

# 线性连续系统动态负荷模型的参数辨识与应用

章健<sup>1</sup>, 沈峰<sup>2</sup>

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 华北电力大学电力系, 北京 102206)

**摘要:** 目前在电力负荷建模中非机理负荷模型较多地采用离散系统模型或差分方程形式的模型, 而电力系统数字仿真中更需要连续系统的模型。研究了作用函数不含导数项和含有导数项两种情况下的线性连续系统微分方程形式的负荷建模方法, 介绍了模型参数辨识的直接优化算法, 该模型对于描述线性动态负荷或小扰动下的非线性动态负荷的行为, 具有一定程度的普适性。介绍了该动态负荷模型与电力系统分析综合程序 PSASP 的自定义连接方法。通过动模实验数据建模和仿真计算, 验证了模型参数辨识算法以及模型与电力系统分析综合程序接口的有效性。

**关键词:** 负荷建模; 动态负荷; 线性连续系统; 参数辨识

## Parameter estimation and application of dynamic load model with linear continuous-time signal form

ZHANG Jian<sup>1</sup>, SHEN Feng<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Electric Power Department, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The load models with discrete-time signal form or difference equation form are widely used in non mechanics load modeling currently. But the load model with continuous-time signal form is specially required in power system digital simulation. For two cases which the differential item is included or not in the excitation function, the linear continuous-time signal system load models with the form of differential equation are studied respectively in this paper. The direct optimization algorithm for parameter estimation is introduced. These models have a wide range of applications in describing the characteristics of linear dynamic load and non linear dynamic load under small signal turbulence. The method for linear continuous-time signal system model connected to the power system analysis software package (PSASP) by using the user definition function is described. The validity of proposed parameter estimation algorithm is proved by the examples of load modeling based on the measurement data, and the interface also proves to be valid for the model connected to PSASP.

**Key words:** load modeling; dynamic load; linear continuous-time signal system; parameter identification

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)15-0018-06

## 0 引言

基于电力系统元件数学模型的数字仿真是目前电力系统行为分析的主流方法。显然, 数字仿真结果的可信程度完全依赖于其所使用的数学模型<sup>[1]</sup>。电力负荷的时变性、变结构性、地域差异性、非线性等, 使得作为电力系统重要元件之一的电力负荷的建模一直成为了长期困扰着电力工程与学术领域的技术人员和学者的难题, 其建模的研究一直受到广泛的重视。虽然已取得了一些成果<sup>[2-4]</sup>, 但仍然还有许多问题需要解决, 负荷建模研究任重道远。

随着现代控制理论的发展和数字计算技术的广泛应用, 离散系统模型得到了越来越多的研究和重视, 并已在一些领域内发挥了很大作用。电力负荷建模直接借鉴了系统辨识理论的成果<sup>[5]</sup>, 除感应电

动机和少数几种模型<sup>[6-9]</sup>以外, 许多负荷特性辨识都主要是针对离散系统建模的<sup>[10-12]</sup>。但是在电力系统分析中, 发电机、励磁调节系统、原动机调速系统等元件一般采用连续系统模型<sup>[13]</sup>。电力系统的科研和工程技术人员习惯于在计算和分析中采用基于物理机理建立的具有明确物理意义参数的元件数学模型, 例如同步发电机模型中具有各类暂态电抗、绕组的时间常数、机组的转动惯量等。连续系统模型仍将是电力系统分析所采用的主要模型形式。为和电力系统其他元件模型形式协调, 进行连续系统形式的动态负荷的建模研究十分必要。

描述连续系统动态过程的微分方程、状态方程组和表征离散系统动态过程的差分方程之间有很大的差别<sup>[14]</sup>。在微分方程中出现的输入及输出信号的各阶导数, 一般情况下这些信号是不易甚

至是不能直接测量的。而在差分方程中显示的是各采样时刻系统的输入及输出信号, 通常是容易测试的。因此单就建模中输入、输出数据的采样而言, 连续系统的采样要比离散系统困难。

本文首先研究线性连续系统动态负荷模型的参数辨识算法。然后介绍微分方程、状态方程、传递函数、离散状态方程形式的负荷模型的转换关系, 以满足电力系统仿真计算中对不同负荷模型形式的需要。最后基于动模实验数据辨识线性连续系统动态负荷模型的参数, 并且介绍了线性连续系统动态负荷模型与电力系统分析综合程序 PSASP 的自定义连接方法, 以及基于所建负荷模型的暂态稳定仿真算例, 验证了接口程序的正确性。

## 1 线性连续系统动态负荷模型及参数辨识

### 1.1 作用函数不含导数项的输入/输出方程与状态方程<sup>[15]</sup>

满足齐次性和叠加性的系统称为线性系统, 其动态特性可用线性常微分方程式描述。其中作用函数  $f(x, t)$  中不含导数项的  $n$  阶单输入/输出微分方程为:

$$\frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx}{dt} + a_n x = f(x, t) \quad (1)$$

引入状态变量后, 其对应状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} [f(x_1, t)] \quad (2)$$

输出方程:

$$y = [x_1] = [1 \ 0 \ \dots \ 0] [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \quad (3)$$

### 1.2 作用函数中含有导数项的输入/输出方程与状态方程<sup>[15]</sup>

作用函数中含有导数项的  $n$  阶单输入/输出微分方程为:

$$\begin{aligned} \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = \\ b_0 \frac{d^n u}{dt^n} + b_1 \frac{d^{n-1} u}{dt^{n-1}} + \dots + b_{n-1} \frac{du}{dt} + b_n u \end{aligned} \quad (4)$$

引入状态变量后, 其对应状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{n-1} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 - a_1 b_0 \\ b_2 - a_2 b_0 \\ \vdots \\ b_{n-1} - a_{n-1} b_0 \\ b_n - a_n b_0 \end{bmatrix} [u] \quad (5)$$

输出方程:

$$y = [1 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{n-1} \ x_n]^T + [b_0] [u] \quad (6)$$

上述方程中输出  $y$  可以代表负荷有功功率和无功功率, 输入  $u$  为负荷端电压。两种模型的状态方程和输出方程可以统一写成如下形式:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (7)$$

$$y = Cx + Du \quad (8)$$

### 1.3 线性连续动态系统模型的参数辨识

设现场实测动态负荷的激励和响应数据集为  $\{u(t_i), y_m(t_i), i=1, 2, \dots, N\}$ , 用于描述负荷动态特性的式(7)和(8)所示状态方程的辨识问题可以表述为如下优化问题:

$$\text{obj. } \min_{\theta} J(\theta) = \sum_{i=1}^N w_i [y_m(t_i) - y(\theta, t_i)]^2 \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} \dot{x}(\theta, t) = A(\theta)x(\theta, t) + B(\theta)u(t) \\ y(\theta, t) = C(\theta)x(\theta, t) + D(\theta)u(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $w_i$  为权重系数,  $\theta$  为待辨识的模型参数。这里写出的是模型的一般形式, 实际上系数矩阵  $A(\theta)$ 、 $B(\theta)$ 、 $C(\theta)$ 、 $D(\theta)$  可能并非都含有待辨识的参数, 亦即有些为常数矩阵。

式(9)(10)的优化问题可以采用解析法来求解, 例如, 阻尼最小二乘法 (Marquardt 法)<sup>[16]</sup>, 该方法虽然计算速度快, 但需要用到目标函数关于待辨识参数的导数, 计算比较复杂。这里推荐采用步长加速法<sup>[17,18]</sup>进行参数辨识, 该方法是一种直接优化法, 求解中不用目标函数关于寻优变量的导数等解析性质, 仅仅计算目标函数值。虽然速度稍慢但对于寻优变量较少的优化问题还是十分有效的。篇幅所限, 这里不详细介绍。目标函数计算时涉及大量状态方程的求解, 这里采用四阶龙格库塔法。

## 2 线性系统动态负荷模型形式之间的转换

### 2.1 状态方程模型

作用函数不含导数项和含有导数项两种情况的微分方程模型如式(1)和式(4)所示, 利用上述直接优化算法可辨识得到其模型参数, 代入式(2)(3)和式(5)、(6)所示状态方程, 从而得到动态

负荷的状态方程模型。

### 2.2 微分方程模型

辨识获得式 (2) (3) 和式 (5) (6) 所示状态方程负荷模型的参数后, 按照状态方程参数与微分方程模型参数的对应关系很容易得到如式 (1) 和式 (4) 所示的微分方程模型。

### 2.3 传递函数模型

当已知微分方程形式的负荷模型时, 将微分方程的有关参数代入下式, 可分别求出传递函数:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0s^n + b_1s^{n-1} + \dots + b_{n-1}s + b_n}{s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n} \quad (11)$$

### 2.4 离散状态方程模型

对于式 (7) (8) 所述的连续系统状态方程, 可以离散化得到如下离散状态方程:

$$x(k+1) = \Phi(T)x(k) + \Psi(T)u(k) \quad (12)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (13)$$

其中状态转移矩阵  $\Phi(T)$  和控制矩阵  $\Psi(T)$  为:

$$\Phi(T) = e^{AT} \quad (14)$$

$$\Psi(T) = \left( \int_0^T e^{A(T-t)} dt \right) B \quad (15)$$

其不但与连续系统状态方程的系数矩阵  $A$ 、 $B$  有关, 且随采样周期变化。

## 3 线性连续系统负荷模型与电力系统分析综合程序 (PSASP) 接口<sup>[19]</sup>

电力系统分析综合程序(PSASP)以其功能强大、服务维护和升级有保障等优势, 已广泛地应用于我国电力生产部门。其提供的用户自定义功能, 使用户在计算时不拘泥于程序库所提供的元件模型, 能够将自建的模型甚至开发的部分程序纳入综合程序中参与计算, 大大提高了软件的灵活性。本文利用 PSASP 的用户自定义模型的功能, 通过接口实现上述微分方程负荷模型与综合计算程序的连接。

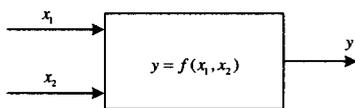


图1 基本功能单元结构图  
Fig.1 Basic function unit

在 PSASP 中, 用户自定义模型就是在不改变计算程序本身的条件下, 由用户根据欲构造模型的需要, 从 PSASP 提供的各种基本功能模块中选择连接所需的模块, 并填写相应模块的参数, 从而构造出

用户自行设计的系统元件和控制装置的数学模型。其基本功能单元的结构如图 1 所示。

设计好自定义模型后需要与主程序交流信息, 此时可将输出信息与所研究的主系统连接, 其示意图如图 2 所示。

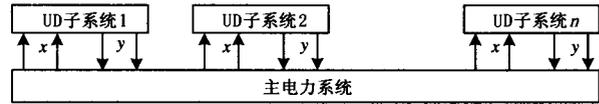


图2 自定义模型与主系统的连接示意图  
Fig.2 Interface of UDM with main system

PSASP 的暂态稳定部分提供了一百多个输入量和十几个输出量供选择, 利用这些 I/O 量即可完成用户自定义模型与主程序的通信。详细内容可查 PSASP 的用户手册。

## 4 建模与仿真计算实例

### 4.1 负荷特性辨识实例

这里用于建模的数据来源于在清华大学国家重点实验室所做的动模试验<sup>[20]</sup>。负荷由两台风机 (均为 1.0 kW)、一台感应电动机 (1.2 kW) 及两组白炽灯 (1.2 kW、2.4 kW) 构成, 其中感应电动机负载是发电机带电炉。实验接线图见图 3。电压扰动通过改变与负荷串联及并联的阻抗的值来控制, 电压扰动起始时刻、持续时间由一台故障发生器控制。

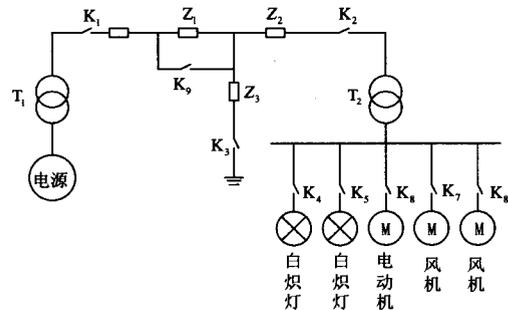


图3 动模试验接线图

Fig.3 Connection diagram of the tests

选择如下作用函数中含有二阶导数项的模型:

$$\frac{d^2P}{dt^2} + a_{P1} \frac{dP}{dt} + a_{P2}P = b_{P0} \frac{d^2V}{dt^2} + b_{P1} \frac{dV}{dt} + b_{P2}V \quad (16)$$

$$\frac{d^2Q}{dt^2} + a_{Q1} \frac{dQ}{dt} + a_{Q2}Q = b_{Q0} \frac{d^2V}{dt^2} + b_{Q1} \frac{dV}{dt} + b_{Q2}V \quad (17)$$

式中:  $P$  为负荷的有功功率,  $Q$  为负荷的无功功率,  $V$  为负荷的端电压。

选用一组实测数据分别辨识上述微分方程负荷模型的参数, 辨识结果见表 1。实测电压激励如图 4 所示。有功和无功实测与模型的响应曲线分别如图

5、图 6 所示。图 5、图 6 中实线是模型响应, 虚线是实测响应。显然, 拟合结果可以接受, 适当选择模型阶数和优化过程中的控制参数会得到更好的拟

合结果, 但负荷建模应追求泛化能力, 而不是过度拟合。

表 1 参数估计值

Tab.1 Estimated value of parameters

参数	$a_{p1}$	$a_{p2}$	$b_{p0}$	$b_{p1}$	$b_{p2}$	$a_{Q1}$	$a_{Q2}$	$b_{Q0}$	$b_{Q1}$	$a_{Q2}$
参数值	499.9	5307.6	838.3	5294.6	1	499.9	3013.76	1731.6	2065.25	1

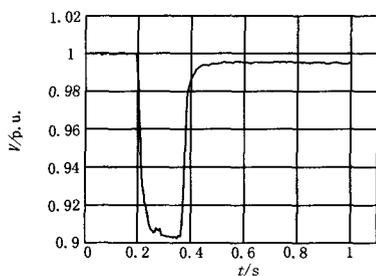


图 4 电压激励曲线

Fig.4 Voltage excitation curves

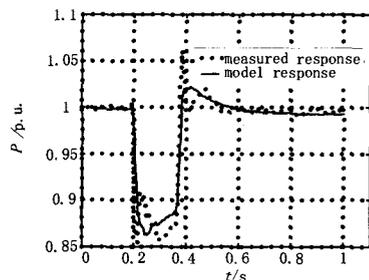


图 5 负荷有功响应曲线

Fig.5 Active power responses

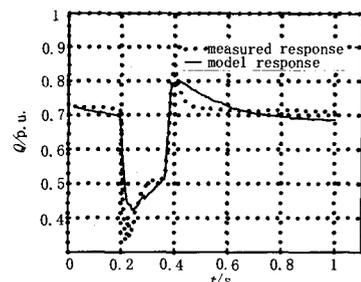


图 6 负荷无功响应曲线

Fig.6 Reactive power responses

表 3 参数估计值

Tab.3 Estimated value of parameters

参数	$a_{p1}$	$a_{p2}$	$b_{p0}$	$b_{p1}$	$b_{p2}$	$a_{Q1}$	$a_{Q2}$	$b_{Q0}$	$b_{Q1}$	$b_{Q2}$
参数值	-4	5	1.175	-2.72	1.565	-4	5	1.45	-1.76	3.195

仿真系统与计算条件: 以 PSASP 提供的 EPRI-36 母线系统作为算例<sup>[19]</sup>。故障点选 BUS19, 扰

#### 4.2 仿真计算实例

首先以 PSASP 模型库中的感应电动机作为动态负荷模型, 其参数如表 2 所示, 仿真计算得到此感应电动机在一定激励下的响应。然后, 根据激励和仿真所得响应数据辨识式 (16) (17) 所示微分方程形式负荷模型的参数, 参数辨识结果见表 3, 此微分方程负荷模型作为感应电动机负荷模型的等值。由于 PSASP 在暂态稳定计算时, 自定义模型输出变量没有负荷有功和无功, 须将有功和无功转化为注入电流的实部和虚部。

$$\begin{cases} I_r = P/U \\ I_i = -Q/U \end{cases} \quad (18)$$

由式 (16) ~ (18) 组成的模型用 PSASP 的自定义动态模型表示如图 7 所示。

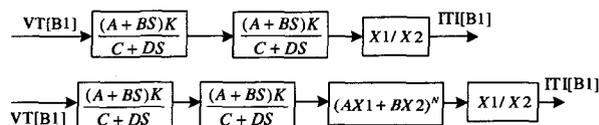


图 7 基于 PSASP 的用户自定义负荷模型框图

Fig.7 Block of user defined load model based on PSASP

利用 PSASP 支持的接口功能, 把辨识的微分方程形式的动态负荷模型联入系统, 进行仿真计算。若接口成功的话, 则基于感应电动机负荷模型的仿真计算结果应与基于微分方程动态负荷模型的仿真结果吻合。

表 2 感应电动机参数

Tab.2 Parameters of induction motor

$r_2$	$x_1$	$x_2$	$\alpha$	$\beta$	$s_0$	$T_d'$	$T_j$
0.02	0.295	0.12	0.15	4	0.011	0.576	2

动方式为三相永久性短路经 0.12 秒切除故障, 结果输出 BUS19 的电压曲线以及与 BUS4 相连的发电机

的功角摇摆曲线。

分别采用感应电动机负荷模型和经参数辨识作为其等值的微分方程负荷模型进行仿真计算, 计算的母线 19 处的电压变化曲线和母线 4 处的发电机摇摆曲线示于图 8 和图 9。可以看出, 分别基于两个负荷模型的仿真计算结果十分接近, 说明微分方程动态负荷模型与电力系统综合计算程序 (PSASP) 接口正确。

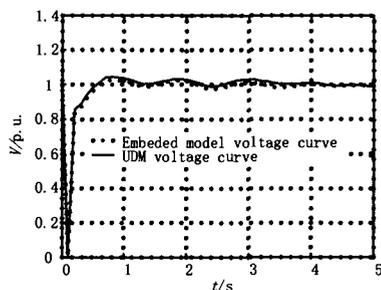


图 8 暂态稳定计算之电压曲线

Fig.8 Voltage curve in transient stability

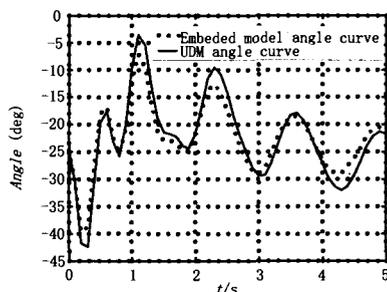


图 9 暂态稳定计算之功角曲线

Fig.9 Rotor angle curve in transient stability

## 5 结论

作为电力系统仿真计算的发电机、励磁调节系统、原动机调速系统等元件的数学模型一般采用连续系统模型的形式。而以往非机理的电力负荷模型较多地采用离散系统模型或差分方程模型, 致使负荷模型形式与其他模型之间不协调。另外负荷差分方程建模时的采样周期与电力系统数字仿真计算时采用的计算步长也不一致, 在离散模型使用时有个采样周期的处理问题, 使用不便。因此, 需要建立连续系统形式的负荷模型。作用函数中含有导数项和不含导数项两种形式的微分方程以及其对应的状态方程模型, 对于描述线性动态负荷或小扰动下的非线性动态负荷的行为, 具有一定程度的普适性。并且其具有向不同模型形式灵活转换的能力。步长加速法寻优过程中不用计算目标函数关于寻优变量的导数, 仅仅计算目标函数值, 是一种有效的模型

参数辨识算法。利用电力系统综合计算程序提供的用户自定义功能可以容易地实现本文所述线性连续系统模型与综合计算程序的连接。通过利用动模实验数据进行负荷建模和仿真计算, 验证了该模型参数的辨识算法以及模型与电力系统综合计算程序接口的有效性。

## 参考文献

- [1] 张鹏飞, 罗承廉, 孟远景, 等. 动态负荷模型比例对电网稳定性影响分析[J]. 继电器, 2006, 34(11): 24-26, 48.  
ZHANG Peng-fei, LUO Cheng-lian, MENG Yuan-jing, et al. Impact of Dynamic Electric Load Model Proportion on Power System Stability Impact of Dynamic Electric Load Model Proportion on Power System Stability [J]. RELAY, 2006, 34(11): 24-26,48.
- [2] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Load Representation for Dynamic Performance Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993,8(2):472-482.
- [3] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995,10(1):523-538.
- [4] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995,10(3):1302-1313.
- [5] 方崇智, 肖德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1983.  
FANG Chong-zhi, XIAO De-yun. Process Identification[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1983.
- [6] 金群, 李欣然, 刘艳阳, 等. 一种综合改进型遗传算法及其在综合负荷建模中的应用[J]. 继电器, 2006, 34(10): 18-22.  
JIN Qun, LI Xin-ran, LIU Yan-yang, et al. Synthetically Improved Genetic Algorithm in Power Load Modeling[J]. RELAY, 2006, 34(10): 18-22.
- [7] Iliceto F, Capasso A. Dynamic Equivalents of Asynchronous Motor Loads in System Stability Studies[J]. IEEE Trans on PAS, 1974,93:1650-1659.
- [8] Abdel Hakim M M., Berg G J. Dynamic Single-Unit Representation of Induction Motor Groups[J]. IEEE Trans on PAS, 1976,95(1):155-165.
- [9] Karlsson D, Hill D J. Modeling and Identification of Nonlinear Dynamic Loads in Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994,9(1):159-166.
- [10] 贺仁睦, 魏孝铭, 韩民晓. 电力负荷特性实测建模的外推和内插[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 151-154, 170.

- HE Ren-mu, WEI Xiao-ming, HAN Min-xiao. Power System Dynamic Load Modeling Based on the Measurements in the Field[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3): 151-154, 170.
- [11] 韩民晓. 神经网络及其在负荷建模中的应用(博士学位论文)[D]. 北京: 华北电力大学, 1995.
- HAN Min-xiao. Artificial Neural Network and Its Application in Electric Load Modeling, Doctoral Dissertation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 1995.
- [12] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- JU Ping, MA Da-qiang. Power System Load Modeling[M]. Beijing: China Water Power Press, 1995.
- [13] 西安交通大学, 清华大学, 等. 电力系统计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978.
- Xi'an Jiaotong University, Tsinghua University, et al. Power System Computing[M]. Beijing: China Water Power Press, 1978.
- [14] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993. P135.
- SHEN Shan-de. Power System Identification[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [15] 金先级. 机电系统的计算机仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- JIN Xian-ji. Machinery and Electric System Computer Simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991. 11-14.
- [16] 王振永, 王然冉. 电机的数学模型和参数辨识[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- WANG Zhen-yong, WANG Ran-ran. Motor Mathematic Model and Parameter Identification[M]. Beijing: China Machine Press, 1991.
- [17] 魏权龄, 王日爽, 徐兵. 数学规划引论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991.
- WEI Quan-ling, WANG Ri-shuang, XU Bing. Mathematic Programming Introduction[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1991.
- [18] 章健, 贺仁睦, 韩民晓. 直接优化方法及其在负荷模型参数辨识中的应用[J]. 现代电力, 1996, 12(4): 8-14.
- ZHANG Jian, HE Ren-mu, HAN Min-xiao. A Direct Optimization Method and Application to Identification of Load Model Parameters[J]. Modern Electric Power, 1996, 12(4): 8-14.
- [19] 电力科学研究院. 电力系统分析综合程序—用户手册[R]. 北京: 电力科学研究院, 1996.
- Electric Power Research Institute. Power System Analysis Software Package[R]. Beijing: Electric Power Research Institute, 1996.
- [20] 章健. 电力系统负荷建模方法的研究(博士学位论文)[D]. 北京: 华北电力大学, 1997.
- ZHANG Jian. The Study of Electric Load Modeling, Doctoral Dissertation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 1997.

收稿日期: 2006-12-31; 修回日期: 2007-02-09

作者简介:

章健(1963-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力负荷特性辨识、电力系统分析与运行; E-mail: zdzhangj@tom.com

沈峰(1973-), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统辨识方面的研究。E-mail: shenfeng320@126.com

(上接第 8 页 continued from page 8)

- [2] 李友军, 王俊生, 郑玉平, 等. 几种行波测距算法的比较[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14).
- LI You-jun, WANG Jun-sheng, ZHENG Yu-ping, et al. Comparison of Several Algorithms of Travelling Wave Based Fault Location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14).
- [3] Bewley L V. Travelling Waves on Transmission Systems(Second Edition)[M]. John Wiley, 1951.
- [4] 覃剑, 陈祥训, 郑健超. 行波在输电线上传播的色散研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 27-30.

QIN Jian, CHEN Xiang-xun, ZHENG Jian-chao. Study on Dispersion of Travelling Wave in Transmission Line[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 27-30.

收稿日期: 2007-01-04; 修回日期: 2007-05-24

作者简介:

李友军(1975-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统继电保护、故障测距及故障信息传输工作; E-mail: nari\_liyj@163.com

徐丽娜(1977-), 女, 硕士, 工程师, 从事水利电力规划、设计、运行的研究工作。