

清 华 大 学

综 合 论 文 训 练

题目：基于准稳态/动态量测的电力综合负荷结构辨识

系 别：信息学院自动化系

专 业：自动化

姓 名：辛明原

指导教师：曹军威 副研究员

2013 年 6 月 19 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

电力系统负荷建模始终是电力系统建模中的难题，缺乏准确有效的负荷模型及其参数，已经成为制约电力系统仿真和计算分析的可信度和精度主要因素。到目前为止，统计综合法和总体测辨法成为了主流的负荷建模方法。其中，总体测辨法以其简单、方便、数据来自实际测量得到了广大建模者的关注。

总体测辨法希望电网的扰动越大越好，但这与实际情况不相符，现实中电网出现大的扰动概率很低，相比之下，在电网中稳定运行状态附近的小扰动始终持续存在，能够获得大量的小扰动准稳态或动态量测。作者希望利用这些小扰动数据，分析提取得到综合负荷模型的一个重要参数 P_{ct} ，即动负荷与各种静负荷所占的比例。

作者基于电力系统电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC，搭建了恒定电阻、恒定电流和恒定功率静负荷 (ZIP) 加感应电动机 (M) 的综合负荷模型，并接入电网某节点，在其中加入扰动，构造了电网的小扰动环境。之后对综合负荷的有功输出进行测量，利用感应电动机负荷在小扰动输出呈线性的特点，作者推出了一个小扰动下的负荷响应特性模型，并对有效性进行了论证，将该模型用于后续负荷结构辨识。

继而，作者研究给出了辨识该模型关键参数的算法，关键参数包括感应电动机模型系数项 M_p 、指数项 n 和时移项 t_0 。辨识算法关键技术特征、关键技术点在于全局搜索与终止条件的可控性，并通过仿真得来的数据进行了负荷模型的辨识。

最后，通过分部辨识与总体辨识的对比实验，验证了该方法有效性和可行性。

关键词：电力系统；负荷结构；参数辨识；小扰动；遗传算法；

ABSTRACT

Power system load modeling is one of the most difficult problems in power system modeling. So far component-based modeling approach and measurement-based modeling approach has become the mainstream of load modeling. Among them, measurement-based modeling approach with its simple, convenient gets the attention of masses of the modeler.

Measurement-based modeling approach hopes the grid disturbance is large, but this is not consistent with actual situation. In reality, most data measured in the grid is small disturbance near the steady-state value. The author hopes to use these small disturbance data to obtain the parameter, P_{ct} , an important parameter of load model, shows the static load in proportion to the total load.

The author uses PSCAD/EMTDC to set the composite load model constituted by ZIP load model in parallel with asynchronous motor. Add the small disturbance and measure the active output of each load. Using the output of the asynchronous motor load has linear characteristic, the author put forward a load model of asynchronous motor in small disturbance, and verified it.

Finally, the author gives the identification algorithm of the model, and use the data from the simulation identified the model parameters, verified the feasibility of the method.

Key words: Power system simulation; Load structure; Parameter identification; Load identification; Small disturbance; Genetic algorithm;

目 录

| | |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 引言..... | 1 |
| 1.1 概述..... | 1 |
| 1.2 电力系统负荷建模概述..... | 2 |
| 1.2.1 电力系统负荷建模的意义..... | 2 |
| 1.2.2 电力系统负荷建模的现状..... | 2 |
| 1.3 本文结构和主要内容安排..... | 4 |
| 第 2 章 实验软件介绍与负荷模型的选择..... | 5 |
| 2.1 仿真平台介绍..... | 5 |
| 2.2 负荷模型的选择与搭建..... | 6 |
| 2.3 综合负荷的小扰动下响应特性建模..... | 8 |
| 2.4 小扰动下负荷有功特性的探究..... | 15 |
| 2.5 本章小结..... | 17 |
| 第 3 章 基于遗传算法的负荷结构辨识方法设计..... | 18 |
| 3.1 引言..... | 18 |
| 3.2 算法描述..... | 19 |
| 3.2.1 确定编码方案..... | 19 |
| 3.2.2 适配值函数的确定..... | 20 |
| 3.2.3 种群初始化..... | 20 |
| 3.2.4 遗传操作..... | 21 |
| 3.2.5 终止条件..... | 22 |
| 3.2.6 算法中参数的设置..... | 23 |
| 3.3 本章小结..... | 23 |
| 第 4 章 负荷辨识算法的实践..... | 25 |
| 4.1 负荷模型的再简化..... | 25 |
| 4.2 算法设计与实现..... | 32 |
| 4.3 对模型的整体辨识结果..... | 33 |
| 4.3.1 对扰动量模型辨识的结果..... | 33 |
| 4.3.2 对剩余的两个参数的辨识结果..... | 36 |
| 4.4 本章小结..... | 39 |
| 第 5 章 总结..... | 40 |
| 5.1 结论..... | 40 |
| 5.2 展望..... | 41 |

| | |
|-----------------------------|----|
| 插图索引..... | 42 |
| 表格索引..... | 44 |
| 参考文献..... | 45 |
| 致 谢..... | 46 |
| 声 明..... | 47 |
| 附录 A 外文资料的书面翻译..... | 48 |
| 附录 B 原辨识方法的总体辨识结果与对应图像..... | 72 |

第1章 引言

1.1 概述

随着科技的发展，用电量逐渐增加，电力系统不断扩大规模，目前已经形成了一个庞大而复杂的电网。这样，对电网的分析与控制就有了更大的难度和更高的要求，能否有效、快速控制电网，对人们的生命财产有着重要的影响。

电力系统仿真是目前分析和解决电力系统问题的重要方法之一[1]。电力系统仿真是对电力系统建立数学模型，通过计算机仿真技术，计算模型在不同条件下的输出情况，模拟现实的电力系统，对电力系统的各个时态进行分析与预测。

对于计算机仿真而言，模型的建立非常重要，模型的好坏直接影响仿真结果的准确性。电力系统大体可分为三个部分，分别是：发电机部分、传输线路部分和负荷部分。其中发电机部分与传输线路部分的建模已经比较成熟，已经提出了适应不同精度要求的模型，然而电力消耗部分的负荷模型因为其模型的时变性与分散性等问题，建模一直没有较大的进展，人们往往从原理出发，用最基本的恒阻抗负荷、恒电流负荷、恒功率负荷或这三者的组合来近似。发电机负荷模型与传输电路负荷模型的精确与负荷模型的粗糙的不一致，仿真的精度大大降低，负荷模型的精确度成为了制约电力系统仿真精确度的主要原因之一。

负荷建模的最大难点在于负荷模型的时变性。模型会随着时间而改变，因此较为成熟的离线仿真在实际中的应用性不大，因为原本已经建好的模型过了一段时间便不再符合实际情况，而且离线仿真速度太慢，往往需要十几分钟才能将模型辨识出，无法满足快速控制的要求。因此需要不断从电网进行量测并进行快速建模，即在线即测即辨即控。

目前主导的负荷建模方法有综合统计法与总体测量法，相关的介绍会在下一节详细给出。其中总体测辨法以其简单、实用、数据来源于实际测量而得到了广大负荷建模者的关注。本文采用了总体测辨法的思想，将负荷模型设定为由恒阻抗负荷、恒电流负荷、恒功率负荷与感应电动机负荷的综合。总体测辨法希望从电网中获取的扰动数据越大越好，然而现实中不允许有太大的扰动出现，相比之下电网中更多的是进入准稳态的小扰动，而这些小扰动的数据，目前的利用率很低。

本文希望能对这些小扰动数据进行处理，利用这些数据对负荷模型中的静负荷与动负荷的比例这一重要参数进行辨识，从而能够为之后的系统分析给出一个较好的条件。

1.2 电力系统负荷建模概述

1.2.1 电力系统负荷建模的意义

电力系统大体可以分为三部分——发电机部分、电力传输部分和负荷部分[8]。长期以来，人们对发电系统与配电系统进行了大量的研究，已经提出了适合不同仿真精度要求的数学模型。但是，负荷模型由于其时变性、分散性等问题，负荷的建模一直没有取得突破性的进展。人们往往从基本概念出发，采用理想化的恒阻抗、恒电流、恒功率或三者的组合作为负荷模型，但是这种方法十分粗糙，与精确的发电系统、配电系统的建模产生了不对称性，因此大大降低了仿真结果的准确度与可信度。目前，负荷建模已经成为了制约电力系统仿真准确度的主要原因之一。

通过大量的仿真实验后发现，潮流计算、电压稳定计算、暂态稳定计算、小信号动态稳定计算等都与负荷模型有着密切的关系，且在临界情况下，不同的负荷模型给出的结果是截然不同的，更有给出完全相反结果的情况[3][5]。由此可以负荷建模的重要性，提高负荷模型的准确度、通用性成为了电力系统建模的最迫切的问题。

1.2.2 电力系统负荷建模的现状

目前，主导的电力系统负荷建模方法有两种，分别是对电力负荷进行综合统计的综合统计法和根据电网扰动量测进行辨识的总体测辨法。

综合统计法是对各类用电设备的种类、特性、比例进行统计分类，根据不同的用电设备所占的比例加权综合得到负荷模型的参数[4][5]。美国电力科学院（EPRI）对该方法进行了大量的研究，并研制开发了 EPRILOADSYN 负荷模型软件包。EPRILOADSYN 需要用户提供负荷类型数据（民用、工业和商用负荷在总负荷中所占的比例）、各类负荷中用电设备的组成比例和各类负荷元件的特性等三个信息，其中，负荷类型数据必须由使用者给出，统计方法软件中也有介绍。其余的两个参数可以使用软件包的缺省值，也可以根据 EPRI 提供的方法确定，总的来说使用起来比较方便。

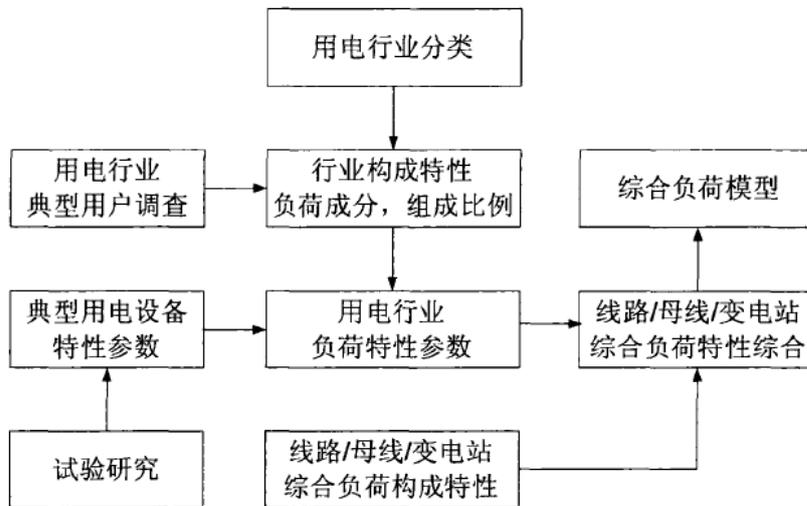


图 1.1 统计综合法示意图

综合统计法得到的负荷模型，其物理概念清晰，便于理解，但是该方法需要投入大量的统计工作，而且由于负荷的时变性，需要在不同的时间对负荷特性进行统计，这样一来工作量就更大了，在现实中很难实现。

总体测辨法是在电网上进行现场测量，得到电网的电压、频率、有功功率、无功功率等数据，根据这些数据的变化量，对事先给定的负荷模型进行参数的辨识[4][5]。总体测辨法将庞大的用电设备综合起来看做一个黑箱子，不考虑其复杂的构成，只注重在电压母线端口的对电网的等效特性。此方法忽略复杂的负荷结构，不需要大量的统计计算，可行性高，方法简单、实用，数据直接来自对电网的测量，由此受到了广大研究人员的关注。本文采用的负荷模型辨识方法便是这种基于测量的综合负荷辨识。

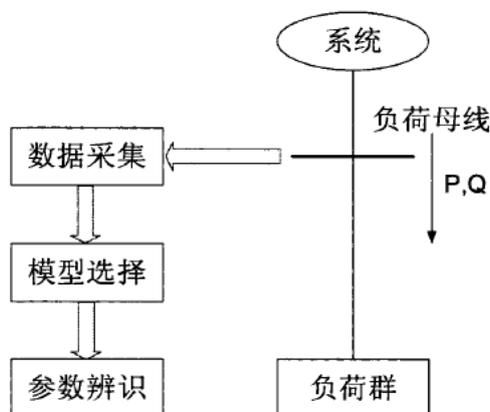


图 1.2 总体测辨法示意图

总体测辨法的可行性更高,通过对电网的测量即可对负荷模型进行参数辨识,不需要进行大量的统计工作。然而,利用该方法得到的模型的通用性不强,适合某一节点的模型不一定在其他节点都可以使用。出于这方面考虑,作者在进行模型选取的时候,采用了物理意义明确、通用性较好的恒阻抗、恒电流、恒功率(ZIP)加感应电动机(M)的综合负荷模型。

目前,负荷建模按照前面提出的两种方法不断发展,分别取得了可观的成绩。

1.3 本文结构和主要内容安排

本文共分为5个章节。

第1章为引言,主要介绍了研究的背景与负荷建模的现状与方法。第2章介绍了实验平台PSCAD/EMTDC,基于仿真实验,提出了小扰动下的负荷模型并用实验对其可行性进行了验证。第3章介绍了本文采用的负荷辨识算法——遗传算法,对算法的结构、原理等进行了详细的说明。第4章运用第3章介绍的遗传算法,用仿真的量测数据对负荷模型进行了辨识,给出了辨识算法的可行性。第5章是全文的总结。

第2章 实验软件介绍与负荷模型的选择

2.1 仿真平台介绍

本课题所使用的电力系统仿真软件为 PSCAD/EMTDC，是一种被广泛使用的电力系统仿真软件。EMTDC 为主运算程序，是 Dennis Woodford 博士于 1976 年，在加拿大曼尼托巴水电局开发完成的。后来通过开发了 PSCAD 的图形界面，用户能够方便地使用 EMTDC 进行电力系统仿真。软件的操作环境为：UNIX OS，Windows95, 98, NT；Fortran 编辑器；浏览器和 TCP/IP 协议。

PSCAD/EMTDC 可以对电力系统进行时域或频域的仿真计算，其内部包含各种常用的元件模块，用户可根据自己需求从模型库里调出元件搭建电路，也可以自己编写代码进行控制。

下图是本次实验所搭的电路图。

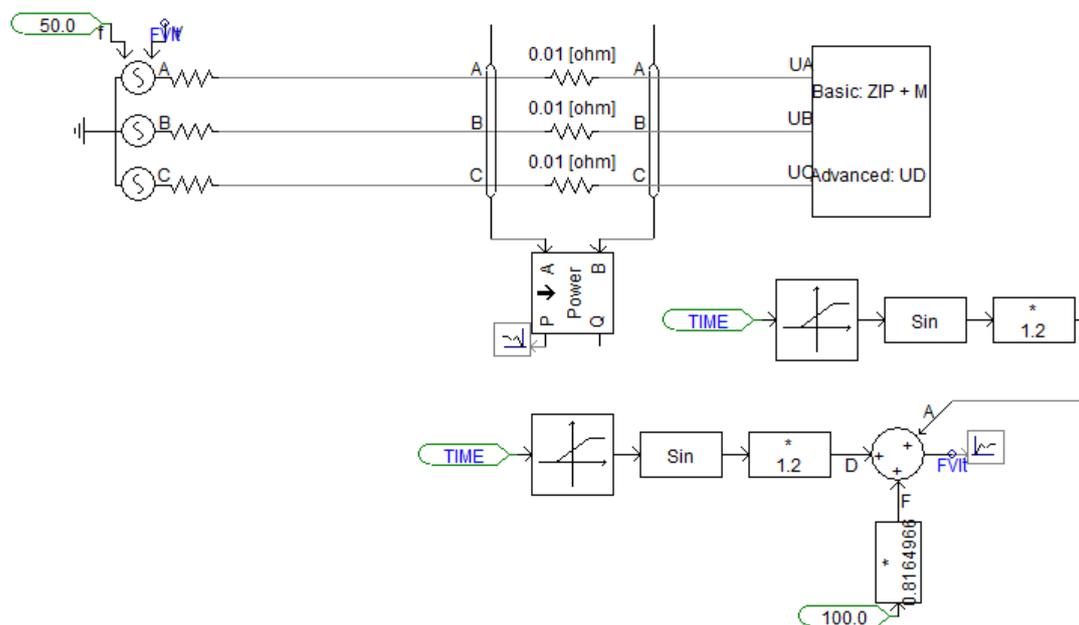


图 2.1 实验电路总视图

搭建的电路大体可分为两部分，上面的部分是负荷模块，接入了三相电网；下面的部分是电网的扰动生成，输入量为电压的峰值。本次实验采用了正弦的扰动信号，其代数式如下。

$$U = 81.65 + 1.2 \sin \omega t$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi \cdot N}{9}$$

其中, N 为 1s 到 10s 的正弦波的周期个数, 该参数可以由 PSCAD/EMTDC 调节。由此可以算出, 测量得到的电网线电压的有效值约为

$$81.65\sqrt{3} / \sqrt{2} \approx 100$$

2.2 负荷模型的选择与搭建

负荷模型一般可分为静态负荷模型和动态负荷模型两类[8]。当输入的电压和频率变化缓和时, 负荷的有功功率与无功功率随电压和频率的变化缓慢地变化, 反映这种规律的即为静态负荷模型。当电压和频率变化较快时, 负荷的动态特性便不可忽视, 此特性可以用动态负荷模型进行标示, 通常采用微分方程或差分方程来表示。

在经过大量的实验和尝试后, 前人们总结出单用静态负荷模型或动态负荷模型都不能很好地描述出负荷的特性。将静态负荷模型与动态负荷模型按一定比例相结合的综合负荷模型成为了目前广泛使用的模型。

出于外推性的考虑, 本文采用的是 ZIP+机理感应电动机模型。其中 ZIP 为静态负荷, 分别对应恒阻抗负荷 Z, 恒电流负荷 I, 恒功率负荷 P。该模型的物理意义清晰, 且在很多仿真软件中也都有应用, 是目前使用最广泛的模型之一。

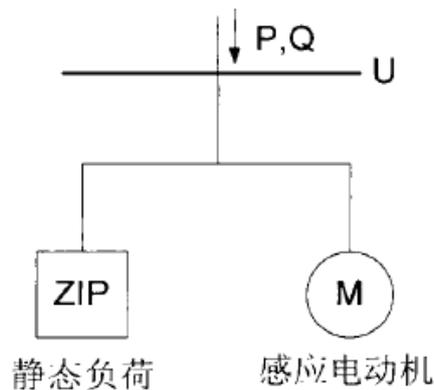


图 2.2 ZIP+感应电动机模型示意图

常用的感应电动机的三阶微分方程如下:

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

其中， E_d 、 E_q 为d、q轴的电势，两者共同表征电动机内点事的幅值和相位； I_d 与 I_q 分别为d、q轴的电流； ω_r 为异步电动机的缺省转速； f_0 为电网频率，在我国为50Hz； T_E 为电磁转矩； T_M 为机械转矩； T_j 为电动机惯性时间常数，即 H_2 。

该模型被电机学界普遍认可采用，但是该模型较为复杂，待辨识参数较多，导致在线辨识难度较大。考虑到在小扰动的情況下，电压波动较小，感应电动机非线性部分通过电压波动的累积可以近似地看作一种线性关系，这样模型就可以得到简化，为在线快速辨识提供可行条件。具体的模型建立将在下一节进行说明。

根据所选的恒阻抗、恒电流、恒功率加感应电动机模型，在PSCAD/EMTDC中搭建如下负荷模块。

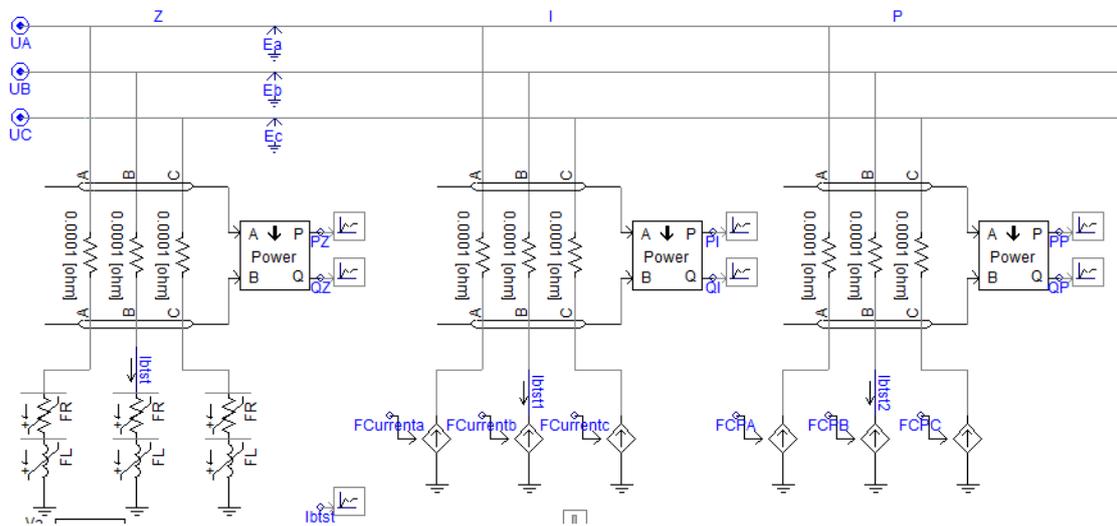


图 2.3 ZIP 模块电路图

图中由左到右依次为恒阻抗负荷、恒电流负荷与恒功率负荷，可以通过调节模块的参数改变负荷的大小。利用PSCAD/EMTDC软件可以对每个负荷消耗的功率进行时域的量测并将数据导出。下图为感应电动机负荷，同样可对其消耗的功率进行时域下的量测。

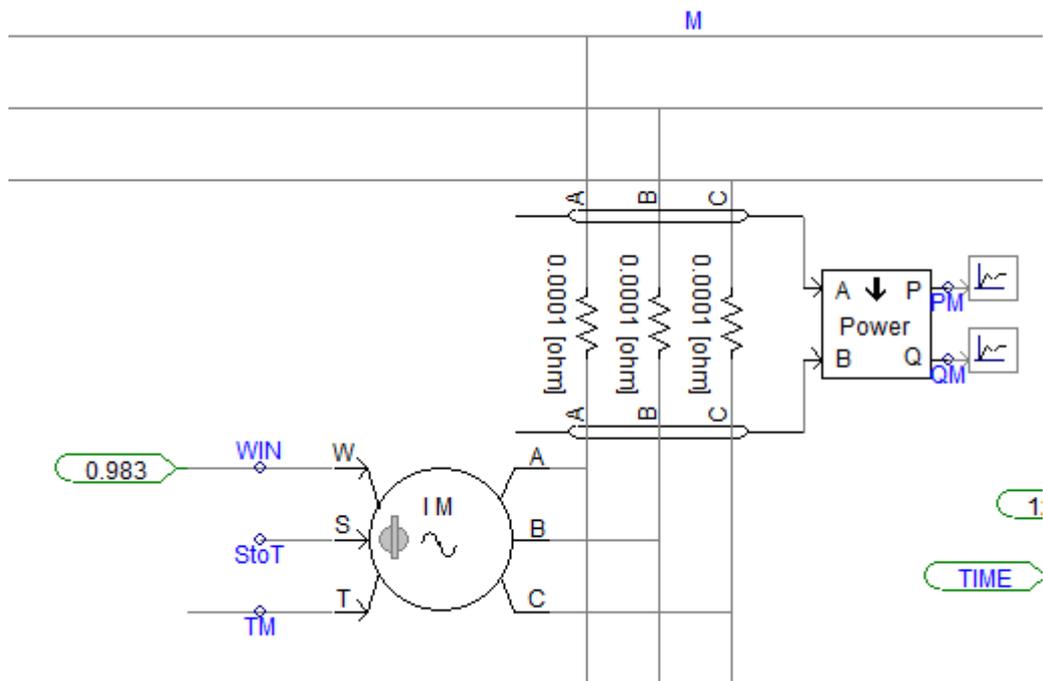


图 2.4 感应电动机模块电路图

2.3 综合负荷的小扰动下响应特性建模

由于传统的三阶感应电动机模型较为复杂，待辨识参数较多，实现在线辨识比较困难。而在小扰动的情况下，由于电压的浮动范围较小，感应电动机在经过电压正负浮动响应的累积后，可以近似地看成一种线性的负荷，从而可以将模型化简，为在线快速辨识提供可行条件。

本文希望能从实验测量的波形图中找到感应电动机负荷响应的数学性质，为此利用搭好的实验平台进行仿真实验，得到如下的电压与有功输出波形。

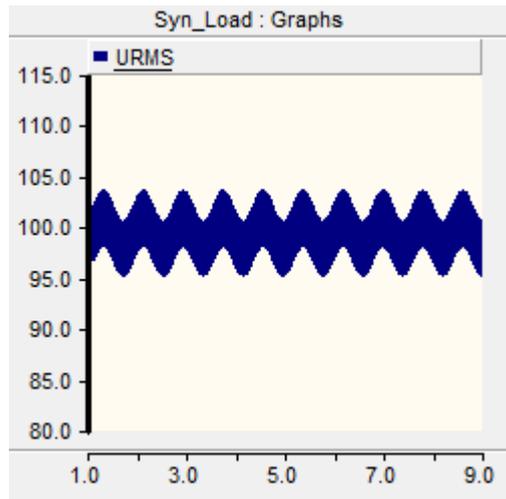


图 2.5 仿真测量的电网电压

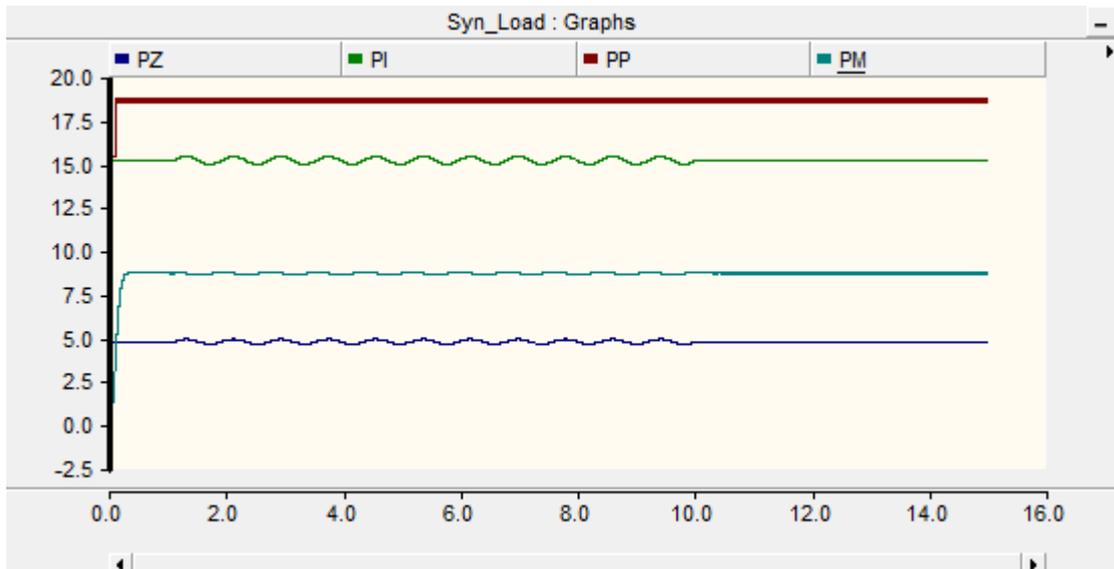


图 2.6 仿真测量的各负荷的有功

图 2.6 中由上至下依次为恒功率负荷、恒电流负荷、感应电动机负荷、恒阻抗负荷的有功功率。将图片放大后如下：

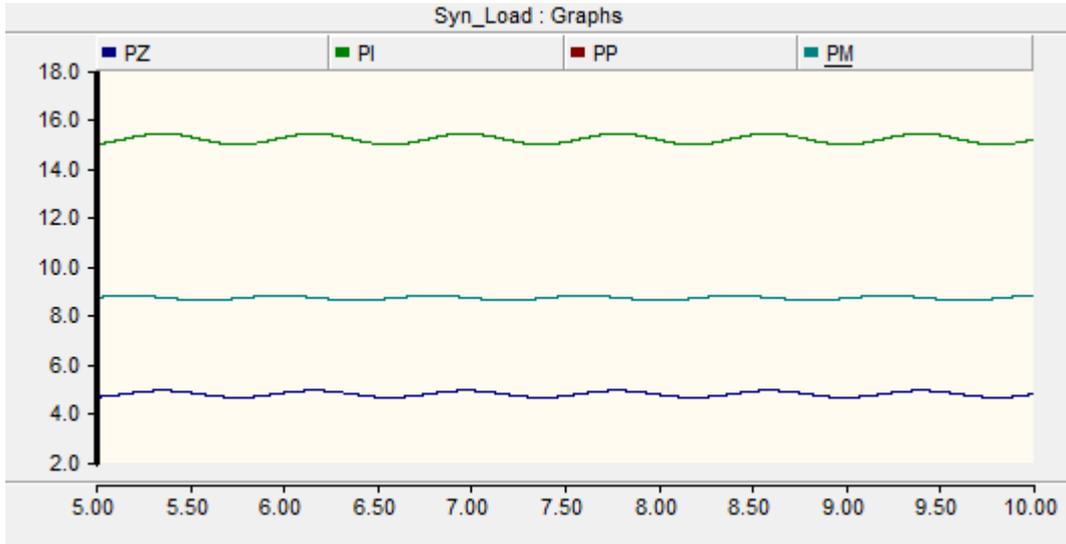


图 2.7 放大后的有功

通过反复放大比较后作者发现随着电压的扰动,恒功率负荷的有功没有改变,恒阻抗负荷与恒电流负荷的有功跟随着电压的变化,感应电动机部分的有功也有波动,但与恒电流负荷、恒阻抗负荷的有功相比相位有所提前。

常用的静负荷部分有功功率的代数表达式如下:

$$P_{\text{静}t} = A_p \left(\frac{U_t}{U_0} \right)^2 + B_p \left(\frac{U_t}{U_0} \right) + C_p$$

式中 $A_p \left(\frac{U_t}{U_0} \right)^2$ 对应恒阻抗负荷, $B_p \left(\frac{U_t}{U_0} \right)$ 对应恒电流负荷, C_p 对应恒功率负荷。

由于感应电动机的有功曲线与静负荷曲线相似,存在一个相位角,在时域就是一个时间的提前,故推测感应电动机的有功代数表达式为 $P_{\text{感}t} = M_p \left(\frac{U_{t+\Delta t}}{U_0} \right)^n$

接下来进行对该模型的验证,将 2s 到 9s 的电压、有功输出等数据导入 MATLAB,以电压量为输入,以各负荷部分的有功功率作为输出,对以上的静负荷与感应电动机负荷模型进行拟合。对于恒阻抗负荷与恒电流负荷,其基本形式是 $y = a \cdot x^n$, $n=1$ 或 2 ,可以使用最小二乘法对系数 a 进行拟合。恒功率负荷可以直接求取测量的平均值。对于感应电动机负荷,其待辨识参数有系数项 M_p ,指数项 n 和时移项 t_0 ,对此无法直接用最小二乘的方法,需要利用自相关法将时移项 t_0

求出，然后可以用最小二乘法将其余参数辨识出来。具体的方法后面还会提出，matlab 实现也将在后面给出，先将拟合的结果给出，如下图。

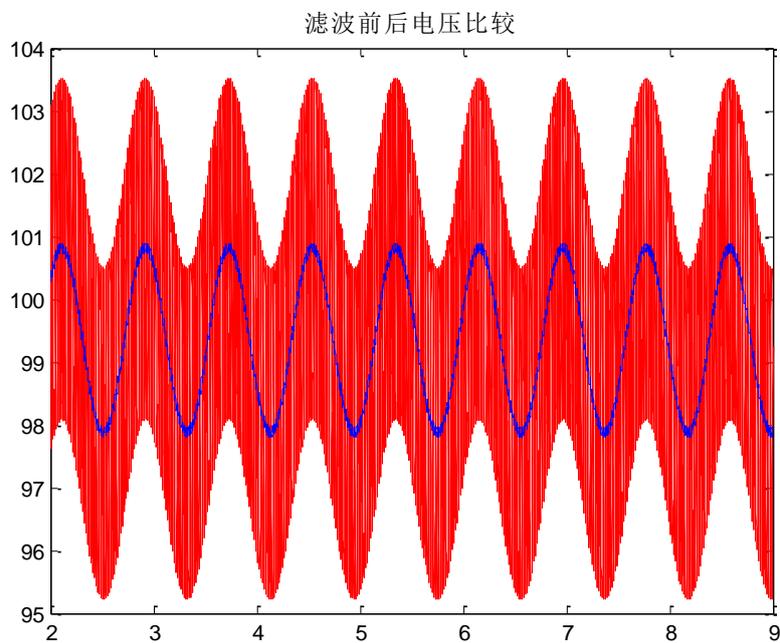


图 2.8 电压滤波前后效果图

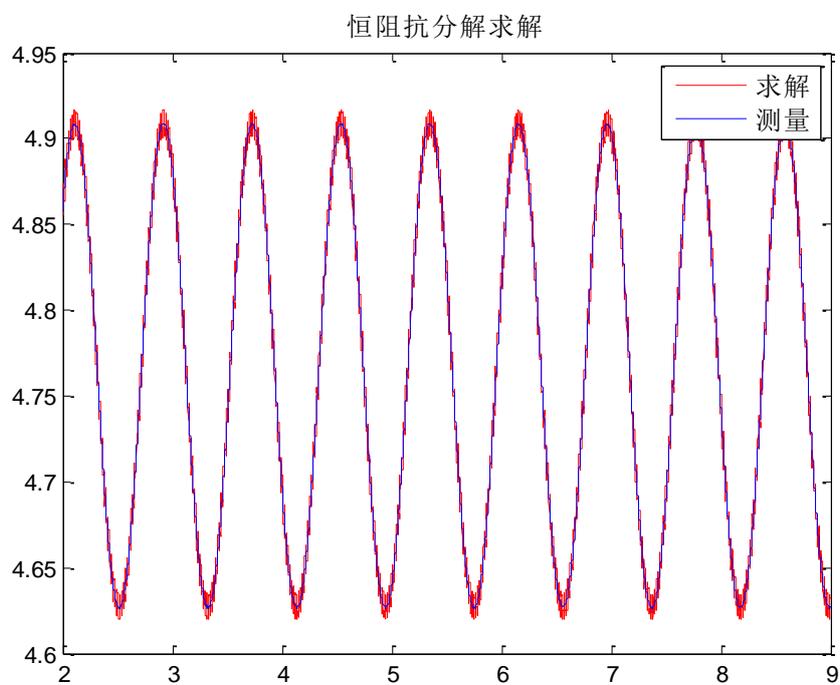


图 2.9 恒阻抗负荷拟合图

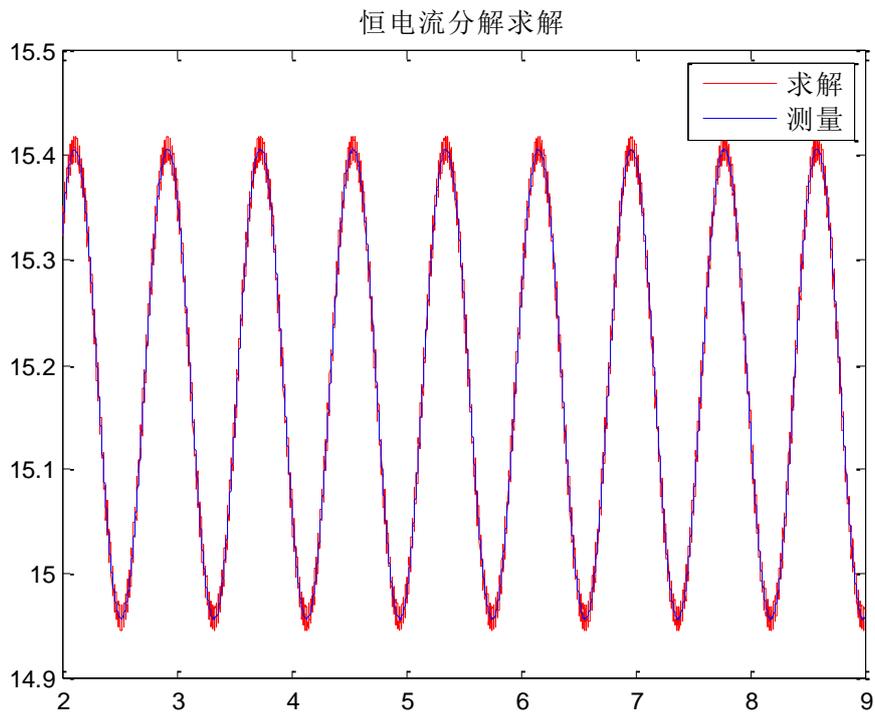


图 2.10 恒电流负荷拟合图

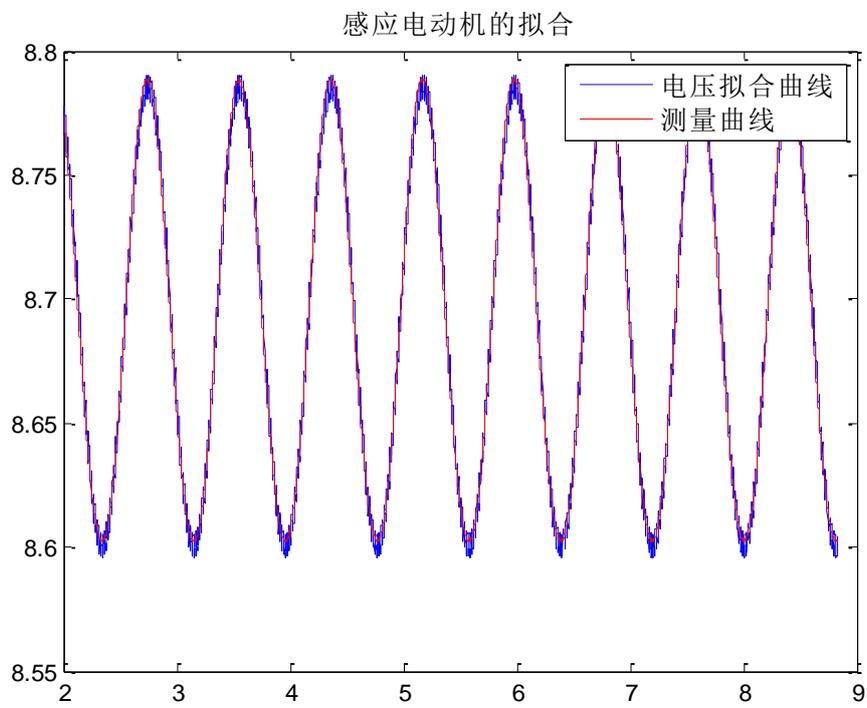


图 2.11 感应电动机负荷拟合图

负荷模型参数辨识结果如下：

表 2.1 感应电动机负荷模型验证结果

| A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n |
|--------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 4.7670 | 15.1827 | 18.6195 | 8.6933 | 0.1735 | 0.7191 |

恒阻抗负荷与恒电流负荷是用最小二乘法进行的参数辨识，恒功率负荷则直接求取测量的恒阻抗功率的平均值。感应电动机负荷的辨识分为两步：第一步辨识出时移 t_0 ，第二步辨识出系数 M_p 和指数项 n 。 t_0 的辨识办法是将输入电压与感应电动机有功曲线归一化处理并平移到 0 点处，计算两个曲线的自相关系数，根据得到的系数确定时移 t_0 。在确定了时移项后，计算出平移后的电压数据 $U(t-t_0)$ ，将其与感应电动机的有功波形用最小二乘法进行拟合，得到系数 M_p 与指数项 n 的值。

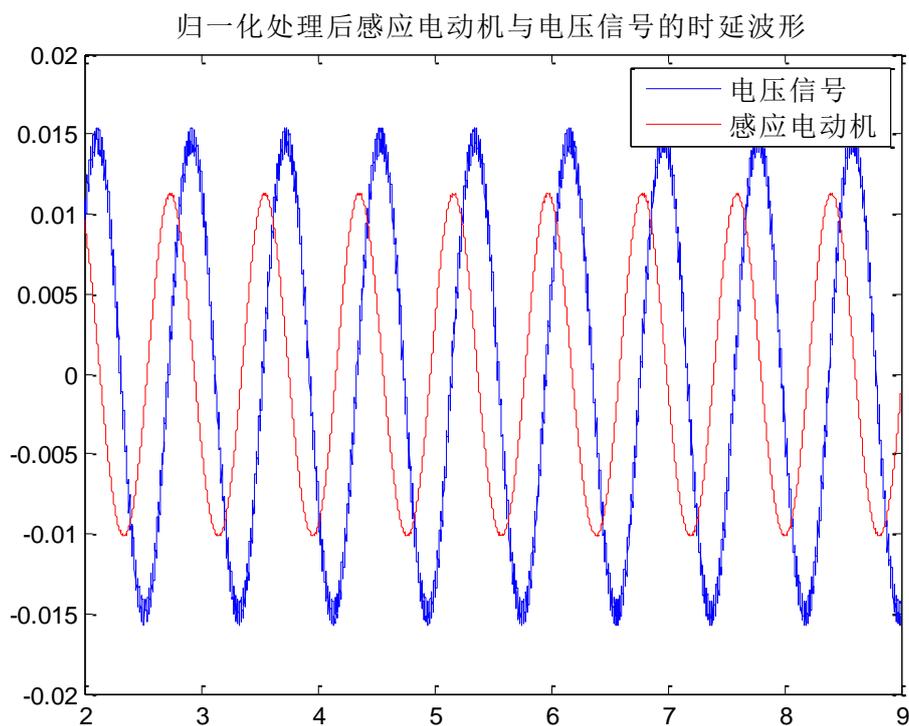


图 2.12 归一化、0 点移动处理后电压与功率平移前图像

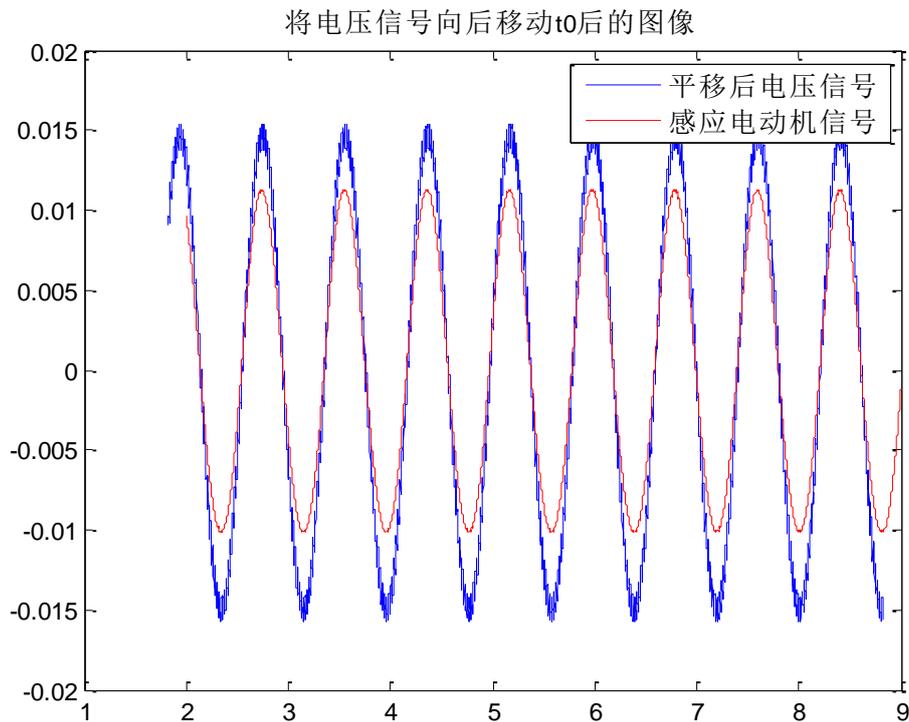


图 2.13 归一化、0 点移动处理后电压与功率平移后图像

最小二乘法是矩阵求解中最常用的方法之一，MATLAB 中最小二乘法曲线拟合可以用 `lsqcurvefit()` 函数方便地求出，表达式为 `[x, res]=lsqcurvefit(fun, x0, xdata, ydata)`。其中 `x` 为拟合结果，`res` 为辨识的误差；`fun` 为需要拟合的函数，`x0` 为初值，`xdata` 和 `ydata` 分别是输入与输出的数据。例如，本文中在拟合恒阻抗负荷时使用的语句为 `[Zp, resZp]=lsqcurvefit(fz, 0, x(:, 2), yz(:, 2))`。`fz` 为曲线的代数方程 $fz=@(Zp, x) Zp*x.^2$ ，初值设为 0，将输入量和输出量导入 `x` 与 `yz`，然后执行语句即可。拟合的结果为系数项 `Zp` 与拟合误差 `resZp`。

求取时移使用了自相关函数 `xcorr()`，通过该函数可以找到与原函数重合度最好时的平移量，然后利用对应关系即可求出时移项 `t0`。`xcorr()` 使用的具体语句为 `[temp]=xcorr(xdata, ydata)`。输入为两个待求取相关系数的向量，输出为相关系数矩阵，矩阵中最大值的坐标即为最佳重合度的平移单位，一位对应 0.005s，由此可以计算出时移。需要注意的是，输入的 `xdata` 与 `ydata` 一定要过零点，否则该函数失效。

2.4 小扰动下负荷有功特性的探究

上面的实验结果虽然拟合的较好，但是仅仅为一次的实验结果而已，缺乏推广性，为了进一步验证模型的可行性，并探究小扰动下负荷模型的有功特性，作者保持输入电压不变，仅改变静负荷的参数，重复以上实验，实验数据如下。

表 2.2 电压不变，仅改变静负荷参数

| 序号 | Ap | Bp | Cp | Mp | t0 | n |
|----|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 2.7326 | 24.0596 | 9.0247 | 8.6989 | 0.1980 | 0.6705 |
| 2 | 1.6050 | 33.6786 | 6.1798 | 8.6889 | 0.1975 | 0.6703 |
| 3 | 0.2801 | 39.4024 | 7.5174 | 8.6790 | 0.1975 | 0.6714 |
| 4 | 5.8490 | 13.9789 | 5.1420 | 8.7183 | 0.1980 | 0.6690 |
| 5 | 2.7417 | 8.7079 | 8.3797 | 8.7273 | 0.1980 | 0.6683 |

从实验中得到的拟合结果均可接受，在此便不再给出拟合的图像。由此模型基本可以确定，其有功的代数方程可以写为

$$P_t = A_p \left(\frac{U_t}{U_0} \right)^2 + B_p \left(\frac{U_t}{U_0} \right) + C_p + M_p \left(\frac{U_{t+\Delta t}}{U_0} \right)^n$$

除此之外，笔者从以上的实验中发现，调节静负荷对感应电动机负荷的影响基本可以忽略，感应电动机负荷的系数项Mp，时移t0与指数项n的变动很小，可忽略不计。可以认为静负荷的改变不影响感应电动机负荷。

进一步，笔者对输入电压（即扰动）的频率进行了由小到大的改变，静负荷维持不变。在不同频率的输入下，各项参数的拟合结果如下：
改变电压输入频率，静负荷不变

表 2.3 改变电压输入频率，其他负荷不变

| N | Z | I | P | M | t0 | n |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 6 | 2.7671 | 8.7480 | 8.3797 | 8.7455 | 0.3900 | 0.4486 |
| 7 | 2.7671 | 8.7480 | 8.3797 | 8.7478 | 0.3205 | 0.5073 |
| 8 | 2.7671 | 8.7480 | 8.3797 | 8.7500 | 0.2710 | 0.5636 |
| 9 | 2.7671 | 8.7481 | 8.3797 | 8.7522 | 0.2315 | 0.6178 |
| 10 | 2.7671 | 8.7481 | 8.3797 | 8.7542 | 0.1980 | 0.6683 |
| 11 | 2.7671 | 8.7481 | 8.3797 | 8.7562 | 0.1740 | 0.7171 |
| 12 | 2.7671 | 8.7481 | 8.3797 | 8.7582 | 0.1565 | 0.7635 |
| 13 | 2.7671 | 8.7481 | 8.3797 | 8.7600 | 0.1415 | 0.8060 |
| 14 | 2.7671 | 8.7481 | 8.3797 | 8.7616 | 0.1275 | 0.8452 |

其中N为1s到10s内扰动波形的周期个数，即扰动频率与其关系为 $f=N/9$ 。从表中可以看出，电压频率的改变给感应电动机负荷带来了变化，系数项 M_p 有一个缓步上升的趋势，但是幅度很小，基本上可以忽略，时移 t_0 随着N的增大而减小，指数项 n 则相反随着N的增大而增大。结合前面实验得出的结果，感应电动机的系数仅与电压的输入有关，故 t_0 、 n 、 N 之间可能存在某种关系，确定其一即可将剩余的两项求出。将 t_0 与 n 的变化做成图，发现两者呈现出近似反比例函数的关系，用MATLAB的曲线拟合工具箱将其拟合，可以得到两者的关系为

$$t_0 = a/n + b, a=0.2507, b=-0.1727$$

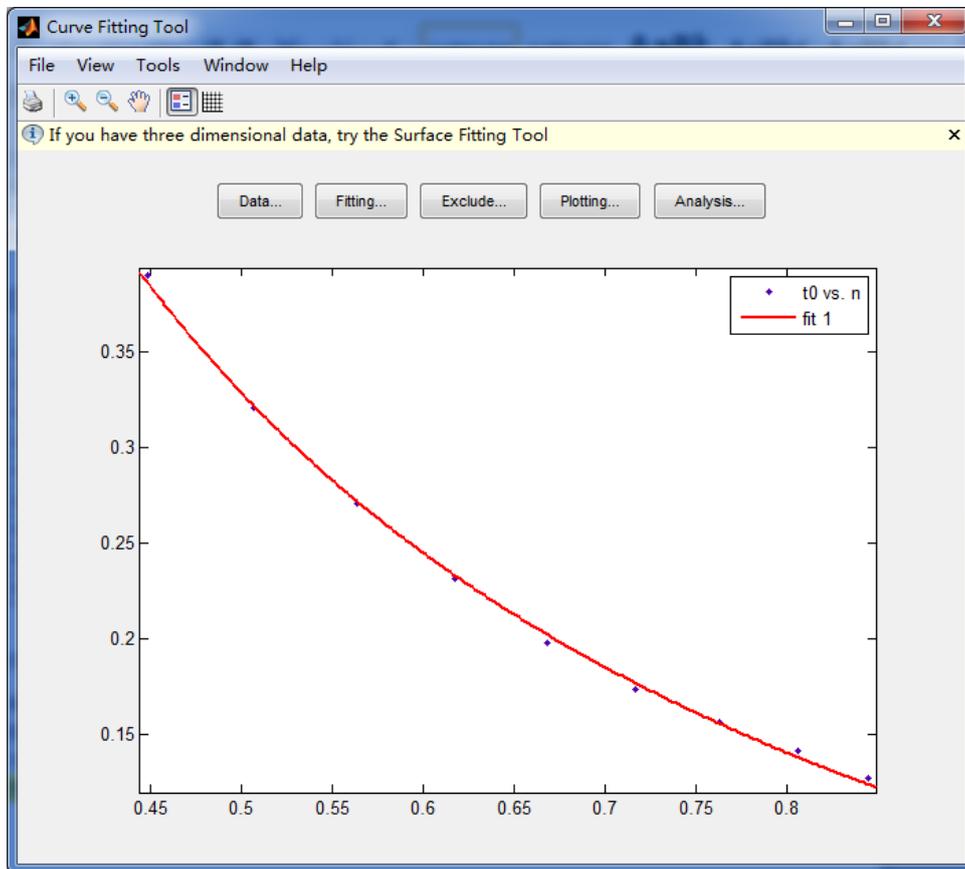


图 2.14 t_0 与 n 的关系拟合图

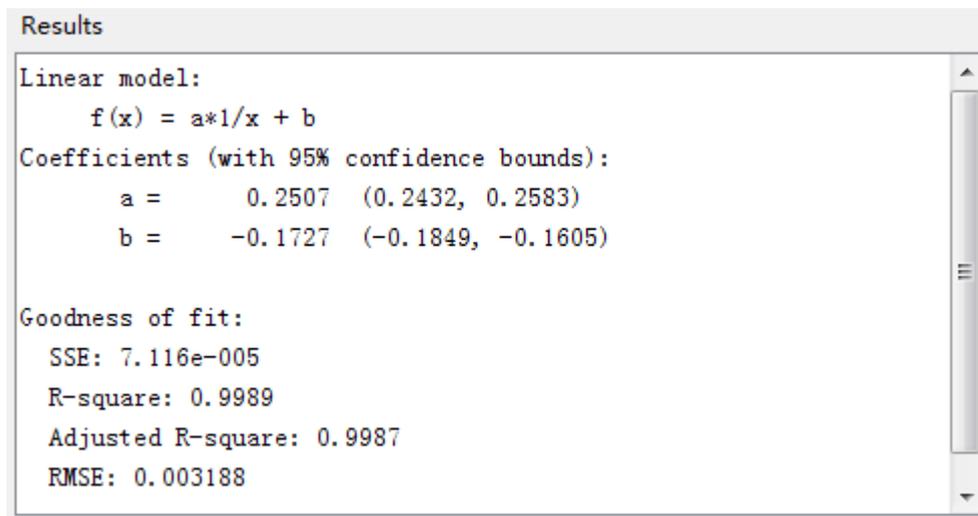


图 2.15 t_0 与 n 的拟合结果

2.5 本章小结

本章首先简要介绍了仿真软件，并对实验搭建的电路做了介绍。接着由仿真结果出发，通过分析波形推测出感应电动机的线性化模型，并通过实验进行了验证，最终得出小扰动下的有功代数方程式为

$$P_t = A_p \left(\frac{U_t}{U_0} \right)^2 + B_p \left(\frac{U_t}{U_0} \right) + C_p + M_p \left(\frac{U_{t+\Delta t}}{U_0} \right)^n$$

之后，对小扰动下的负荷模型进行了探究，发现感应电动机的指数项 n 与时移项 t_0 在同一频率下几乎不变，不同频率下呈现类似反比例函数性质的关系，由此导出两者的关系式 $t_0 = 0.2507/n - 0.1727$ 。进一步考虑，或许在辨识了 t_0 或 n 后，可以由此得出扰动的频率。

第3章 基于遗传算法的负荷结构辨识方法设计

3.1 引言

遗传算法 (genetic algorithms, GA) 是一种智能优化算法, 由 J Holland 于 1975 年根据生物进化论而提出的 [9]。遗传算法将要求解的目标函数作为一种“环境”, 输入量作为生活在该“环境”的“个体”, 其代入目标函数的值作为对该“环境”的适应程度, 通过复制、交叉、变异等操作繁衍后代, 淘汰环境适应度低的个体, 一代代进化后最终收敛到最适应该环境的个体。

遗传算法是一种高度并行、随机和自适应优化算法, 其使用没有局限性, 是一种通用的优化算法。算法的各项操作易编写代码, 执行起来简单, 且优化不受限制性条件的约束, 其两个最大的优点就是隐含并行性和全局解空间搜索。目前, 随着计算机技术的发展, 遗传算法已经越来越受到重视, 在模式识别、神经网络、图像处理、机器学习等诸多领域均得到了应用。

作者选择该算法是在进行了大量的实验后决定的。原本作者使用求解无约束非线性最优解的方法对模型的参数进行了辨识, 但是, 该方法需要给定一个初值。通过大量的实验发现, 辨识的结果与初值关系很大, 只有在初值非常靠近最优解时辨识参数的结果才较为理想, 而稍微偏离一点最优解将会得到局部最优解, 甚至无法找到。该无约束非线性最优求解的函数在 matlab 中有已经编写好的 `fminsearch()`, 该函数是用单纯形法求解目标函数的最小值的。后来, 作者改变函数, 使用了有约束的 `fmincon()` 函数进行求解, 该方法是用牛顿法求最优解, 但是很遗憾的是, 在多次实验中, 该函数的结果返回标示符 `exitflag` 的值为 0, 即在使用该函数进行实验的过程中, 很多都没有辨识出结果。

作者对以上结果做了总结, 分析了导致这类问题出现的原因。首先是给定的目标函数存在多个局部最优解, 且全局最优解相对于局部最优解优势不够好。再者, 由于这些函数均为 matlab 的自带函数, 内部结构不是很了解, 不能对函数进行很好的调整。出于以上两点考虑, 作者决定自己编写辨识函数, 该函数要有全局搜索的能力, 且对目标函数的值要有可操作性, 如将不同输入对应目标函数值之间差别加大等。基于以上的考虑, 作者决定采用遗传算法。

整体的辨识思路可以用以下框图表示

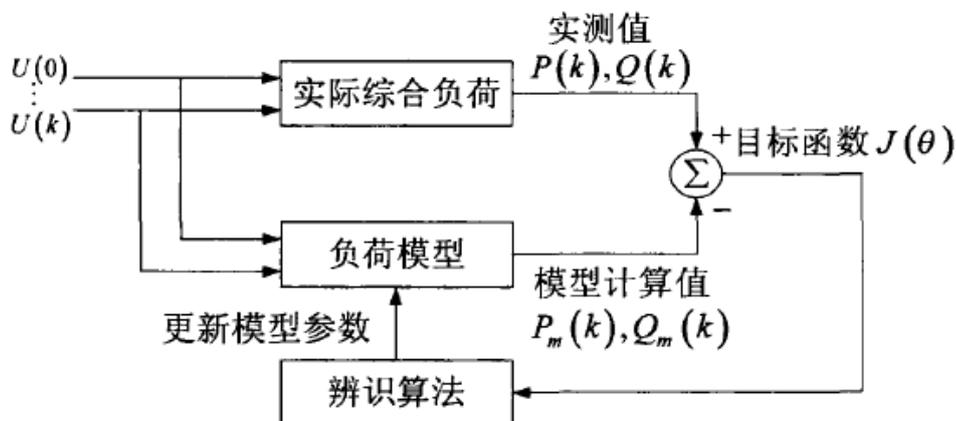


图 3.1 负荷模型参数辨识原理图

3.2 算法描述

遗传算法的总思路是：从解空间中产生一代初始种群，通过适配值函数计算出每个个体对“环境”的适应程度，从中选择“适值”更高的个体，对其“染色体”进行复制、交叉、变异等操作遗传到下一代种群中，淘汰“适值”低的个体。这样一代一代“繁衍”下去，种群将不断进化最终收敛到全局的最优解或先前规定的约束条件。

下面对算法的各个步骤做详细的说明。

3.2.1 确定编码方案

由于遗传算法的搜索空间通常不能直接作为问题的解空间，因此需要找到一种对应关系，将遗传算法的搜索空间与问题的解空间联系起来，这种对应关系便是编码。编码的选择要依赖实际的问题，选择合适的编码方案对问题求解的效率有着很大的影响。

函数优化问题的编码通常有二进制编码、十进制编码和实数编码等。

二进制编码是将问题的解用二进制 0-1 字符串来表示的方法。例如，用一个长度为 l 的二进制字符串 s 来表示区间 $[a, b]$ 的变量 x ，则其关系式可表示成如下形式：

$$x = a + \frac{[s]_2}{2^l - 1} \cdot (b - a)$$

十进制编码的基本原理与二进制编码相同，将 0-1 字符串替换为 0 至 9 的字符串即可，在此不多做说明。

实数编码是将解用实数来表示的方法。该方法更加地实用，且解决了二进制编码和十进制编码的精度和存储量等问题，同时可以在引入问题的相关信息，如梯度信息等。实数编码可以使遗传算法直接在解空间进行遗传搜索，对高维度的优化问题有较好的效果，得到了广泛应用。

在本文中，考虑到算法的效率、存储空间与代码编写难度，选择了实数编码方案，将每个待测参数作为“染色体”中的一位。

3.2.2 适配值函数的确定

适配值函数是计算个体的“适值”，对该个体对“环境”的适应程度作出评价的函数，也可以将此函数视作个体“生存”的“环境”。在后面的交叉、变异、复制等遗传操作中均以个体的适配值为选择依据，适配值函数的合适与否直接影响最终得到的结果是否准确。

适配值函数的确定也要以实际问题为基准，对于简单的求最大值问题而言，可以直接将目标函数作为适配值函数。在选择适配值函数时还要注意的一点是该适配值函数计算优劣的个体时，适配值差异要足够明显，若优势个体相对弱势个体的“适值”差异不大，则搜索效率将大大降低，并可能出现早熟收敛等问题。出现这种情况时需对适配值进行调节，常用的方法有线性变换和指数变换等，如将原本的适配值函数 $f(x)$ 变换为 $e^{a \cdot f(x)}$ 。

本文是对模型的参数进行辨识，以测量得到的功率为真实结果，以电压量为输入，求出模型输出的解，将两者的差作为基准，差越小则表示拟合的结果越好。因此，适配值函数的设定即为模型输出与测量值之间的误差。

3.2.3 种群初始化

首先要确定解空间，给定每个解的范围，此范围可以取得宽松一些，没有严格的限制，虽然会对搜索效率产生影响，但问题不大。在确定了解空间后要初始化种群，也就是生成迭代算法的第一组解，可以看成是一种初值。为了让种群有较好的多样性，并从全局进行搜索提高效率，初识种群一般是随机生成的。

种群的规模与算法的效率有关，一般选取的范围是 50 到 200，通常“染色体”的长度越长，种群规模越大，具体数值可根据需要而定。

3.2.4 遗传操作

1 选择操作

选择操作是从种群中选取适配值高的个体的操作，该操作可以将劣势个体淘汰掉，保证优秀的基因遗传到下一代。

选择的方法有很多种，常用的有比例选择或轮盘赌法、基于排名的选择和锦标赛选择法。

轮盘赌法是常用的选择法之一，该方法是计算所有个体的适配值在总适配值和所占的比例，该比例即为该个体被选择的概率。用代数式表示则为

$$\frac{\sum_{j=1}^{i-1} f_j}{\text{popsize}} < \xi \leq \frac{\sum_{j=1}^i f_j}{\sum_{j=1} f_j}$$

其中 f_j 为第 j 个个体的适配值，popsize 为种群的规模， ξ 为均匀随机产生的 $[0, 1]$ 的随机数。

基于排名的选择方法与轮盘赌法类似，将个体按照适配值进行排序，分给每个个体选择概率，排名靠前的也就是适配值高的选择概率更大，总体的概率和要保证为 1。

锦标赛法是从种群中随机选择 1 个个体，然后将这 1 个个体中适配值最高的个体选出。选择的效果由 1 决定。

本文采用的方法是锦标赛选择法，通过实验后发现种群的多样性较差，容易出现早熟的现象，通过多次实验后决定 1 的取值为 2。此外，为了保证最佳个体不会被偶然淘汰掉，在选择时会将最优个体直接复制到下一代而不经任何处理。

2 交叉操作

交叉操作是主要的遗传操作步骤，用于产生新一代的种群，实现在解空间中的搜索。操作过程是在原种群中选择两个个体作为父代，根据交叉概率对其进行交叉，交叉方法根据编码的不同有以下几种方式。

二进制与十进制的交叉方式类似，有单点交叉、两点交叉和多点交叉。单点交叉是在父代“染色体”中随机选择一位，将该位及其后面的“染色体”进行对换。以二进制为例，设父代的两个个体为 (1100 101) 和 (0101 100)，随机产生的交叉位置为 5，则交叉操作后的子代个体为 (1100 100) 和 (0101 101)。

两点交叉就是随机产生两个交叉位置，将这两点间的“染色体”进行互换。多点交叉则是随机生成几个交换位置，然后将对应位置的“染色体”进行交换。

实数编码的交叉通常采用算术平均的方法，对两个父本 x_1 与 x_2 ，新产生的个体为 $x = a * x_1 + (1 - a) * x_2$ ，其中 a 为随机生成的 $[0, 1]$ 之间的数。实数编码也可以从多个个体中进行交叉，如有 i 个个体 x_1, x_2, \dots, x_i 作为父本，其后代为 $x = a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + \dots + a_i * x_i$ ，其中 a_i 在 $[0, 1]$ 之间且 $a_1 + a_2 + \dots + a_i = 1$ 。

除以上介绍的交叉办法外，还有映射交叉、次序交叉等其他交叉方法，要根据实际问题而定，在此便不多做说明。

本文采用了实数编码，故在交叉操作中选择了算术平均的方法，此外还结合了两点交叉的思想，在“染色体中”随机选择了两点，将两点间的基因进行了算术平均操作。

3 变异操作

变异是指交叉后产生的新个体，按照一定几率（通常很小）产生的变化。变异操作的使用可以减少种群在未达到最优解时而收敛的早熟问题，提高种群的多样性，使种群收敛到全局最优解。

二进制与十进制编码通常采用置换法，在“染色体”上随机选择一个或多个置换位，将原基因置换为其他的基因，如将某位的 0 置换为 1。

实数编码通常采用在原基因段上加入扰动的方法进行变异，用代数式表达则为 $x = x_0 + a * s$ ，式中 x 为变异后的个体， a 为 $[0, 1]$ 的随机数， s 为扰动的幅值。

需要注意的是，在进行变异操作后要对变异的个体进行检查，防止变异后解的取值超出解空间，可以将超出的数值取为边界值。

3.2.5 终止条件

如果没有终止条件，即使已经收敛到最优解，遗传算法也会不停地持续下去，因此要在遗传算法得到收敛时给出终止条件。

由于最优解往往是未知的，故需要从遗传过程中找到合适的退出信息。常用的终止条件有固定仿真步长，也就是更新代数；也有设置可接受的适配值的方法，设置某一常熟，当遗传算法得到的最优解的适配值大于该常数时终止；还有设置最优解的滞留步数的方法，即设定某个自然数 N ，若连续 N 代的最优解均不改变则推出运算。此外还有很多其他的办法。

本文实验中首先固定了最大更新代数，然后设置了可接受的适配值，在判断得到的最优解的适配值超过该值后进行退出。

3.2.6 算法中参数的设置

遗传算法中的主要参数及其常用取值在此列出

种群规模：50-200，默认值 100

交叉概率：0.5-0.85，默认值 0.8

变异概率：0.05-0.2，默认值 0.1

进化代数：100-1000，默认值 100

3.3 本章小结

本章对此次实验的辨识算法进行了详细的介绍，遗传算法的编写具体需要确定编码方案、确定适配值函数、初始化种群，选择、交叉、变异等遗传操作、设置终止条件。整个遗传算法可以写成如下步骤：

步骤 1：初始化参数，设定好算法中的各参数值，令 $k=0$ ，生成规模为 N 的初始种群 $\text{pop}(0)$ 。

步骤 2：评价种群 $\text{pop}(k)$ 中每个个体的适配值，将适配值最大的个体复制到临时种群

步骤 3：令 $m=1$

步骤 4：根据适配值的大小，从原种群 $\text{pop}(k)$ 中选择两个个体作为父本，生成一个 0 到 1 的随机数 a ，若 $a \leq p_c$ ， p_c 为交叉概率，则将两个父本执行交叉操作，生成两个临时个体；若 $a > p_c$ ，则不执行交叉操作，直接将两个父代作为临时个体。

步骤 5：生成一个 0 到 1 的随机 b ，若 $b \leq p_m$ ， p_m 为变异概率，则对两个临时个体进行变异操作，并将适配值更高者放入临时种群；若 $b > p_m$ ，则直接计算两个临时个体的适配值，并将适配值高者存入临时种群中。令 $m=m+1$ 。

步骤 6：若 m 小于 N ，则返回步骤 4；否则转至步骤 7。

步骤 7：用锦标赛等选择方法对临时种群进行筛选，在此之前先将最优个体直接复制，从而生成新一代种群 $\text{pop}(k+1)$ 。

步骤 8：判断种群 $\text{pop}(k+1)$ 是否满足终止条件，满足则退出，否则令 $k=k+1$ ，并转至步骤 2。

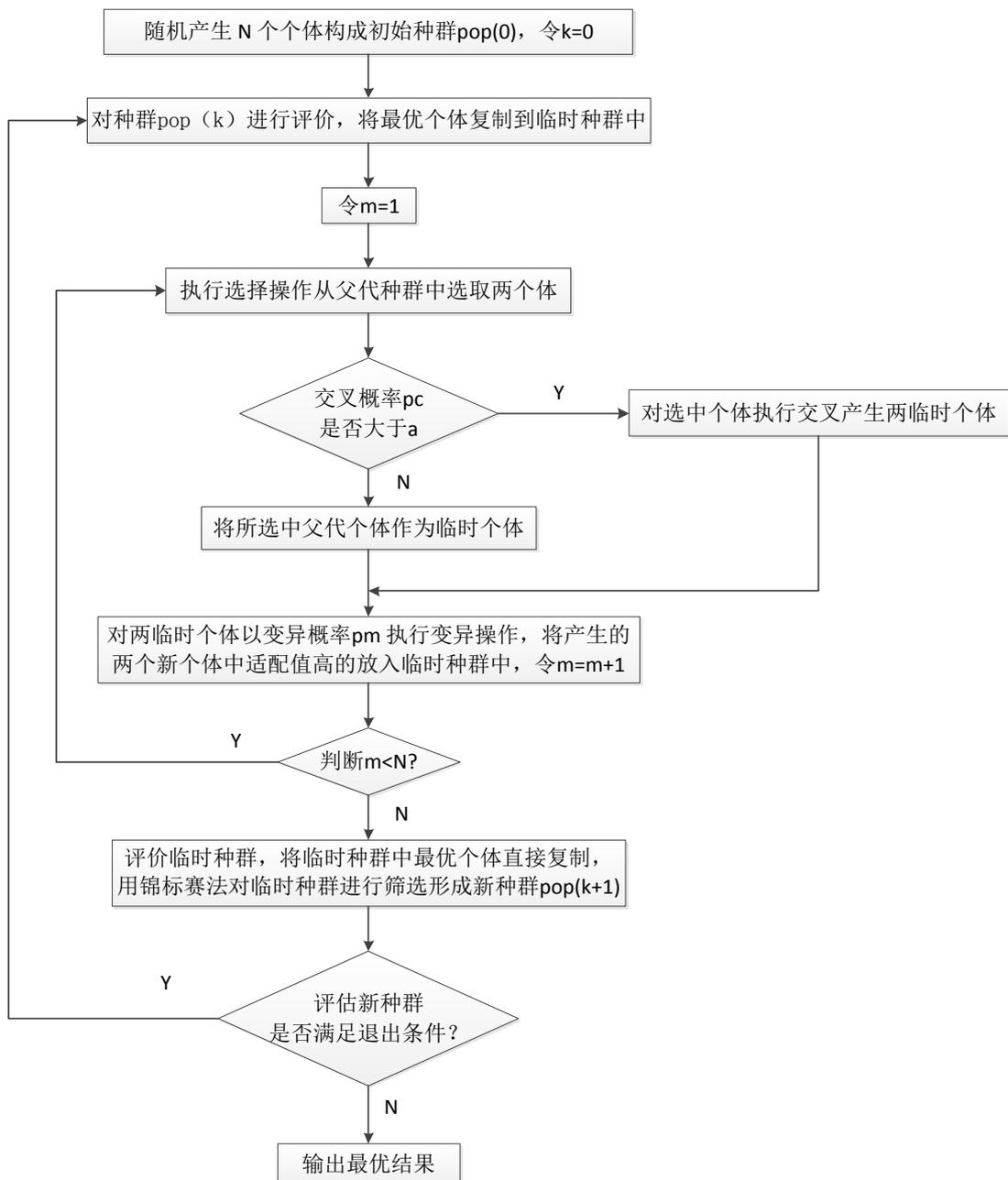


图 3.2 遗传算法的流程图

第4章 负荷辨识算法的实践

4.1 负荷模型的再简化

第2章详细介绍了本次小扰动实验的模型提出过程，并对模型进行了实验验证，得到如下的模型的代数方程：

$$P_t = A_p \left(\frac{U_t}{U_0}\right)^2 + B_p \left(\frac{U_t}{U_0}\right) + C_p + M_p \left(\frac{U_{t+\Delta t}}{U_0}\right)^n$$

第3章详细介绍了辨识采用的遗传算法。作者将模型导入遗传算法中，对参数进行了辨识，待辨识参数可表示为 $x=[A_p \ B_p \ C_p \ M_p \ n \ t_0]$ 共有六个，是一个六维解空间的搜索，效率十分低下，且出现了多解的现象，下面是20次仿真的结果。

表 4.1 原辨识算法 20 次实验结果

| 序号 | Ap | Bp | Cp | Mp | t0 | n | f(x) | e | 运行时长 (s) |
|----|--------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|---|----------|
| 1 | 7.6952 | 11.6831 | 5.8773 | 11.7548 | 0.3374 | 0.9000 | 3846.3 | 0 | 72.59 |
| 2 | 6.6486 | 10.1348 | 10.1094 | 10.1114 | 0.3081 | 0.8804 | 5452.2 | 1 | 10.44 |
| 3 | 5.6036 | 5.7969 | 16.2544 | 9.3635 | 0.2422 | 0.5659 | 7487.7 | 1 | 5.49 |
| 4 | 5.8979 | 5.1995 | 11.8191 | 14.0945 | 0.2432 | 0.5002 | 7336.6 | 1 | 13.29 |
| 5 | 7.437 | 9.9377 | 9.3595 | 10.2795 | 0.3337 | 0.8969 | 4671.6 | 1 | 18.63 |
| 6 | 5.1005 | 8.7030 | 15.6597 | 7.5459 | 0.2813 | 0.7938 | 4588.0 | 1 | 12.39 |
| 7 | 6.2208 | 6.0873 | 16.4009 | 8.2934 | 0.2512 | 0.8142 | 6587.6 | 1 | 6.20 |
| 8 | 4.851 | 10.209 | 11.328 | 10.620 | 0.281 | 0.7149 | 8634.4 | 1 | 17.6 |

| | | | | | | | | | |
|--------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|---|-----------|
| | 0 | 3 | 4 | 2 | 5 | | | | 1 |
| 9 | 6.927 4 | 5.0021 | 16.115 2 | 8.9570 | 0.300 8 | 0.6952 | 4502.6 | 1 | 12.2 6 |
| 1 0 | 3.455 3 | 7.5320 | 19.687 1 | 6.3415 | 0.183 8 | 0.7783 | 7680.7 | 1 | 10.8 0 |
| 1 1 | 1.736 5 | 12.300 1 | 12.077 5 | 10.891 9 | 0.197 2 | 0.4225 | 5827.0 | 1 | 9.55 |
| 1 2 | 7.157 9 | 6.3278 | 13.523 8 | 10.001 0 | 0.293 7 | 0.7126 | 6217.7 | 1 | 11.9 8 |
| 1 3 | 1.905 6 | 8.3307 | 18.378 2 | 8.3909 | 0.127 0 | 0.7244 | 5702.4 | 1 | 8.10 |
| 1 4 | 2.395 8 | 13.990 9 | 11.663 6 | 8.9611 | 0.289 3 | 0.5902 | 4952.2 | 1 | 10.3 8 |
| 1 5 | 5.569 4 | 9.9598 | 11.551 1 | 9.9160 | 0.315 0 | 0.8918 | 4642.8 | 1 | 8.18 |
| 1 6 | 3.242 5 | 13.137 0 | 12.657 6 | 7.9671 | 0.262 7 | 0.7417 8 | 4651.8 | 1 | 17.4 4 |
| 1 7 | 3.914 6 | 6.2048 | 15.410 2 | 11.483 9 | 0.178 7 | 0.5333 | 14324. 8 | 1 | 12.4 7 |
| 1 8 | 8.678 3 | 2.1717 | 14.802 2 | 11.368 1 | 0.281 5 | 0.7065 | 7109.2 | 1 | 11.3 9 |
| 1 9 | 2.968 2 | 8.8629 | 18.939 2 | 6.2499 | 0.200 0 | 0.7765 | 5797.1 | 1 | 11.7 4 |
| 2 0 | 7.493 1 | 3.8446 | 18.625 7 | 7.0582 | 0.283 9 | 0.9000 | 6942.4 | 1 | 39.6 2 |
| 平均 | 5.116 | 8.0912 | 14.440 1 | 9.3629 | 0.255 5 | 0.7179 | 6479.4 | 1 | 16.0 2 |

表 4.2 分部辨识结果（对比用）

| <u>A_p</u> | <u>B_p</u> | <u>C_p</u> | <u>M_p</u> | <u>t₀</u> | <u>n</u> |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------|
| 1.9452 | 10.3901 | 15.9665 | 8.7116 | 0.1735 | 0.7178 |

表格的前 6 列为待辨识的参数，第 7 列为遗传算法中该个体的适配值，具体为拟合曲线与测量曲线的倒数，数值越大表明拟合度越好，在实验中认为大于 4500 即可接受；ef (exitflag) 为推出标识，1 代表找到满足终止条件的个体，0 则表示没有找到；终止条件的设定为适配值大于 4500 或达到最大仿真步长；最后一列为仿真的运行时长，单位是秒。最后一行的平均值计算中，前 8 列未使用第一行的无效数据，最后一列的时间平均则将第一行的仿真时间也加入进行了统计。

从表中可以看出，第一次仿真未能找到满足终止条件的解，运行时长也较长，为 72 秒，其他解都满足终止条件。从 $f(x)$ 列中可以看出，这些解的误差均可接受，在附录 B 中给出了对应编号的拟合图像。虽然结果的分散性较强，但是从附录 B 和 $f(x)$ 的值可以看出，曲线的拟合度还是可以接受的。但是与分部仿真得到的结果对比，部分解的误差还是很大的，尤其对于我们关注的 M_p 项，其误差最大达到了 62% 左右。其他参数的分散性也较为严重，其结果如下图：

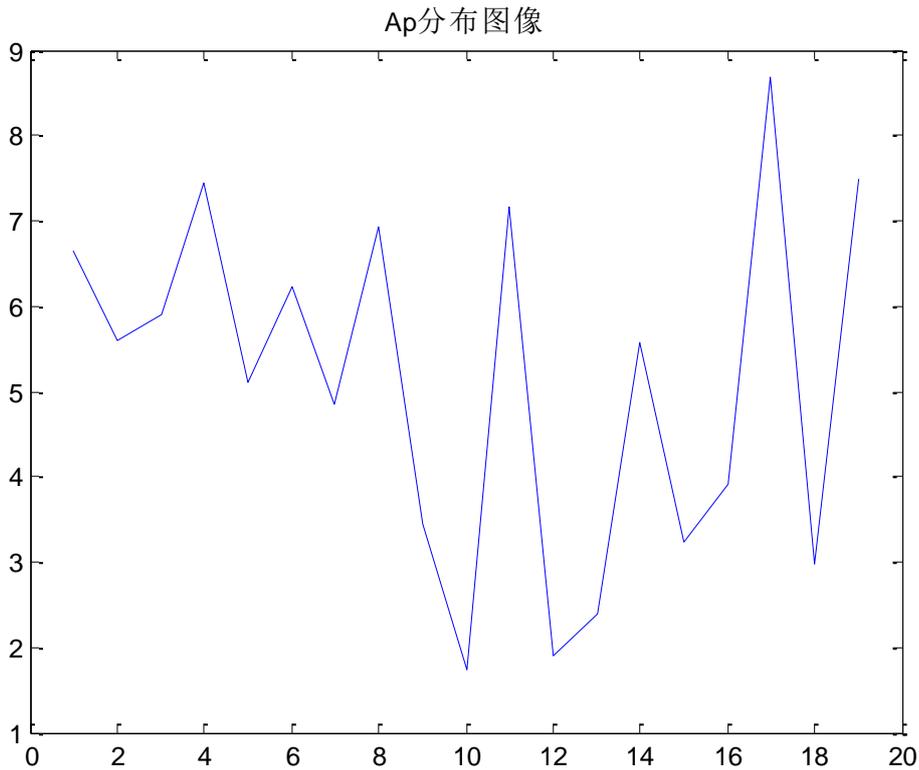


图 4.1 原辨识算法辨识 A_p 的分布图

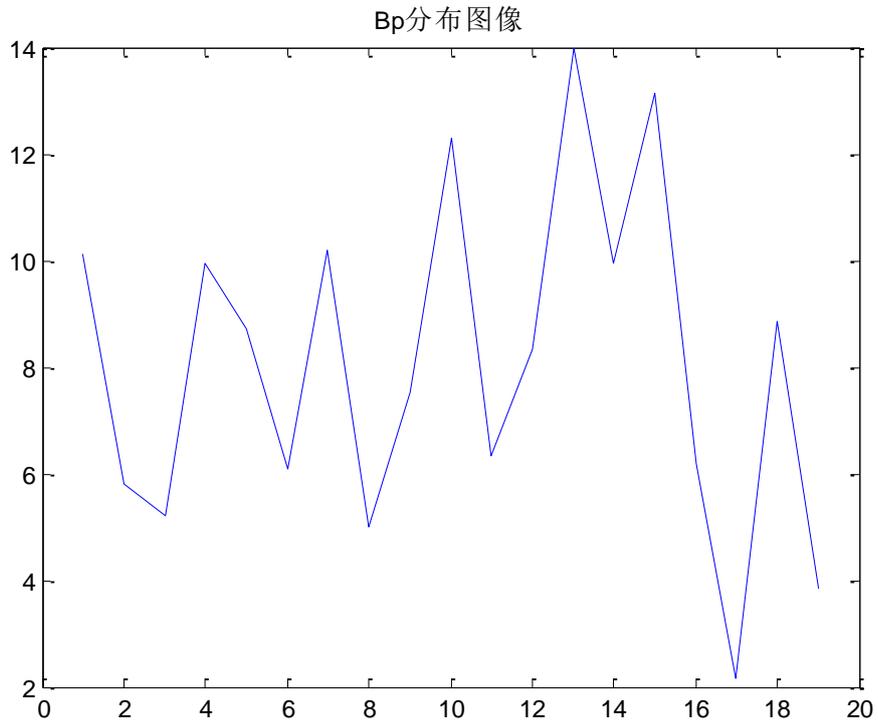


图 4.2 原辨识算法辨识 Bp 的分布图

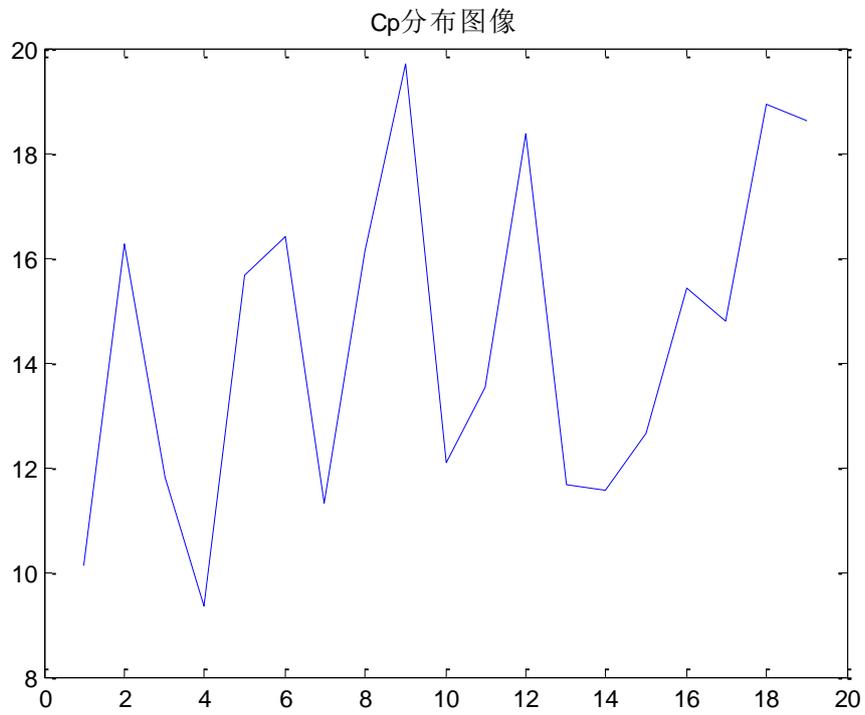


图 4.3 原辨识算法辨识 Cp 的分布图

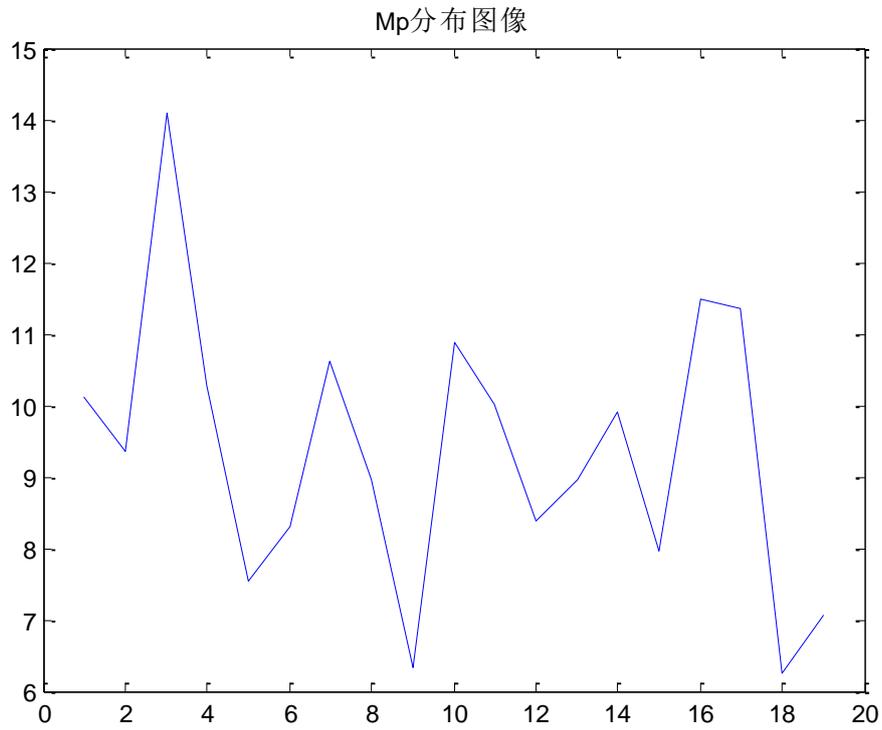


图 4.4 原辨识算法辨识 M_p 的分布图

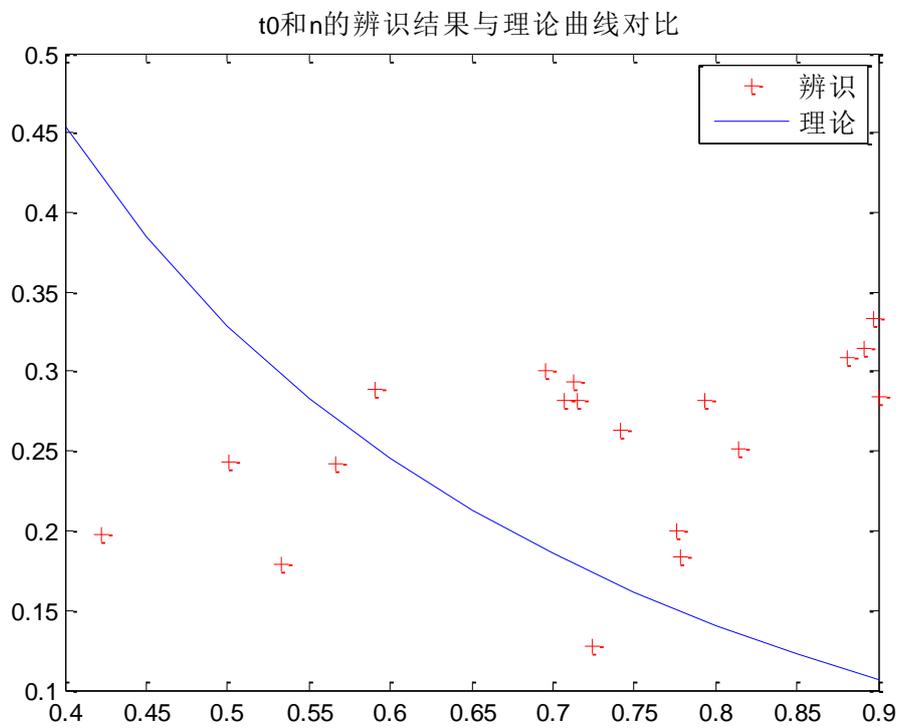


图 4.5 原辨识算法辨识 t_0 、 n 的分布与“理论”曲线对比

上图是此次实验得到的 t_0 与 n 的分部图（红色+号表示）与第 2 章分析得到的 t_0 与 n 的关系曲线（蓝色曲线）的对比图。从这里可以发现，大多数辨识到的结果与“理论”曲线相差较远，没有分布在曲线附近。由此，作者考虑到可能是 t_0 与 n 的关系没有被利用，进而产生了多解的现象。

利用在第 2 章对小扰动有功负荷特性的探究结果，将参数 n 与 t_0 利用关系式 $t_0=0.2507/n-0.1727$ 转化为一个参数后，辨识效果有了改善，但仍旧不够效率且辨识结果的分散性依旧存在。

虽然辨识的结果有着分散性，但是从它们的部分图可以发现，这些参数的总体趋势是在稳定值附近的，对于这点，作者猜想可能是最优解的特性不够好，最优解附近太过平滑，最优特性不明显，再加上输入的一些扰动干扰，导致算法在最优解附近收敛。对此问题，可以用多次实验取平均的方法克服，不过计算效率首先要提高。

为提高辨识效率，作者将原单步辨识的六维空间搜索算法，改为两步辨识算法。作者改变输入与输出量，将输入量、输出量改为相对于稳态值时的扰动值。

设 $y_t = P_t$ ， $x_t = \frac{U_t}{U_0}$ ，则原代数方程式变为

$$y_t = A_p x_t^2 + B_p x_t + C_p + M_p x_{t+t_0}^n$$

$$y_t + \Delta y_t = A_p (x_t + \Delta x_t)^2 + B_p (x_t + \Delta x_t) + C_p + M_p (x_{t+t_0} + \Delta x_{t+t_0})^n$$

将两式相减、忽略扰动量的高阶项可得

$$\Delta y_t = (2A_p + B_p) \cdot \Delta x_t + n \cdot M_p \cdot \Delta x_{t+t_0}$$

即

$$\Delta y_t = k_1 \cdot \Delta x_t + k_2 \cdot \Delta x_{t+t_0}$$

其中 $k_1=2A_p+B_p$ ， $k_2=n \cdot M_p$ 。扰动量的代数方程需要辨识的参数就减少到了三个，这样不但可以减少辨识参数的数量，并将指数项转换为乘法因子项，降低运算难度提高效率，而且通过此次辨识的结果，可以得到原负荷模型的各个参数之间的关系。在进行了扰动量辨识，得到 k_1 、 k_2 、 t_0 后，通过 $k_1=2A_p+B_p$ ； $k_2=n \cdot M_p$ ； $t_0=0.2507/n-0.1727$ 这三个关系式，可以计算出 M_p 和 n ，并将 A_p 和 B_p 两个参数减少为一个，加上 C_p ，那么剩下的未辨识的参数就只剩下两个了。

至此，作者将原六维的解空间搜索改成了两步辨识，第一步辨识 3 个参数，第二步辨识 2 个，从效率和精确度上都得到了提高。

表 4.3 原辨识算法与改进的两步辨识算法对比

| 参数 | Ap | Bp | Cp | Mp | t0 | n | Time (s) |
|------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|----------|
| 原方法 | 5.116 | 8.0912 | 14.4401 | 9.3629 | 0.2555 | 0.7179 | 16 |
| 两步法 | 2.5697 | 9.7799 | 15.0043 | 9.6584 | 0.1911 | 0.6891 | 4 |
| 分部辨识 | 1.9452 | 10.3901 | 15.9665 | 8.7116 | 0.1735 | 0.7178 | |

表中最后一列为平均辨识一次的时间，可以看到两步法将时间减少至原方法的四分之一。从辨识结果来看，两步法对灵敏度不高的 A_p 项的辨识结果也比原方法要好，其他参数也都更接近“真实值（分部辨识结果）”。对于 M_p 项反而相差更远是因为，在 20 次两步法辨识结果中有一次辨识结果较“真实值”较远，达到了 19，但是拟合误差也在允许范围内，从而使辨识的准确度降低。下图为两步法辨识出的 M_p 的分布图：

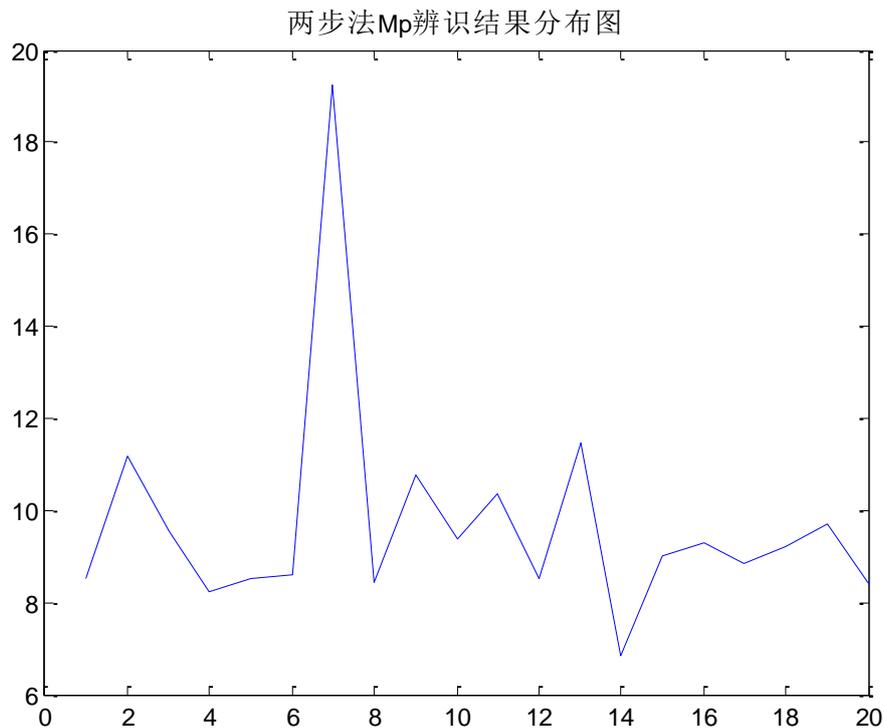


图 4.6 两步法辨识 M_p 结果分布图

从图中可以发现，除了第七次辨识的结果偏差较大外，其余结果均在“实际值” 8.7 上下浮动。由此，作者猜想除最优解附近比较平滑外，或许还存在其他“最优解”或最优近似解且该解距离实际解较远。若确实如此，则该模型的可辨识性会成为一个值得讨论的问题。

4.2 算法设计与实现

以扰动量辨识实验为例，进行算法具体实现的说明。待辨识的参数有 k_1 , k_2 , t_0 。

编码采用实数编码 $x=[k_1 k_2 t_0]$ ，并给出解空间范围，将上限存储至 LB，下限存储至 UB。种群初始化方法为在解空间中进行均匀分布，具体的代码为 $x=\text{rand}(1, \text{length}(x)) * (\text{LB}-\text{UB}) + \text{UB}$ ，其中 $\text{length}(x)$ 可以求出 x 的参数个数， $\text{rand}(m, n)$ 可以生成 $m * n$ 阶 $[0, 1]$ 均匀分布的随机矩阵，故由此可以得到解空间内的平均分布的初始种群。

适配值函数由模型解与实际测量值的误差的倒数构成，其具体表达式为

$$e = \sqrt{\sum_{i=1}^l (y_i - Y_i)^2 / l}$$
$$f(x) = \frac{1}{e}$$

式中 y_i 为 i 时刻的模型输出， Y_i 为 i 时刻的测量值， e 为模型与实际测量值的平均误差， $f(x)$ 为 x 的适配值，取了误差的倒数。

交叉操作采用了算术平均交叉与两点交叉的结合，先随机选择了两个交叉位置，将两个位置间的基因进行了算术平均操作。

变异操作采用扰动变异的方法，在“染色体”中先随机找几个变异点，然后根据该点的解空间取值范围制定幅值，并与一个均匀分布的 $(0, 1)$ 随机数相乘加到原基因上形成新的基因。在之后对新形成的个体进行检查，若取值超出范围，就将超出的值改为边界值。

选择操作采用锦标赛选择方法，并结合保优选择法。每次选择操作进行时，先将最优个复制到下个种群中，然后采用锦标赛选择法，从种群中选取 1 个个体，将适配值最高的个体选出。考虑到种群的多样性等问题，经过大量的实验后，作者选取 1 的值为 2。

终止条件设有两项，其一为最大进化代数设为 50，另一项为判断最优解的适配值大小是否超过 4500。通过以上两个方法可以使得算法在较短的时间内结束，需要说明的是最大进化代数之所以选得不大是因为作者在实验中发现，一旦算法收敛到了某些局部最优解，那么跳出的概率会很小，导致算法时间很长，而算法的收敛速度是很快的。为了减少不必要的时间，作者认为算法运行到最大进化代

数的结果是不可取的，只有满足了适配值项的结果才进行采用。通过这两种终止条件，每次算法运行的速度均保持在 0.5s 左右，且得到的结果基本都是可用的。

算法中各个参数的设定值在此列出：

参数上限：LB=[30 10 0.5]；

参数下限：UB=[1 1 0.1]；

最大进化代数：er anum=50；

种群规模：popsize=100；

交叉概率：pcross=0.8；

变异概率：pmutation=0.1；

4.3 对模型的整体辨识结果

4.3.1 对扰动量模型辨识的结果

从 PSCAD/EMTDC 中仿真出一组电压与有功数据，将其导入 matlab 中。通过在第 2 章提到的从负荷的各个部分辨识得到的结果，将其视为“真实值”作今后的从总功率辨识得到的参数的对比。

表 4.4 各部分辨识结果

| Ap | Bp | Cp | Mp | t0 | n |
|--------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 1.9452 | 10.3901 | 15.9665 | 8.7116 | 0.1735 | 0.7178 |

由此可以计算出 $k1=2Ap+Bp=14.2805$ ， $k2=Mp*n=6.2532$ ， $t0=0.1735$ 。

运行 20 次算法得到的结果如下：

表 4.5 20 次扰动量辨识结果

| 序号 | k1 | k2 | t0 | f(x) | exitflag | 运行时长/s |
|----|---------|--------|--------|----------|----------|--------|
| 1 | 13.5313 | 6.3919 | 0.1606 | 10643.91 | 1 | 0.5512 |
| 2 | 19.1141 | 6.3755 | 0.2661 | 7409.03 | 1 | 0.5245 |
| 3 | 13.0135 | 7.0095 | 0.1681 | 6364.83 | 1 | 0.5713 |
| 4 | 12.9706 | 6.3891 | 0.1508 | 7251.77 | 1 | 0.5561 |
| 5 | 15.2208 | 5.9553 | 0.1867 | 8614.60 | 1 | 0.5421 |
| 6 | 12.9521 | 6.3381 | 0.1668 | 4899.11 | 1 | 0.5471 |
| 7 | 23.2170 | 9.8516 | 0.3171 | 6109.82 | 1 | 0.5455 |
| 8 | 12.8453 | 6.3863 | 0.1591 | 5711.36 | 1 | 0.5334 |
| 9 | 18.2283 | 6.1260 | 0.2685 | 8457.82 | 1 | 0.5406 |

| | | | | | | |
|----|---------|--------|--------|----------|---|--------|
| 10 | 14.4658 | 6.6138 | 0.1825 | 8483.16 | 1 | 0.5517 |
| 11 | 17.0923 | 6.3837 | 0.2345 | 11228.13 | 1 | 0.5495 |
| 12 | 11.7358 | 6.9609 | 0.1345 | 15211.10 | 1 | 0.5432 |
| 13 | 17.5992 | 6.7452 | 0.2537 | 9334.61 | 1 | 0.5333 |
| 14 | 13.4048 | 5.2636 | 0.1528 | 8003.06 | 1 | 0.5437 |
| 15 | 14.1814 | 6.4097 | 0.1801 | 8668.83 | 1 | 0.5409 |
| 16 | 12.4545 | 7.3337 | 0.1449 | 11631.20 | 1 | 0.5479 |
| 17 | 14.7093 | 6.1704 | 0.1868 | 7892.56 | 1 | 0.5542 |
| 18 | 16.2904 | 5.8965 | 0.2185 | 8791.05 | 1 | 0.5445 |
| 19 | 10.4440 | 8.5008 | 0.1135 | 5510.06 | 1 | 0.5640 |
| 20 | 14.8078 | 6.0111 | 0.1771 | 6245.06 | 1 | 0.5377 |
| 平均 | 14.9139 | 6.6556 | 0.1911 | 8323.05 | 1 | 0.5461 |

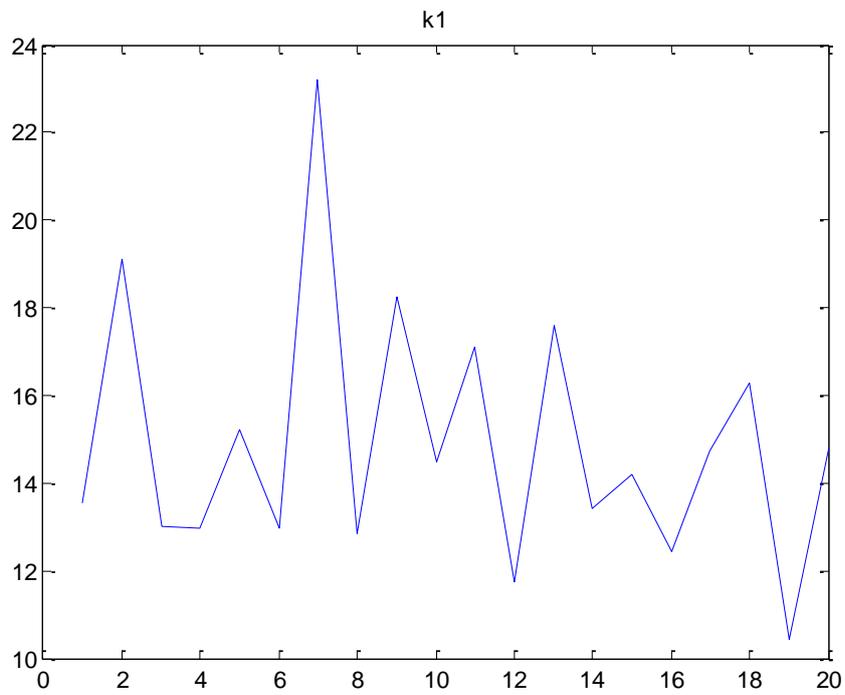


图 4.7 k1 辨识结果图

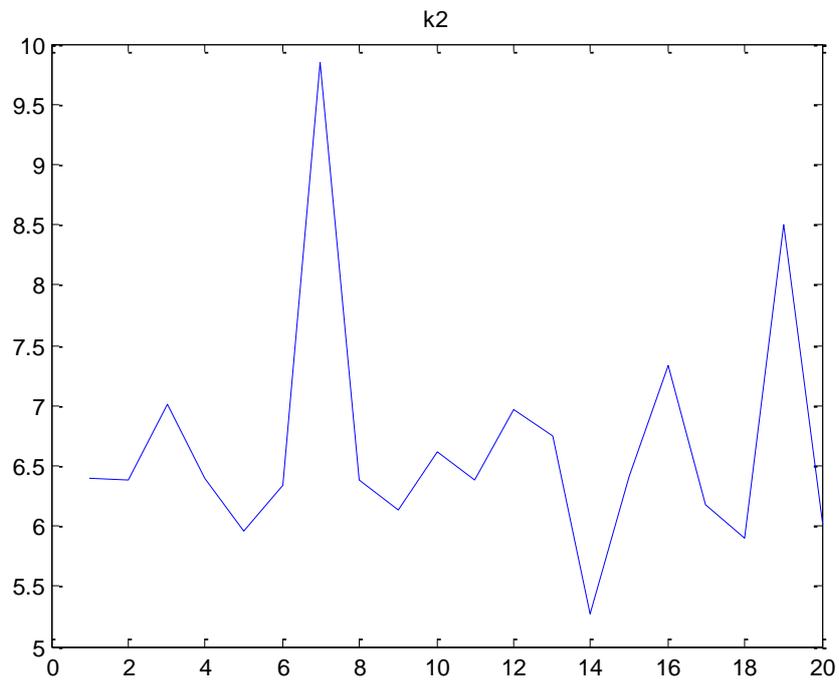


图 4.8 k2 辨识结果图

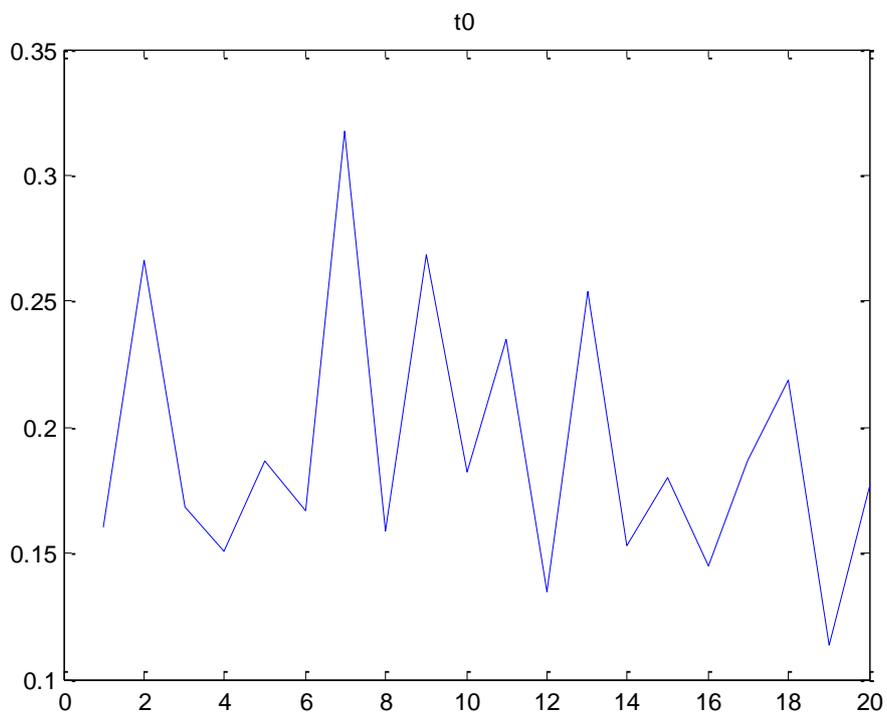


图 4.9 t0 辨识结果图

从表 4.2 与各个参数的辨识结果图中可以看出，辨识结果虽然带有一定的浮动，但总体结果在一个水平线上波动。故我们可以取这些数据的平均作为辨识的结果，得到 $k_1=14.9193$ ， $k_2=6.6556$ ， $t_0=0.1911$ 。这与将负荷分开辨识后得到的结果 $k_1=14.2805$ ， $k_2=6.2532$ ， $t_0=0.1735$ 相比误差较小，可以接受。分析会有这样扰动的原因在于，小扰动的变化量很小，输入电压的变化范围在 $(-0.15, 0.15)$ 之间，且含有噪声，再加上时移项将会导致解的多值性。

4.3.2 对剩余的两个参数的辨识结果

从总体辨识得到的 $k_1=14.9193$ ， $k_2=6.6556$ ， $t_0=0.1911$ 以及关系式 $k_1=2A_p+B_p$ ； $k_2=n*M_p$ ； $t_0=0.2507/n-0.1727$ 可以算出 $n=0.6891$ ， $M_p=9.6584$ ， $B_p=14.9193-2*A_p$ 。

表 4.6 20 次对剩余参数辨识的结果

| 序号 | A_p | C_p | $f(x)$ | exitflag | 运行时长/s |
|----|--------|---------|---------|----------|--------|
| 1 | 2.3363 | 14.7780 | 7816.72 | 1 | 5.0727 |
| 2 | 1.9268 | 14.3653 | 7075.18 | 1 | 4.9380 |
| 3 | 2.1742 | 14.6007 | 4945.40 | 1 | 3.4394 |
| 4 | 3.1507 | 15.5870 | 8967.64 | 1 | 3.4393 |
| 5 | 4.2876 | 16.7403 | 5621.61 | 1 | 1.7224 |
| 6 | 2.3339 | 14.7714 | 9636.47 | 1 | 3.5903 |
| 7 | 1.6274 | 14.0666 | 5887.63 | 1 | 3.4511 |
| 8 | 2.4714 | 14.9084 | 9670.05 | 1 | 1.7142 |
| 9 | 3.3802 | 15.8102 | 6255.50 | 1 | 3.4344 |
| 10 | 2.3116 | 14.7475 | 7322.27 | 1 | 5.1574 |
| 11 | 1.2388 | 13.6717 | 8972.76 | 1 | 5.1977 |
| 12 | 2.6938 | 15.1320 | 4987.04 | 1 | 5.1093 |
| 13 | 1.5944 | 14.0320 | 9637.85 | 1 | 3.4527 |
| 14 | 4.2660 | 16.6993 | 6729.43 | 1 | 3.3954 |
| 15 | 4.4654 | 16.8856 | 4586.57 | 1 | 1.7176 |
| 16 | 4.0878 | 16.5090 | 6140.24 | 1 | 1.7206 |
| 17 | 1.2725 | 13.6927 | 4539.03 | 1 | 1.7386 |
| 18 | 0.3927 | 12.8300 | 9687.96 | 1 | 3.4478 |
| 19 | 3.5805 | 16.0197 | 9362.68 | 1 | 5.1517 |
| 20 | 1.8025 | 14.2390 | 5650.62 | 1 | 3.3706 |
| 平均 | 2.5697 | 15.0043 | 7174.63 | 1 | 3.5131 |

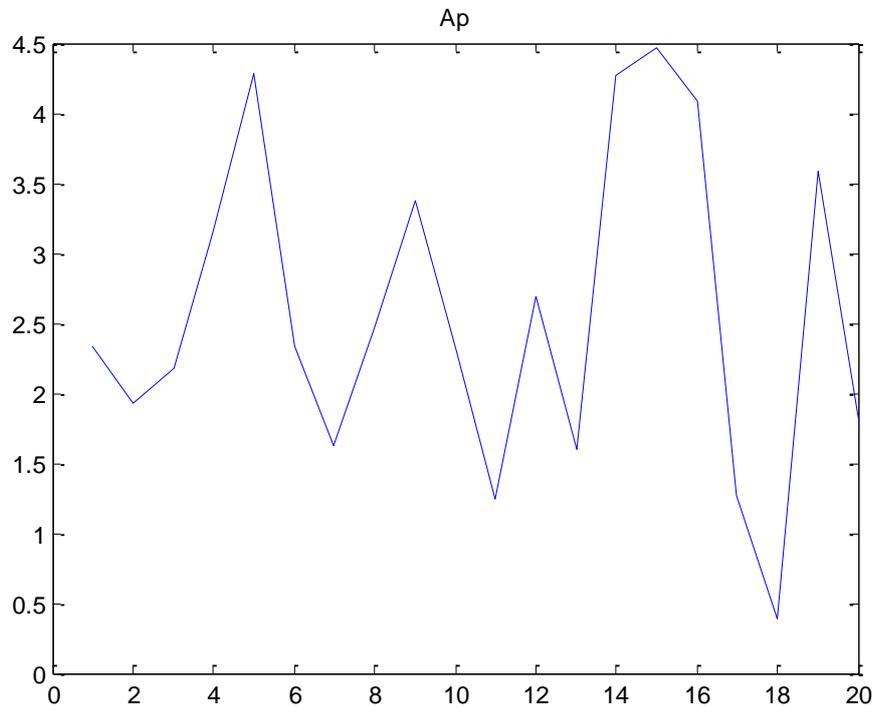


图 4.10 Ap 的辨识结果

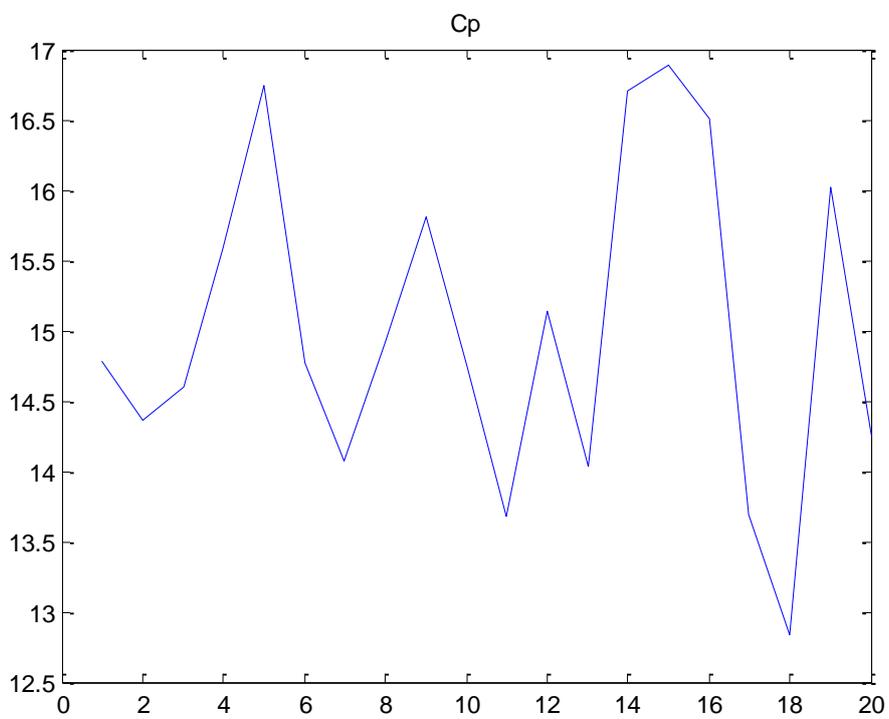


图 4.11 Cp 的辨识结果

计算 20 次的实验平均得到 $A_p=2.5697$, $C_p=15.0043$ 。从上面给出的参数辨识结果图中可以看出, 同扰动量辨识结果一样, 辨识的参数有浮动值, 相对浮动也较大, 且两个参数有一种线性的关系。作者认为, 浮动值大是因为最优解附近的导数较小, 趋势平缓, 最优解的某个邻域内误差均很小, 而且伴随输入的噪声, 在噪声的覆盖范围内也会造成解的不确定性。另外, 虽然辨识的参数仅有两项, 比前面的扰动量辨识还要少, 但是辨识的时间却加长了。造成这样结果的主要原因是, 原模型的代数方程式较为复杂, 运算量较大, 且拟合的模型不像扰动量辨识那样是线性的, 故产生了较大的计算时间。

由 A_p 、 B_p 的关系式推出 $B_p=9.7799$ 。综合以上辨识结果得出下表:

表 4.7 总体测量辨识与分部测量辨识的结果对比

| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n |
|------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 总体辨识 | 2.5697 | 9.7799 | 15.0043 | 9.6584 | 0.1911 | 0.6891 |
| 分部辨识 | 1.9452 | 10.3901 | 15.9665 | 8.7116 | 0.1735 | 0.7178 |
| 误差 | 0.3210 | 0.0587 | 0.0602 | 0.1086 | 0.1014 | 0.0399 |

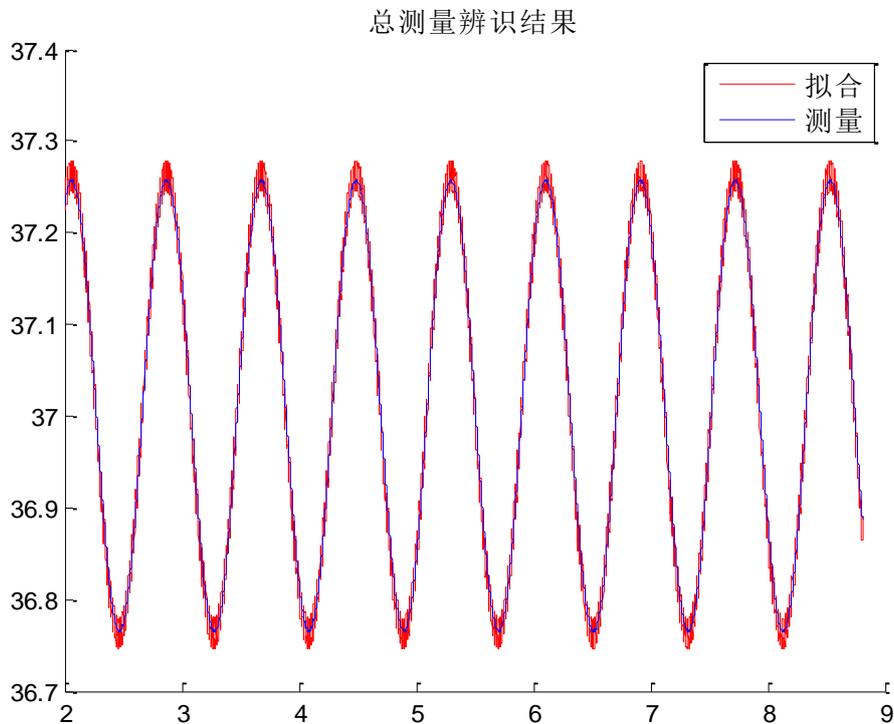


图 4.12 总体测量辨识效果图

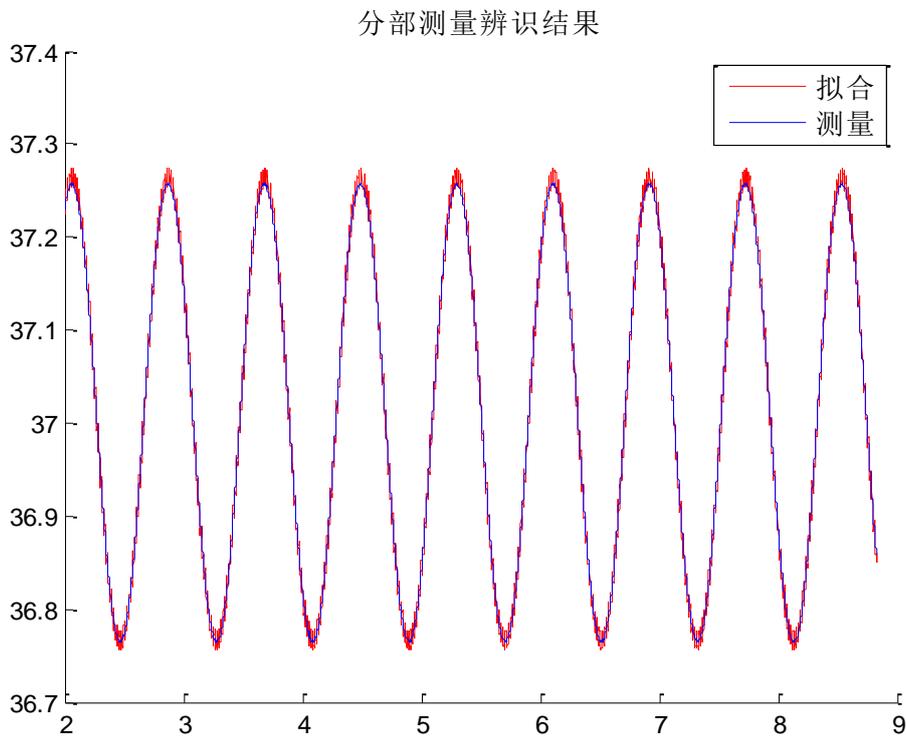


图 4.13 分部测量辨识效果图

在这里，将分部辨识的结果看做“真实值”，从表 4.4 中可以看到，总体辨识与“真实值”虽然有些差异，但误差不大，且“真实值”也未必就是真实值，可以接受。由模型输出与测量的对比图中也可以发现实际的拟合效果良好，可以接受。

4.4 本章小结

在进行了大量实验后，作者认为直接对六维解空间进行搜索的方法不可行，不仅算法效率低下，而且解的分散性较强。将原模型的平稳量与扰动量分开后，模型得到了化简，进而形成两步辨识的方法。之后，介绍了模型两步辨识的公式推导，并进行了实际仿真实验与实际测量值进行了对比，得到了较好的辨识结果。对辨识中产生的结果浮动的现象，作者认为是最优解附近邻域内的导数较小，趋势平缓，导致最优解的某个邻域内误差均很小，而且伴随输入的噪声，在噪声的覆盖范围内也会造成解的不确定性。

第5章 总结

5.1 结论

针对电力系统负荷建模的难点，本课题尝试从电力系统输配电网中大量的小扰动量测辨识获取电力综合负荷的结构组成。在该问题的研究中，首先通过试验和量化特征分析，提出了电力综合负荷小扰动模型，并对其模型进行了验证，进一步，研究提出了基于遗传算法的电力综合负荷小扰动模型参数辨识方法。

小扰动下的电力负荷模型采用的是 ZIP 加感应电动机的综合模型，理论上在小扰动的情况下，感应电动机的非线性环节通过正负不断累加可以视作一种线性环节。通过大量的仿真实验和量化特征归纳，得到感应电动机的有功响应与静负荷响应的相似和本质区别，差别在于响应时间差——动负荷在其接入母线电压波动输入下的响应存在惯性，感应电动机的有功响应可以用静负荷的代数方程式来近似描述，关键参数包括感应电动机模型系数项 M_p 、指数项 n 和时移项 t_0 。

通过大量的实验对模型的输出与实际测量的结果进行了比对，表明该模型与测量结果吻合良好，模型基本能够描述负荷主要特性。此外，通过对小扰动模型的探究实验，得到了各个参数间的关系式，为今后的辨识提供了化简条件。

基于上述模型，通过对不同算法的实践表明，线性、非线性最优搜索算法不适合该模型的拟合，因为模型辨识结果对初值的要求较高。而本文提出的隐含并行与全局搜索的遗传算法适合该模型的参数辨识问题。

进一步，模型进行了修改简化，解决原模型的六维空间搜索复杂度较高搜索效率低下的问题。首先根据相对稳态值的扰动量进行第一步的辨识，并根据前面得到的各个参数间的关系式，可以将 M_p ， t_0 ， n ，以及 $2A_p+B_p$ 的值辨识出来，第二步，将稳态值的输入也加入到系统中，辨识出 A_p 与 C_p 的值，并将 B_p 计算出。通过两步的辨识算法将六个参数辨识了出来，运行一次的时间在 4 秒左右，大大提升了效率。

最后，将辨识得到的参数代入模型，从其输出值与仿真的测量值的对比表明，曲线的拟合效果较好。对比分部辨识的结果与总体辨识的结果，偏差在可以接受的范围。

至此，负荷模型的提出、验证、辨识的工作全部完成。

5.2 展望

实验中最大的收获之一是发现了辨识结果的分散性，究竟是算法问题还是本身就存在多解是一个值的探究的问题，关乎到模型是否可辨识与是否要改变模型。

到目前为止的工作均为在仿真平台上的测量，需要一些实际测量进行验证；另外测量得到的功率比较平滑，信噪比很高，若加入噪声后的结果如何还不得而知；扰动信号也是单一的正弦信号，若有多个扰动进行叠加，情况可能也会改变。

今后的工作可以考虑在测量出的功率曲线上添加一些噪声，还有将扰动设置为多个频率的扰动的叠加，进一步对小扰动下的负荷模型进行探究。该模型的外推性如何还没有得到验证，可以考虑在其他测量数据上进行辨识实验，考察模型的外推性。

插图索引

| | |
|------------------------------------|----|
| 图 1.1 统计综合法示意图..... | 3 |
| 图 1.2 总体测辨法示意图..... | 3 |
| 图 2.1 实验电路总视图..... | 5 |
| 图 2.2 ZIP+感应电动机模型示意图..... | 6 |
| 图 2.3 ZIP 模块电路图..... | 7 |
| 图 2.4 感应电动机模块电路图..... | 8 |
| 图 2.5 仿真测量的电网电压..... | 9 |
| 图 2.6 仿真测量的各负荷的有功..... | 9 |
| 图 2.7 放大后的有功..... | 10 |
| 图 2.8 电压滤波前后效果图..... | 11 |
| 图 2.9 恒阻抗负荷拟合图..... | 11 |
| 图 2.10 恒电流负荷拟合图..... | 12 |
| 图 2.11 感应电动机负荷拟合图..... | 12 |
| 图 2.12 归一化、0 点移动处理后电压与功率平移前图像..... | 13 |
| 图 2.13 归一化、0 点移动处理后电压与功率平移后图像..... | 14 |
| 图 2.14 t_0 与 n 的关系拟合图..... | 16 |
| 图 2.15 t_0 与 n 的拟合结果..... | 17 |
| 图 3.1 负荷模型参数辨识原理图..... | 19 |
| 图 3.2 遗传算法的流程图..... | 24 |
| 图 4.1 原辨识算法辨识 A_p 的分布图..... | 27 |
| 图 4.2 原辨识算法辨识 B_p 的分布图..... | 28 |
| 图 4.3 原辨识算法辨识 C_p 的分布图..... | 28 |
| 图 4.4 原辨识算法辨识 M_p 的分布图..... | 29 |

| | |
|--|----|
| 图 4.5 原辨识算法辨识 t_0 、 n 的分布与“理论”曲线对比 | 29 |
| 图 4.6 两步法辨识 M_p 结果分布图..... | 31 |
| 图 4.7 k_1 辨识结果图 | 34 |
| 图 4.8 k_2 辨识结果图 | 35 |
| 图 4.9 t_0 辨识结果图 | 35 |
| 图 4.10 A_p 的辨识结果 | 37 |
| 图 4.11 C_p 的辨识结果 | 37 |
| 图 4.12 总体测量辨识效果图..... | 38 |
| 图 4.13 分部测量辨识效果图..... | 39 |

表格索引

| | |
|-------------------------------|----|
| 表 2.1 感应电动机负荷模型验证结果..... | 13 |
| 表 2.2 电压不变, 仅改变静负荷参数..... | 15 |
| 表 2.3 改变电压输入频率, 其他负荷不变..... | 15 |
| 表 4.1 原辨识算法 20 次实验结果..... | 25 |
| 表 4.2 分部辨识结果 (对比用) | 26 |
| 表 4.3 原辨识算法与改进的两步辨识算法对比..... | 31 |
| 表 4.4 各部分辨识结果..... | 33 |
| 表 4.5 20 次扰动量辨识结果 | 33 |
| 表 4.6 20 次对剩余参数辨识的结果 | 36 |
| 表 4.7 总体测量辨识与分部测量辨识的结果对比..... | 38 |

参考文献

- [1] 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.
- [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] 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.
- [4] 刘忠辉. 综合负荷模型参数辨识及负荷特性分类综合方法研究[D]. 山东大学, 2011.
- [5] 张红斌. 电力系统负荷模型结构与参数辨识的研究 [D][J]. 北京: 华北电力大学, 2003.
- [6] Renmu H, Jin M, Hill D J. Composite load modeling via measurement approach[J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2006, 21(2): 663-672.
- [7] 郑剑翔. 阶惯性延时系统的免分析建模法[J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2007, 35(1).
- [8] 艾芊. 现代电力系统辨识人工智能方法[C]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012.
- [9] 金群, 李欣然, 刘艳阳, 等. 一种改进遗传算法及其在负荷建模中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 8(2).
- [10] 王凌. 智能优化算法及其应用[C]. 北京: 清华大学出版社, 2001

致 谢

首先，感谢曹军威老师在百忙之中抽出时间对我的毕设进行指导。在前期的实验思路探讨中，曹老师给了我很多建议，使我受益颇深，在课题进行过程中，曹老师对我的完成情况进行了解，给出了具体目标并进行了指导，使我的课题能够顺利进行下去。

此外，实验室的万宇鑫博士与电机系的张树卿博士给了我很多的帮助。万博士在算法的探讨中给了我很多建议，并与我一起讨论了实验中各个问题的原因与解决方案。张博士给了我很多理论上的指导，我的毕业设计属于跨学科的课题，在实验平台搭建与理论推导、结论分析中，张博士给了我很多宝贵意见。在最后的论文修改和语句修正中，张博士也给了我很大的帮助，在此表示诚挚的谢意。

最后想感谢其他帮助我的同学们，有你们的支持与关心我才能顺利完成毕业设计，谢谢。

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，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

基于测量的综合负荷建模

摘要

综合负荷的精度对电力系统的稳定性分析与控制有着重要的影响。基于在中国对负荷模型进行实际测量的实践，这篇文章系统的展开了一个基于测量的综合负荷建模。负荷建模的指导理论在模型建模随机特性的详细分析中进行了讨论。提出了基于测量方法的综合负荷模型结构。介绍了一种多曲线识别技术用于取得参数。模型的普适性能也在此文章中进行了研究。对两种情况进行了研究，说明了在实际电力系统中改进的模型对负荷的动态特性测量的准确度。

关键词： 负荷模型，测量方法，电力系统稳定性

I 引言

从[1]-[9]可见负荷模型对电力系统稳定分析和控制的重要性已得到公认。然而，众所周知由负荷的不确定性和复杂性，对负荷建模变得十分困难。两种方法被展开用于建模，分别叫基于组件的方法[10]-[12]和基于测量的方法[10]，[13]-[18]。两种方法互有利弊。无论哪个建模更实用，总有三个问题需要解决：第一，什么模型的结构适合综合负载？第二，负荷模型的参数如何确定？第三，该模型的普适性如何？显然，可以回答上述三个问题的负荷模型听起来更能准确地反映出综合负荷的特性。尽管所有的模型实测，或多或少、直接或间接地回答了上述三个问题，但就作者所了解，仍然没有一个万能的解决方案，该领域仍需更多的努力。

负荷模型结构对电力系统分析有着很重要的影响[4]-[9]。现在已经证实，在做系统稳定性分析时，使用不同的负荷模型将得到各式各样，甚至完全相反的结论[19]-[21]。传统的产品级电力系统分析工具通常使用恒阻抗，恒电流，恒功率负荷模型，即 ZIP 负荷模型。然而，由 ZIP 模型作为负荷模型进行的仿真结果往往偏离现场测试的结果，这表明 ZIP 负荷模型并不合适。Hill 提出，要在电压

恢复时捕获负荷的强非线性特性，需要非线性的负荷模型结构[23]。之后，Karlsson 和 Hill 提出了负荷结构的非线性方程[24]。Lin et al. [16]确定了两个基于测量的动态负荷模型结构，并声称二阶传递函数比一阶函数更能捕获负荷特性。Lesieutre et al. [25]比较了各种动态负荷模型，并从一个三节感应电动机模型上开发出了 PQ 负荷模型。现今的趋势是将动态负荷模型与静态负荷模型进行结合[14], [17], [18], [20] - [22], [26]。Wanget al. [17]开发了一个结合 RC 平行电路和感应电动机等效电路的负荷模型。Shi 和 He[18]报道了他们在中国探索基于测量的综合负荷模型的负荷建模的前期工作。Kao et al. [20]使用各种不同的负荷暂态扰动记录相应的数据进行了时域稳定性仿真，通过比较这些仿真结果他得出综合静态与动态负荷模型可以得到一个更准确的结果。类似的结论也在[21]得到验证。[22]在 WSCC 系统仿真中给出了一个由 80%静态模型和 20%感应电动机模型组成的过渡期的综合负荷模型。然而，这些模型里使用的却是缺省参数值。

除了负荷模型的结构，负荷模型的普适性也是很重要的。一个由一到两个现场测试的数据构建的负荷模型可能不是一个很好的负荷模型，因为它可能缺乏适应新的测量曲线的能力。一个好的负荷模型，应该接近实际负荷的特性，即使在不同的电压变化下。因此，估计负荷模型的普适性能力是负荷模型建模过程中必不可少的部分。然而，到目前为止，负荷建模实践仍然没有完全解决这个问题。基于我们在中国实地测量的负荷建模的实践，本文提出一种基于测量的综合负荷模型。本文试图系统地回答上述的三个问题。本文将分析基于测量的负荷建模过程的随机特性，在此基础上提出了负荷建模过程中的指导原则。这为以后的工作奠定了理论基础。然后，提出一种改进的负荷模型结构，并基于从现场测量的数据进行参数辨识。更进一步，采用交叉验证的方法，对这样的负荷模型的普适性进行了评估。

本文的安排如下。基于测量的负荷建模过程的一般的随机特性将在第二部分进行讨论。在第三部分，用现场测量的数据对综合负荷模型结构进行确定，这也回答了关于模型结构的第一个问题。第四部分提供了辨识算法，回答了本文开头提出的第二个问题。第五部分重点估计了负荷模型的普适性，也就是回答了第三个问题。在第六部分，我们将讨论在中国东北部 HuShiTai 和 JiXi 变电站测试的两种情况。第七部分提出结论。

II 基于测量的综合负荷模型的随机特性

由于基于测量的负荷建模是数学识别问题，他可以勾画出图 1 的概念图。

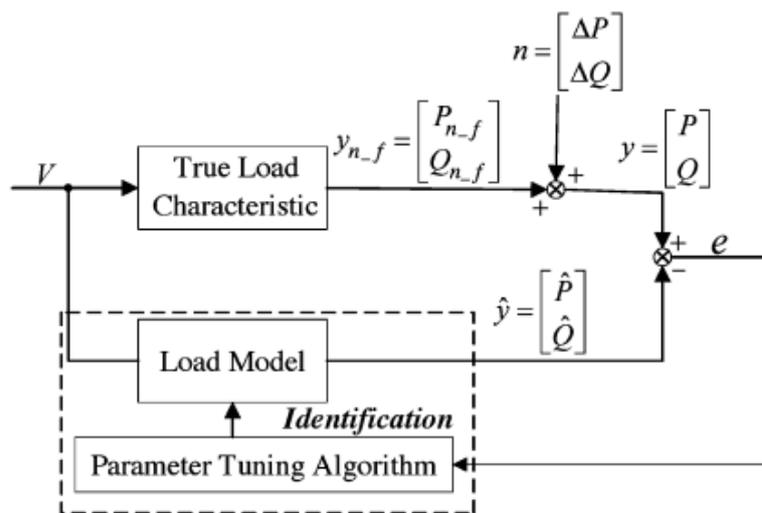


Fig. 1. Measurement-based load modeling.

在图 1 中， V 是总线电压，其随着各自连接到总线的负荷的变化而变化。电压变化越大，负荷特性能够更好地被仿真出来。一般的，电压下降大于 0.1p.u. 能够引起负载响应。电压下降大于 0.3p.u. 的情况也有所记录，但次数很少。在该电压的输入下，无噪声的负载特性输出为

$$y_{n-f} = \begin{bmatrix} P_{n-f} \\ Q_{n-f} \end{bmatrix}$$

为构建的负载特性相对于电压变化的函数关系式，通常假定，在很短的时间内（通常仅仅为即使毫秒甚至更短）电压干扰下，负荷的变化仅由该电压引起变化。当然，确实存在不可测因素，如一些电器切换至开启，另一些切换至关闭，而恰巧都发生在这短短的期间内。因此，在每次测量的时候，总存在一些不是由电压扰动而引起的小的随机变化。这些从电力负荷在电压扰动时便产生作用的随

机扰动，使得负荷变得不确定。这在图 1 中用 $n = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$ 来表示，将其添加到了真

实的负荷中。因此，每个测量将产生一个输出 $y = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix}$ ，而真正的负荷特性

$y_{n-f} = \begin{bmatrix} P_{n-f} \\ Q_{n-f} \end{bmatrix}$ 是不可观察的。

确定的负荷模型在总线电压 V 下会得出预测负荷 $\hat{y} = \begin{bmatrix} \hat{P} \\ \hat{Q} \end{bmatrix}$ 。 y 和 \hat{y} 的差被反馈到参数调谐算法中，使得负荷模型的参数可以调整到最小的平方误差，即

$$\min E(e^2) \quad (1)$$

它可以被分解成一下两部分

$$E(e^2) = E[(y - \hat{y})^2] = E[(y_{n-f} - \hat{y})^2] + E[n^2] \quad (2)$$

(2) 式的右侧第一部分为模型误差，它反映实际的却无法测量的负荷特性与负荷模型输出之间的误差。第二部分是噪声方差，它由噪声产生，并无法避免。显然，一个好的负荷模型应使得模型误差尽可能小。在理想情况下，如果它总为零，则建立的负荷模型如一面镜子一样反映了真实的负荷。该模型的误差可以进一步分解为以下两个部分[27]：

$$E[(y_{n-f} - \hat{y})^2] = [y_{n-f} - E(\hat{y})]^2 + E\{[\hat{y} - E(\hat{y})]^2\} \quad (3)$$

它通常表示为

$$(\text{模型误差})^2 = (\text{偏移误差}) + (\text{模型方差误差}) \quad (4)$$

偏移误差与负荷模型的结构有着密切的联系。例如，如果负荷是高度非线性的，那么线性模型无论有多高的阶次，都将无法消除偏移误差。偏移误差描述模型与实际负荷之间的系统偏差，因此，他是模型结构的固有成分。由于任何负荷模型仅仅是众多负荷部件各种特性的聚合，因此，偏移误差总是存在的。我们只能尽可能地将负荷模型的偏移误差减小。一般情况下，随着模型结构的复杂性的增加和参数个数的增加，偏移误差是单调减小的。从这个角度来看，我们应该在计算机能够承担的范围內，尽可能选择复杂的模型结构。然而，太过复杂拥有诸多参数的模型结构，其普适性将会很差。

除了偏移误差，还存在其他的误差，即模型方差误差。模型方差误差的出现是因为，在实际测量中，模型参数是从有限且有噪音的数据集中估计而来的，自然，这些参数通常偏离了其最佳值。由于偏移误差是模型结构所固有的，对于在

模型建立后测量得到的新的数据集，其模型误差很大程度上取决于模型方差误差。因此，一个更大的模型方差误差意味着一个更大的模型误差，这自然会导致这个模型的看不见的数据有更低的预测性。已被证明，在大量的数据集下，模型方差误差与模型参数个数有着线性比例的关系。由[27]得到下面的近似表达式：

$$\text{模型方差误差} \approx \sigma^2 \frac{n_p}{N} \quad (5)$$

其中， σ^2 是噪声的方差。 n_p 是负荷模型中参数的个数， N 是训练样本个数。训练样本是用来估计模型参数的数据样本。式（5）清楚地表明，较小的噪声方差和较少的参数个数以及较大的训练样本数可以提高模型的泛化能力。这符合奥卡姆剃刀原则[27]，这便是在所有可以准确地描述一个过程的模型中，最简单的便是最好的。

基于以上分析，在我们负荷建模实践中起指导作用的三个基本原则如下：

P1) 负荷模型结构不能过于简单，一个过于简单的负荷模型将导致一个较大的偏移误差，这将反映在模型输出与实际测量记录数据的较大差异上。

P2) 负荷模型结构不应该太复杂。一个太复杂的模型会有一个较大的模型方差误差。因此，一个复杂的负荷模型或许可以很好地拟合训练数据，不过，由于从数据中无法看到电压变化，他的泛化能力会比较差。

P3) 建立一个或两个领域测试的负荷模型是不可靠的，因为它产生较大的模型方差错误，可推断其普适性较低。一个好的负荷模型只能在长期的负荷特性的观测中获得。

III 综合负荷模型结构

由负荷建模过程的随机性开始，原则 P1 和 P2 在最后一部分为负荷模型的选择提供了一个良好的指导。然而，我们在建模的实践中，除了这两个原则外，我们找到了更具体的细节需要加入。第一个是负荷模型的建立目的。我们建立的负荷模型主要是针对电力系统稳定性仿真控制。因此，它应该很容易地投入到产品级的分析工具。第二个问题是模型的有效应用范围。不存在一个适用于所有情况的普适负荷模型。其原因在于负荷总是由各式各样的特性组件组成。在极端情况下，如接近电压崩溃点或电压骤降几秒时，一些负荷可能会出现高度的非线性特性，一些电机将停止运行。在这些情况下，应该建立一个特殊的负荷模型。我们要建立的是一个在大多数电力系统稳定分析下有效的普适的负荷模型。最后，

但不是最次要的，我们关注的问题是客户的认可程度。在负荷建模的实践过程中，我们发现黑盒子的负荷模型对系统运行商是很难接受的。系统运营商更喜欢物理意义明确的负荷模型。

考虑了所有这些因素，感应电动机加 ZIP 模型被选定为综合负荷模型。正如本文引言部分所提到的，将负荷模型结合到系统稳定性分析已经成为了一种趋势。然而，迄今为止的大部分工作集中在讨论模型在系统动态中的效果，而使用的参数却是缺省的。基于测量的负荷建模工作尚未系统地出版，我们将在此提供。该负荷模型的等效电路如图 2。

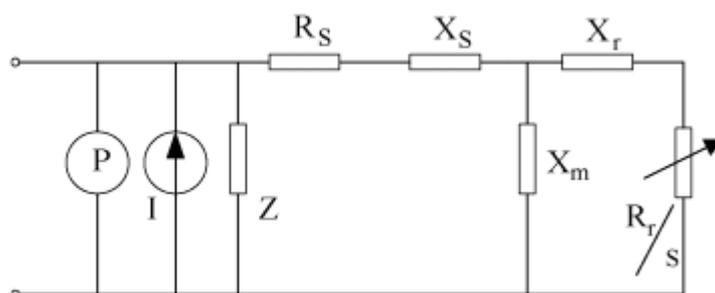


Fig. 2. Equivalent circuit of the composite load model.

该模型包括静态部分 ZIP 和动态部分三阶电动机的等效电路。对于该负荷模型，一个非常重要的参数是总负荷中电动机负荷所占的比例，它被定义为

$$K_{pm} = \frac{P_{motor}}{P_0}$$

其中， P_0 是总线上有效负荷的初始值， P_{motor} 是电动机负荷飞初始值。另一个重要的参数是，反映总负载上动态组件效果的参数，被定义为

$$M_{lf} = \frac{\left[\frac{P_{motor}}{S_{motorBase}} \right]}{\left[\frac{V_0}{V_{Base}} \right]}$$

其中， $S_{motorBase}$ 是电机额定容量。 V_0 和 V_{Base} 分别是初始总线电压和电压基。显然， $S_{motorBase}$ 的值与动态等效负荷在总负荷的影响有着密切联系。一个较大的 $S_{motorBase}$ 和一个较小的 K_{pm} 相当于一个大电机，负载很轻。另一方面，一个较小的 $S_{motorBase}$ 和一个较大的 K_{pm} 相当于一个小的等效电机但负荷很大。可以预测的是，如果将这两个负荷模型应用到系统稳定性分析，两个负荷模型的效果是截然不同的。根据 K_{pm} 和 M_{lf} 的定义，图 2 中的动态部分可以被描述为

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_d + (X - X')I_q] - (\omega - 1)E'_q \\ \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_q + (X - X')I_d] - (\omega - 1)E'_d \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{2H} [(A\omega^2 + B\omega + C)T_0 - (E'_d I_d + E'_q I_q)] \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_d = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_d - E'_d) + X'(U_q - E'_q)] \\ I_q = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_q - E'_q) - X'(U_d - E'_d)] \end{array} \right. \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} T' &= \frac{X_r + X_m}{R_r} \\ X &= X_s + X_m \\ X' &= X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r} \\ A + B + C &= 1. \end{aligned}$$

(8) 中的前两个方程描述了通量衰减动力方程，而第三个方程描述了惯性动力方程。图 2 的静态部分如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} P_s^* = P_z^* \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + P_l^* \left(\frac{V}{V_0}\right) + P_p^* \\ Q_s^* = Q_z^* \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + Q_l^* \left(\frac{V}{V_0}\right) + Q_Q^* \end{array} \right. \quad (10)$$

它满足

$$\begin{aligned} P_z^* + P_l^* + P_p^* &= 1 - K_{pm} \\ Q_z^* + Q_l^* + Q_Q^* &= 1 - \frac{Q_{motor}}{Q_0} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 Q_0 是总线上的初始无功负载， Q_{motor} 是电动机初始消耗的无功功率，它会被图 2 中的等效电路初始化。该负荷模型的一般形式可以如下表示：

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y, \theta) \\ 0 &= g(x, y, \theta) \end{aligned} \quad (12)$$

其中 x 和 y 分别是动态的和代数状态的等效负载。 θ 表示模型参数。

表 1 给出了在辨识过程中负荷模型参数的数值区间。可以发现，负荷的无功部分对电压非常敏感，这是由配电变压器的饱和造成的[7]。此外，电压调节器在配电网中也可能导致电压与无功负载的高灵敏度。因此，在表 1 中，无功部分 Q_z^* 的系数要比有功部分 P_z^* 大得多，这意味着无功负荷有着更突出的作用。此外，允许 P_i^* 和 Q_i^* 为负面的等效负荷模型，以增加模型的灵活性，因为本地发电可能是存在的。

TABLE I
NUMERICAL INTERVAL OF THE LOAD MODEL PARAMETER

| Load Model | Parameters Range |
|------------|------------------|
| Rs | [0.1, 0.35] |
| Xs | [0.1, 0.18] |
| Xm | [2, 3.8] |
| Rr | [0.01, 0.08] |
| Xr | [0.07, 0.18] |
| H | [0.5, 1.5] |
| A | [0.2, 1] |
| B | [0, 1] |
| K_{pm} | [0.2, 0.95] |
| M_{lf} | [0.2, 0.65] |
| P_p^* | [0.1, 0.9] |
| P_z^* | [0.1, 0.9] |
| Q_Q^* | [0.1, 0.9] |
| Q_z^* | [0.1, 4] |

解决了初始值区间的选择后，他们在试验许多负荷数据的基础上做了进一步的完善。如果参数的数值区间不合适，则识别程序将在预先设定值达到的最大迭代次数时停止，留下一个大的拟合误差。然后，对参数的数值区间进行调整。随着各个变电站中的负荷特性记录在中国被广泛应用，到目前为止参数识别与应用已经形成了一个稳定的数值区间，保证了相好的识别性能。

IV 多曲线识别

根据在第二部分提到的原则 P3，从多个数据集确定的负荷模型相较于单个数据集要更加准确。假设有 M 个记录数据，然后，对第 i 个数据，模型输出与现场测量的根均方误差之间可以表述为

$$e_{pi} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N W_p(k)[\hat{P}(k) - P(k)]}{N}} \quad (13)$$

$$e_{qi} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N W_q(k)[\hat{Q}(k) - Q(k)]^2}{N}} \quad (14)$$

其中 N 是测量的采样点。 $\hat{P}(k)$ 和 $\hat{Q}(k)$ 分别表示，在第 k 个步骤的有功负荷和无功负荷的输出，而 $P(k)$ 和 $Q(k)$ 是在第 k 步测得的有功负荷和无功负荷。 W_p 和 W_q 是有功和无功负荷的权重向量。根据我们的实践，我们选择

$$W_p(k) = W_q(k) = 0.4 \frac{|U(k) - \bar{U}|}{\sum_{k=1}^n |U(k) - \bar{U}|} + \frac{0.6}{n} \quad (15)$$

这清楚地表明，采样点的差异越大其重量越大。方程 (13) 和 (14) 是绝对拟合误差。由于负荷在测量值在测量时会有一个很大范围的的不同，相对误差可以更好地反映拟合的准确程度，他的定义如下

$$\tilde{e}_{pi} = \frac{e_{pi}}{P_i} \quad (16)$$

$$\tilde{e}_{qi} = \frac{e_{qi}}{Q_i} \quad (17)$$

其中

$$\bar{P}_i = \frac{\sum_{k=1}^N P(k)}{N} \quad \bar{Q}_i = \frac{\sum_{k=1}^N Q(k)}{N}$$

分别对应第 i 个平均有功负荷和无功负荷。
因此，多曲线识别的损失函数可以定为

$$\min \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M W_i (\tilde{e}_{pi} + \tilde{e}_{qi})$$

其中， W_i 是加权系数，用于不同的测量。在（18）式中，加权系数的选择时根据对数据样本和变电站之间变化的提前分析得来的。显然，（18）是第2部分的（1）的替代形式。由于（18）总结了所有的每此测量的所有误差，最小化目标（18）可以得到对所有测量数据拟合最好的负荷模型，这也是我们所说的综合负荷模型的期望。

多曲线负荷建模过程在这里作为一个非线性的优化问题，在负荷模型（6）到（11），寻找参数

$$[R_s, X_s, X_m, R_r, X_r, H, A, B, K_{pm}, M_{lf}, P_Z^*, P_P^*, Q_Z^*, Q_Q^*]$$

使得目标（18）最小。一般情况下，有两种优化算法用来解决这个问题[27]。一种方法是在非线性局部优化技术，其中包括单纯形法、梯度法、非线性最小二乘法，另一个方法是非线性全局优化技术，其中包括退火算法、遗传算法、禁忌搜索。非线性局部优化技术具有快速的收敛速度，但在很大程度上依赖于起始参数。因此，它很容易陷入局部最优。另一方面，由于非线性的全局优化技术全局优化技术在整个参数空间中搜索最佳点，它一般不会陷入局部最优；尽管如此，它的收敛速度很慢。为了提高识别效率，我们在实践中使用了遗传算法和单纯形搜索法的混合算法。遗传算法首先找到最佳点的区域。然后用单纯形法找到最佳点。

V 综合负荷模型泛化能力估计

正如引言部分所述，在得到综合负荷模型的所有参数后，对负荷的建模尚不完整。对于每一个模型，研究其适应新的、未知数据的能力是很重要的。因此，我们必须评估由负荷模型引申的泛化能力。在第二部分，（5）给出了分析模型泛化能力的理论估算方法。然而，由于噪声的方差实际上是未知的，因此（5）不能用于实践中以评估负荷模型的泛化能力。

由于负荷模型的泛化能力只能由新的未知数据进行测试，故整个数据集可分为训练集和测试集。在训练集上辨识的负荷模型将在测试集上进行评估。根据其在测试集上的测试结果可以粗略地估计其泛化能力。为了充分利用数据集，并提供一个更好的近似负荷模型泛化能力，我们采用了交叉验证法。

假设共有 M 个数据集。交叉验证程序可以用下面的步骤实施：

步骤 1：将以随机方式数据分成同等的 L 个子集，每个子集中有 M/L 个数据。

步骤 2：选一个子集作为测试数据集，其余的 $(L-1)$ 个子集作为训练集。用训练集对模型进行训练，建立负荷模型。

步骤 3：用测试集检验在步骤 2 中建立的模型，拟合误差表示为 e_i^v 。

步骤 4：如果每个组的 L 都已被选定为测试集，则转到步骤 5，否则转到步骤 2。

步骤 5：可以估计模型对新的未知数据的误差为

$$\hat{e} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L e_i^v \quad (19)$$

[27]中提到， \hat{e} 可以用于获得较好地估计模型性能的数据。最终的用途还是，该模型要在整个可用的数据集中进行训练。

VI 案例研究

我们在中国电力系统的基于测量的负荷建模可以追溯到 1985 年。第一个产品级负荷特性记录是在 1995 年的沧州变电站进行的。到目前为止，中国已有 14 个负荷特性记录仪。其中，有三个在中国的南方，四个在中国的北方，还有七个在中国的东北。南方和北方将在不久投入更多的记录仪。本文提出的负荷模型已经在变电站中通过各种场景进行了验证，被证明是足够准确的，可以在电力系统稳定性分析和控制中模拟真实的负荷行为。该负荷模型已经被中共电力研究所（CEPRI）在其产品级电力系统分析软件包（PSASP）中作为标准负荷模型，因此，可以很容易地接入系统稳定性分析。

在本节中，提出了两种情况，用来说明开发的模型描述负荷动态特性的准确度。

A. 虎石台变电站的基于测量的负荷建模

虎石台变电站位于中国的辽宁省。自 2003 年 7 月以来，负荷特性记录仪便开始运作。表 II 展示了，由 90 组负荷测量记录中构成的负荷模型的差异。

TABLE II
LOAD MODEL PARAMETER OF HUSHITAI SUBSTATION

| Load Model | Numerical Value | Variance |
|-------------|-----------------|------------|
| R_s | 0.3441 | 0.00048145 |
| X_s | 0.1781 | 0.00094501 |
| X_m | 2.0424 | 0.0001687 |
| R_r | 0.0322 | 0.00014986 |
| X_r | 0.1765 | 0.00081106 |
| H | 1.4569 | 0.00015055 |
| A | 0.3475 | 0.00042412 |
| B | 0.9216 | 0.0007566 |
| K_{pm} | 0.3382 | 0.00044861 |
| M_{lf} | 0.2688 | 0.0010084 |
| P_p^* | 0.1031 | 0.00016689 |
| P_z^* | 0.6490 | 0.00011447 |
| Q_Q^* | 1.8894 | 0.0004549 |
| Q_z^* | 0.2757 | 0.0009818 |
| Model Error | 3.9e-4 | |

观察表 II，我们可以确定负荷模型有一个更大的等效 R_s 。这是因为在配电网络，配电线的电阻通常具有更大的值。表 II 中所示的模型误差是 $3.9e-4$ ，只是一个相当令人满意的拟合精度。图 3-5 表示，2003 年 7 月 24 日，在一个干扰下的负荷的动态特性。实线是现场测量，虚线是模型输出。

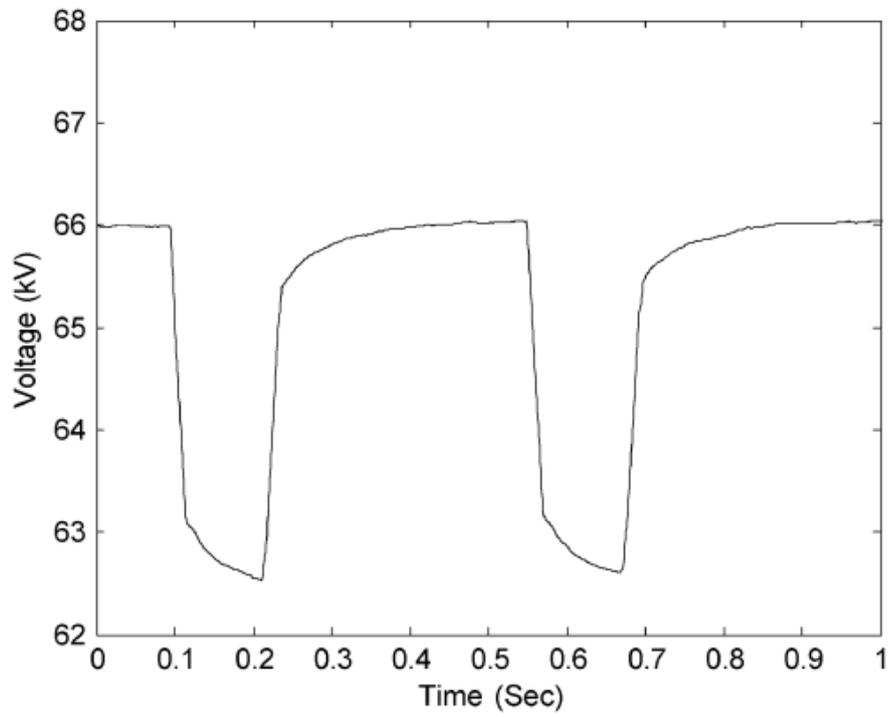


Fig. 3. Bus voltage of HuShiTai substation on 14:38:54, July 24, 2003.

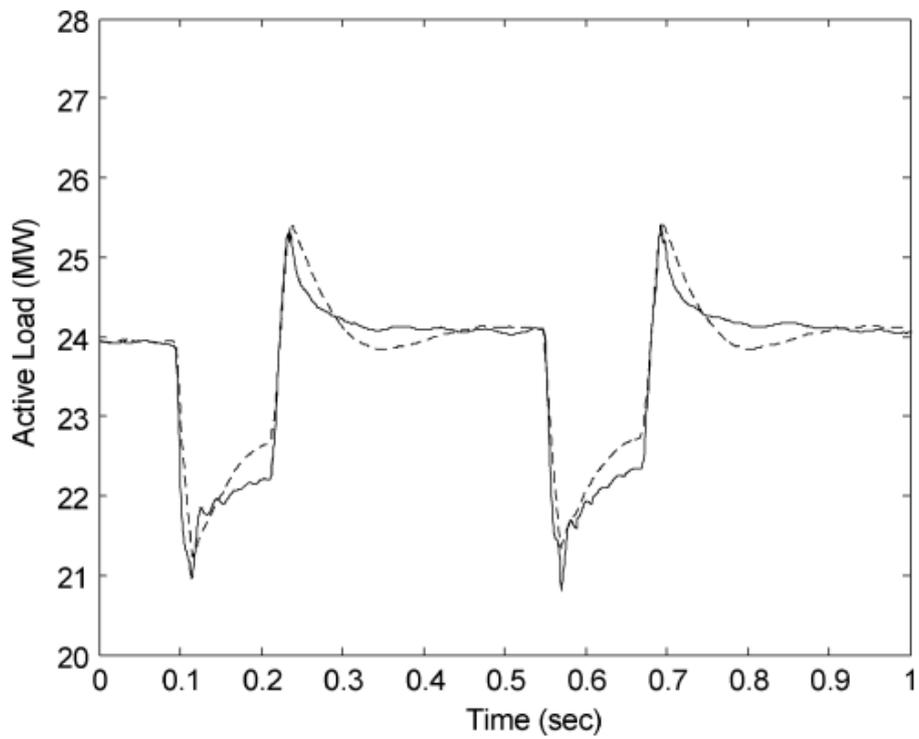


Fig. 4. Active load of both model output and the measurement.

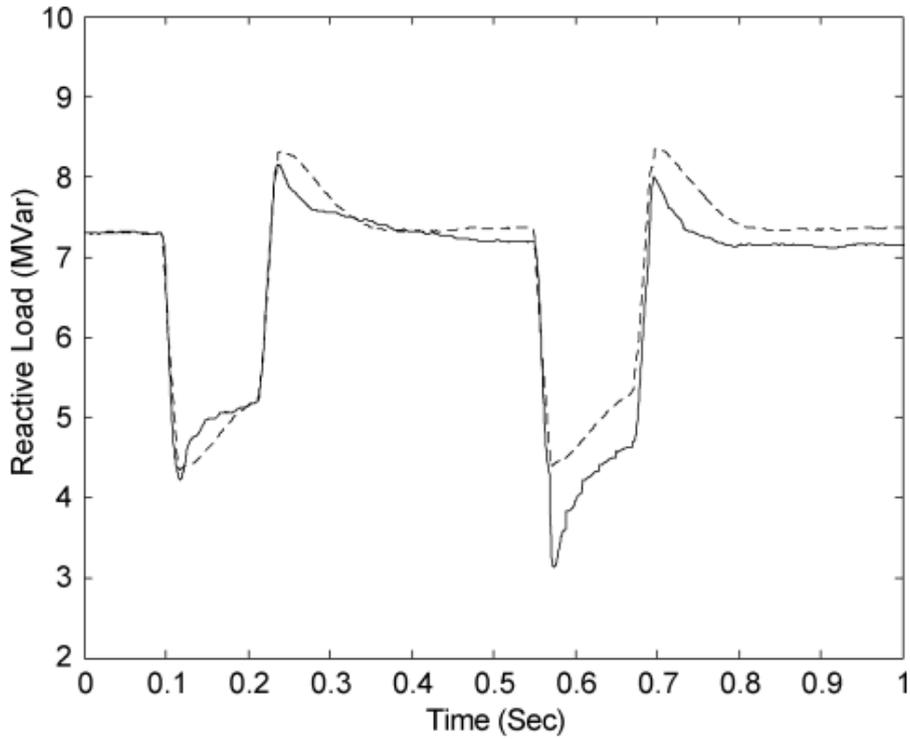


Fig. 5. Reactive load of both model output and the measurement.

图 3-5 清楚地表明，负载模型在两次电压变化下的负荷特性。应当指出的是，由于负荷的随机性和复杂性，负载模型只能聚合成为一个近似值。即，负载模型可以不点对点地适应测量的负荷曲线，但它应当反映负荷的一般特性。其实，一个对一到两个测量数据可以准确吻合的负荷模型，其普适性比较差，无法适应其他曲线。这些被称为过度拟合问题。为给表 II 中的负荷模型的泛化能力做出估计，我们将全部数据随机分发到 3 个子集，每个子集有 30 个数据。然后运用在第五部分提出的交叉验证法。其结果在表 III。

TABLE III
GENERALIZATION CAPABILITY ESTIMATE ON LOAD MODEL OF
HUSHITAI SUBSTATION

| Data Subset | Training Error | Validation Error |
|---|----------------|------------------|
| 1 | 4.163356e-004 | 1.388901e-003 |
| 2 | 3.980500e-004 | 1.316049e-003 |
| 3 | 4.501120e-004 | 8.381140e-004 |
| Estimate on the Model Error for Unseen Data | | 0.12% |

因此，表 I 中的负荷模型已达到了预测未知数据的精度级别，同时也表现了一个很好的泛化能力。图 6-8 展示了 2003 年 8 月 21 日一次扰动的模型输出（虚线）。图 6-8 还展示了负荷动态特性的实际测量（实线）。这次的干扰并不包含在 90 个负荷训练的数据集中。因此，对于表 II 中建立的负荷模型，这是一个未知的数据集。从图 6-8 中可以看出，表 II 中的模型相当准确地描述了这个未知的负荷特性。

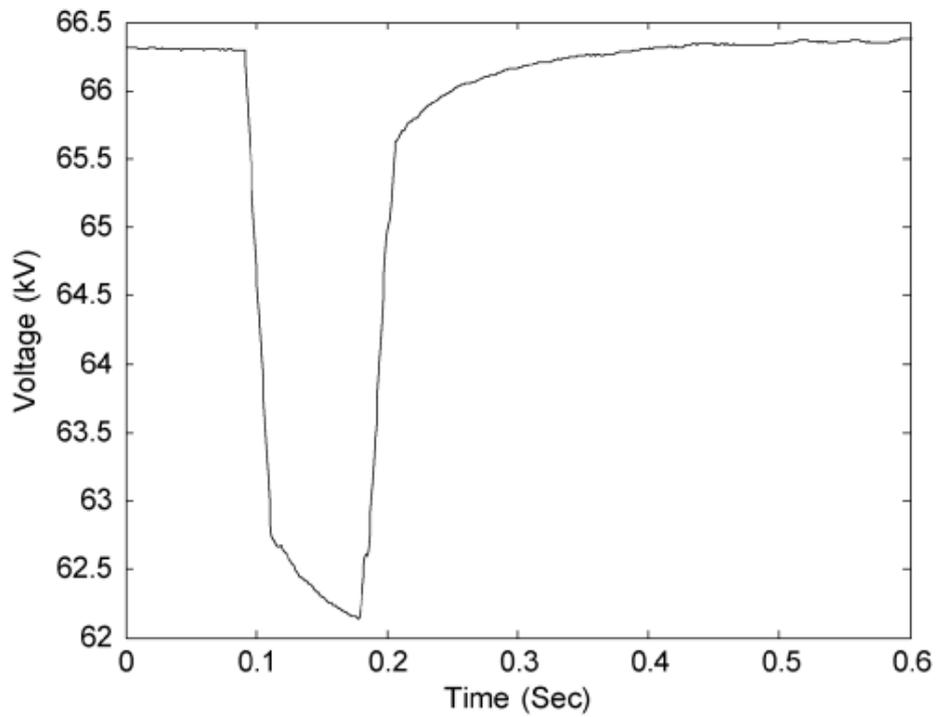


Fig. 6. Bus voltage of HuShiTai substation on 18:17:21, Aug. 21, 2003.

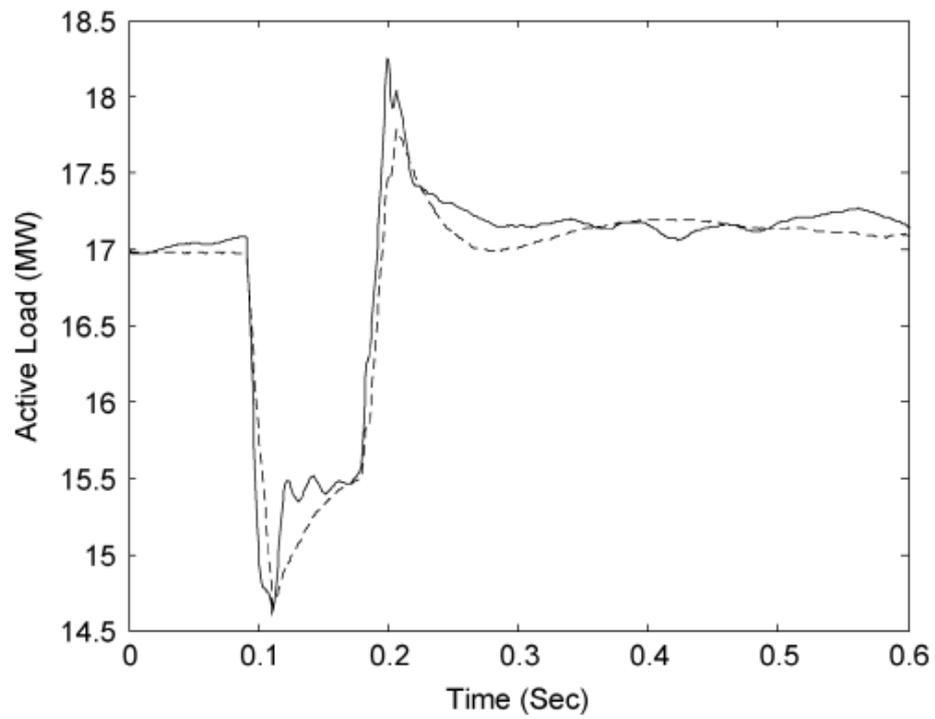


Fig. 7. Active load of both model prediction and the measurement.

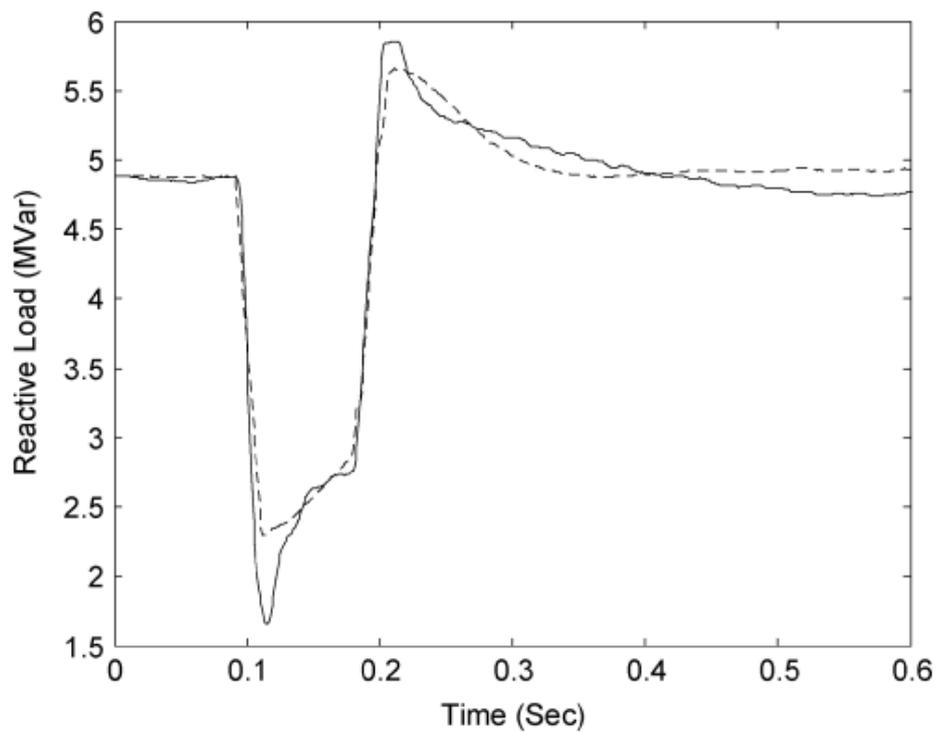


Fig. 8. Reactive load of both model prediction and the measurement.

B. 在鸡西变电站的基于测量的负荷模型

鸡西变电站位于黑龙江省。通过提出的负荷建模程序，可以得到表 IV 的负荷模型。

TABLE IV
LOAD MODEL PARAMETER OF JIXI SUBSTATION

| Load Model | Numerical Value | Variance |
|-------------|-----------------|-------------|
| Rs | 0.2010 | 0.00080033 |
| Xs | 0.1791 | 0.00013736 |
| Xm | 2.0141 | 0.00041536 |
| Rr | 0.0424 | 0.00012675 |
| Xr | 0.1507 | 1.3653e-005 |
| H | 1.4529 | 0.00031992 |
| A | 0.6267 | 0.00018455 |
| B | 0.4471 | 0.00050259 |
| K_{pm} | 0.4676 | 2.5813e-005 |
| M_{lf} | 0.3976 | 1.6333e-005 |
| P_p^* | 0.1094 | 0.00040187 |
| P_z^* | 0.7463 | 0.00019959 |
| Q_Q^* | 3.1588 | 0.00079837 |
| Q_z^* | 0.3071 | 0.00016075 |
| Model Error | 1.5e-3 | |

图 9-11 表示了 2003 年 3 月 10 日的一个扰动记录，它已被包含在了训练表 IV 的负荷模型的训练集中。可以清楚地看出，该模型可以很好地描述负荷动态特性。

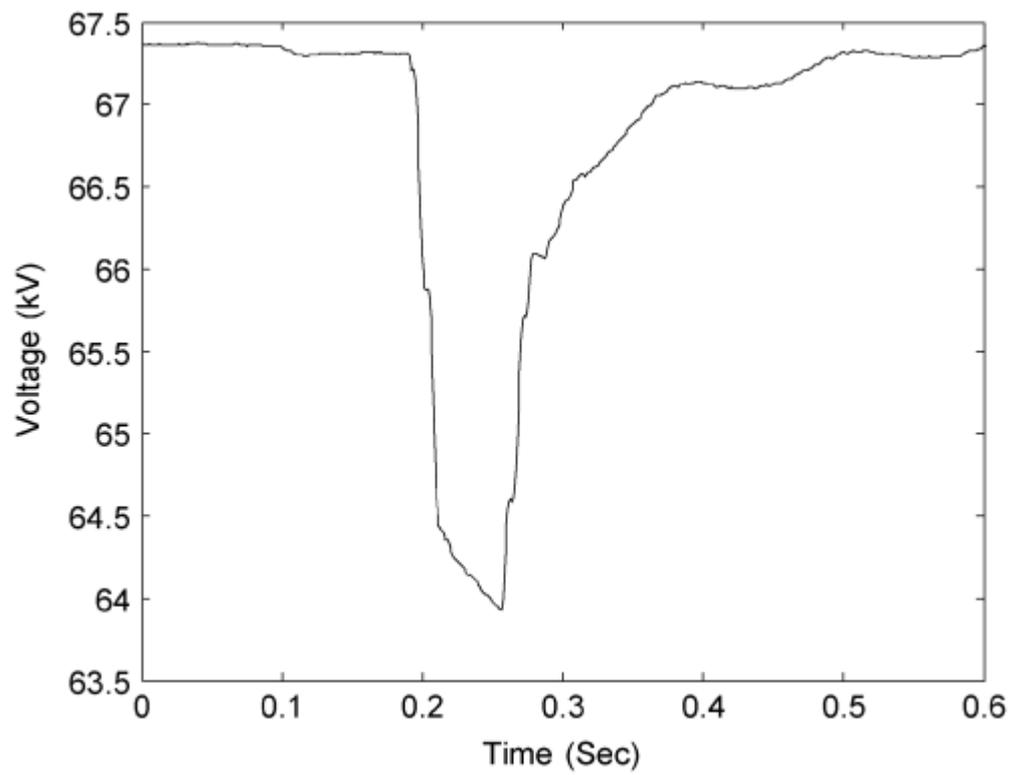


Fig. 9. Bus voltage of JiXi substation on 5:54:27, March 10, 2003.

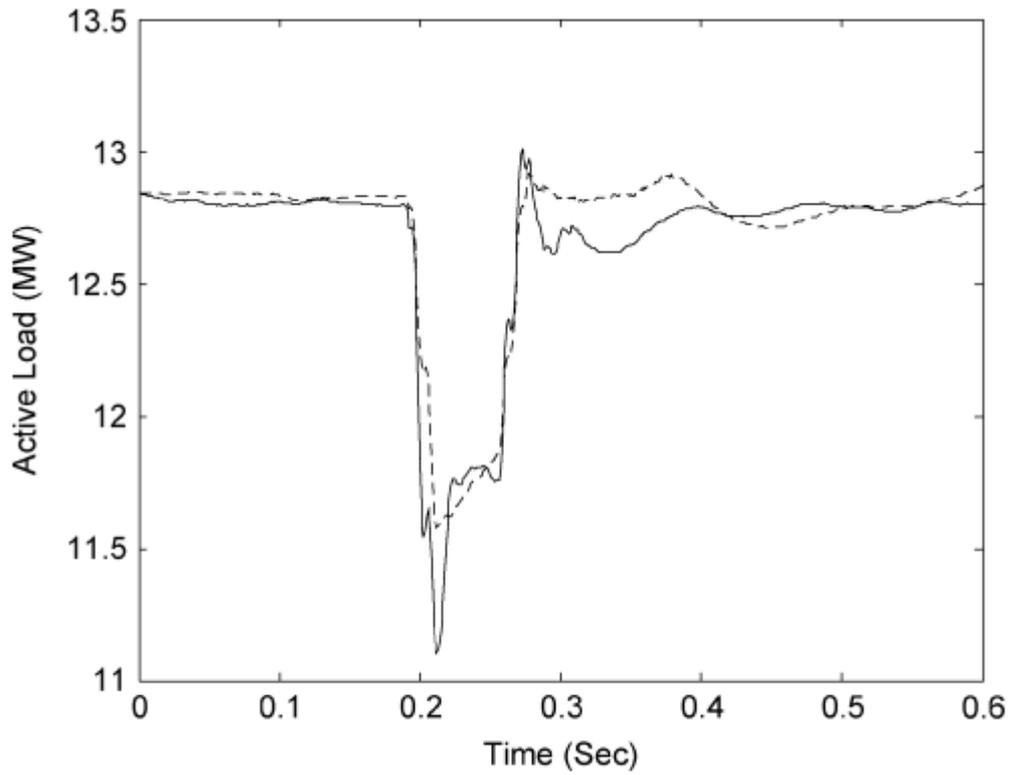


Fig. 10. Active load of both model output and the measurement.

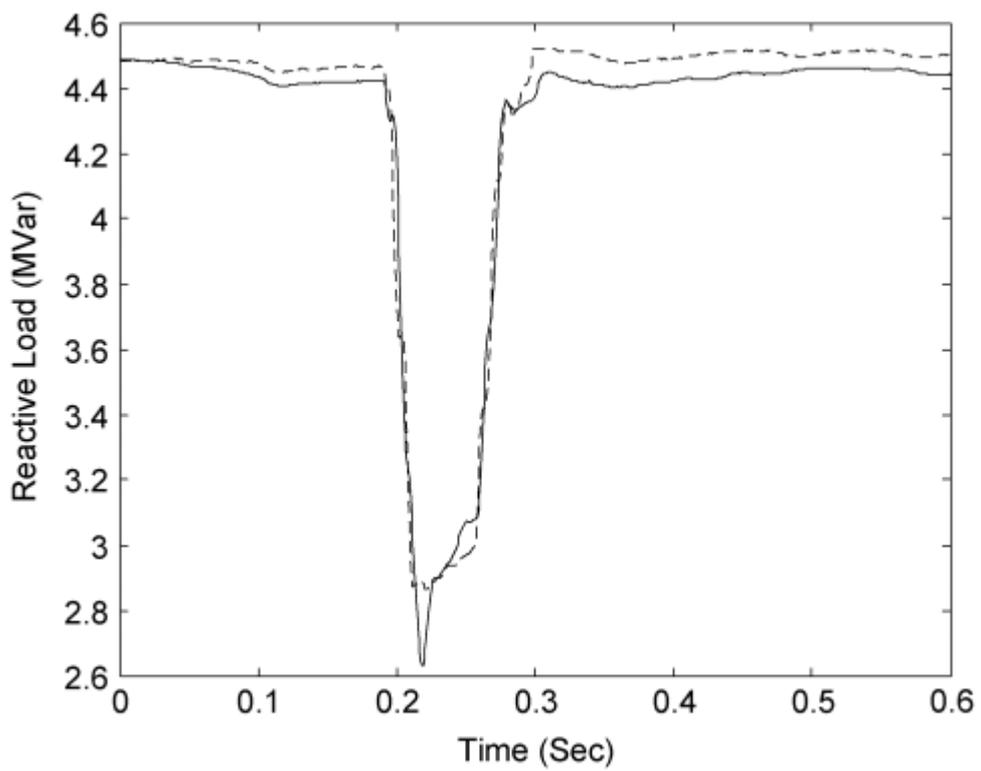


Fig. 11. Reactive load of both model output and measurement.

图 12-14 表示了 2003 年 3 月 1 日的一次扰动记录。这次扰动并未包含在表 IV 模型的训练集中，这是由数据随机筛选未选中引起的。比较图 9 和图 12 可以发现此次扰动中有一个很低很长的总线电压压降。下降值有 0.3p.u.。在图 13 和图 14 中比较模型输出（虚线）和实际负荷特性（实线），我们可以看到，虽然模型的输出和测量的负荷特性之间存在着偏差，该模型还是可以接受的。这显示了该模型有一个较强的普适能力。

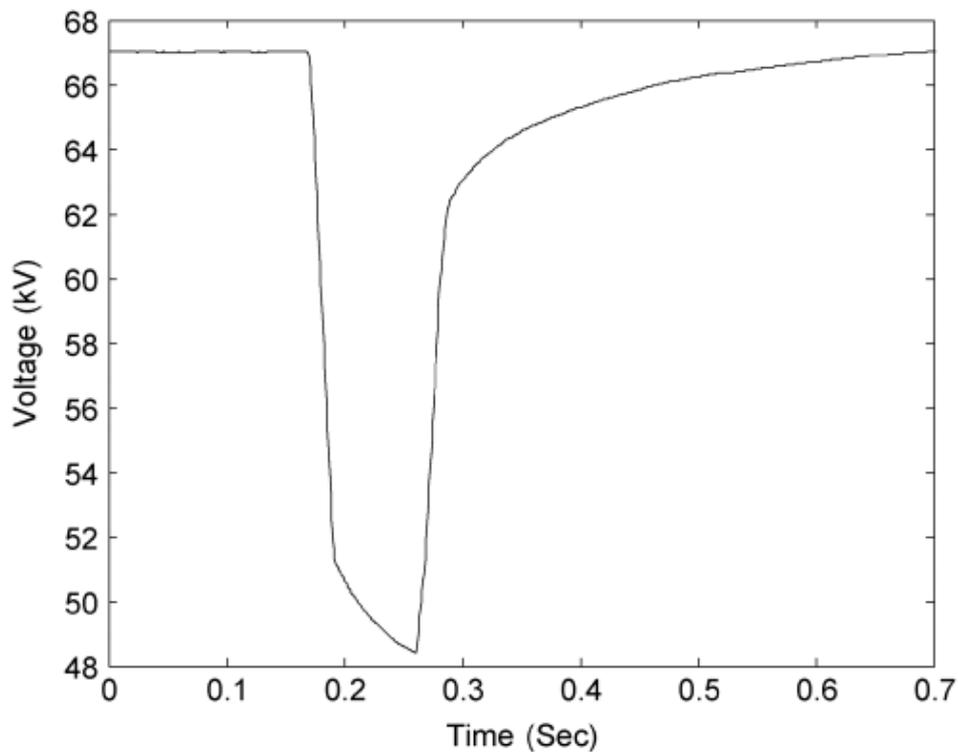


Fig. 12. Bus voltage of JiXi substation on 10:29:11, March 1, 2003.

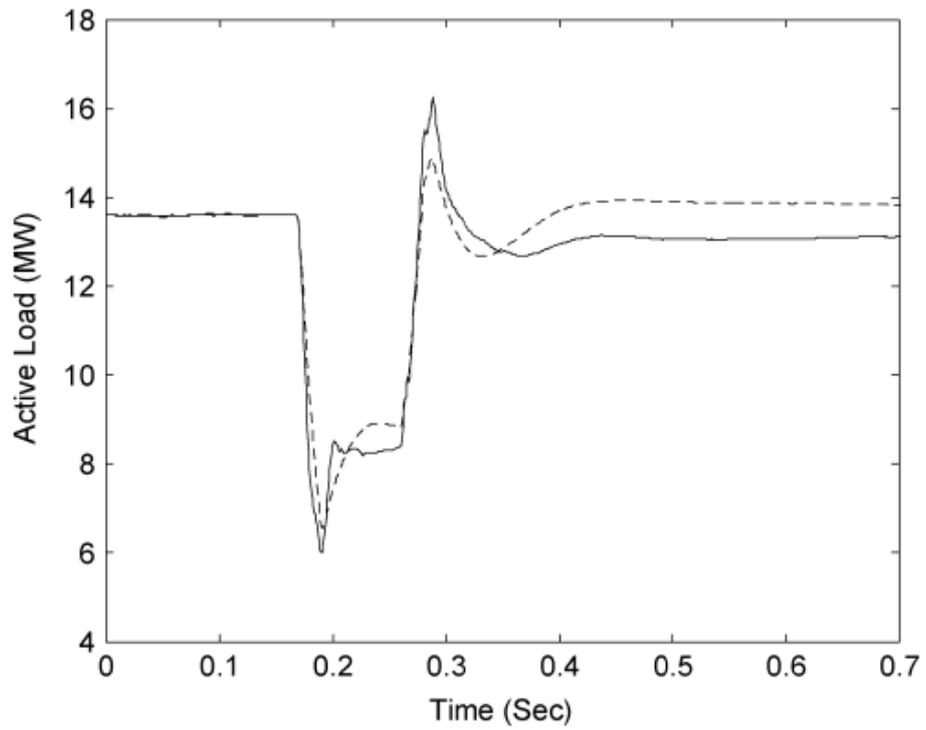


Fig. 13. Active load of both model prediction and the measurement.

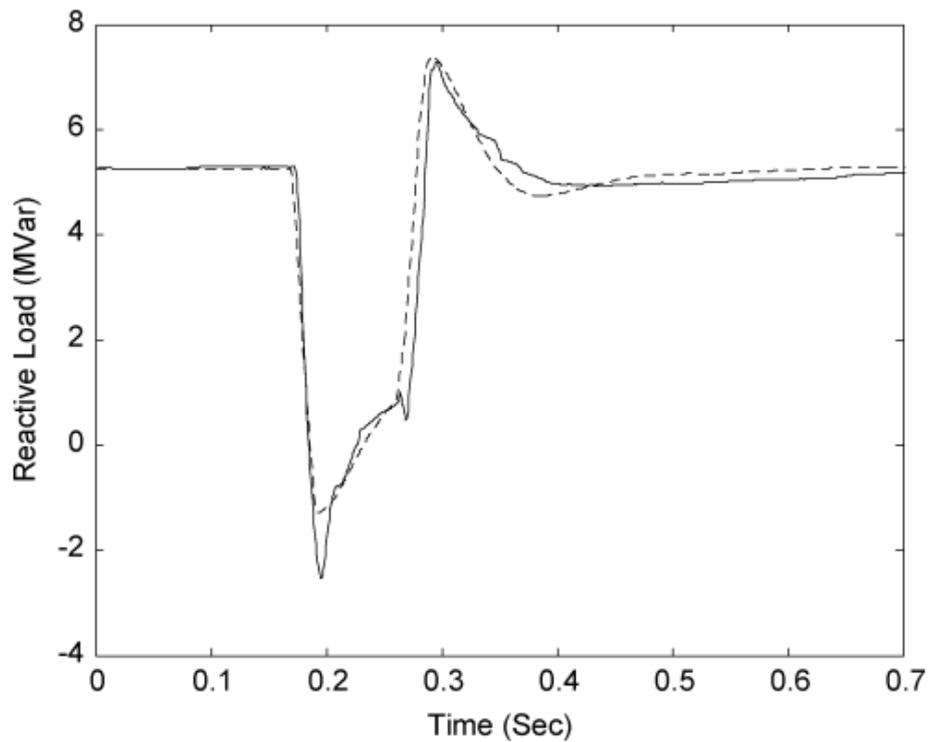


Fig. 14. Reactive load of both model prediction and the measurement.

VII 结论

本文系统地阐述了基于测量综合负荷模型的建立方法。其结构为感应电动机加静态 ZIP 模型，其所有参数均由本文提供的实地测量的数据所确定。交叉验证法在本文中被应用于研究负荷模型的泛化能力。案例研究充分说明了模型描述在真实电力系统只能怪负荷动态特性行为，其准确度和普适性很强。

产品级的负荷特性记录仪已被中国各地广泛开发和应用。本文阐述的负荷模型的准确度已在系统运行过程中进行了验证。

未来的工作将集中在一下三个方面。首先，积累的实地测量的数据提供了一个机会，可以找到统计规律背后的看似不相干的复合数据。由于所有的负荷模型都是由有限的数据中建立出来的，能够捕捉随机变化的负荷的内在规律将是最好的负荷。因此，基于小数据集[29]的建模统计学理论技术[28]将在实践中探索。此外，海量的数据揭示了统计规律将作为基于测量的负荷建模的指导技术。

其次，将对副变压器等级电压下的一般负荷特性进行研究。到目前为止，负荷模型都建立在配电电压的等级上；然而，接下来的工作需要一个更高等级电压的综合负荷特性。基于测量的负荷建模技术可以扩展来解决这个问题，然而，需要研究能够描述副传输电压等级的适当的负荷模型结构[30]。

第三，将研究全局负荷模型。由于，负荷在极端的运行条件下可能会有很不同的特性，如电压崩溃点附近或长时间的电压骤降等情况，可以研究一个全局的负荷模型以适应所有可能的系统工作情况。全局控制的理念[31]将被扩展成一个围绕全局负荷模型和混合系统的更全面的稳定性控制的理念。

本文阐述的工作仅仅是更好地了解负荷的初始的一步。随着越来越多的数据记录，更多的负荷特性将被发现。

参考文献

- [1] C. Concordia and S. Ihara, "Load representation in power systems stability studies," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-101, no. 4, pp. 969–977, Apr. 1982
- [2] J. M. Undrill and T. F. Laskowski, "Model selection and data assembly for power system simulation," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS101, no. 9, pp. 3333–3341, Sep. 1982.
- [3] R. H. Craven and M. R. Michael, "Load representations in the dynamic simulation of the Queensland Power System," J. Elect. Electron. Eng., vol. 3, no. 1, pp. 1–7, 1983.
- [4] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Load representation for dynamic performance analysis," IEEE Trans. Power Syst., vol. 8, no. 2, pp. 472–482, May 1993.

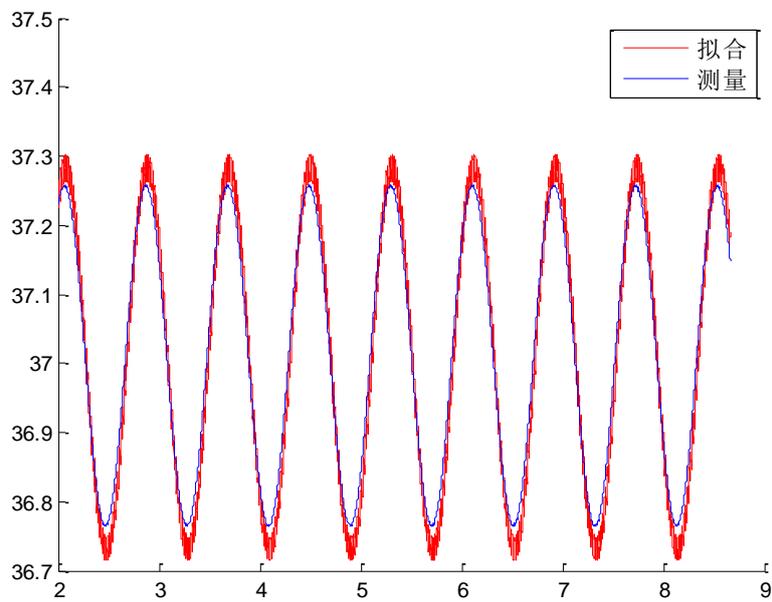
- [5] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 523–538, Feb. 1995.
- [6] J. V. Milanovic and I. A. Hiskens, "Effects of load dynamics on power system damping," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 1022–1028, May 1995.
- [7] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Standard load models for powerflow and dynamic performance simulation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1302–1313, Aug. 1995.
- [8] I. A. Hiskens and J. V. Milanovic, "Load modeling in studies of power system damping," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 4, pp. 1781–1788, Nov. 1995.
- [9] A. Gebreselassie and J. H. Chow, "Investigation of the effects of load models and generator voltage regulators on voltage stability," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 83–89, 1994.
- [10] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [11] General Electric Company, "Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies," EPRI, Rep. EL-5003, vol. 1–4, Jan. 1987.
- [12] W. W. Price, K. A. Wirgau, A. Murdoch, J. V. Mitsche, E. Vaahedi, and M. A. El-kady, "Load modeling for loadflow and transient stability computer studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 180–187, Feb. 1988.
- [13] H. Renmu and A. J. Germond, "Dynamic model for load model parameters identification based upon measurement in the field," in *Proc. 8th Power System Computation Conf.*, Aug. 1984, pp. 858–866.
- [14] H. Renmu, "Establishment of the power system load model," in *Proc. CSEE*, vol. 12, Nov. 1992, pp. 33–40.
- [15] M. Daqiang and J. Ping, "A novel approach to dynamic load modeling," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, no. 2, pp. 396–402, May 1989.
- [16] C. J. Lin, Y. T. Chen, H. D. Jiang, and J. C. Wang, "Dynamic load models in power systems using the measurement approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 1, pp. 309–315, Feb. 1993.
- [17] J. C. Wang, H. D. Jiang, C. L. Chang, and A. H. Liu, "Development of a frequency-dependent composite load model using the measurement approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 1546–1556, Aug. 1994.
- [18] J. H. Shi and H. Renmu, "Measurement-based load modeling—model structure," in *Proc. IEEE Bologna PowerTech Conf.*, Bologna, Italy, Jun. 23–26, 2003.
- [19] D. N. Kosterev, C. W. Taylor, and W. A. Mittelstadt, "Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 3, pp. 967–979, Aug. 1999.
- [20] W.-S. Kao, C.-J. Lin, C.-T. Huang, Y.-T. Chen, and C.-Y. Chiou, "Comparison of simulated power system dynamics applying various load models with actual recorded data," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 248–254, Feb. 1994.
- [21] W.-S. Kao, "The effect of load models on unstable low-frequency oscillation damping in Taipower system experience w/wo power system stabilizers," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 3, pp. 463–472, Aug. 2001.

- [22] L. Pereira, D. Kosterev, P. Mackin, D. Davies, J. Undrill, and W. Zhu, "An interim dynamic induction motor model for stability studies in the WSCC," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 4, pp. 1108–1115, Nov. 2002.
- [23] D. J. Hill, "Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 1, pp. 166–176, Feb. 1993.
- [24] D. Karlsson and D. J. Hill, "Modeling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 157–166, Feb. 1994.
- [25] B. C. Lesieutre, P. W. Sauer, and M. A. Pai, "Development and comparative study of induction machine based dynamic P,Q load models," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 182–191, Feb. 1995.
- [26] T. Omata and K. Uemura, "Aspects of voltage responses of induction motor loads," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 4, pp. 1337–1344, Nov. 1998.
- [27] O. Nelles, *Nonlinear System Identification*. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [28] V. N. Vapnik, *The Nature of Statistic Learning Theory*. New York: Springer-Verlag, 1995.
- [29] P. Radonja, S. Stankovic, and Z. Popovic, "Specific process models derived from extremely small data sets and general process models," in *Proc. 7th Seminar Neural Network Applications Electrical Engineering*, Sep. 23–25, 2004.
- [30] D. J. Hill and I. A. Hiskens, "Modeling, stability and control of voltage behavior in power supply systems," in *Proc. IV Symp. Specialists Electric Operational Expansion Planning*, Foz do Iguacu, Brazil, May 1994.
- [31] Y. Guo, D. J. Hill, and Y. Wang, "Global transient stability and voltage regulations for power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 678–688, Nov. 2001.

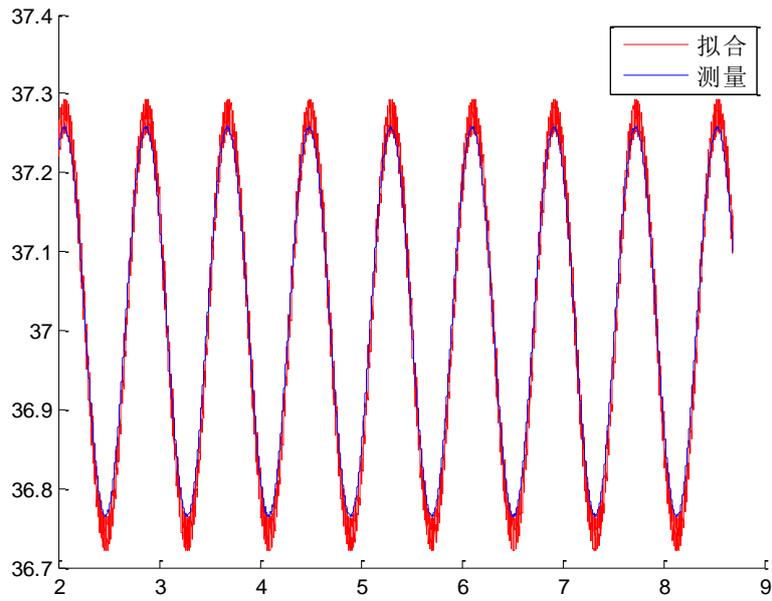
附录 B 原辨识方法的总体辨识结果与对应图像

在此给出 4.1 节中原辨识算法辨识结果对应的代数方程与实际测量曲线的对比图。表格下方的图片为表格数据中的参数对应的代数方程与测量值的对比图。

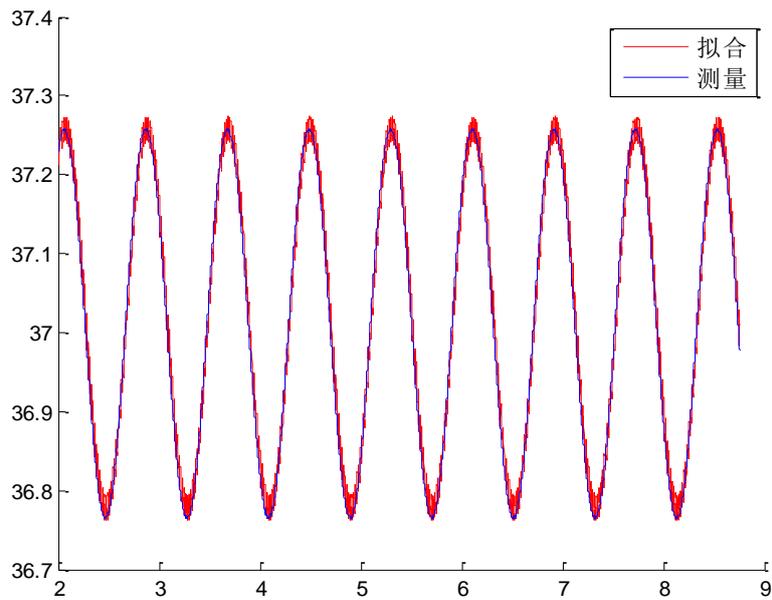
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|---|--------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|------|---------|
| 1 | 7.6952 | 11.6831 | 5.8773 | 11.7548 | 0.3374 | 0.9000 | 3846.3 | 0 | 72.59 |



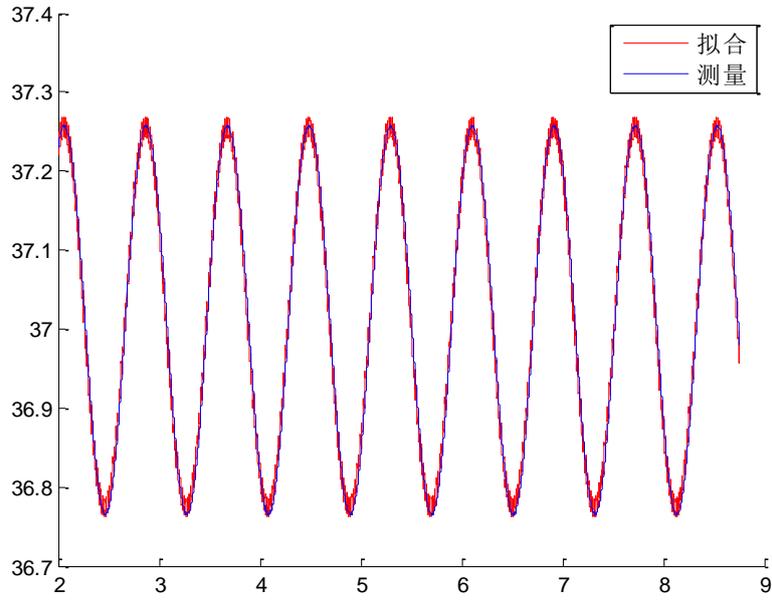
| | Ap | Bp | Cp | Mp | t0 | n | f(x) | ef | time(s) |
|---|--------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|----|---------|
| 2 | 6.6486 | 10.1348 | 10.1094 | 10.1114 | 0.3081 | 0.8804 | 5452.2 | 1 | 10.44 |



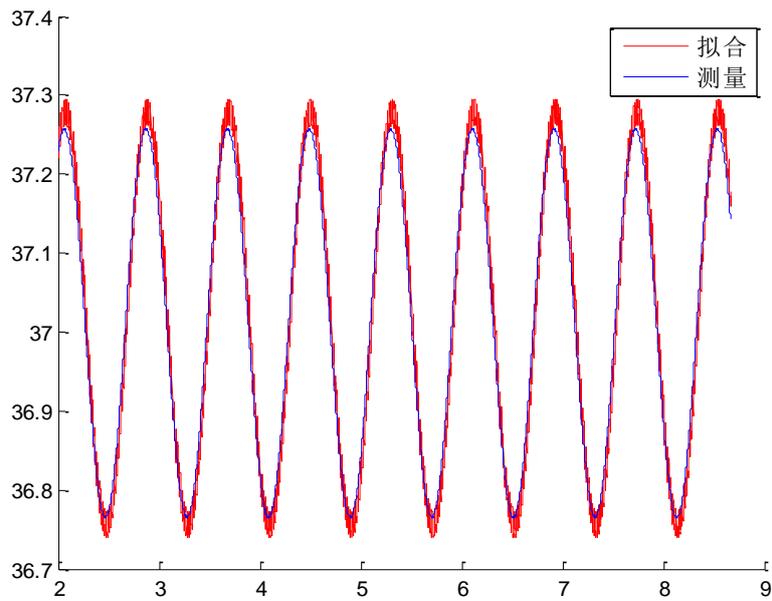
| | Ap | Bp | Cp | Mp | t0 | n | f(x) | ef | time(s) |
|---|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|----|---------|
| 3 | 5.6036 | 5.7969 | 16.2544 | 9.3635 | 0.2422 | 0.5659 | 7487.7 | 1 | 5.49 |



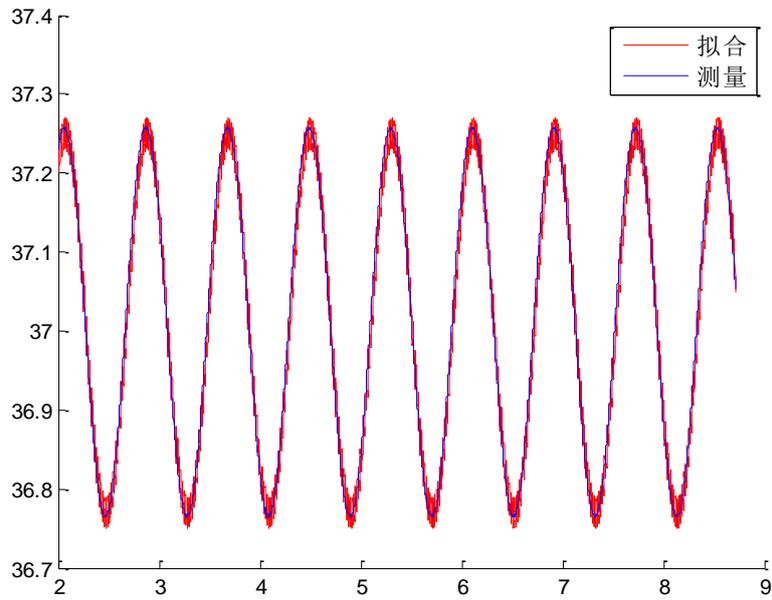
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time (s) |
|---|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|------|----------|
| 4 | 5.8979 | 5.1995 | 11.8191 | 14.0945 | 0.2432 | 0.5002 | 7336.6 | 1 | 13.29 |



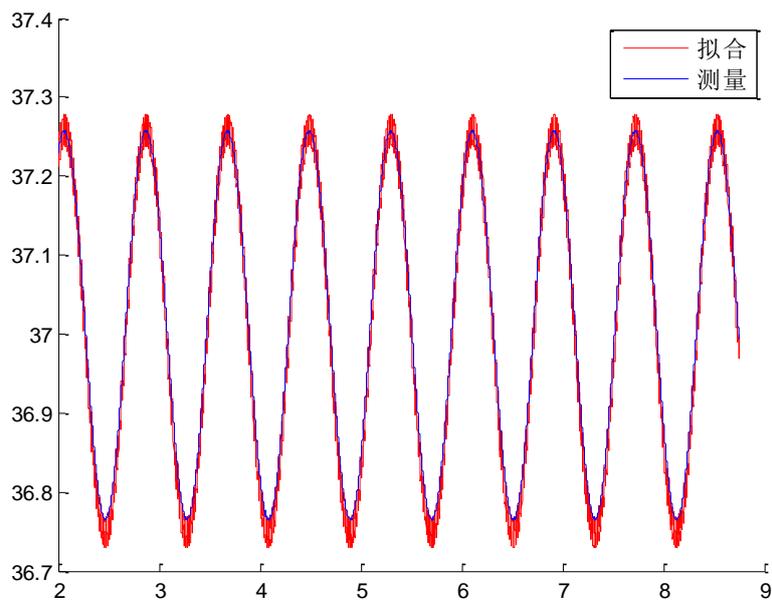
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time (s) |
|---|-------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|------|----------|
| 5 | 7.437 | 9.9377 | 9.3595 | 10.2795 | 0.3337 | 0.8969 | 4671.6 | 1 | 18.63 |



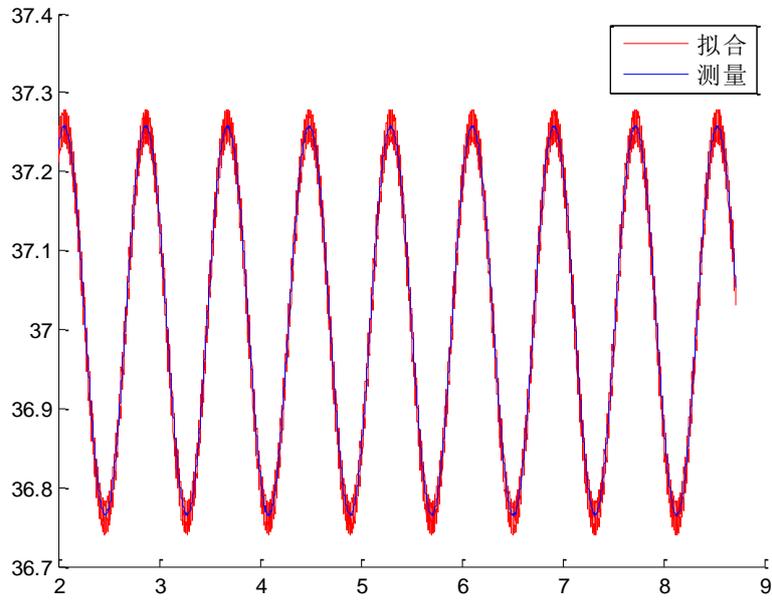
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time (s) |
|---|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|----|----------|
| 6 | 5.1005 | 8.7030 | 15.6597 | 7.5459 | 0.2813 | 0.7938 | 4588.0 | 1 | 12.39 |



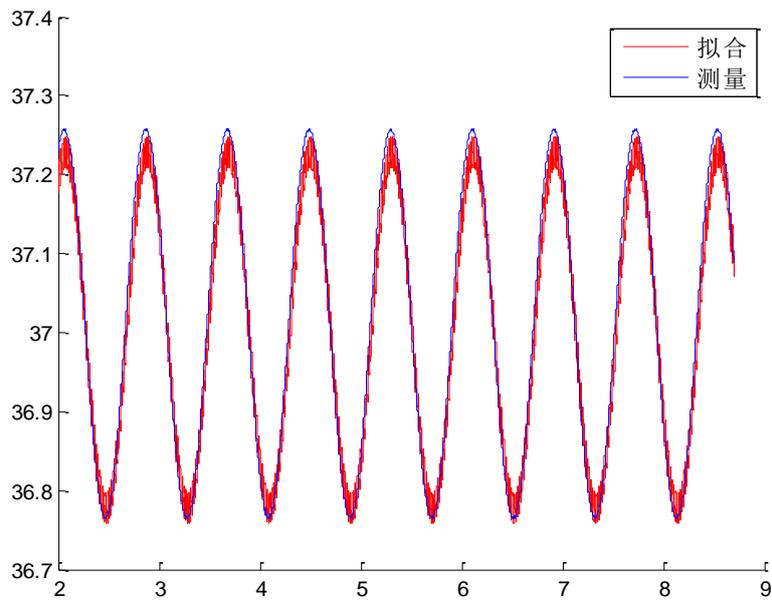
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time (s) |
|---|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|----|----------|
| 7 | 6.2208 | 6.0873 | 16.4009 | 8.2934 | 0.2512 | 0.8142 | 6587.6 | 1 | 6.20 |



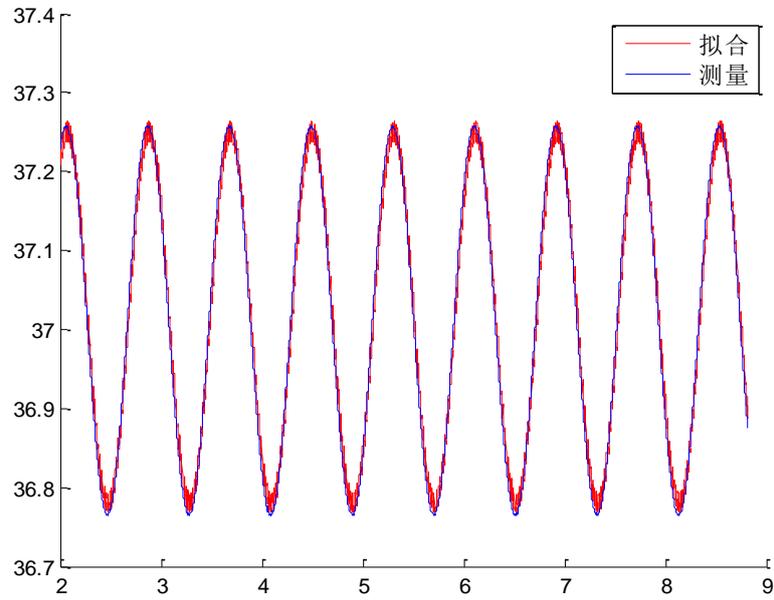
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|---|--------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|----|---------|
| 8 | 4.8510 | 10.2093 | 11.3284 | 10.6202 | 0.2815 | 0.7149 | 8634.4 | 1 | 17.61 |



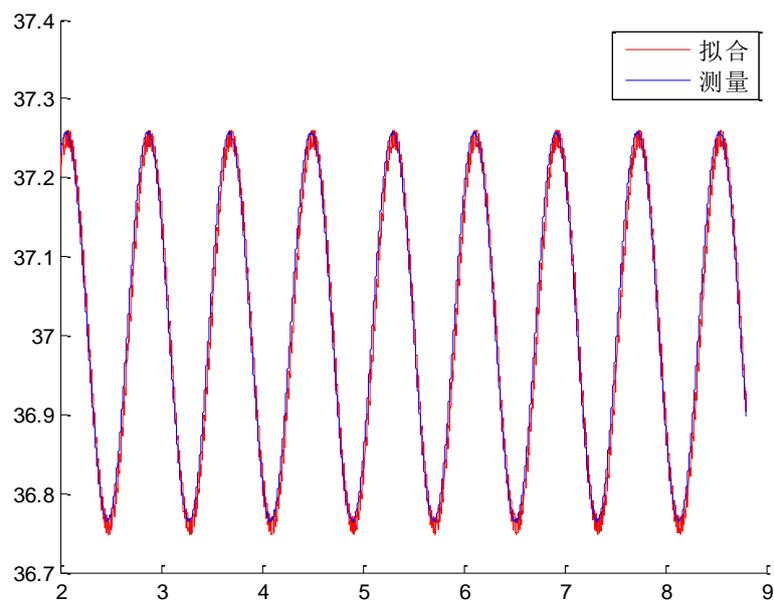
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|---|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|----|---------|
| 9 | 6.9274 | 5.0021 | 16.1152 | 8.9570 | 0.3008 | 0.6952 | 4502.6 | 1 | 12.26 |



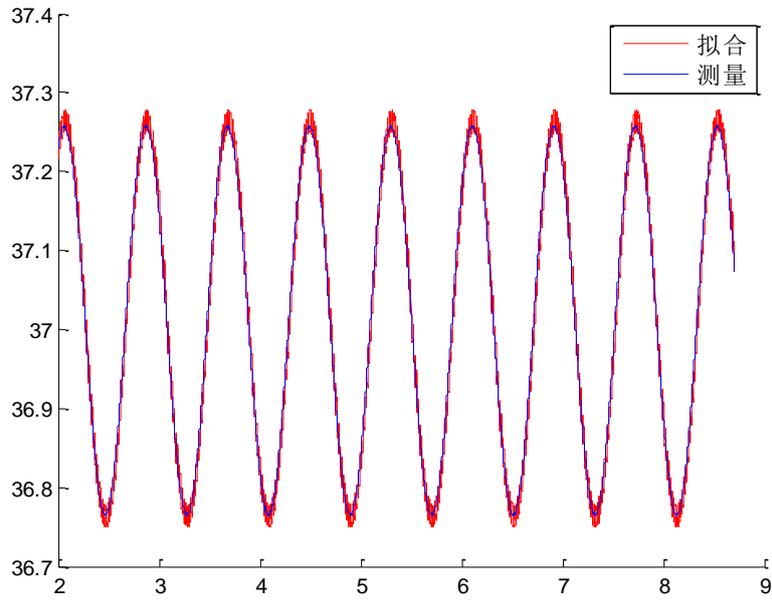
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|----|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|----|---------|
| 10 | 3.4553 | 7.5320 | 19.6871 | 6.3415 | 0.1838 | 0.7783 | 7680.7 | 1 | 10.80 |



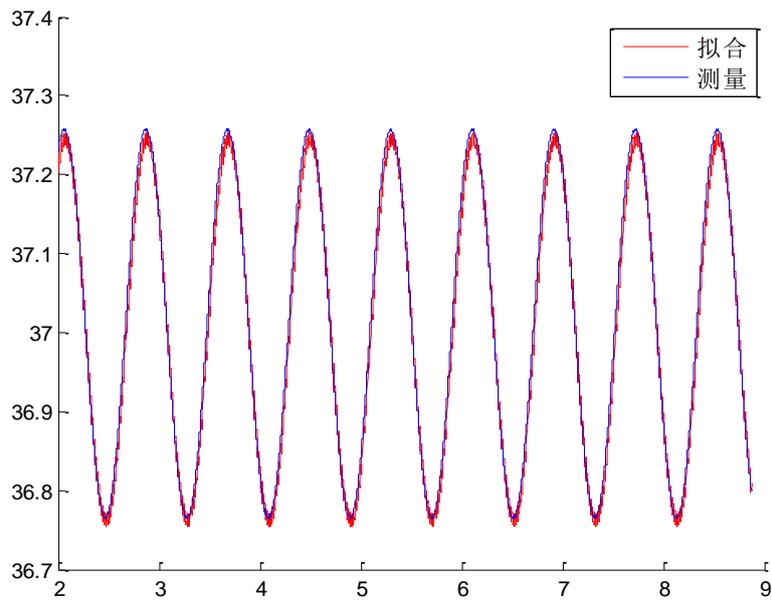
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|----|--------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|----|---------|
| 11 | 1.7365 | 12.3001 | 12.0775 | 10.8919 | 0.1972 | 0.4225 | 5827.0 | 1 | 9.55 |



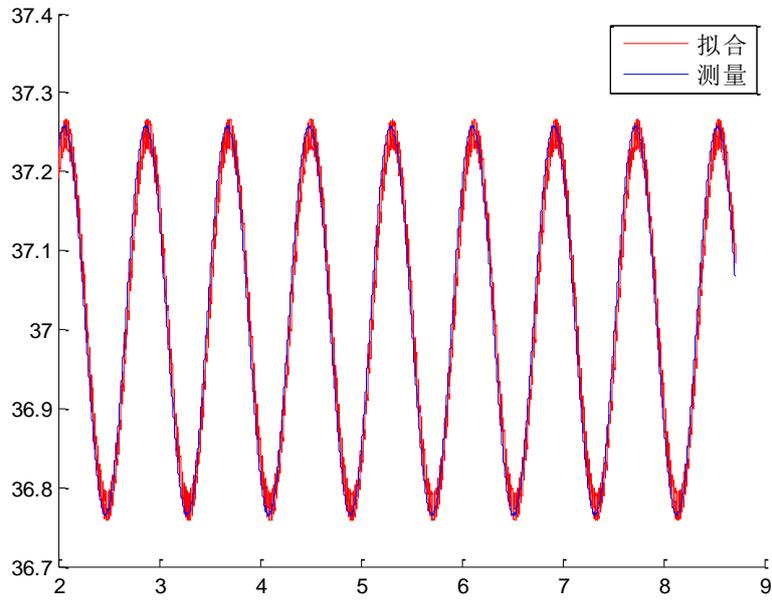
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|----|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|----|---------|
| 12 | 7.1579 | 6.3278 | 13.5238 | 10.0010 | 0.2937 | 0.7126 | 6217.7 | 1 | 11.98 |



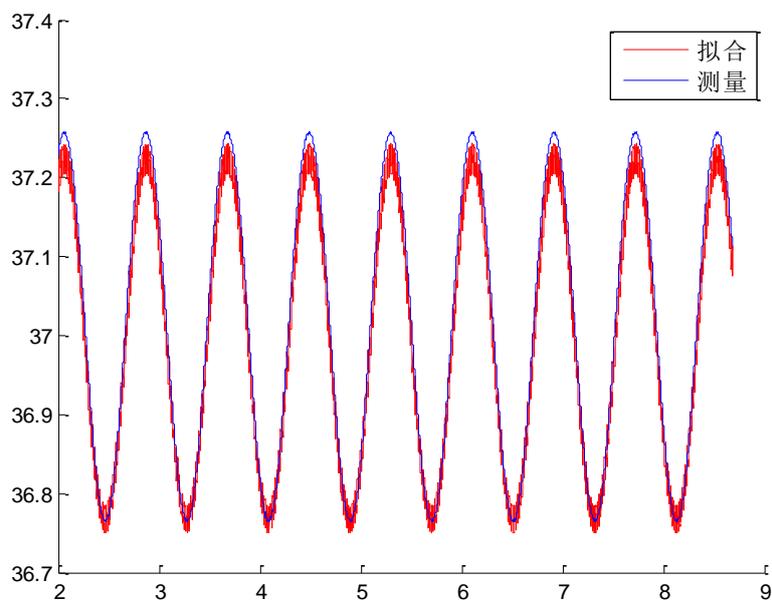
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|----|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|----|---------|
| 13 | 1.9056 | 8.3307 | 18.3782 | 8.3909 | 0.1270 | 0.7244 | 5702.4 | 1 | 8.10 |



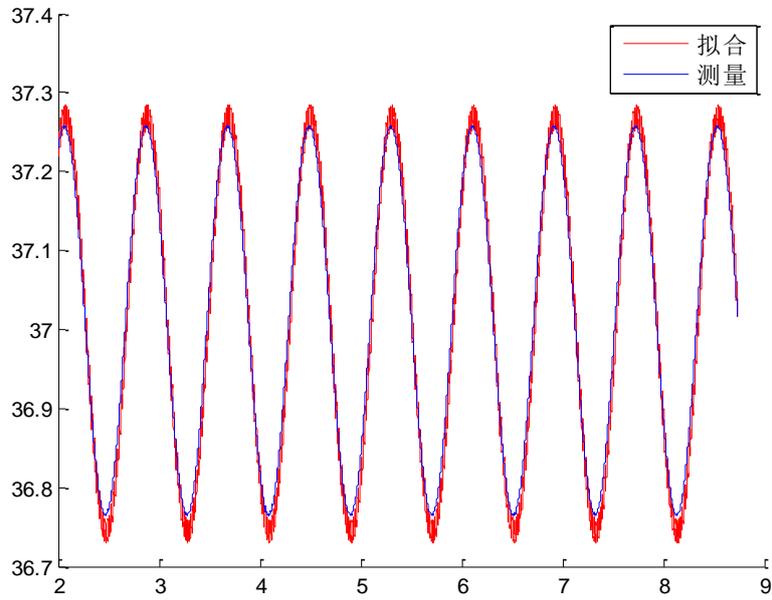
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|----|--------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|----|---------|
| 14 | 2.3958 | 13.9909 | 11.6636 | 8.9611 | 0.2893 | 0.5902 | 4952.2 | 1 | 10.38 |



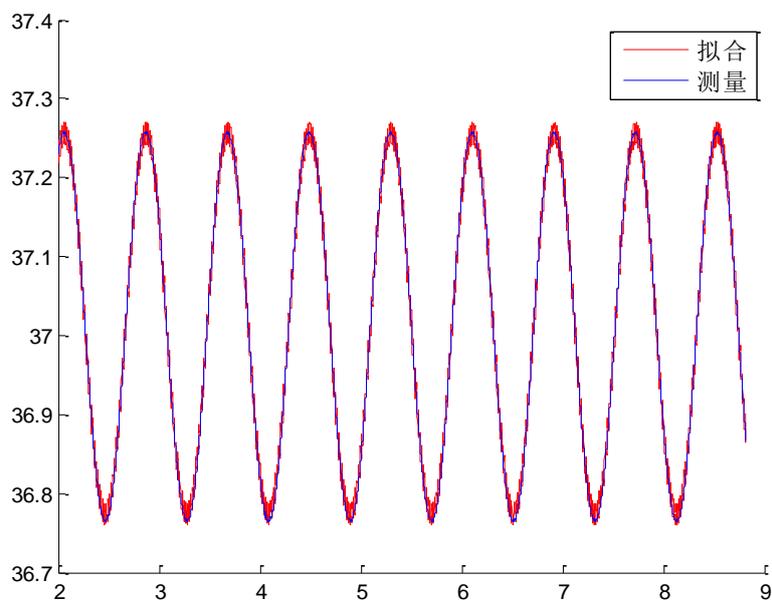
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|----|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|----|---------|
| 15 | 5.5694 | 9.9598 | 11.5511 | 9.9160 | 0.3150 | 0.8918 | 4642.8 | 1 | 8.18 |



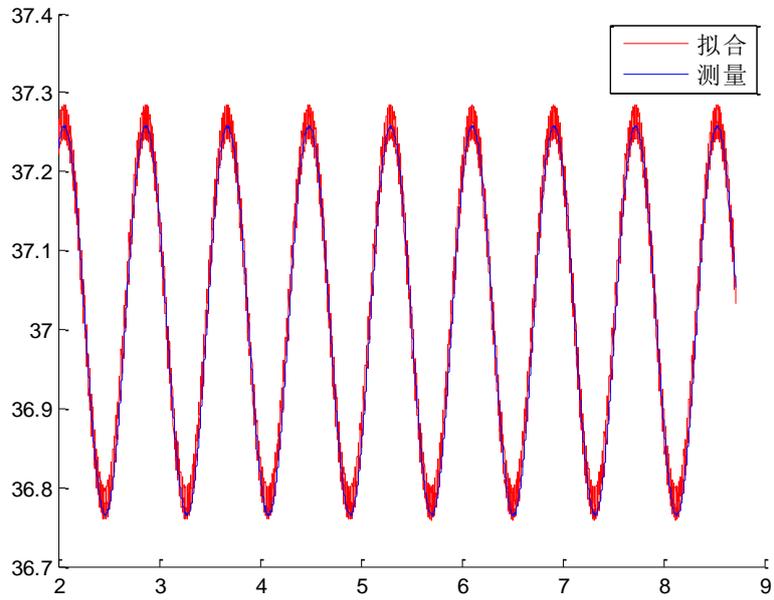
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|----|--------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|----|---------|
| 16 | 3.2425 | 13.1370 | 12.6576 | 7.9671 | 0.2627 | 0.74178 | 4651.8 | 1 | 17.44 |



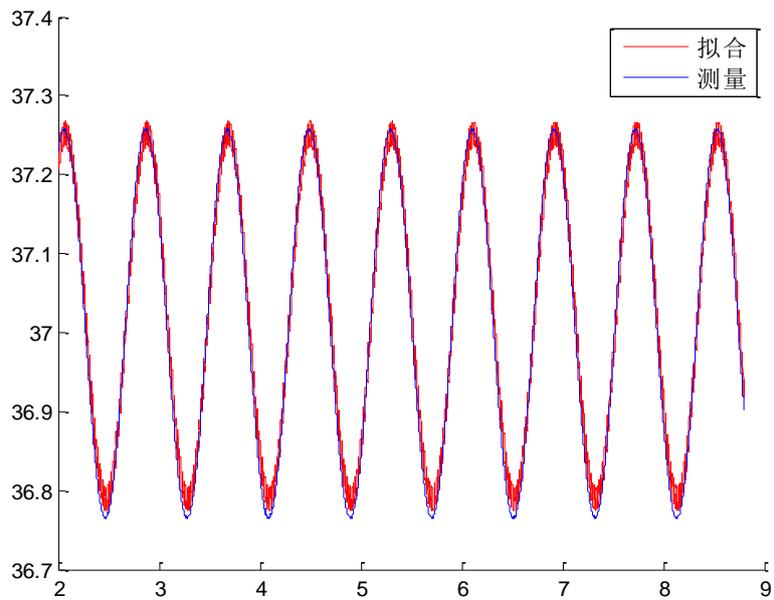
| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|----|--------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|----|---------|
| 17 | 3.9146 | 6.2048 | 15.4102 | 11.4839 | 0.1787 | 0.5333 | 14324.8 | 1 | 12.47 |



| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|----|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|----|---------|
| 18 | 8.6783 | 2.1717 | 14.8022 | 11.3681 | 0.2815 | 0.7065 | 7109.2 | 1 | 11.39 |



| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|----|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|----|---------|
| 19 | 2.9682 | 8.8629 | 18.9392 | 6.2499 | 0.2000 | 0.7765 | 5797.1 | 1 | 11.74 |



| | A_p | B_p | C_p | M_p | t_0 | n | $f(x)$ | ef | time(s) |
|----|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|----|---------|
| 20 | 7.4931 | 3.8446 | 18.6257 | 7.0582 | 0.2839 | 0.9000 | 6942.4 | 1 | 39.62 |

