

Matlab 在水轮机模型辨识中的应用

刘宪林¹,杜晓勇¹,田云峰²,赵海廷²

(1. 郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450002;

2. 华北电力科学研究院有限责任公司,北京 100045)

摘要: 介绍 Matlab 系统辨识工具箱的功能,对 Matlab 在水轮机模型辨识中的应用进行研究。结合抽水蓄能电站现场试验,基于并网发电运行、负荷随机波动激励下的 200 MW 机组实测数据,运用 Matlab 系统辨识工具箱实现了数据预处理和模型辨识计算,得出了复杂输水系统下水轮机输出力矩与导叶开度间的传递函数模型,并采用先验知识检验、阶跃响应检验和残差白噪声检验 3 种方法对其进行检验。结果表明,辨识模型具有非最小相位系统特征,连续阶跃响应的现场实测结果与采用辨识模型的仿真结果在响应的各个阶段均相当一致,模型残差为具有 99 % 置信度的白噪声,所得模型可靠。

关键词: Matlab; 模型辨识; 水轮机; 模型检验

中图分类号: TM 312

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)12-0085-03

0 引言

同步发电机及其励磁系统、原动机及其调速系统以及负荷的模型是电力系统稳定计算的重要基础。作为水电站的原动机,水轮机的模型对于调速器参数整定、水电系统稳定性分析和动态仿真具有重要作用^[1-4]。水轮机模型不仅与自身特性有关,还与输水系统的结构和参数密切相关。鉴于水击过程的复杂性和水轮机的非线性特性^[5-6],通过现场实测数据提取水轮机数学模型的辨识建模方法越来越受到重视^[7-12]。辨识算法复杂,运算量大,借助于一般程序设计语言实现比较困难。Matlab 系统辨识工具箱提供了多种辨识算法,调用相关函数即可进行辨识计算,而且还提供数据预处理、模型结构辨识和模型检验等功能^[13]。笔者在北京十三陵抽水蓄能电站水轮机模型辨识^[14]中应用 Matlab 系统辨识工具箱取得了良好的效果,下面对此进行介绍。

1 水轮机模型辨识及检验

对于水轮机模型辨识,可由先验知识初步确定水轮机系统的动态模型结构和阶次。在小波动条件下一般可认为在工况点附近水轮机是一个线性系统,阶次为 1~2 阶^[12]。由于水电厂的背景噪声为有色噪声,则可用 ARMAX 模型^[13-15]描述水轮机组:

$$A(z^{-1})m(k) = B(z^{-1})y(k) + C(z^{-1})v(k)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \cdots + a_{n_a}z^{-n_a}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \cdots + b_{n_b}z^{-n_b}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + \cdots + c_{n_c}z^{-n_c}$$

式中 $y(k)$ 为系统输入信号,即导叶开度(标么值);
 $m(k)$ 为系统输出,即水轮机输出转矩(标么

值); $v(k)$ 则为均值为零的不相关随机噪声; n_a 、 n_b 分别为系统输出、输入信号阶次; n_c 为噪声信号阶次。

确定模型结构和阶次后即可选用适当的算法进行辨识计算。增广最小二乘法对有色噪声有较强抑制作用,应用较为广泛。对所得辨识模型,可综合采用先验知识检验、激励阶跃响应检验、残差白噪声检验等方法对其进行检验^[14-15]。

2 Matlab 系统辨识工具箱主要功能

2.1 数据预处理

通常的测试数据中都含有直流或低频成分,辨识算法无法消除它们对辨识精度的影响。为了提高辨识的精度,辨识计算前需对测试数据进行预处理。Matlab 中常用的预处理函数如下:

dtrend 消除测试数据中的趋势项;
idfilt 测试数据滤波,剔除高频成分;
idresamp 测试数据重新采样。

2.2 模型辨识

对于非参数类模型常用的辨识函数如下:

cra 采用相关分析法估计对象脉冲响应;
spa 利用谱分析法估计对象频率响应。

除非参数模型外,系统辨识工具箱还支持 AR/ARX、ARMAX、BJ、SS 和 OE 等参数类模型辨识,常用函数如下:

ar 辨识时间序列的 AR 模型参数;
arx 基于最小二乘法辨识 ARX 模型参数;
armax 辨识 ARMAX 或 ARMA 模型参数。

另外,函数 rarx、rarmax 可分别实现 ARX 模型、ARMAX 模型的递推辨识。

2.3 模型检验

系统辨识工具箱结合 Matlab 的其他功能可实现

各种模型检验方法,常用函数如下:

predict 根据历史数据计算模型的预测输出;
compare 比较模型仿真输出与实际输出;
resid 计算模型残差并进行相关分析。

2.4 模型转换

Matlab 提供各种模型间的相互转换功能,常用函数如下:

d2c 将离散模型转换为连续模型;
c2d 将连续模型转换为离散模型;
tf 将 ARMAX 等模型转换为传递函数形式;
zpk 将模型从一般形式转换为零极点形式。

除上述常用的模型辨识功能外,Matlab 控制工具箱还提供了众多模型特性查看函数;Matlab 7 中还提供了强大的 advice 功能,它对输入、输出数据和模型辨识结果提供评估和建议,并能计算输入数据的持续激励阶数。

3 应用实例

十三陵抽水蓄能电站安装 4 台 200 MW 混流可逆水轮发电机组,设计水轮机工作水头 430 m。输水系统结构复杂,4 台机组按 1 号、2 号和 3 号、4 号机组分为 2 组,每组 2 台机组共用一个上游引水管道和下游尾水管道,上下游均设有调压井。2005 年 5 月,结合十三陵抽水蓄能电站 3 号、4 号机组大修试验,按照国家电网调度中心的安排,有关单位联合对机组进行了试验。

机组试验和数据采集过程为:3 号机组升速并网;逐次改变调速系统给定功率使机组经负荷阶跃过程进入稳态。测试仪记录整个负荷阶跃过程接力器行程和发电机有功电磁功率数据,采样间隔为 0.05 s。由于随机负荷的影响,机组进入稳态后电磁功率以及机组其他变量有小幅随机波动,本文即利用随机波动数据进行水轮机模型辨识。

由于水轮机导叶开度难以量测,将其用接力器行程 y 替代;同样原因,水轮机输出转矩用发电机电磁转矩近似替代,即有近似关系为: $m \approx m_e \approx P_e / \omega$,其中 P_e 为发电机机端电磁功率, ω 为转子机械角速度,并网条件下其标么值近似为 1。

3.1 模型辨识

由于现场存在有色噪声,选用 ARMAX 模型进行辨识。模型阶次和噪声阶次均选为 $n=2$ 。系统辨识要求输入信号满足 $2n$ 阶持续激励要求^[12,14-15],对本试验输入信号应至少满足 4 阶持续激励要求。使用 advice 函数对实测的接力器行程信号进行评估,结果表明输入信号满足 50 阶持续激励要求,可以进行辨识计算。使用 Matlab 辨识的语句如下:

```
D=iddata(m,y,0.05);
% 建立 Matlab 中标准的输入、输出数据对象
% m 为水轮机输出转矩测量值
% y 为水轮机导叶开度测量值
```

```
% 0.05 表示采样间隔  $T=0.05$  s
```

```
Data=dtrend(D,0);
```

```
% 去除数据中的直流低频分量
```

```
Model=arimax(Data,[2,3,2,0]);
```

```
% 辨识 ARMAX 模型参数
```

```
Dtranfun=tf(Model);
```

```
% 将 ARMAX 模型转换为传递函数形式
```

在并网发电 200 MW 负荷水平下,十三陵抽水蓄能电站 3 号机组脉冲传递函数的辨识结果为

$$\frac{m(z)}{y(z)} = \frac{-0.1976z^2 + 0.09814z + 0.1569}{z^2 + 0.00278z - 0.9602}$$

使用双线性变换语句

```
Ctranfun=d2c(Dtranfun,'tustin');
```

将上式转换为连续传递函数:

$$\frac{m(s)}{y(s)} = \frac{-3.746s^2 - 765.3s + 2479}{s^2 + 4231s + 1840}$$

使用以下 3 种方法检验辨识模型的正确性。

3.2 模型检验

3.2.1 利用先验知识进行检验

由语句

```
pzmap(Dtranfun);
```

% 查看离散模型的零极点可得所得脉冲传递函数的零极点图如图 1 所示。由图可见,该脉冲传递函数有一个单位圆外的零点,表明 3 号机组为非最小相位系统。这正是水击作用的体现,与传统理论认识相符^[12]。连续传递函数也表明了这一点。

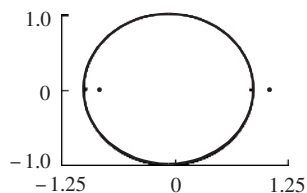


图 1 200 MW 负荷水平下脉冲传递函数零极点图

Fig.1 Poles and zeros of discrete transfer function under 200 MW load

3.2.2 阶跃扰动检验法

利用机组给定功率连续阶跃扰动(160 MW-180 MW-200 MW)下的测试数据,以接力器行程实测信号为输入,用上述辨识模型求取水轮机转矩仿真曲线,将其与实测曲线进行比较,如图 2 所示。Matlab 中实现语句为

```
TestData=iddata(m,y,0.05)
```

```
compare(Model,TestData)
```

由图 2 可见,除实测曲线高频抖动部分在仿真曲线中反映不出来外,仿真结果与实测结果在动态过

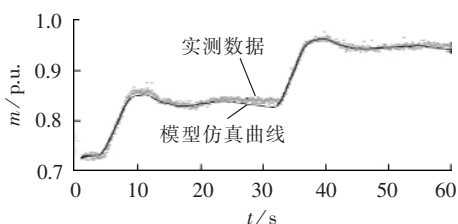


图 2 机组给定功率连续阶跃扰动仿真曲线与实测曲线(160 MW-180 MW-200 MW)

Fig.2 Simulative and measured response curves of power step changes(160 MW-180 MW-200 MW)

程的各个阶段均相当一致,这表明辨识模型质量较高。此外,对图 2 而言,虽然对 2 个不同负荷水平下的仿真计算都采用 200 MW 同一负荷水平下的辨识模型,仿真曲线与实测曲线仍相当一致,这表明额定负荷下的辨识模型对其他负荷工况具有较强的适应性。

3.2.3 检验模型的残差白色性^[12,15]

理想的白噪声序列其自相关函数为

$$R(\tau) \neq 0 \quad \tau = 0$$

$$R(\tau) = 0 \quad \tau \neq 0$$

为了判定模型残差的白色性,可计算出模型残差序列 $\{\varepsilon(k)\}$ 的自相关函数 $R_\varepsilon(\tau)$,当 $\tau \neq 0$ 时,若 $R_\varepsilon(\tau)$ 在一个接近于 0 的区间(置信度为 α)内波动,则可认为 $\{\varepsilon(k)\}$ 为白噪声。 α 常取 95% 或 99%。相应的 Matlab 语句为

`resid(Model,Data)`

返回的 $R_\varepsilon(\tau)$ 曲线($\tau \neq 0$)如图 3 所示。图中两虚线之间为 $\alpha=99\%$ 的置信区间,可见 $R_\varepsilon(\tau)$ 在置信区间内,因此模型残差可视为置信度为 99% 的白噪声,这表明辨识所得模型是可靠的。

由以上 3 种检验结果可知,所得辨识模型可信。

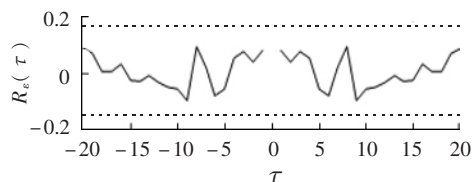


图 3 200 MW 负荷水平辨识模型的残差相关系数

Fig.3 Residual correlation coefficients of identified model under 200 MW load

4 结论

a. Matlab 系统辨识工具箱功能丰富,使用简便,可以满足模型离线辨识的要求。

b. 结合北京十三陵抽水蓄能电站现场试验,基于并网发电运行、负荷随机波动激励下的实测数据,运用 Matlab 系统辨识工具箱,成功地实现了复杂输水系统下大型水轮机模型的辨识。

参考文献:

- [1] 李艳军,刘宪林. 考虑水力系统详细模型的电力系统暂态过程仿真[J]. 电网技术,2005,29(8):61-64.
LI Yan-jun,LIU Xian-lin. Power system transient simulation considering detailed models of hydraulic system[J]. Power System Technology,2005,29(8):61-64.
- [2] 陈舟,陈寿孙,张中华,等. 水力系统模型对电力系统暂态稳定分析的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版,1996,6(7):13-18.
CHEN Zhou,CHEN Shou-sun,ZHANG Zhong-hua,et al. Effect of hydraulic system model on transient analysis of power system[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,1996,6(7):13-18.
- [3] 高慧敏,刘宪林,徐政. 水轮机详细模型对电力系统暂态稳定分析结果的影响[J]. 电网技术,2005,29(2):5-8.
GAO Hui-min,LIU Xian-lin,XU Zheng. Effect of detailed

hydro turbine models on analysis results of power system transient stability[J]. Power System Technology,2005,29(2):5-8.

- [4] CHMN M. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1992,7(1):167-179.
- [5] 凌代俭,沈祖诒. 水轮机调节系统的非线性模型、PID 控制及其 Hopf 分叉[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):97-102.
LING Dai-jian,SHEN Zu-yi. The nonlinear model of hydraulic turbine governing systems and its PID control and Hopf bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(10):97-102.
- [6] 曾玉,邓长虹,胡翔勇,等. 一种用于电力系统仿真的水轮机非线性模型[J]. 武汉水利电力大学(宜昌)学报,2000,22(1):55-58.
ZENG Yu,DENG Chang-hong,HU Xiang-yong,et al. A kind of non-linear model of hydraulic turbine using in power system simulation[J]. J of Unive of Hydr & Elec Eng/Yichang,2000,22(1):55-58.
- [7] TRUDNOWSKI D J,AQEE J C. Identifying a hydraulic-turbine model from measured field data[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1995,10(4):768-773.
- [8] BERUBE G R,HAJAGOS L M. Modeling based on field tests of the turbine/governor systems[C]//Proceedings of the 1999 Winter Meeting of the IEEE Power Engineering Society. New York,USA:IEEE,1999:567-573.
- [9] 张霄元,郑玉森,刘长胜,等. 水轮机参数在线辨识及调节器参数自整定[J]. 电力系统及其自动化学报,2000,12(2):16-18.
ZHANG Xiao-yuan,ZHENG Yu-sen,LIU Chang-sheng,et al. On-line identification and adaptive PID governor of hydraulic turbine[J]. Proceedings of the EPSA,2000,12(2):16-18.
- [10] CHEN Qi-juan,XIAO Zhi-huai. Dynamic modeling of hydro-turbine generating set[C]//2000 IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics. Nashville,USA:IEEE,2000:3427-3430.
- [11] 张承慧,刘玉庆. 水轮机建模与参数识别[J]. 电力系统自动化,1997,21(5):53-56.
ZHANG Cheng-hui,LIU Yu-qing. Modeling and parameter discrimination for hydroturbine system[J]. Automation of Electric Power Systems,1997,21(5):53-56.
- [12] 徐枋同,李永华. 系统辨识理论与实践——在水电控制工程中的应用[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [13] 魏巍. Matlab 控制工程工具箱技术手册[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [14] 刘宪林,杜晓勇,田云峰,等. 基于随机负荷波动的抽蓄电站水轮机模型辨识[J]. 中国电机工程学报,2007,27(6):49-52.
LIU Xian-lin,DU Xiao-yong,TIAN Yun-feng,et al. Identifying the hydroturbine models in pumped storage power station based on random load fluctuation[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(6):49-52.
- [15] 候媛彬,汪梅,王立琦. 系统辨识及其 Matlab 仿真[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [16] 方崇智,萧德云. 过程辨识[M]. 北京:清华大学出版社,1988.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

刘宪林(1955-),男,河南洛阳人,教授,博士,主要从事电力系统分析与控制方面的教学和研究工作(E-mail: liuxl@zzu.edu.cn);

杜晓勇(1983-),男,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为电力系统模型辨识。

(下转第 92 页 continued on page 92)

Application of Matlab in hydroturbine model identification

LIU Xian-lin¹, DU Xiao-yong¹, TIAN Yun-feng², ZHAO Hai-ting²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: The function of Matlab system identification toolbox is introduced and its application in hydroturbine model identification is studied. Combined with site experiments in a pumped storage power station and based on the measured data of a 200 MW hydroturbine, connected to power grid and excited by random load fluctuation, the data pre-processing and model identification are carried out using Matlab system identification toolbox. The transfer function model between the output torque of hydroturbine and the openness of guide vanes under complicated work conditions is identified, which is validated by three methods: prior knowledge validation, step disturbance validation and self relation function validation. Results show that, the identified model has the minimum phase system behavior and reliable, its simulative data of continuous step response are consistent with the measured data in various stages and its residuals are white noise with 99 % reliability.

Key words: Matlab; model identification; hydroturbine; model validation