着智能电网的方向发展。智能电网有着吸引人的特色，例如安全性、可靠性、灵活性，兼容性，开放性以及交互性等等。电力系统的发展将会给电力系统的计划和运行带来许多新的挑战和要求。挑战之一就是新的可再生能源的大规模接入，这将会导致新的运行模式和新的电力系统计划的产生。一般来说，电力应用取决于动态仿真，而动态仿真精密地依赖于负荷模型的选择。获取精确的负荷模型能够真实地反映负荷的静态和动态特性。在智能电网中，对于负荷模型准确性的要求甚至要更高。因此，负荷建模在这种情况下仍然是一项关键性的任务。

本文的目标之一是总结基本的负荷建模概念和定义。电力系统负荷建模一直以来都是一个难以完成的任务。负荷的随机性和时变性特征是导致这种困难的关键性原因。除此之外，负荷模型应当在实际的，多变的情况下被检验。也就是说，模型应当有很好的可推广能力。

构建负荷模型主要由两种方法：统计综合法和总体测辨法。统计综合法根据其各个成分的信息来构建模型。然而，大规模电力系统的数据采集是一项繁重的任务。总体测辨法采用现场测量来确定一个选定模型参数。本文的第二个目标就是描述这两种方法的负荷建模过程。这一内容将在第五章中涉及。

本文的结构如下：第二章概括叙述负荷建模的基本概念和定义，第三章提出在智能电网环境下提升负荷建模方法的需要，在第四章中，将会讨论负荷模型的

工业要求。负荷模型建立的两种主要方法将在第五章中被讨论到。本章将会被分成三部分：数据采集，负荷聚合以及负荷模型检验。同时，将会对典型的负荷形式和参数估计的技术有一项综述。第六章结束本文，同时提出对未来工作的一些考虑。

II. 负荷建模的基本概念和定义

这一章为本文和相关报告中经常提到的与负荷建模相关的概念提供了一些基本的定义和概念。

负荷

术语“负荷”在电力系统工程中有着几种含义，如下：

- 一种器件，连接一个消费能量的电力系统
- 所有连接到一个电力系统的器件的总能量(有功以及/或者无功)消耗
- 一个系统中并没有被清晰地在系统模型里表达的部分，而是被认为是系统模型中一个连接到母线上的能耗装置
- 许多独立的负荷器件的总体影响的等价代表
- 一个发电机或者发电站发电设备的能量输出

在负荷模型研究工作中，术语“负荷”一般指的是第三种定义。在负荷一词含义不明的情况下，特殊的术语将会被用来指明实际含义，例如“负荷器件”，“系统负荷”，“总线负荷”或者“发电机负荷”。

正如在图 1 中所阐述的，下面的术语将在描述负荷的构成时被用到。

负荷成分

负荷成分是一类特殊或者相近的器件的总体等价。例如电阻热，房间空调调节器，白炽灯。

负荷等级

负荷等级是负荷的一种分类，例如住宅负荷，商业负荷或者工业负荷。出于负荷建模的目的，将负荷划分为几类的负荷是非常有用的，每一类负荷可以有相似的负荷组成和特征。

负荷构成

负荷构成是指由组成负荷的各种负荷成分的百分比。这个术语可以用于总线负荷或者一种特殊的负荷类型。

负荷类混合

类似于负荷构成，负荷类混合是指负荷等级组成的总线负荷的各等级百分比。
负荷特征

一系列的参数代表了负荷特征，例如功率因数和有功功率、无功功率的关于电压幅值和频率的偏导数。这个术语可以被特殊种类的负荷期间，一种负荷成分，负荷等级或者总线负荷应用。

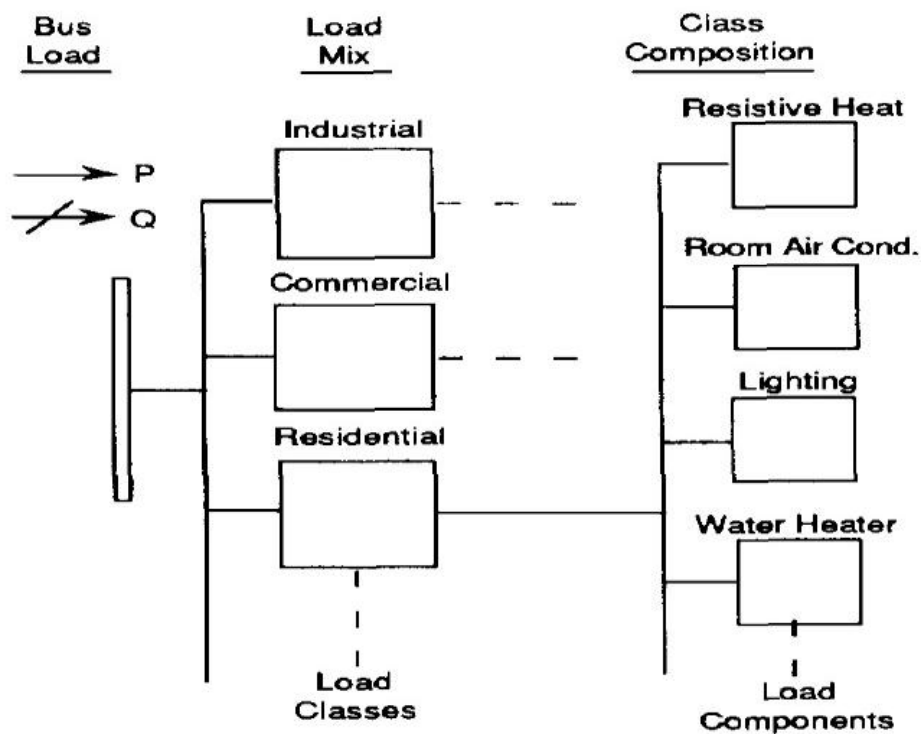


图1 基于成分的负荷模型术语

在接下来的一部分中介绍的术语通常会被用来描述负荷建模过程或者不同类型的负荷。

负荷模型

负荷模型是一系列用于描述总线电压(幅值和频率)和负荷(有功功率和无功功率)之间关系的代数等式。在大多数情况下，出于降低复杂性的目的，研究者只考虑电压幅值如何取决于负荷。虽然频率如何取决于负荷也很重要，这个领域的相关工作并不多。

为了在第五章中描述负荷建模过程的时候能更清晰，本文将负荷建模过程分为三部分：数据采集，负荷综合以及负荷模型检验。

静负荷模型

静负荷模型描述了在同一瞬间总线电压和负荷(有功功率和无功功率)之间的关系。静负荷模型不光用于表征静态负荷成分，例如阻性负载，也用于近似代表一些动态成分，例如感应电机。然而，近似模型在研究中并不一定足够，特别是

在稳定性研究中。其原因是 inaccurate 的负荷模型可能会导致完全错误的结果，从而使静负荷模型逐渐被动态负荷模型所取代。

一般来说，静负荷模型有两种形式，多项式模式(也被称作 ZIP 模型)以及指数模型。

动负荷模型

不同于静负荷模型，动负荷模型在任何时刻通过总线电压(幅值和频率)在过去和当前时刻的值来表征负荷。根据文献调研，负荷模型可以有两种不同的表达形式：微分方程和差分方程。

混合负荷模型

混合模型是静负荷模型与动负荷模型的结合。其被期望用于稳定性研究，后者比功率流研究要求更准确的动态表示。根据不同的研究目的和仿真程序，混合负荷模型可以有多种的负荷模型结构。

III. 在智能电网背景下提升负荷建模技术的需要

未来的电能网络将会是智能电网这一事实将会给电力系统的计划和运行带来许多新的挑战和要求。挑战之一就是新的可再生能源的大规模接入。新的负荷成分将会出现，浙江要求对应的负荷模型来表征准确的动态特性。

除此之外输电系统的膨胀以及长时间的运行给电力系统施加了越来越大的压力。这些情况要求系统的极限工作条件尽可能接近实际系统能力。为了解决这些问题，应用程序一般基于动态仿真。根据研究调研，仿真结果很大程度上依赖于负荷模型的种类和参数值。能够复制系统在意外情况下的响应的准确的负荷模型对于动态仿真是非常必要的。

提升负荷建模的利益是难以量化的。但看到不准确的负荷模型对于动态研究所带来的影响是非常容易的。接下来的部分将会讨论负荷模型会怎么影响瞬态研究，阻尼研究和电压稳定性研究。

A. 暂态研究

在一次故障发生后第一个振荡，电压骤降是一种普遍情况。不准确的负荷模型所计算的功率将会导致发电-耗电不平衡，从而在这段时间内进一步影响偏移角的大小和系统的暂态稳定性。

B. 小信号阻尼研究

涉及到分布于整个系统的多台发电机组的区域间振荡通常会产生电压和频率的剧烈变化。如果恒阻抗负荷模型被用于估计阻尼，那么结果会变得很悲观。结

果将会是准确模型所估计的结果的两倍。

C. 电压稳定研究

电压稳定研究对于负荷模型有着更强的依赖。曾经有一项关于渥太华地区丢失一条电力输送线路的影响的研究。研究结果表明静负荷模型和动负荷模型所获得的结果有很大的区别。静负荷模型导致了许多完全错误的结论。

静负荷模型被证明不足以用于电压稳定的研究。虽然对用于电压稳定性研究的负荷模型还没有统一结论，动负荷模型而不是静负荷模型能够提供更可靠的结果。

IV. 负荷模型的工业要求

根据基于工业实际和科学研究的调研，ZIP 模型是电力应用中关于电力程序的最普遍的模型，而负荷模型(ZIP 以及感应电机模型)在现今的动态研究总应用最广泛的软件工具。

这一章将会讨论在实际中可用的负荷模型的一些要求，包括如下所示：

- 推广能力
- 高度灵活性(用户可定义特征)
- 简化的格式

简化的模型较之包含许多参数的高度复杂的模型能提供更高的灵活性。在特殊场合下，一个高度复杂的模型会比一个简化的模型更准确。但是高度复杂的模型的参数在其他场合下可能并不适合，而简化的模型有更强的推广能力。在实际应用中，负荷模型的简化性和准确性之间往往需要进行折中。

下一章将会给出最普通的负荷模型的概述。

V. 负荷建模方法论

实际应用中有两种最主要的方法，统计综合法和总体测辨法。统计综合法是一种传统方法，如图 1 中所表述的，根据其各个成分的信息来构建模型。总体测辨法采用现场测量来确定一个选定模型参数。

这一章将会介绍这两种不同的方法。为了使得描述负荷建模过程更清晰，同时更好地区分这两种方法，建模过程将会被分为三部分：数据采集，负荷综合以及负荷模型检验。

A. 数据采集

统计综合法的数据

统计综合法需要三类的数据：负荷特性，负荷构成以及负荷类混合。他们可以被分为两类：确定性数据以及非确定性数据。

负荷特性数据是确定性数据，能够通过理论分析以及实验室检测获得。一旦确定后，它们能够被所有的电力系统应用采用。这些数据中的许多被 EPRI 项目确定并备案。然而，当新的负荷种类产生或者负载装置被重新设计之后，它需要被更新。典型的负荷成分特性在文献 11 的表 1 和文献 12 的表 1 中被定义。

在确定负荷特性的过程中所遇到的一个关键问题需要被注明。一些负荷成分的多样性，例如同类但不同寿命的感应电机，代表着不同的负荷特性。进行更多获取负荷特性多样性对于负荷建模影响的调研是非常有必要的。

在一条特殊的母线上的负荷构成数据和负荷类混合数据均是不确定性数据。它们需要根据母线负荷消耗信息来计算，而负荷成分特征能够被直接使用。前者随着时间，季节和位置变化。明确地确定它们相对于确定负荷特征数据要难得多。

负荷构成数据是指由组成负荷的各种负荷成分的百分比，例如电阻热，房间空调调节器。为了获取这一数据，资本库存以及利用系数是必须的。资本库存指的是一类负荷成分的总体存货。而利用系数指的是总体的使用百分比。对于估计负荷成分有用的数据来源包括负荷研究数据，人口调查和账单等等。关于几类负荷类型，位置和季节的典型的负荷构成数据可以在 EPRI 负荷建模手册中被找到。典型的数据刚开始可以被用于参考。为了获取更特殊的负荷构成的指导手册可以在文献 13 中被找到。

负荷混合数据，即负荷等级组成的总线负荷的各等级百分比，在各条母线上都各不相同。除此之外，数据会受位置，季节，天气以及其他因素的影响。因此，它们是不确定性数据，并能够从母线负荷消耗的信息中根据文献 13 和文献 7 中所描述的方法被推断出来。

获取负荷构成数据和负荷类混合是一项繁重的任务，这也是统计综合法的缺点之一。为了简化这个问题，需要进一步集中注意力在发展搜集这些数据的一般程序上。

总体测辨法的数据

总体测辨法的数据是通过安装在母线上负荷聚集处的器件采集得来的。随着通讯和计算机技术的发展，不同类型的，可应用于负荷建模的基于微处理的器件出现了。例如，电能质量监测，数字故障记录仪，数字中继站和相量测量装置，也是最流行的仪器。这些基于微处理器的器件通常被称为智能电力元件，能够收发数据，并为控制站点器件提供服务。对于负荷建模来说，这样的器件必须几轮

电压和频率以及相应的有功功率和无功功率。测量到的数据一般来说可以被分为两类：稳态数据以及扰动测量数据。稳态下测量的数据可以被用于小信号负荷建模的目的。而扰动测量则是在暂态稳定研究中用于构建负荷模型的极好资源。许多应用程序已经构建了数据采集系统，用于采集适用于负荷建模目的的数据。

为了获得适合磨合建模的数据，EPRI 进行了一项关于当前智能电力元件的仔细调查，并鉴定了在一定范围内有着令人满意的特性的元件，这些元件很适合于获得负荷建模的可用数据。元件的选择决定了属性值的准确性。除此之外，测量位置的选择对于准确表征负荷也很关键。关于选择合适位置的指导可以在文献 17 中被发现。

B. 负荷聚合

负荷聚合是负荷建模过程中的最关键部分。聚合方法直接影响负荷模型的准确性。聚合形式有两种：理论聚合和辨识聚合，分别与统计综合法和总体测辨法相对应。

理论聚合

理论聚合指的是基于负荷类型解析地聚合相似的负荷，之后采用负荷各个参数的预定义值。许多方法已经被用于聚合静负荷模型和动负荷模型，这些方法采用来自负荷类混合和负荷构成的信息。一般来说，负荷构成数据被认为是重要因素。为了构建一般的负荷模型，负荷模型的敏感度特征应当作为各个独立特征的加权平均数。

EPRI 已经发展了负荷模型综合程序包(LOADSYN)，采用负荷类混合，负荷构成和负荷特征数据来确定适用于电力流和暂态稳定程序的负荷参数。LOADSYN 是两个主程序的妥协：GLDMOD 和 SLDMOD，GLDMOD 能够产生综合负荷模型，而 SLDMOD 在给定需要的细节等级后可以将综合负荷模型转化为特殊模型。

辨识聚合

在总体测辨法中，负荷模型通过基于现场测量数据的辨识算法来聚合。实际上，这是一个系统辨识过程，涉及到寻找合适的模型结果和适用于该结构的参数。该过程的流程图如图 2 所示，可以被描述为 3 步：

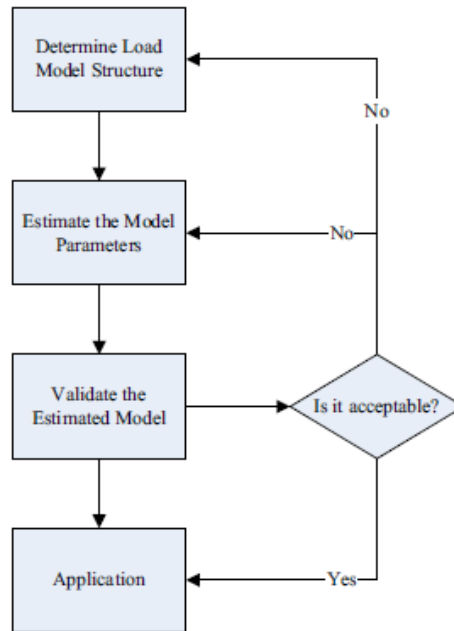


图 2 系统辨识的流程图

- 确定负荷模型结构，描述系统的输入输出行为
- 确定合适的参数估计方法
- 检验估计的负荷模型，如果模型可以接受，则将其应用于实际，如果不可接受，就重复辨识过程直到找到合适的模型

检验过程将会在下一章中被进一步介绍。值得注意的是系统的先验知识和工程经验对于做出选择是非常有用的。

1) 确定负荷结构

a) 确定负荷结构的两种方法

负荷结构通常来说采用常微分方程，或者偏微分方程的形式，或者传递函数等形式来表达。有两种可以用来确定负荷结构的方法：先验法(也被成为参数法)以及后验法(也被成为非参数法)。

先验法首先确定一个近似的负荷模型结构，然后执行任意参数估计。相反地，后验法采用通过一个给定的模型结构所获得的参数来确定一个更好的模型结构。除了方法，系统的先验知识和工程师的洞察力以及经验对于做出决定也很有价值。

b) 典型负荷类型的综述

这一章给出了许多可用的负荷模型结构的综述。在电力流，暂态稳定分析以及长期动态仿真中用到的标准负荷模型的手册可以在文献 21 中被找到。采用不同负荷模型的系统动态响应之间的比较将会在文献 2 和文献 22 中涉及。

静负荷模型

恒阻抗负荷模型

恒阻抗负荷模型是一种静负荷模型，在这种模型中电能直接跟随电压幅值的平方变化。这种负荷也被称为是恒导纳负荷模型。

恒电流负荷模型

恒电流负荷模型是一种静负荷模型，在这种模型中电能直接跟随电压的幅值变化。

恒 P-Q 负荷模型

恒电流负荷模型是一种静负荷模型，在这种模型中电能的变化和电压的幅值的变化无关。在经典应用里，大部分负荷被认为是恒 P-Q 负荷。然而一些器件，例如电子仪器，在特殊的电压下并不表现出这一特性。因此，恒 P-Q 负荷模型在意外情况下并不足以代替动负荷表现。

多项式负荷模型

多项式负荷模型是恒阻抗负荷，恒电流负荷和恒功率负荷的混合。它也被成为 ZIP 模型。ZIP 负荷模型的数学表达式有着如下形式：

$$P = P_0 \left[a_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + b_p \left(\frac{V}{V_0} \right) + c_p \right] \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \left[a_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + b_q \left(\frac{V}{V_0} \right) + c_q \right] \quad (2)$$

负荷模型的参数为 a_p , b_p , c_p , a_q , b_q , c_q 。 P_0 和 Q_0 为额定负荷。

指数负荷模型

指数负荷模型是一种静负荷模型，这种模型描述采用指数函数描述功率和电压之间的关系。在一些情况下，无功功率和电压之间的依赖关系超过了二次关系，此时 ZIP 模型失去了物理意义。

指数负荷模型的数学表达式有着如下形式：

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{p_v} \quad (3)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{q_v} \quad (4)$$

负荷模型的参数为 p_v ， q_v 。 P_0 和 Q_0 为额定负荷。

频率依赖负荷模型

指数负荷模型是一种静负荷模型，这种模型描述了负荷的频率依赖性。这种模型一般是以乘法形式或者多项式以及指数形式表达，如下所示：

$$1 + a_f(f - f_0)$$

此处 f 代表了电压的频率， f_0 为额定频率， a_f 是模型的频率敏感性参数。

在许多动态表现分析的研究中，频率依赖模型被忽略了。但是当描述振荡阻尼的正确影响时，频率模型是必要的。

基于成分的表达

基于成分的模型是独立成分的整合，被LOADSYN程序所采用，有着物理意义。负荷被分为几类：住宅，工业，商业，农业以及其他。每个独立成分的特定已经被定义好。基于成分的表达可以通过理论聚合来获得。但是在动态研究中，其贡献的和并不等于组合响应。

动负荷模型

感应电机模型

感应电机是电力系统中的一个关键成分。感应电机模型基于一个感应电力的物理特征，能够代表静负荷模型在故障情况下不能表征的动态响应。

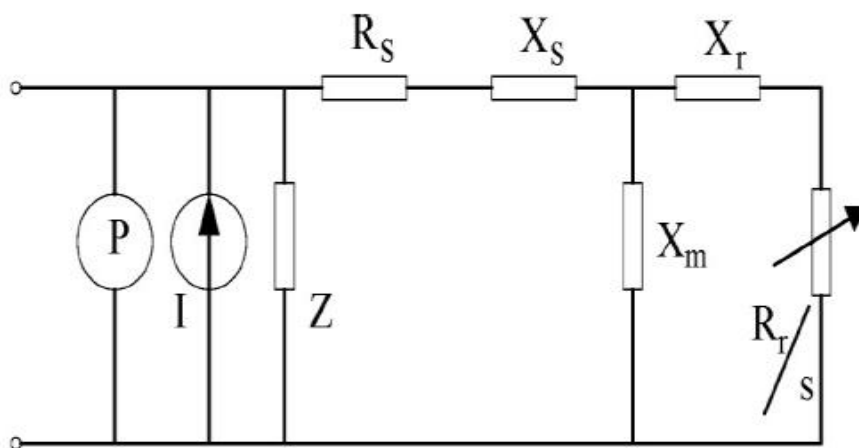


图3 感应电机等效电路

感应电机模型有许多形式。一般来说，三阶模型对于暂态稳定性研究已经足够了。其等效电路如图3所示。

差分方程模型

差分方程模型是一种动态负荷模型，它代表了负荷的变化特性。不同于感应电机负荷，差分方程模型并没有物理意义。二阶差分方程如下所示：

$$\begin{aligned} \Delta P(k) = & a_{p1}\Delta P(k-1) + a_{p2}\Delta P(k-2) + c_{p0}\Delta V(k) + c_{p1}\Delta V(k-1) \\ & + c_{p2}\Delta V(k-2) + g_{p0}\Delta f(k) + g_{p1}\Delta f(k-1) + g_{p2}\Delta f(k-2) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q(k) = & a_{q1}\Delta P(k-1) + a_{q2}\Delta P(k-2) + c_{q0}\Delta V(k) + c_{q1}\Delta V(k-1) \\ & + c_{q2}\Delta V(k-2) + g_{q0}\Delta f(k) + g_{q1}\Delta f(k-1) + g_{q2}\Delta f(k-2) \end{aligned} \quad (6)$$

混合负荷模型

混合负荷模型结合了静负荷模型和动负荷模型。考虑到工业需求，EPRI 在文献 17 中提出了四种一般形式。如上文所提到的，静负荷模型包括 ZIP 模型和指数模型。动负荷模型包括感应电机模型和差分方程。需要注明的是，ZIP 模型和感应电机模型均有物理意义，而其他两种模型并没有。

以下是四种混合负荷模型结构：

- ZIP+感应电机(三阶模型)
- ZIP+微分方程(二阶模型)
- 指数+感应电机(三阶模型)
- 指数+微分方程(二阶模型)

2) 确定估计参数的技术

在确定负荷模型结构之后，下一个步骤就是参数估计。参数估计方法实际上是一系列用于提取一个给定过程的数学模型的技术，这种提取是通过分析过程的输入输出的数量关系来完成的。在负荷建模的过程中，输入数据是测定的电压(幅值和频率)，输出数据是有功功率和无功功率。参数估计的目的是找到合适的模型参数，使得仿真结果能最好地负荷实地测量结果。

参数估计的方法有许多。没有证据表明某种方法要比其他方法好。在某些场合下，一种方法可能提供比其他方法更好的结果。但这种方法并不能被证明适用于任何情况。关于各种方法更详细的讨论可以参考文献 25。这一章只提供目前存在的参数估计方法的综述，而没有方法间的比较。

不同的参数估计方法都包括两方面：一个估计准则和一个近似算法。线性模型的构建方法已经被很好地建立起来了，而非线性系统的参数估计还需要进一步的研究。一般来说，非线性系统的建模方法可以被分为三类：

- a) 基于解析的方法

在文献 23 中提出的基于解析的方法是一种用于感应电机负荷的简单的参数推导方法。这种方法一般用于特殊的测试

b) 基于优化的统计方法

在基于优化的方法中，目标函数被定义为是仿真结果和测量输出(有功和无功)之间的误差的平方和。优化方法的主要目标是 minimized 目标函数。传统算法如下所列：

- 最小二乘估计
- 加权最小二乘估计
- 广义最小二乘估计
- 参数估计梯度法
- 基于工具变量的参数估计法

c) 高级系统辨识法

以下是几种高级的优化方法：

- 基于神经网络的参数估计法
- 基于遗传算法的参数估计法
- 基于模糊逻辑的参数估计法
- 基于轨道敏感度的参数估计法

C. 负荷模型检验

在获得所选的模型结构的所有参数之后，负荷建模过程并没有结束。从特殊的数据集中获取的模型应当采用新的，未经预习的数据检验。如果模型的仿真结果和测试数据集相符，那么模型就通过检验。亦即是说，一个有效的模型应该有很强的推广能力。因此，我们必须评价模型的推广能力。

文献 30 和 31 应用一种交叉验证法来估计混合负荷模型的推广能力。文献 32 的一项关于验证总体测辨法混合建模的近期研究显示了负荷构成确实对于负荷检验有很大的影响。实际的负荷构成离用于建模的负荷构成越远，模型的仿真结果和实测数据之间的距离也就越远。因此在验证前对于负荷特性的聚类这一提议已经被提出。在文献 33 中提出了一种计算准确度指数和置信区间的检验方法。

VI 结论和未来的工作

本文清晰地阐述了负荷建模的过程。负荷建模被分为三段：数据采集，负荷聚合以及负荷模型检验。数据采集部分包括统计综合法和总体测辨法两种方法所需的数据。第二部分主要集中于两种不同的负荷建模方法的负荷聚合方法。在统计综合法中，负荷建模通常通过理论分析的方法，而在总体测辨法中，负荷建模

则通常采用系统辨识的方法。许多当今技术发展水平的负荷模型和参数估计方法被概括。在最后一部分讨论了检验负荷模型推广能力的方法。同时也列出了一些应用于实际的方法。

在未来，有许多问题需要进一步研究。一些将来研究的关键性问题包括：

- 为了更成功的负荷建模，数据采集是基本工作。在总体测辨法中，测量数据的质量是影响建模结果的最主要因素之一。因此选择具有代表性的监测位置并采集更多可用数据是必要的。
- 发展更先进的负荷模型结构。举例来说，将感应电机模型分成一个小的和一个大的电机模型。需要开展更深入的研究。
- 在参数估计的过程中，初始参数值对于结果有很大影响。如果其设置的不合适，那么辨识结果可能会陷入局部极小，在实际应用中就会发生错误。因此，一个关于初始参数值对于辨识结果影响的敏感性检验是有必要的。
- 一个基于夏季数据的模型可能并不适用于冬季。一个彻底的关于模型参数随着时间、季节和地理区域变化的敏感度研究是需要的。
- 智能电网的特性将会给负荷建模带来许多新的挑战。需要进行一个关于负荷建模新要求的深度调查，从而为将来的工作提供指导。