doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.004

车载电源性能在环测试平台优化*

李　勇[1]　马　飞[1]　Kazerani Mehrdad[2]　顾　青[1]

(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：为了实现车载电源性能的综合测试，搭建了由直流电动机-飞轮组成的电源测试平台，以此为基础，研究了平台结构对直流调速系统控制精度的影响。建立了测试平台的数学模型，通过实验分析了存在的问题。依据多轴机电传动理论，提出了平台结构的优化方法，建立了优化后平台的数学模型和状态空间方程。分析了无级变速器(CVT)的传动效率，确定了其速比控制约束条件。构建了基于 dSPACE 的硬件在环测试平台，通过实验分析了平台优化前后直流调速系统的调速效果，实验结果表明，优化后的平台具有优良的调速性能，直流调速系统的跟踪精度显著提高，为开展复合电源性能测试提供了技术支持。

关键词：纯电动汽车　车载电源　无级变速器　结构优化　在环测试平台

中图分类号：TP29　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2014)12-0025-07

引言

车载电源的可靠性直接影响电动汽车的整体安全性能，为研究车载电源的综合性能，搭建一个性能优良的测试平台尤为重要[1-2]。

国内外学者对车载电源性能测试平台做了大量的研究工作[3-6]。现有研究大多集中在车载电源能量管理策略和驱动电机控制策略等方面[7-12]，而对测试平台结构的本身特性，尤其是对不同循环工况下调速系统的控制精度与平台结构之间的关系研究较少。

本文提出由直流电动机和飞轮组成的平台构成，他励直流电动机用来模拟电动汽车牵引电机，飞轮用来模拟电动汽车在行驶过程中的负载和整车惯量。以该测试平台为基础，深入研究平台物理结构特性对直流调速系统控制精度的影响。

1　直流电动机-飞轮测试平台

1.1　平台模型

用于车载电源性能测试的平台由电源模块、直流电动机模块及飞轮 3 部分构成，其结构如图 1 所示。

因本文重点研究平台物理结构对直流调速系统控制精度的影响，故首先需要确定由直流电动机-飞轮组成的测试平台的力学模型。图 2 为简化的直流电动机-飞轮测试平台的力学模型，直流电动机与飞轮通过联轴器连接，二者组成单轴电力拖动系统。

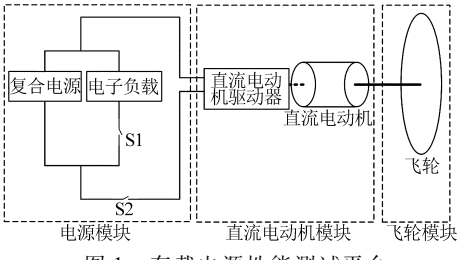

图 1　车载电源性能测试平台

Fig. 1　Performance testing bench of vehicular energy storage system

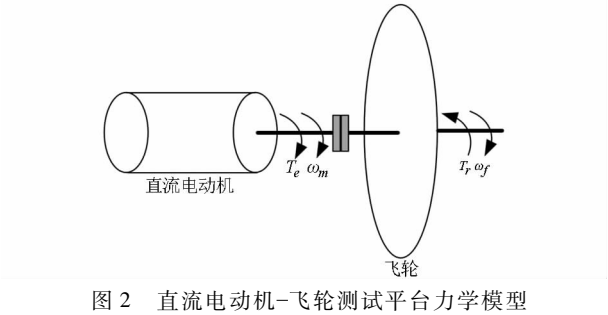

图 2　直流电动机-飞轮测试平台力学模型

Fig. 2　Mechanical model of test bench with DC motor & flywheel

由传动理论可得

$$T_e - T_r = (J_m + J_f)\frac{\mathrm{d}\omega_m}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

其中　$T_r = k_f\omega_f$

收稿日期：2014-07-21　修回日期：2014-08-31

*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

式中 T_e——直流电动机电磁转矩

J_m——直流电动机转动惯量，为 0.2 kg·m^2

J_f——飞轮转动惯量，为 3.99 kg·m^2

ω_m——直流电动机输出轴旋转角速度

T_r——飞轮阻力矩　　k_f——飞轮阻尼系数

ω_f——飞轮旋转角速度

若忽略 k_f，则由式(1)可得直流电动机正常工作的条件为

$$T_e \geqslant (J_m + J_f)\frac{\mathrm{d}\omega_m}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

设定 J_L' 为折算到直流电动机输出轴上的总转动惯量，则有 $J_L' = J_m + J_f$，代入式(2)可得

$$T_e \geqslant J_L' \frac{\mathrm{d}\omega_m}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

选取 2 种不同速度变化率的循环工况，即简单循环工况和 NYCC 循环工况，分别将 2 种循环工况下的汽车行驶速度转换为电动机转速，则电动机转轴角加速度曲线如图 3 所示。

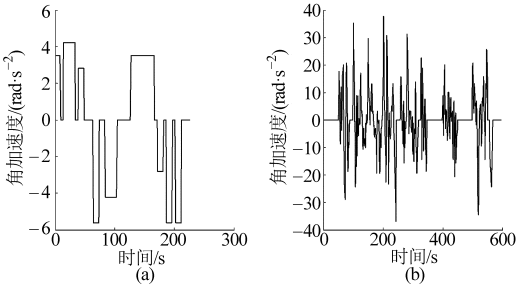

图 3　电动机旋转角加速度变化曲线

Fig. 3　Angular acceleration curve of simple drive cycle

(a) 简单循环工况　(b) NYCC 循环工况

图 3a 中，电动机角加速度曲线变化较为平缓，其变化范围为 −5.8 ~ 4.2 rad/s^2；图 3b 中，电动机角加速度曲线变化较为陡峭，其变化范围为 −35 ~ 38 rad/s^2，约为图 3a 中电动机角加速度的 6.4 ~ 8.75 倍。

1.2　在环实验

搭建了基于 dSPACE 的直流电动机-飞轮测试平台，如图 4 所示。直流电动机的额定功率为 3.73 kW，额定转速为 3 600 r/min。

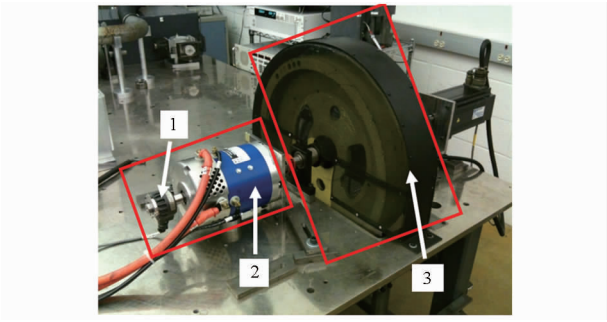

图 4　直流电动机-飞轮实验平台

Fig. 4　Test bench setup

1. 转速传感器　2. 直流电动机　3. 飞轮

直流电动机调速系统分别以简单循环工况和 NYCC 循环工况为参考转速，采用具有较好静态和动态性能的模糊-PID 双模控制器[13-14]，实验结果如图 5 所示。

实验结果表明，简单循环工况下反馈转速能够较好地跟踪参考转速；而当参考转速变化较剧烈时，NYCC 循环工况，直流调速系统的跟踪特性开始变差。

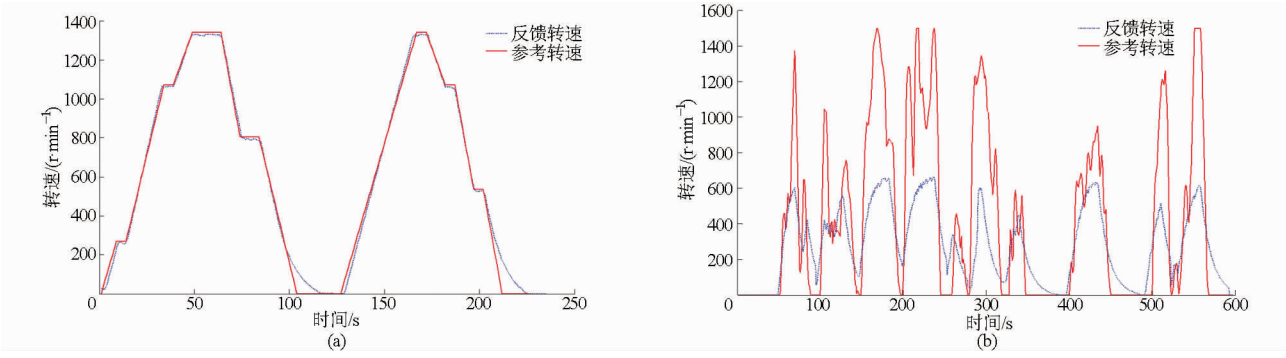

图 5　直流电动机-飞轮平台直流调速系统实验结果

Fig. 5　Experimental result of speed control system based on original test bench

(a) 简单循环工况　(b) NYCC 循环工况

1.3　平台现存问题

在简单循环工况下，折算到电动机输出轴上的转动惯量 J_L' 与角加速度的乘积满足式(3)，电动机工作在最佳动力区域，调速系统具有较好的跟踪特性，如图 5a 所示。在 NYCC 循环工况下，电动机输出轴角加速度较大，此时转动惯量 J_L' 保持不变，两者乘积无法满足式(3)，超出了电动机最佳动力区域，导致直流调速系统跟踪特性变差，尤其当转速超过 800 r/min 时，反馈转速与参考转速完全脱离，如图 5b 所示。

由上述分析可知，折算到电动机输出轴上的转动惯量 J_L' 对直流调速系统的跟踪特性影响较大，为

了提高平台的动态测试范围，必须对该测试平台结构进行优化。

2　直流电动机-飞轮测试平台的优化

2.1　平台优化机理

平台的优化措施是在直流电动机与飞轮之间加装传动装置，进而达到改变折算到电动机输出轴上转动惯量 J_L' 的目的。改进后的平台成为多轴拖动系统。为简化计算，将其折算为等效单轴拖动系统。折算前后系统动能不变，将负载转动惯量折算到电动机输出轴上的等效转动惯量。根据能量守恒定理，可得

$$\frac{1}{2}J_L\omega_m^2=\frac{1}{2}J_m\omega_m^2+\frac{1}{2}J_i\omega_i^2+\frac{1}{2}J_o\omega_o^2+\frac{1}{2}J_f\omega_f^2 \quad (4)$$

式中　J_L——系统等效转动惯量，即平台优化后折算到电动机输出轴上的转动惯量

ω_i——传动装置输入轴角速度，ω_i 在数值上与 ω_m 相等

ω_o——传动装置输出轴角速度，ω_o 在数值上与 ω_f 相等

J_i——传动装置输入轴转动惯量

J_o——传动装置输出轴转动惯量

设传动装置的传动比为 i，则有

$$i=\frac{\omega_i}{\omega_o}=\frac{\omega_m}{\omega_f} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)，可得

$$J_L=J_m+J_i+\frac{J_o+J_f}{i^2} \quad (6)$$

式(6)中，若忽略 J_i 和 J_o，J_L 可近似为

$$J_L=J_m+\frac{J_f}{i^2} \quad (7)$$

由式(7)可看出，若传动比 $i>1$，则有 $J_L<J_m+J_f$，即

$$J_L<J_L' \quad (8)$$

由式(3)可知，平台优化后，在 NYCC 循环工况下通过合理调整传动比 i，可使电动机满足正常工作条件。

优化后 J_L 与系统开环截止频率 ω_c 的关系式[15]为

$$\omega_c=\sqrt{\frac{T_r\varphi_{\omega c}}{J_L|2\Delta|}} \quad (9)$$

式(9)表明，当飞轮阻力矩 T_r、机械传动空回转角量 $|2\Delta|$ 及其等效相位滞后 $\varphi_{\omega c}$ 一定时，若 J_L 减小，则系统开环截止频率 ω_c 增大，系统的跟踪精度提高，过渡过程时间缩短。

2.2　优化后平台模型

常用的传动装置有齿轮箱、变速箱和无级变速器。齿轮箱和变速箱的传动比固定，不能实现传动比的连续变化；无级变速器体积小，传动比可以实现连续变化，是较为理想的传动装置[16-17]。故本文选用无级变速器作为传动装置。优化后平台传动系统如图 6 所示。

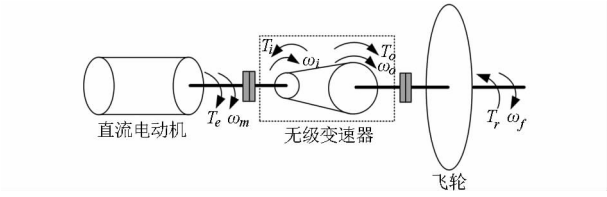

图 6　优化后平台传动系统示意图

Fig. 6　Schematic improved test bench

依照质量集中法将直流电动机和飞轮的转动惯量分别折算到 CVT 的输入轴和输出轴上，则优化后的平台可简化为具有 2 个旋转质量的模型系统，即 CVT 输入轴的转动惯量和 CVT 输出轴的转动惯量。

由此可列出 CVT 输入轴、输出轴转矩方程为

$$T_e-T_i=(J_m+J_i)\frac{\mathrm{d}\omega_i(t)}{\mathrm{d}t}+(f_m+f_i)\omega_i(t) \quad (10)$$

$$T_o-T_r=(J_o+J_f)\frac{\mathrm{d}\omega_o(t)}{\mathrm{d}t}+(f_o+f_f)\omega_o(t) \quad (11)$$

式中　T_i——CVT 输入轴转矩

T_o——CVT 输出轴转矩

f_i——CVT 输入轴阻尼系数

f_o——CVT 输出轴阻尼系数

设 CVT 传动效率为 η，则有

$$T_o=i\eta T_i \quad (12)$$

CVT 输入轴和输出轴的转速关系为

$$\omega_i=i\omega_o \quad (13)$$

因 CVT 速比 i 随时间变化，故对式(13)两端求导可得

$$\frac{\mathrm{d}\omega_i}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\omega_o+i\frac{\mathrm{d}\omega_o}{\mathrm{d}t} \quad (14)$$

联立式(10)、(11)、(12)和(14)，可得

$$T_e-\frac{T_r}{i\eta}=\left[(J_m+J_i)\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+i(f_m+f_i)+\frac{f_o+f_f}{i\eta}\right]\omega_o+\left[i(J_m+J_i)+\frac{J_o+J_f}{i\eta}\right]\frac{\mathrm{d}\omega_o}{\mathrm{d}t} \quad (15)$$

式(15)中，若忽略 f_m、f_i、f_o、f_f、J_i 和 J_o，则有

$$\frac{\mathrm{d}\omega_o}{\mathrm{d}t}=\frac{\left(T_e-\frac{T_r}{i\eta}-J_m\omega_o\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\right)\frac{1}{i}}{J_m+\frac{J_f}{i^2\eta}} \quad (16)$$

式(16)表明，该系统为多输入多输出的非线性系统。为便于分析，将式(16)用状态方程进行描述[18-19]。系统的输入变量、输出变量和状态变量设

定为

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix}x_1\\x_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\omega_o\\i\end{bmatrix} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{y}=[y_1]=[x_1]=[\omega_o] \tag{18}$$

$$\boldsymbol{u}=\left[\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\right] \tag{19}$$

系统模型用状态方程为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})+\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}=\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})\end{cases} \tag{20}$$

其中 $f_1(x)=\dfrac{\eta T_e x_2-T_r}{i^2\eta(J_m+J_i)+J_o+J_f}$

$$f_2(x)=0\quad g_1(x)=-\frac{x_1x_2\eta(J_m+J_i)}{i^2\eta(J_m+J_i)+J_o+J_f}$$

$$g_2(x)=1\quad h(x)=x_1$$

系统状态方程为

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\\dot{x}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\eta T_e x_2-T_r}{i^2\eta(J_m+J_i)+J_o+J_f}\\0\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-\dfrac{x_1x_2\eta(J_m+J_i)}{i^2\eta(J_m+J_i)+J_o+J_f}\\1\end{bmatrix}u \tag{21}$$

由于该系统为多输入多输出的非线性系统，为检验能否进行线性化，需对该系统的能控性和对合性进行验证。故构造向量场 $\boldsymbol{g}$ 和 $ad_f\boldsymbol{g}$ 为

$$\boldsymbol{g}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{g}_1\\1\end{bmatrix} \tag{22}$$

$$ad_f\boldsymbol{g}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial\boldsymbol{g}_1}{\partial\boldsymbol{x}_1}&\dfrac{\partial\boldsymbol{g}_2}{\partial\boldsymbol{x}_2}\\0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{f}_1\\0\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dfrac{\partial\boldsymbol{f}_1}{\partial\boldsymbol{x}_1}&\dfrac{\partial\boldsymbol{f}_2}{\partial\boldsymbol{x}_2}\\0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{g}_1\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial\boldsymbol{g}_1}{\partial\boldsymbol{x}_1}\boldsymbol{f}_1+\dfrac{\partial\boldsymbol{f}_1}{\partial\boldsymbol{x}_1}\boldsymbol{g}_1\\\dfrac{\partial\boldsymbol{f}_1}{\partial\boldsymbol{x}_2}\end{bmatrix} \tag{23}$$

则有 $[\boldsymbol{g}\quad ad_f\boldsymbol{g}]=\begin{bmatrix}\boldsymbol{g}_1&\dfrac{\partial\boldsymbol{g}_1}{\partial\boldsymbol{x}_1}\boldsymbol{f}_1+\dfrac{\partial\boldsymbol{f}_1}{\partial\boldsymbol{x}_1}\boldsymbol{g}_1\\1&\dfrac{\partial\boldsymbol{f}_1}{\partial\boldsymbol{x}_2}\end{bmatrix}$ (24)

测试平台系统在运行过程中的秩为 2，满足能控性和对合性条件，可以实现全状态反馈线性化。

为研究输入/输出间的动态响应关系，对 y 求关于 t 的导数，有

$$\dot{y}=\dot{x}_1=\frac{\partial h}{\partial\boldsymbol{x}_1}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})+\frac{\partial h}{\partial\boldsymbol{x}_1}\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})u=L_f\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})+L_g\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})u \tag{25}$$

将式(20)代入，可得 $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})$ 对向量场 $\boldsymbol{f}$、$\boldsymbol{g}$ 的李导数

$$L_f\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})=f_1(x)\quad L_g\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})=g_1(x)$$

测试平台在运行过程中 $x_1>0$，$x_2>0$，故 $L_g\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})\neq 0$。令控制变量

$$u=\frac{1}{L_gh}(-L_fh+v)=\frac{1}{g_1(x)}(-f_1(x)+v)$$

则 $\dot{y}=v$。

系统转换为线性系统，即系统可使用线性反馈控制。

3 无级变速器特性

在车载电源性能测试平台中，CVT 的主要作用，一是高效传递功率，即将电动机输出功率输送到飞轮；二是根据 NYCC 循环工况的特点调整 CVT 传动速比，使电动机保持在最佳工作区域。只有 CVT 的传动效率和速比控制均达到最佳状态时，测试平台的功能才能够充分展现[20-21]。

3.1 CVT 传动效率

CVT 传动效率是通过合理控制金属带的夹紧力来实现的，夹紧力应始终控制在理想范围内。本文所用 CVT 的最小速比 $i_{\min}$ 为 0.5，最大速比 $i_{\max}$ 为 3.5。对 CVT 进行传动效率实验，传动比分别为 1.0、2.5 和 3.5，实验结果如表 1 所示。

表 1 CVT 传动效率

Tab. 1 CVT efficiency

序号	实验条件					传动效率 η/%
	传动比	输入转速/(r·min^{-1})	输入转矩/(N·m)	输出转速/(r·min^{-1})	输出转矩/(N·m)	
1	1.0	400	19.16	399	17.82	93.15
2	2.5	800	9.56	321	21.99	92.30
3	3.5	1 350	5.66	386	18.07	91.23

由表 1 可看出，CVT 的平均传动效率为 92.23%。

3.2 CVT 速比控制

CVT 速比控制器通过调整实际速比与目标速比之间的偏差值来控制执行机构动作，使 CVT 的实际速比尽快达到目标速比。由式(16)可得

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=\frac{i\eta T_e-T_r-(i^2\eta J_m+J_f)\dfrac{\mathrm{d}\omega_o}{\mathrm{d}t}}{i\eta J_m\omega_o} \tag{26}$$

NYCC 循环工况下，为使电动机正常工作，须降

低 J_L 的取值，故 CVT 速比的约束条件应为

$$1 < i \leqslant i_{\max} \tag{27}$$

4　优化后平台直流调速系统仿真和实验

4.1　仿真

以 NYCC 循环工况为直流调速系统的参考转速，调速系统采用模糊－PID 控制策略，对优化后平台进行仿真，结果如图 7 所示。

由图 7 可看出，优化后平台直流调速系统的反馈转速与参考转速相吻合，改进后平台的负载转动惯量得到了降低，直流电动机反馈转速跟踪精度提高，其调速性能得到了良好的体现。

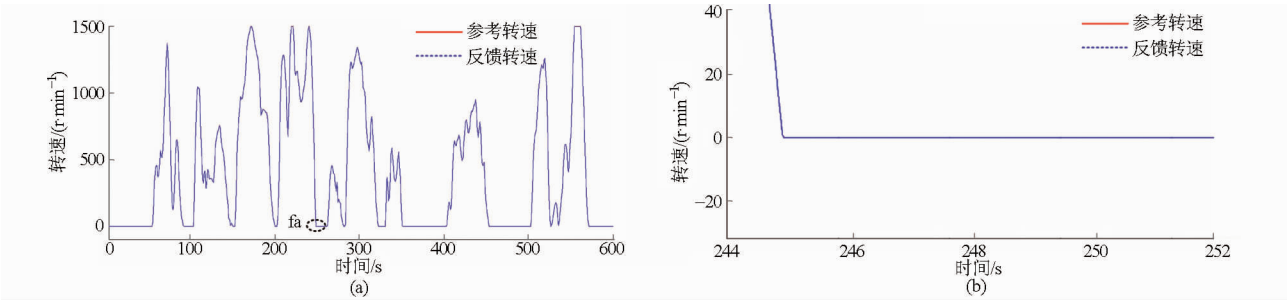

图 7　优化后平台调速系统仿真结果

Fig. 7　Simulation results of speed control system of optimized test bench

（a）优化后平台调速系统仿真结果　（b）f_a 区域放大图

4.2　实验

为了验证车载电源性能测试平台优化的合理性，对原测试平台进行结构优化，优化后平台如图 8 所示。

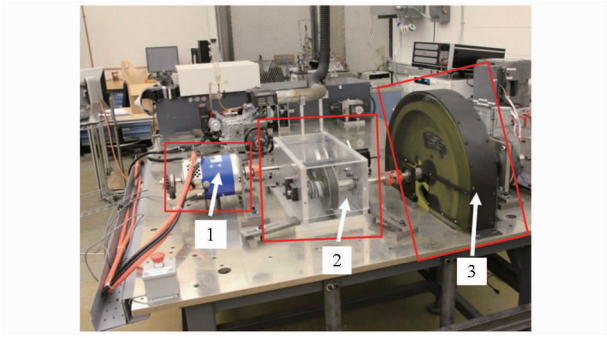

图 8　优化后平台

Fig. 8　Improved test bench setup

1. 直流电动机　2. 无级变速器　3. 飞轮

以 NYCC 循环工况为优化后平台直流调速系统的参考转速，直流调速系统采用模糊－PID 控制，实验结果如图 9 所示。

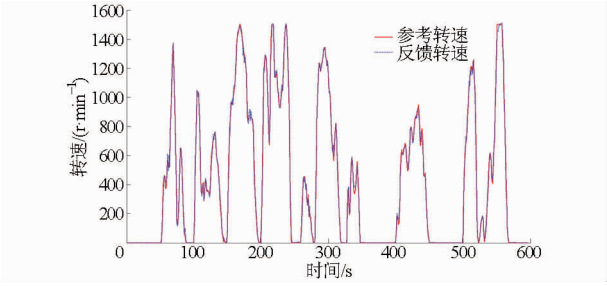

图 9　优化后平台直流调速系统实验结果

Fig. 9　Experiment result of speed control system based on optimized test bench

图 9 中，优化后平台直流调速系统的反馈转速和参考转速吻合程度非常高。

平台优化前后直流调速系统误差如图 10 所示。

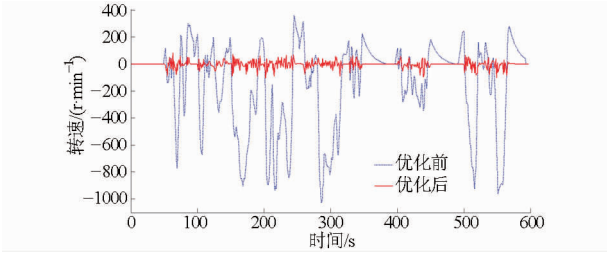

图 10　平台优化前后直流调速系统误差

Fig. 10　Error of speed control system of test bench

图 10 中，NYCC 循环工况下，平台优化前直流调速系统的误差范围为 －1 000 ～400 r/min，优化后直流调速系统的误差范围为 －90 ～83 r/min。平台优化后直流调速系统的误差范围大幅度减小，跟踪精度得到了显著提高，说明该测试平台优化方法是可行的。优化后平台直流调速系统具有较好的调速性能，为下一步开展车载复合电源性能测试研究奠定了基础。

5　结论

（1）分析了不同速度变化率循环工况下直流调速系统跟踪精度与测试平台结构之间的关系，提出了通过加装 CVT 降低系统负载转动惯量的平台结构优化方法。

（2）建立了优化后平台的数学模型和状态空间方程。分析了 CVT 的传动效率和速比控制，确定了速比控制的约束条件，确保电动机工作在最佳性能区域。

（3）搭建了基于 dSPACE 的硬件在环测试平台，通过实验分析比较了平台优化前后直流调速系

统的调速效果,实验结果表明,优化后的平台具有优良的调速性能,直流调速系统的跟踪精度大幅提高。

参 考 文 献

1 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 H, 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: 147 - 152.

3 Erdinc O, Vural B, Uzunoglu M. A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system[J]. Journal of Power Sources, 2009, 194(1): 369 - 380.

4 Bouscayrol A. Different types of hardware-in-the-loop simulation for electric drives[C]// 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008: 2146 - 2151.

5 Basiri M. Development of a hardware-in-the-loop platform for hybrid and electric vehicles[D]. Waterloo: University of Waterloo, 2012.

6 韦作高,刘振军,叶明,等. 基于 dSPACE 的混合动力试验台系统开发研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2008,27(3):470 - 473.
Wei Zuogao, Liu Zhenjun, Ye Ming, et al. Design and research on the test bed of hybrid electric vehicle based on dSPACE[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2008, 27(3): 470 - 473. (in Chinese)

7 于远彬. 车载复合电源设计理论与控制策略研究[D]. 长春:吉林大学,2008.

8 张为,王伟达,车坚志,等. 基于 V 模式的机电复合传动能量管理控制系统设[J]. 农业机械学报,2012,43(10):1 - 7.
Zhang Wei, Wang Weida, Che Jianzhi, et al. Energy management control system design for electro-mechanical transmission based on V-mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 1 - 7. (in Chinese)

9 He Hongwen, Xiong Rui, Zhao Kai, et al. Energy management strategy research on a hybrid power system by hardware-in-loop experiments[J]. Applied Energy, 2013, 112: 1311 - 1317.

10 朱元,武四辈,吴志红,等. 电动汽车用内置式永磁同步电动机精确转矩控制方法[J]. 农业机械学报,2014,45(1):8 - 13.
Zhu Yuan, Wu Sibei, Wu Zhihong, et al. Precise torque control method of IPMSM in vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 8 - 13. (in Chinese)

11 李勇,马飞,Kazerani Mehrdad. 车载电源性能测试平台驱动电机调速系统控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(21):3481 - 3487.
Li Yong, Ma Fei, Kazerani Mehrdad. Research on the control strategy for the traction motor on the test bench of vehicular energy storage sytem[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2014, 34(21): 3481 - 3487. (in Chinese)

12 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)

13 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.

14 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)

15 周超群,陈小安,合烨. 伺服系统中精密传动装置精度分析[J]. 现代制造工程,2007(4):73 - 76.
Zhou Chaoqun, Chen Xiaoan, He Ye. Precision analysis of mechanical transmission in servo system[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2007(4): 73 - 76. (in Chinese)

16 刘振军,秦大同,胡建军. 重型车辆电控机械式自动变速系统设计与应用[J]. 农业机械学报,2011,42(8):7 - 14.
Liu Zhenjun, Qin Datong, Hu Jianjun. Design and application of heavy truck AMT system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 7 - 14. (in Chinese)

17 王书翰,徐向阳,Tenberge P,等. 液力变矩器液压系统设计与动态特性仿真[J]. 农业机械学报,2009,40(5):20 - 23.
Wang Shuhan, Xu Xiangyang, Tenberge P, et al. Hydraulic system design and dynamic characteristic simulation of torque converter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 20 - 23. (in Chinese)

18 骆顺志. 搭载电控无级变速器纯电动汽车动力系统控制策略的研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2012.

19 贺昱曜,闫茂德. 非线性控制理论及应用[M]. 西安:西安电子科学大学出版社,2007.

20 杨新桦,蒋强,程越,等. 电机控制的金属带式无级变速器速比变化特性的仿真研究[J]. 汽车工程,2012,34(4):320 - 322.
Yang Xinhua, Jiang Qiang, Cheng Yue, et al. A simulation study on the speed ratio variation characteristics of motor controlled metal V-belt CVT[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(4): 320 - 322. (in Chinese)

21 康宁,刘宏伟. 双金属带传动无级变速器设计与仿真[J]. 农业机械学报,2013,44(10):23 - 28.
Kang Ning, Liu Hongwei. Design and simulation of Bi-metal belts CVT[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 23 - 28. (in Chinese)

Improved Test Bench of Energy Storage System in Electric Vehicle

Li Yong[1]　Ma Fei[1]　Kazerani Mehrdad[2]　Gu Qing[1]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *University of Science and Technology Beijing*, *Beijing* 100083, *China*

2. *Department of Electrical and Computer Engineering*, *University of Waterloo*, *Waterloo N2L 3G1*, *Canada*)

Abstract: The safety and reliability of electric vehicle depend on the performance of vehicular energy storage system. The test bench composed by DC motor and flywheel was proposed to test the performance of energy storage system. This paper mainly focuses on an improved test bench. The tracking precision of speed control system was affected by the improved test bench. The model and current problems of the test bench were presented. The structure improvement method of the test bench was improved according to the theory of multi-shaft transmission system. The improved test bench was modeled by using state-space equation method. The efficiency and ratio control of continuously variable transmission (CVT) were analyzed. The dSPACE-based hardware-in-the loop (HIL) test bench was built and improved in the lab. Experimental results showed that the tracking precision of speed control system was improved with new test bench. It provides technology support for the performance testing of hybrid energy storage system.

Key words: Electric vehicle　Vehicular energy storage system　CVT　Structure improvement　HIL test bench

(上接第 8 页)

Forces and Deposition Characteristics of Particles in Turbulent Flow Channel

Ning Zhi　Bai Zhenxiao　Sun Chunhua　Fu Juan

(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Beijing Jiaotong University*, *Beijing* 100044, *China*)

Abstract: The movement and deposition of the diesel particles have important effect on the particle sampling measurement, the operation of the exhaust gas recirculation system and the trapping of the particles. The forces imposed on the emission particles of diesel engine and the deposition characteristics of the emission particles of diesel engine in the turbulent flow channel were investigated under different conditions by using the force modes and the particle random trajectory mode established. The results showed that the Stokes drag force, Brownian force, Saffman lift force, thermophoresis force, gravitation force, and buoyancy force imposed on the emission particles had strong relations with the dimension of the particles and the distance of the particles far from the wall. The main driving forces for the depositing of the emission particles were different under different conditions. The forces, the flow inlet velocity and temperature and the channel dimensions affected the deposition of the emission particles in the turbulent flow channel.

Key words: Diesel engine　Turbulent flow channel　Particle　Force　Deposition