doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.006

# 车载电源多电动机测试平台耦合分析与解耦控制研究

## 李 勇<sup>1</sup> 马 飞<sup>1</sup> Kazerani Mehrdad<sup>2</sup>

(1.北京科技大学机械工程学院,北京100083;2.滑铁卢大学电气与计算机系,滑铁卢 N2L 3G1)

**摘要:**为研究纯电动汽车车载电源性能在环测试,提出了由异步电动机-直流电动机组成的测试平台,是集机、电、 磁于一体的复杂机电耦合系统。首先对该测试平台进行了机电耦合分析,建立了其机电耦合模型。根据 α 阶积分 逆系统原理构建了伪线性系统,实现了对该复杂机电耦合系统的线性化。在此基础上,将自适应模糊神经网络与 逆系统结合,构造出自适应模糊神经网络逆系统对原系统进行解耦控制。仿真和实验结果表明:自适应模糊神经 网络逆系统控制取得了较好的解耦效果;异步电动机的反馈转速和直流电动机的反馈转矩均较好地跟踪了参考转 速和参考转矩。此外,通过该测试平台可得到在整个循环工况中与异步电动机相连的电池电压、电流以及功率的 变化曲线,为复合电源的在环测试提供了理论依据。

#### 引言

电源是电动汽车能量存储装置的载体。车载电 源性能的好坏直接影响着电动汽车的安全和可靠。 车载电源性能测试平台的研究是电动汽车综合性能 测试的重要内容。

为进行纯电动汽车车载电源性能在环测试,提出了由异步电动机-直流电动机组成的测试平台,如

图 1 所示。该测试平台按照模块化组成的思路搭 建,由电源模块、驱动电动机模块及负载和惯量模块 组成。在该测试平台中,驱动电动机和负载电动机 分别用来模拟牵引电动机和行车阻力及整车惯 量<sup>[1-2]</sup>。由驱动电动机和负载电动机组成的机电耦 合系统直接影响着车载电源性能的测试,因此对该 复杂机电耦合系统进行研究具有重要的研究意 义<sup>[3-4]</sup>。



图 1 异步电动机-直流电动机测试平台结构图 Fig. 1 Scheme of test bench with ac motor & dc motor

#### 异步电动机-直流电动机测试平台耦合分析

测试平台中,交流电动机和直流电动机之间采 用刚性联轴器连接,由机电传动系统的力学原理可 得到机电耦合系统模型<sup>[5-6]</sup>,如图2所示。



Fig. 2 Model of electromechanical coupling

机电耦合系统力学运动方程式

$$J_{t} \frac{\mathrm{d}^{2} \theta_{t}}{\mathrm{d}t^{2}} = T_{t} - Rt \frac{\mathrm{d}\theta_{t}}{\mathrm{d}t} - T_{s}$$
(1)

$$J_{l} \frac{\mathrm{d}^{2} \theta_{l}}{\mathrm{d}t^{2}} = T_{s} - R_{l} \frac{\mathrm{d} \theta_{l}}{\mathrm{d}t} - T_{l}$$
(2)

$$T_{s} = R_{s} \left( \frac{\mathrm{d}\theta_{t}}{\mathrm{d}t} - \frac{\mathrm{d}\theta_{l}}{\mathrm{d}t} \right) + S_{s} (\theta_{t} - \theta_{l})$$
(3)

式中  $J_i$ 、 $J_i$ ——交流电动机和直流电动机转动惯量  $R_i$ 、 $R_i$ ——交流电动机和直流电动机阻尼系数

收稿日期:2014-02-25 修回日期:2014-03-14

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA060403)和北京市科技计划资助项目(Z121100003012016) 作者简介: 李勇,博士生,主要从事电动汽车电源性能测试平台研究, E-mail: liyongthinkpad@ gmail.com

通讯作者:马飞,教授,博士生导师,主要从事车辆振动噪声分析与控制研究,E-mail: yeke@ ustb.edu.cn

 $\theta_{i}$ ,  $\theta_{i}$  — 交流电动机和直流电动机旋转角度

T<sub>s</sub>——连接轴转矩

R<sub>s</sub>——连接轴阻尼系数

S。——连接轴刚度系数

## 2 α 阶积分逆系统

逆系统控制方法是一种新的非线性控制策略, 是一种直接反馈线性化方法。对于多输入多输出系 统来说,α阶逆系统一般通过状态反馈来实现<sup>[7]</sup>。 将得到的α阶逆系统串联在原系统之前就组成了 伪线性系统,如图3所示。



Fig. 3 Pseudo linear system

该伪线性系统的映射关系用算子  $\theta_{\alpha}$  表示,如 果该伪线性系统的输入为  $v(t) = y_{a}^{(\alpha)}(t) =$  $(y_{d1}^{(\alpha1)}(t), y_{d2}^{(\alpha2)}(t), y_{d3}^{(\alpha3)}(t), \dots, y_{dq}^{(\alphaq)}(t)),$ 根据  $\alpha$ 阶逆系统的定义,该系统的输出为  $y_{d}(t) = (y_{d1}(t), y_{d2}(t), y_{d3}(t), \dots, y_{dq}(t))$ 。从该伪线性系统的输入 一输出关系可以看出,伪线性系统实现了输入一输出 之间的解耦控制。

# 3 异步电动机─直流电动机测试平台逆系统 解耦

## 3.1 异步电动机可逆性分析

交流异步电动机是一个高阶、多变量、非线性、 强耦合的多变量系统。本文对异步电动机采用按转 子磁场定向的矢量控制方式<sup>[8-9]</sup>。

采用逆系统的方法实现转子转速和转子磁链的 动态解耦控制,首先要判断数学模型的可逆性。在 两相静止坐标系中,异步电动机动态模型的输出方 程为

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(x) = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2^2 + x_3^2 \end{bmatrix}$$
(4)

状态变量为

输入变量为 
$$\boldsymbol{u} = (u_1, u_2) = (u_{s\alpha}, u_{s\beta})$$
 (5)

输出变量为  $\mathbf{y} = (y_1, y_2) = (\omega, \psi_{r_\alpha}^2 + \psi_{r_\beta}^2)$  (6)

异步电动机动态模型的输入向量维数是 p = 2, 输出向量的维数 q = 2,并且 p = q,是一个方系统。 根据逆系统存在的充分条件可知异步电动机存在  $\alpha$  阶逆系统。

对于异步电动机来说,其 α 阶逆系统的输入为 **v** = ( $v_1$ , $v_2$ ),输出为 **u** = ( $u_1$ , $u_2$ )。伪线性系统的输 入向量为 α 阶逆系统的输入向量 **v** = ( $v_1$ , $v_2$ ),伪线 性系统的输出向量为异步电动机的输出向量阶 **y** = ( $y_1$ , $y_2$ )。伪线性系统的输入输出关系为

$$v_1 = \frac{\mathrm{d}^2 \omega}{\mathrm{d}t^2} = \frac{\mathrm{d}^2 y_1(t)}{\mathrm{d}t^2} \tag{7}$$

$$v_{2} = \frac{d^{2} \left( \psi_{r_{\alpha}}^{2} + \psi_{r_{\beta}}^{2} \right)}{dt^{2}} = \frac{d^{2} y_{2} \left( t \right)}{dt^{2}}$$
(8)

从式(7)和式(8)可以看出,电动机的转速输出  $\omega$ 只受  $v_1$ 控制,转子磁链模值的平方  $\psi_r^2$ 只受  $v_2$ 控制。

## 3.2 直流电动机转矩控制及可逆性分析

本文以直流电动机作为负载电动机,对其实施 转矩控制,控制框图如图4所示。





直流电动机转矩控制器采用 PID 控制策略,分 别取  $K_p = 1, K_i = 0.0001, K_d = 0$ 。仿真过程中,将目 标转矩作为直流电动机的参考转矩。直流电动机输 出轴上的转矩计算式为

$$T_{l} = T_{dc} - J \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{9}$$

$$T_{dc} = k_a \phi I_a \tag{10}$$

式中 J——直流电动机转动惯量, $J = 0.2 \text{ kg·m}^2$ 

k<sub>a</sub>——无量纲常数

φ----每极磁通量

 $k_a \phi$ 表示直流电动机常数, $k_a \phi = 0.3_{\circ}$ 

由式(10)可知,直流电动机的输出转矩与电枢 电流成正比关系,故直流电动机的转矩控制其实就 是对电枢电流的控制,这样就实现了对作为负载的 直流电动机进行精确的转矩控制,直流电动机的控 制也是可逆的。

## 4 异步电动机─直流电动机逆系统解耦控制

## 4.1 多电动机测试平台可逆性分析

转速、磁链和转矩控制系统可近似为三输入三 输出多变量最小相位的线性系统。令 $U(k) = [n_i(k) \psi_i(k) T_i(k)]^T, Y(k) = [n_o(k) \psi_o(k) T_o(k)]^T,将被控对象模型离散化,得到其数学模型<sup>[10]</sup>$ 

$$G(z^{-1}) = A^{-1}(z^{-1})B(z^{-1})$$
(12)  
式中  $A(z^{-1})$ ,  $B(z^{-1})$ ——由系统参数确定的矩阵

解耦控制器的设计如图 5 所示,其能够实现输 出反馈矩阵  $F(z^{-1})$ 和前置解耦补偿矩阵  $P(z^{-1})$ , 使闭环传递函数  $T(z^{-1})$ 为对角矩阵。根据各通道 的动、静态性能要求设计单回路控制器  $C(z^{-1})$ 。



图 5 解耦控制系统结构图

Fig. 5 Diagram of decoupling control system

由图 5 可知,在暂不考虑 *C*(*z*<sup>-1</sup>)作用下的解耦 控制律 *U*(*k*)为

$$\boldsymbol{U}(k) = \boldsymbol{P}(z^{-1})\boldsymbol{R}(k) - \boldsymbol{F}(z^{-1})\boldsymbol{Y}(k) \quad (13)$$

式中

$$\begin{cases} \boldsymbol{F}(z^{-1}) = \boldsymbol{F}_{0} + \boldsymbol{F}_{1}z^{-1} + \boldsymbol{F}_{2}z^{-2} + \cdots + \boldsymbol{F}_{nf}z^{-nf} \\ \boldsymbol{P}(z^{-1}) = \boldsymbol{P}_{0} + \boldsymbol{P}_{1}z^{-1} + \boldsymbol{P}_{2}z^{-2} + \cdots + \boldsymbol{P}_{np}z^{-np} \end{cases}$$
(14)

将式(13)代入式(11),得到解耦控制系统的闭 环传递函数为

$$T(z^{-1}) = [A(z^{-1}) + B(z^{-1})F(z^{-1})]^{-1}B(z^{-1})P(z^{-1})$$
(15)

在  $C(z^{-1})$ 的各通道中引入一个稳定的滤波器  $1/f(z^{-1})$ ,使得

$$\boldsymbol{U}(k) = [\boldsymbol{P}(z^{-1})\boldsymbol{R}(k) - \boldsymbol{F}(z^{-1})\boldsymbol{Y}(k)]/f(z^{-1})$$
(16)

其中,
$$f(z^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^2 + \cdots$$
, 且 $f_0 \neq 0_\circ$   
若  $B(z^{-1})$  为非奇异矩阵 则有

$$\begin{cases} \mathbf{F}(z^{-1}) = \mathbf{B}^{-1}(z^{-1}) \left[ \mathbf{A}_{e}(z^{-1}) - \mathbf{A}(z^{-1}) \right] f(z^{-1}) \\ \mathbf{P}(z^{-1}) = \mathbf{B}^{-1}(z^{-1}) \mathbf{A}_{e}(z^{-1}) f(z^{-1}) \end{cases}$$
(17)

式(17)中**B**<sup>-1</sup>(z<sup>-1</sup>)可以表示成  

$$B^{-1}(z^{-1}) = \operatorname{adj}(B(z^{-1}))/[z^{-d}(b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \cdots)] \quad (b_0 \neq 0) \quad (18)$$
若 f(z<sup>-1</sup>) = b<sub>0</sub> + b<sub>1</sub>z<sup>-1</sup> + b<sub>2</sub>z<sup>-2</sup> + ..., 由式(17)  
和式(18)可得 **P**(z<sup>-1</sup>)和 **F**(z<sup>-1</sup>)的有限阶解  

$$\begin{cases} F(z^{-1}) = z^d (\operatorname{adj}B(z^{-1}))[A_e(z^{-1}) - A(z^{-1})] \\ P(z^{-1}) = z^d (\operatorname{adj}B(z^{-1}))B_e(z^{-1}) \end{cases}$$
(19)

上述设计的  $P(z^{-1})$ 、 $F(z^{-1})$ 和  $f(z^{-1})$ 可将图 5

所示的三输入三输出系统解耦成3个独立的子系统。对于本文交流电动机-直流电动机测试平台来说,其伪线性系统如图6所示。



图 6 异步电动机-直流电动机逆系统解耦结构图

Fig. 6 Decoupling diagram of inverse system of test bench

#### 4.2 多电动机测试平台逆系统解耦仿真

将简单循环工况、*i*<sub>a</sub>=0及目标转矩分别作为上述伪线性系统的输入转速、输入磁链以及输入转矩。异步电动机调速系统仿真结果如图7所示。为便于观察,将图7虚线内的 a 和 b 部分进行放大(图8)。



图 7 测试平台逆系统解耦仿真结果





从图 7 和图 8 可看出,异步电动机调速系统取 得了较好的控制效果,但是在速度变化快的时刻与 参考转速仍存在细微的偏差。

直流电动机转矩控制系统输出结果如图9所示。由图9可看出,直流电动机输出轴上的转矩可 以很好地跟踪其参考转矩,误差很小。



Fig. 9 Simulation results of torque control of DC motor

# 5 多电动机测试平台自适应模糊神经网络 逆系统解耦控制

#### 5.1 自适应模糊神经网络逆系统的实现

自适应模糊推理系统可以根据系统的运行状态 获取过程状态的连续信息,通过在线辨识和修正过 程的模糊模型,从中获得所需要的模糊控制规则,实 现在线模糊控制规则的自学习。通过自动调整模糊 控制器的参数,以便适应环境条件或过程参数的变 化,使系统大大提高适应能力,获得较强的鲁棒性, 维持控制系统所要求的性能准则<sup>[11-14]</sup>。自适应模 糊控制器机构如图 10 所示。



神经网络具有多输入多输出的特点,能以任意 精度逼近任意复杂的静态非线性函数,有强鲁棒性 和容错性。神经网络辨识器结构如图11 所示。



图 11 模糊神经网络辨识器结构图

Fig. 11 Recognizer diagram of fuzzy-neural network

为发挥自适应模糊控制方法与神经网络控制方 法的各自优势,将二者有机结合构造出非解析实现 形式的逆系统,称为自适应模糊神经网络逆系统。 构建出的自适应模糊神经网络逆系统解耦控制系统 结构如图 12 所示[15-16]。



adaptive fuzzy-neural network

为减小控制系统输出误差,取简单循环工况速 度变化较快区域的4组数据,如表1所示。将其作 为自适应模糊神经网络的训练样本,对神经网络进 行训练。

表 1

神经网络训练样本

Tab. 1	Training	sample of 1	neural netwo	ork r∕min
序号	第1组	第2组	第3组	第4组
1	167.77	335.55	644.26	644.26
2	201.33	369.10	590. 57	603.99
3	234.88	402.66	536.88	563.73
4	268.44	436. 22	536.88	523.46
5	268.44	469.77	536.88	483.19
6	268.44	503.33	536.88	442.93
7	268.44	536.88	536.88	402.66
8	268.44	570.44	536.88	362.39
9	268.44	603.99	483.19	322.13
10	308.70	637.55	429.50	281.86
11	348.97	671.10	375.82	241.59
12	389.24	704.66	322.13	201.33

#### 5.2 自适应模糊神经网络逆系统控制仿真

同样将简单循环工况、*i<sub>d</sub>*=0及目标转矩分别作 为采用伪线性系统的输入转速、输入磁链以及输入 转矩。异步电动机调速系统仿真结果如图 13 所示。 为便于观察,将图 13 虚线内的 a 和 b 区域进行放 大,如图 14 所示。

从图 14 可以看出,采用自适应模糊神经网络控制的交流调速系统的输出转速与参考转速吻合程度比较高,控制效果优于 PID 控制。

直流电动机转矩控制系统的输出结果与图9相同。

#### 6 实验

在实验室内搭建了由异步电动机和直流电动机 组成的车载电源性能在环测试平台,如图 15 所示。





牵引电动机为异步电动机,其额定功率为5kW。负载电动机为直流电动机,其额定功率为5kW。转矩 传感器最大扭矩为100N·m。



图 15 在环测试平台 Fig. 15 Hardware-in-the-loop test bench

利用异步电动机-直流电动机测试平台进行自 适应模糊神经网络逆系统解耦控制在环测试,实验 结果如图 16 所示。

由实验结果可看出,异步电动机的转速和直流 电动机的转矩均较好地跟踪了参考转速和参考转 矩,虽然还存在微小的波动,但解耦效果比较理想。

整个循环工况中与异步电动机相连的电池功率 变化曲线如图 17 所示。







由图 17 可看出,在整个循环工况过程中电池给 异步电动机-直流电动机测试平台提供的最大功率 为 2.4 kW,同时异步电动机的反馈制动也得到了良 好的体现。

#### 7 结论

(1)由异步电动机-直流电动机组成的车载电源性能测试平台是一个多变量、非线性、强耦合的复杂机电系统,根据传动系统的力学原理,建立了该系统的机电耦合模型。

(2)对异步电动机-直流电动机组成的复杂机 电耦合系统进行可逆性分析,并对该机电耦合系统 进行逆系统解耦控制。在此基础上,对该机电耦合 系统进行自适应模糊神经网络逆系统解耦控制,取 得了较好的控制效果。

(3) 对异步电动机和直流电动机分别实现了精确的转速控制和转矩控制。同时,通过观察与异步 电动机相连的电池的电压和电流,可得到电池的功 率变化曲线,进而为下一步复合电源的在环测试提 供了依据。

#### 参考文献

- 周健豪,袁银男,陈笃红,等. 混合动力汽车动力总成试验台测控系统[J]. 农业机械学报,2011,42(7):36-40.
   Zhou Jianhao,Yuan Yinnan, Chen Duhong, et al. Measurement and control system for vehicular powertrain test bench in HEV applications[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 36-40. (in Chinese)
- 2 Cheng Y, Joeri V M, Lataire P. Research and test platform for hybrid electric vehicle with the super capacitor based energy storage [C]. Power Electronics and Applications 2007 European Conference, 2007: 1-10.
- 3 王伟,王庆年,初亮,等. 混合动力汽车驱动电动机性能评价体系研究[J]. 农业机械学报,2011,42(8):20-25. Wang Wei, Wang Qingnian, Chu Liang, et al. Evaluation regime of traction motor for hybrid electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 20-25. (in Chinese)
- 4 Cheng Y, Joeri V M, Lataire P, et al. Test bench of hybrid electric vehicle with the super capacitor based energy storage [C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2007, ISIE 2007, 2007: 147-152.
- 5 周超群. 伺服系统中精密传动系统机电耦合分析[D]. 重庆:重庆大学,2007. Zhou Chaoqun. Analysis of the electromechanical coupling facts about precise mechanical transmission in servo system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)
- 6 林利红. 永磁交流伺服精密驱动系统机电耦合动力学分析与实验[D].重庆:重庆大学,2009. Lin Lihong. Electromechanical coupling dynamic analysis and experimental study on permanent magnet ac servo precision drive system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)
- 7 李华德,李擎,白晶. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- 8 阮毅,陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- 9 李珍国. 交流电动机控制基础 [M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- 10 钟掘.复杂机电系统耦合设计理论与方法[M].北京:机械工业出版社,2007.
- 11 周润景,张丽娜. 基于 MATLAB 与 fuzzyTECH 的模糊与神经网络设计[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- 12 陈刚,张为公,常思勤. 汽车驾驶机器人模糊神经网络换挡控制方法[J]. 农业机械学报,2011,42(6):6-11. Chen Gang, Zhang Weigong, Chang Siqin. Shift control method of vehicle robot driver based on fuzzy neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 6-11. (in Chinese)
- 13 Eren Y, Erdinc O, Gorgun H, et al. A fuzzy logic based supervisory controller for an FC/UC hybrid vehicular power system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(20): 8681 - 8694.
- 14 Ferreira A A, Pomilio J A, Spiazzi G, et al. Energy management fuzzy logic supervisory for electric vehicle power supplies system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(1): 107 - 115.
- 15 朱茂飞,陈无畏,夏光.基于神经网络逆系统方法的汽车底盘解耦控制[J].农业机械学报,2011,42(12):13-17. Zhu Maofei, Chen Wuwei, Xia Guang. Vehicle chassis decoupling control based on neural network inverse method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 13-17. (in Chinese)
- 16 戴先中,刘国海,张兴华.交流传动神经网络逆控制[M].北京:机械工业出版社,2007.

# Research on Coupling System and Reverse Decoupling Control of Test Bench for Energy Storage System

Li Yong<sup>1</sup> Ma Fei<sup>1</sup> Kazerani Mehrdad<sup>2</sup>

School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
 Department of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, Waterloo N2L 3G1, Canada)

Abstract: A test bench composed by induction motor and dc motor is proposed to test the performance of power source on EVs. The test bench is a complex electromechanical coupling system with mechanical, electrical and magnet fields. The electromechanical coupling model of the system was built. The nonlinear system was linearized with the help of  $\alpha$ -order integration inverse system. The adaptive fuzzy-neural network control was applied to the system based on the inverse system control. That also leads to a better decoupling simulation and experimental results. Both of the feedback of AC motor speed and DC motor torque follow the targets. The variations of voltage, current and power on the DC bus of the battery connected with induction motor can be observed, which provides the theoretical foundation for the research on the hybrid energy storage system.

Key words: Electric vehicle Energy storage device Motor test bench Electromechanical coupling system Decoupling control