doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.040

农用电动车辆预换挡过程转速鲁棒控制方法

张　琰[1]　赵　韩[1]　朱胤斐[1,2]　黄　康[1]　邱明明[1]　秦菲菲[1]

(1. 合肥工业大学机械工程学院, 合肥 230009; 2. 斯威本科技大学软件与电气工程学院, 墨尔本 3122)

摘要: 提出了一种农用电动车辆换挡过程中永磁同步电机速度同步的鲁棒控制方法。针对电动车辆电驱动总成系统,分析了换挡过程及其中的预换挡速度同步问题,根据系统的结构和工作条件,完成了动力学建模。利用一种非线性控制算法完成了永磁同步电机换挡速度同步鲁棒控制,该算法继承了传统 PID 控制和鲁棒控制的特点,基于误差和模型两方面进行控制,将农用车辆作业工况下的模型不确定性和外部干扰集中到一个具有假定上限的函数。基于 Lyapunov 方法从理论上证明了本文设计的鲁棒控制器具有一致有界性和最终一致有界性。通过数值仿真与传统 PD 控制进行对比,在相同 PD 控制参数条件下,鲁棒控制器的转速同步误差平均值与标准差均具有明显优势。通过台架试验进一步验证了该鲁棒控制方法对永磁同步电机速度同步控制的有效性,结果表明,该方法转速同步误差平均值与标准差优于传统 PD 控制 30% 以上。

关键词: 电动车辆; 传动系统; 鲁棒控制; Lyapunov; 机械动力学

中图分类号: U463.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)01-0364-08　　**OSID**:

Novel Robust Speed Control Method of Agricultural Electric Vehicle Preshift Process

ZHANG Yan[1]　ZHAO Han[1]　ZHU Yinfei[1,2]　HUANG Kang[1]　QIU Mingming[1]　QIN Feifei[1]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Hefei University of Technology*, *Hefei* 230009, *China*
2. *School of Software and Electrical Engineering*, *Swinburne University of Technology*, *Melbourne* 3122, *Australia*)

Abstract: A novel robust approach of speed control was adopted for PMSM during the agricultural electric vehicle's preshift process. Considering the two-gear electric vehicle electric driveline, the gearshift process was studied and the preshift process was introduced, electromagnetic speed synchronization of the driving motor was considered specifically. Based on the structure of the driveline and the agricultural working condition, dynamic modeling was completed. And a nonlinear robust control approach was introduced to complete the robust control task of electromagnetic speed synchronization. The adopted control algorithm was characterized by error-based and model-based algorithm inheriting from traditional PID control and robust control. The control algorithm consisted of a model-based algorithm component, a PD component as a feedback control and a piecewise function component as a robust feedback control, in which the system uncertainties and external disturbance were lumped. These system uncertainties and external disturbance were assumed to have upper bound. Based on the Lyapunov method, it theoretically proved the proposed control algorithm had render uniform boundedness and uniform ultimate boundedness. The effectiveness and robustness of the proposed control method for speed synchronization control of permanent magnet synchronous motor were verified by numerical simulation and bench test. By comparing with the traditional PD control, the proposed robust controller had obvious advantages under the same PD control parameters considering the load fluctuation conditions of agricultural electric vehicles. Average speed synchronization error and standard deviation were obviously better than those of traditional PD control in simulation result, which was 30% better in test result. The precise robust control paved the way for synchronization of synchronizer in the later stage and played an important role in improving shift quality.

Key words: electric vehicle; transmission system; robust control; Lyapunov; mechanical dynamics

收稿日期: 2019-07-25　修回日期: 2019-10-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0103201)

作者简介: 张琰(1987—),女,博士生,主要从事新能源车辆集成动力系统非线性控制研究,E-mail: zy@hfut.edu.cn

通信作者: 邱明明(1983—),男,讲师,博士,主要从事新能源车辆控制策略研究,E-mail: hfutqmm@hfut.edu.cn

0　引言

日益严峻的环境问题和能源压力推动了新能源车辆产业的蓬勃发展，电动车辆具有效率高、能耗低、污染小、噪声小等优点，逐渐成为农业机械领域的热门课题[1]。电驱总成作为其中关键部件，其控制质量对车辆性能具有重要影响[2-3]。与传统燃油车辆的发动机驱动系统相比，电机驱动系统没有离合器部件，对传动精度要求更高，对其控制方法也提出了更高的要求[4-7]。换挡控制作为多挡电动车辆控制的重要部分，极大影响了驾驶平顺性，受到了广泛关注：文献[8-9]对换挡策略进行了研究，文献[10-12]采用分段方法控制换挡过程。同步控制是换挡控制的核心问题[9]，极大影响了换挡品质，文献[13-14]研究了其中的电磁同步过程及其控制方法。

农用电动车辆换挡过程中的电磁同步控制问题存在诸多难点。与一般道路车辆相比，农用车辆工作条件恶劣，载荷波动频繁。同时，系统惯性和状态测量误差等可能导致高频颤振，因而必须考虑控制方法的鲁棒性。鲁棒控制包括 H_∞、μ、Kharitonov 和 Lyapunov 等多种方法[15]，其中 Lyapunov 方法是唯一具有理论基础并应用于非线性非自治系统的方法[19]。

本文研究一种基于电驱动系统模型和转速误差的电机速度同步鲁棒控制算法，基于 Lyapunov 方法对其控制稳定性等进行证明，并通过仿真与试验进行进一步验证。

1　动力学模型

目前纯电动农用车辆多采用单电机驱动，难以满足农田作业的多工况、经济性要求[7]，本文考虑一种两挡纯电动车辆的电驱总成系统，如图 1 所示，其布局方式继承传统燃油车辆，包含驱动电机、变速器和主减速器等部分。其中驱动电机选用具有良好可控性的永磁同步电机（Permanent magnet synchronous motor，PMSM），换挡执行器选用同步器。图中，ω_m 为变速器输入轴角速度，即电机转子转速，T_m 为驱动电机的输出扭矩，J_{in} 为输入轴等效转动惯量，ω_t 为输出轴角速度，T_t 为传动系统的传递扭矩，J_{out} 为输出轴等效转动惯量，ω_v 为车轮角速度，J_v 为车辆等效转动惯量，T_v 为车辆行驶阻力矩，i_n 和 i_g 分别为当前变速器和主减速器的传动比。

当车辆正常行驶时，同步器处于结合状态，变速器挡位固定，传动比为常数。电机-变速箱以及车轮-车辆动力学系统通常可处理为单一惯性系统，其

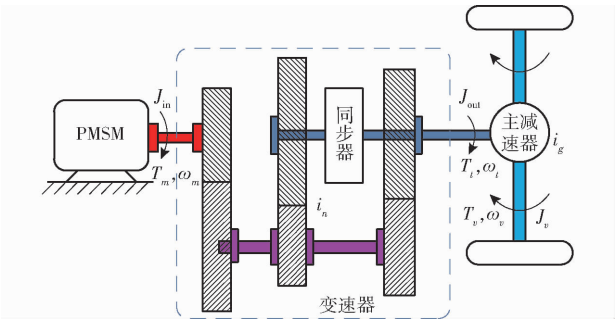

图 1　电动车辆电驱动系统

Fig. 1　Drive system of electric vehicles

动力学方程可表示为

$$\begin{cases} T_t - \dfrac{T_v}{i_g} = J_{\text{out}}\dot{\omega}_t \\ T_m - \dfrac{T_t}{i_n} = J_{\text{in}}\dot{\omega}_m \end{cases} \tag{1}$$

当车辆换挡时，系统处于动力中断状态，此时 $T_t = 0$，并且忽略输入轴自身转动惯量，将 J_{in} 近似等于电机转子上的等效转动惯量 J，则式(1)转换为

$$\begin{cases} -\dfrac{T_v}{i_g} = J_{\text{out}}\dot{\omega}_t \\ T_m = J\dot{\omega}_m \end{cases} \tag{2}$$

换挡过程最终目的是完成换挡时同步器输入端与输出端的转速同步，消除当前挡位与目标挡位的转速差。由于车辆的惯性相对较大，而换挡时间相对较短，因而将同步阶段车速近似于一个常数，PMSM 当前挡位与目标挡位角速度差为

$$\Delta\omega = |\omega_{n+1} - \omega_n| = \left| \frac{v}{R_t}(i_{n+1} - i_n) i_g \right| \tag{3}$$

式中　i_{n+1}——目标挡位变速器传动比

v——车辆行驶速度

R_t——车轮半径

换挡转速同步通过电磁同步和机械同步共同实现，整个换挡过程可分为同步器摘挡、预换挡（电磁同步）和同步器进挡（机械同步）3 部分。通过定义剩余角速度差[$\Delta\omega$]判定何时完成预换挡，进入下一步的机械同步过程。

预换挡过程的控制速度和控制精度对换挡时间和换挡平顺性等换挡品质产生重要影响。选取电机角位移 θ 为自变量，则 $\dot{\theta}$ 为电机角速度，$\ddot{\theta}$ 为电机角加速度，如果采用直轴电流 $i_d = 0$ 的矢量控制方法[24]，基于 PMSM 的 $d-q$ 轴数学模型，把 T_e 作为控制变量，则电磁同步状态下的 PMSM 系统动力学方程可表示为

$$\begin{cases} T_e = J\ddot{\theta} + B_m\dot{\theta} + T_l \\ T_e = \dfrac{3P}{2}\Psi_f i_q \end{cases} \tag{4}$$

式中 T_e——电机电磁转矩

B_m——粘性阻尼系数

T_l——电机负载转矩 P——磁极对数

i_q——矢量控制时交轴上的电流分量

Ψ_f——电机转子磁链

如果将 i_q 作为控制变量,则式(4)可以改写为

$$i_q = \frac{J}{\frac{3P}{2}\Psi_f}\ddot{\theta} + \frac{B_m}{\frac{3P}{2}\Psi_f}\dot{\theta} + \frac{T_l}{\frac{3P}{2}\Psi_f} \tag{5}$$

2 鲁棒控制

2.1 鲁棒控制器设计

对 PMSM 进行了鲁棒控制器设计,使输出角速度在各种模型不确定性及初始条件不相容的情况下尽可能地接近目标跟踪轨迹。控制目标是期望 PMSM 系统按照目标轨迹 $\theta_d(t)$($t \in [t_0, t_1]$),以目标速度 $\dot{\theta}_d(t)$和目标加速度 $\ddot{\theta}_d(t)$运行,并且假设它们最终一致有界。其中 t 为时间,t_0、t_1 分别为初始时间和结束时间。则输出跟踪误差为

$$e(t) = \theta(t) - \theta_d(t) \tag{6}$$

则有

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = \dot{\theta}(t) - \dot{\theta}_d(t) \\ \ddot{e}(t) = \ddot{\theta}(t) - \ddot{\theta}_d(t) \end{cases} \tag{7}$$

令

$$\bar{\boldsymbol{e}}(t) = [e(t) \quad \dot{e}(t)]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

则式(4)可以改写为

$$T_e = J(\ddot{e}(t) + \ddot{\theta}_d(t)) + B_m(\dot{e}(t) + \dot{\theta}_d(t)) + T_l \tag{9}$$

PMSM 系统受到 J、B_m、T_l 等变量参数不确定性的影响,其中 T_l 的不确定性包括前文所述的模型误差和其他外界干扰。为了减少参数不确定性以提高控制性能,引入名义变量 $\hat{J}$、$\hat{B}_m$、$\hat{T}_l$ 分别对实际变量 J、B_m、T_l 进行估计,定义为

$$\begin{cases} \hat{J} = J + \Delta J \\ \hat{B}_m = B_m + \Delta B_m \\ \hat{T}_l = T_l + \Delta T_l \end{cases} \tag{10}$$

其中,$\hat{J}$、$\hat{B}_m$、$\hat{T}_l$ 用来描述相应的不确定性。

对于一个给定的常系数 $S>0$,基于模型不确定性和外部干扰的假定界限,选择一个标量函数 ρ,使得上述模型不确定性及外部干扰包含于函数 $\phi(e, \dot{e}, t)$之中,有如下关系

$$\rho(e, \dot{e}, t) \geqslant \| \phi(e, \dot{e}, t) \| \tag{11}$$

其中

$$\phi = (\hat{J} - J)(\ddot{\theta}_d - S\dot{e}) + (\hat{B}_m - B_m)(\dot{\theta}_d - Se) + \hat{T}_l - T_l \tag{12}$$

函数 $\rho(e, \dot{e}, t)$取决于系统不确定性的假定上界。引入控制增益 $\varepsilon > 0$ 和 $K_p > 0$、$K_v > 0$,控制力矩为

$$T_e = \hat{J}(\ddot{\theta}_d(t) - S\dot{e}(t)) + \hat{B}_m(\dot{\theta}_d(t) - Se(t)) + \hat{T}_l - K_p e(t) - K_v \dot{e}(t) + p(e, \dot{e}, t) \tag{13}$$

其中

$$p(e, \dot{e}, t) = \begin{cases} -\dfrac{\varphi(e, \dot{e}, t)}{\| \varphi(e, \dot{e}, t) \|}\rho & (\| \varphi(e, \dot{e}, t) \| \geqslant \varepsilon) \\ -\dfrac{\varphi(e, \dot{e}, t)}{\varepsilon}\rho & (\| \varphi(e, \dot{e}, t) \| < \varepsilon) \end{cases} \tag{14}$$

$$\varphi(e, \dot{e}, t) = (\dot{e} + Se)\rho(e, \dot{e}, t) \tag{15}$$

对于控制增益而言,ε 综合调节稳态误差与控制代价,通常取值较小,可以通过选取一个极小的 ε 来实现高精度跟踪,但可能由此导致控制输入产生严重颤振。因此,需要权衡控制稳定性与跟踪效果。而 K_p、K_v 分别是比例项与微分项控制增益,其取值可以根据实际模型和控制精度来调整,与传统 PD 控制调试方法一致[21]。

鲁棒控制器结构如图 2 所示,该控制继承了传统 PID 控制和鲁棒控制的优势,兼具误差控制和模型控制的特点。控制器式(13)的前 3 项是名义控制项,而最后一项 p 控制是对不确定性的补偿。分段函数式(14)本质上是一个鲁棒反馈项,用于减弱模型不确定性和外部干扰的影响。在没有 p 控制的情况下,该控制将演变为一种与传统的单纯基于 PD 控制不同的、基于模型和基于误差的 PD 反馈控制。该控制方法使得式(9)一致有界并且最终一致有界。通过适当选择 ε,该最终有界的范围可以达到任意小。

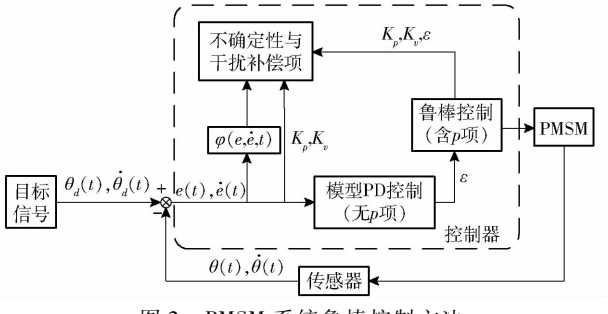

图 2 PMSM 系统鲁棒控制方法

Fig. 2 Robust control method of PMSM system

2.2 控制稳定性

通过 Lyapunov 方法进行控制稳定性证明,选择 Lyapunov 候选函数为

$$V = \frac{1}{2}(\dot{\boldsymbol{e}} + \boldsymbol{S}\boldsymbol{e})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}(\dot{\boldsymbol{e}} + \boldsymbol{S}\boldsymbol{e}) + \frac{1}{2}\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{K}_p + \boldsymbol{S}\boldsymbol{K}_v)\boldsymbol{e} \tag{16}$$

该 Lyapunov 候选函数的合法性以及前文所述控制器的稳定性证明如下。

2.2.1 正定性和递减性

为了证明 V 是一个合法的 Lyapunov 候选函数，需要证明 V 是全局正定且递减的

$$V=\frac{1}{2}[\boldsymbol{e}\quad\dot{\boldsymbol{e}}]\boldsymbol{\Phi}[\boldsymbol{e}\quad\dot{\boldsymbol{e}}]^{\mathrm{T}} \tag{17}$$

其中

$$\boldsymbol{\Phi}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{JS}^2+\boldsymbol{K}_p+\boldsymbol{SK}_v & \boldsymbol{JS}\\ \boldsymbol{JS} & \boldsymbol{J}\end{bmatrix} \tag{18}$$

令 $\breve{\lambda}=\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Phi})$，$\hat{\lambda}=\max(\overline{\boldsymbol{JS}})+\lambda_{\max}(\boldsymbol{\Phi})(\boldsymbol{K}_p+\boldsymbol{SK}_v)$，$\lambda>0$，因为 $\boldsymbol{\Phi}>0$，可得

$$V(\bar{\boldsymbol{e}},t)\geqslant\frac{1}{2}\breve{\lambda}\ \|\bar{\boldsymbol{e}}\|^2 \tag{19}$$

由文献[19]中引理 1 可以证明 V 是一个全局正定函数

$$(\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{Se})^2\leqslant\lambda_{\max}\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}^2 & \boldsymbol{S}\\ \boldsymbol{S} & 1\end{bmatrix}\|\bar{\boldsymbol{e}}\|^2=\overline{\boldsymbol{S}}\ \|\bar{\boldsymbol{e}}\|^2 \tag{20}$$

$$\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{K}_p+\boldsymbol{SK}_v)\boldsymbol{e}\leqslant\lambda_{\max}(\boldsymbol{K}_p+\boldsymbol{SK}_v)\|\bar{\boldsymbol{e}}\|^2 \tag{21}$$

故可得

$$V(\bar{\boldsymbol{e}},t)\leqslant\frac{1}{2}\hat{\lambda}\ \|\bar{\boldsymbol{e}}\|^2 \tag{22}$$

根据文献[19]中引理 2 可以证明 V 是递减函数。综上证明 V 是合法的 Lyapunov 候选函数。

2.2.2 稳定性

利用上述 Lyapunov 候选函数 V 来证明控制器的稳定性。V 沿被控系统式(9)对时间的导数为

$$\begin{aligned}\dot{V}=&(\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{Se})[T_e-J(\ddot{\theta}_d-S\dot{\boldsymbol{e}})-B_m(\dot{\theta}_d-\\&\boldsymbol{Se})-T_l]-(\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{Se})B_m(\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{Se})+\\&\frac{1}{2}(\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{Se})\dot{\boldsymbol{J}}(\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{Se})+\boldsymbol{e}(\boldsymbol{K}_p+\boldsymbol{SK}_v)\dot{\boldsymbol{e}}\end{aligned} \tag{23}$$

$$(\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{Se})p=\begin{cases}-\|\varphi\| & (\|\varphi\|\geqslant\varepsilon)\\ -\dfrac{\|\varphi\|^2}{\varepsilon} & (\|\varphi\|<\varepsilon)\end{cases} \tag{24}$$

因此由式(11)、(24)可得

$$(\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{Se})p+(\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{Se})\phi\leqslant(\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{Se})p+\|\varphi\|\leqslant\frac{\varepsilon}{4} \tag{25}$$

根据式(23)、(25)可得

$$\dot{V}\leqslant-\breve{\lambda}_1|\bar{e}|^2+\frac{\varepsilon}{4} \tag{26}$$

其中

$$\breve{\lambda}_1=\min(\lambda_{\min}(\boldsymbol{K}_p),\lambda_{\min}(\boldsymbol{SK}_v)) \tag{27}$$

其一致有界性如文献[22]所述，即给定任意 $r>0$，有 $\|\bar{\boldsymbol{e}}(t_0)\|\leqslant r$。

定义函数 $d(t)$ 为

$$d(t)=\begin{cases}r\left(\dfrac{2\hat{\lambda}}{\breve{\lambda}}\right)^{\frac{1}{2}} & (r\geqslant R)\\ R\left(\dfrac{2\hat{\lambda}}{\breve{\lambda}}\right)^{\frac{1}{2}} & (r<R)\end{cases} \tag{28}$$

其中

$$R=\left(\frac{\varepsilon}{4\breve{\lambda}_1}\right)^{\frac{1}{2}}$$

对任意 $t\geqslant t_0$ 都有 $\|\bar{\boldsymbol{e}}(t_0)\|\leqslant\bar{d}$，同理可得其最终一致有界性。令

$$\bar{d}=R\left(\frac{2\hat{\lambda}}{\breve{\lambda}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{29}$$

对任意 $t\geqslant t_0+T(\bar{d},r)$，有 $\|\bar{\boldsymbol{e}}(t_0)\|\leqslant\bar{d}$，其中

$$T(\bar{d},r)=\begin{cases}\dfrac{\hat{\lambda}r^2-\frac{1}{2}\breve{\lambda}\bar{R}^2}{\breve{\lambda}_1\bar{R}^2-\frac{\varepsilon}{4}} & (r\geqslant\bar{R})\\ 0 & (r<\bar{R})\end{cases} \tag{30}$$

其中

$$\bar{R}=\left[\frac{\hat{\lambda}}{4}(\breve{\lambda}\bar{d}^2)^2\right]^{-1}$$

综上所述，系统的稳定性得以证明，并且通过适当选择 ε 的取值，可以将 $\bar{d}$ 控制到足够小的范围。由式(28)~(30)可以看出，常系数 S 的选取会影响最终稳定界的大小和到达时间，但是这种影响效果是和其他参数(K_p、K_v)综合作用的结果。

3 计算与仿真

相对于工况较为单一的一般道路车辆，农用车辆田间作业种类繁多，作业负载覆盖范围广[7]，在验证时需考虑其高不确定性特点以模拟农用车辆工况。基于 Matlab 软件进行数值仿真，将前文所述的鲁棒控制与传统 PD 控制进行比较。相关仿真参数的选取参照文献[12]中的实车参数，包括系统名义参数、控制器参数和系统模型不确定性，具体参见表 1~3。农用车辆所受负载变化频繁，并围绕一个均值小幅度波动，为验证电动车辆在负载波动变化工况下的控制效果，根据牵引性能试验确定系统模型不确定性波动范围，根据文献[7]将不确定性幅值假定为名义参数值的 20%，由噪声模拟[14]，如图 3 所示，其余模型不确定性由正弦函数模拟[23]，如表 3 所示。为比较两种控制的效果，在 PD 控制部分两种控制器选择的参数完全相同，控制器的不同之处在于是否含有模型项及 p 项的不确定性补偿。

采用鲁棒控制算法和传统 PD 控制算法进行仿真对比，采用龙格库塔法进行数值计算。

定量比较鲁棒控制下 PMSM 系统的转速响应性能，对转速同步误差进行统计分析对比，引入平均转速同步误差 $\bar{e}$、最大转速同步误差 $e_{\max}$ 和转速同步误差标准差 σ_e，定义为

$$\begin{cases} \bar{e} = \dfrac{1}{600}\sum_{n=1}^{600} |e_n| \\ e_{\max} = \max |e_n| \\ \sigma_e = \sqrt{\dfrac{1}{600}\sum_{n=1}^{600} (e_n - \bar{e})^2} \end{cases} \tag{31}$$

其中,n 是节点数,仿真选取 1 ms 为采样周期,采样时间 $t = \{0, 0.001, \cdots, 0.6\}$ 则 $n = \{1, 2, \cdots, 600\}$。

表 1 系统名义参数

Tab. 1 Nominal parameters of system

参数	数值
J/(kg·m^2)	0.12
B_m/(N·m·min·r^{-1})	0.002
T_l/(N·m)	1
P	4
R_t/m	0.33
Ψ_f/(V·s)	0.31
v/(km·h^{-1})	40
$[\Delta\omega]$/(rad·s^{-1})	2.09
i_n	1.3/2.1
i_g	3.5

表 2 控制器参数(仿真)

Tab. 2 Parameters of controllers

控制方法	控制器参数
PD 控制	$K_p = 5, K_v = 5$
鲁棒控制	$K_p = 5, K_v = 5, \varepsilon = 0.01$

表 3 系统模型不确定性

Tab. 3 System's model uncertainty

不确定性	数值
ΔJ/(kg·m^2)	0.02sin(200t)
ΔB_m/(N·m·min·r^{-1})	0.002sin(200t)
ΔT_l/(N·m)	噪声

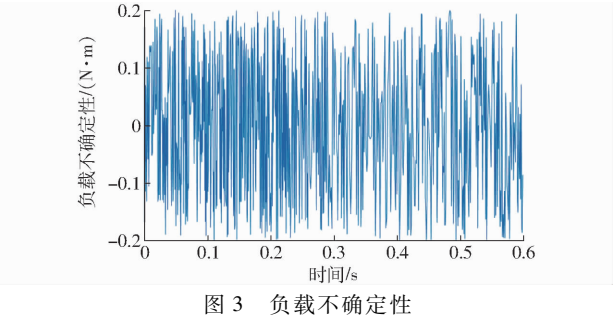

图 3 负载不确定性

Fig. 3 PMSM's speed synchronizing performance

PMSM 响应转速曲线如图 4 所示,两种控制方法都能达到预期的速度,而鲁棒控制可以提供较小稳态误差和较好的动态响应性能。图 5 及表 4 显示了两种控制的同步误差对比,可以看出,鲁棒控制的峰值误差与稳态误差均明显低于传统 PD 控制。由表 4 可以看出,鲁棒控制同步误差的各统计参数均具有明显优势。

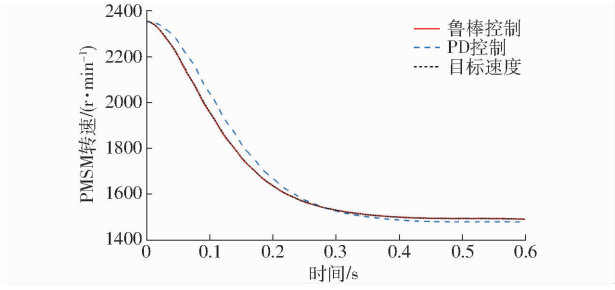

图 4 PMSM 转速同步性能

Fig. 4 PMSM's speed synchronizing performance

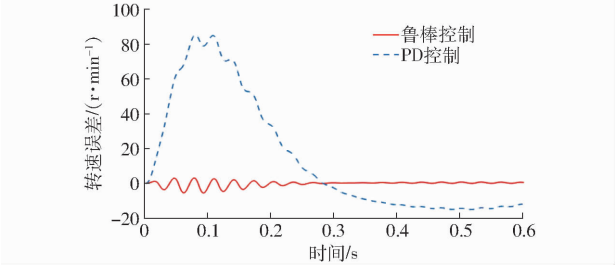

图 5 转速同步误差

Fig. 5 Speed synchronizing error

表 4 同步误差统计分析对比

Tab. 4 Statistical analysis and comparison of synchronizing error r/min

控制方法	$\bar{e}$	$e_{\max}$	σ_e
PD 控制	29.74	85.43	27.10
鲁棒控制	1.14	5.84	1.43

图 6、7 为两种控制的控制力矩和控制电流对比,可以看出两种控制器的控制输入相差不大。由于实际系统的各种环境不确定性和模型不确定性,控制设计中需要解决初始条件不相容的问题。图 8、9 为两种控制在初始条件不相容情况下的控制效果,可以看出,鲁棒控制仍然具有更好的转速同步效果和更小的同步误差。

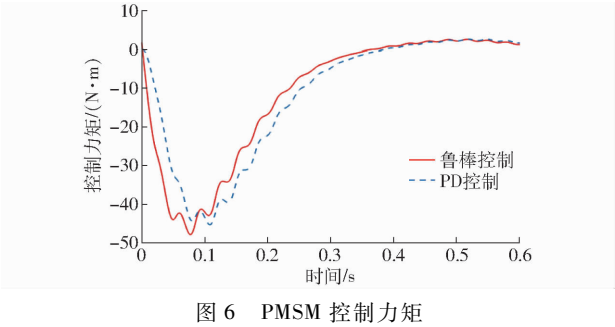

图 6 PMSM 控制力矩

Fig. 6 Control torque of PMSM

通过以上数值仿真和分析,可以初步认为含有 p 项的鲁棒控制比不含 p 项的传统 PD 控制具有更好的控制性能。

4 试验

为进一步验证鲁棒控制器的有效性,搭建

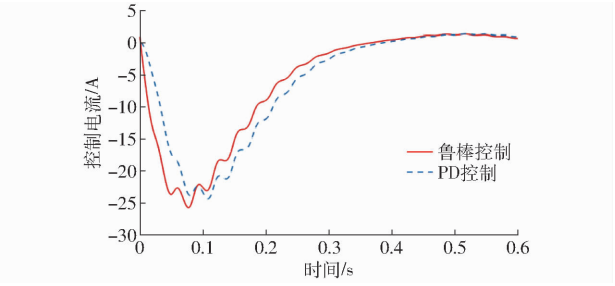

图 7　PMSM 控制电流

Fig. 7　Control current of PMSM

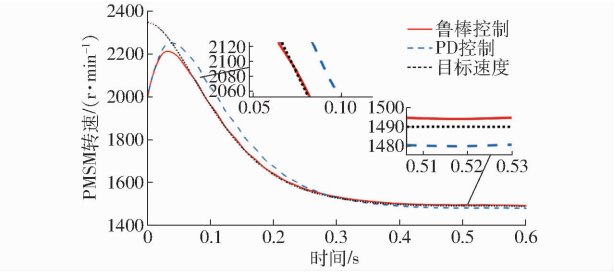

图 8　初始条件不相容情况下转速同步性能

Fig. 8　PMSM's speed synchronizing performance with initial condition deviation

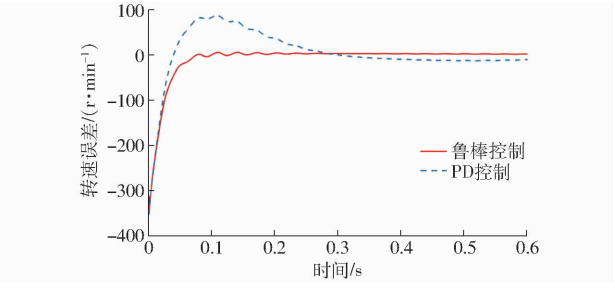

图 9　初始条件不相容情况下转速同步误差

Fig. 9　PMSM's speed synchronizing error with initial condition deviation

PMSM 系统试验台如图 10 所示。试验台由伺服电机平台(图 10a)、cSPACE 驱动控制器(图 10b)和装有控制软件的上位机(图 10c)组成,其中伺服电机平台由负载直流电机、联轴器及装有光电编码器的 PMSM 组成。驱动控制板接收来自光电编码器的 PMSM 旋转角度位置信息,并利用功率管驱动 PMSM 工作,负载直流电机提供可调节的负载。采用直轴电流 $i_d=0$ 的矢量控制方法进行嵌套双闭环控制[24],电流控制环采用 PI 控制,PMSM 控制器速度控制环采用前文所述的鲁棒控制。通过采集相电流实现电流闭环,通过转子位置信号计算出当前速度信号作为图 2 中的传感器负反馈信号,实现速度闭环。

由于传统控制器通常采用串行开发模式,即首先进行功能定义,然后进行硬件设计,使用 C 语言等进行代码编写,完成软硬件及外部接口集成,最后进行系统试验。本试验平台采用 cSPACE 快

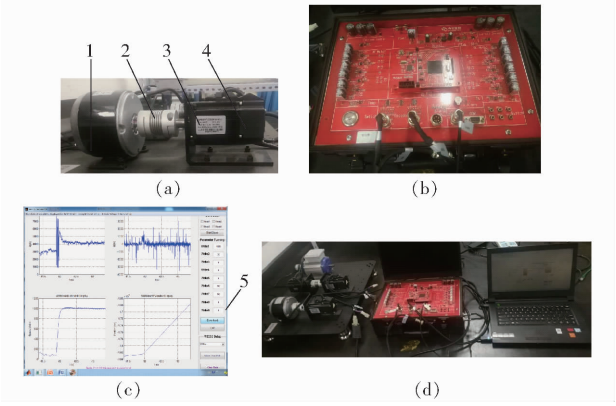

图 10　PMSM 伺服控制试验台

Fig. 10　PMSM servo control test platform

1. 负载直流电机　2. 联轴器　3. PMSM　4. 光电编码器　5. 上位机软件界面

速控制原型开发系统为开发平台提供了一种高效的实时控制算法系统。通过 Matlab/Simulink 软件及控制板产生控制信号,由电机驱动板卡对 PMSM 进行实时控制及系统校验。由于 cSPACE 在 Matlab 环境的基础上开发,与仿真软件一致,整个开发周期无缝集成到单一 Matlab 环境,使得仿真和测试之间的各个开发阶段可以直接运行并重复调试,无需频繁调整。

试验步骤如下:

(1)利用 Matlab/Simulink 软件实现 PMSM 模型和控制器的建模,并参照实物选取相关参数。

(2)结合 cSPACE 硬件接口获得图形化编程模块,并自动生成代码由 USB 接口下载到驱动控制板中,利用功率管驱动 PMSM 工作。

(3)通过上位机接口观察试验结果,并在线调试变量参数。

(4)利用上位机采集数据,利用 Matlab 的各项功能对数据进行分析处理。

相关试验参数参见表 5、6。目标速度轨迹与仿真一致。两种控制器的 PD 参数保持一致,而不同之处在于是否含有模型项及 p 项的不确定性补偿。为验证控制器的鲁棒性能,在负载直流电机上分别加载恒定载荷和时变负载(正弦负载),图 11 ~ 14 为试验结果。对预换挡过程中的转速响应进行局部放大,图 11、12 为两种负载下鲁棒控制和 PD 控制下的转速同步性能。试验运用直轴电流 $i_d=0$ 的矢量控制方法,将 i_q 作为控制输入,图 13、14 为两种负载下两种控制的控制电流。从图中可以看出,不论是恒定负载还是时变负载,鲁棒控制相对于 PD 控制都能更加快速精确地进行速度收敛,且在稳态下具有更好的跟踪效果。参考仿真部分对同步性能参数进行统计分析处理,如表7所示,可以看出,不

表 5 试验参数

Tab. 5 Test parameters of system

参数	数值
$J/(\mathrm{kg\cdot m^2})$	1.9×10^{-5}
$B_m/(\mathrm{N\cdot m\cdot min\cdot r^{-1}})$	0.03
$T_l/(\mathrm{N\cdot m})$	0.6
P	4
R/m	0.33
$\Psi_f/(\mathrm{V\cdot s})$	0.31
$v/(\mathrm{km\cdot h^{-1}})$	40
$[\Delta\omega]/(\mathrm{rad\cdot s^{-1}})$	2.09

表 6 控制器参数(试验)

Tab. 6 Parameters of controllers

控制方法	控制器参数
PD 控制	$K_p=0.5, K_v=0.2$
鲁棒控制	$K_p=0.5, K_v=0.2, \varepsilon=0.01$

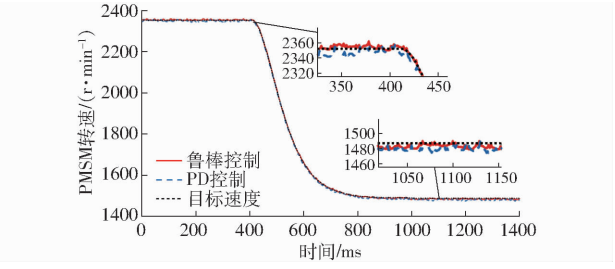

图 11 恒定负载下 PMSM 转速同步性能

Fig. 11 PMSM's speed synchronizing performance with constant load

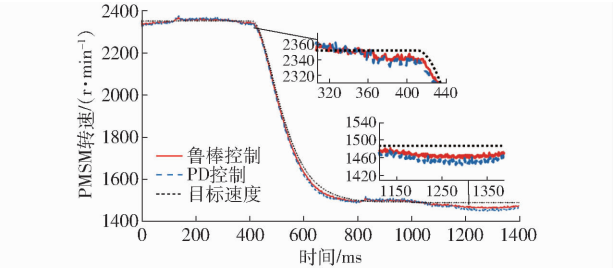

图 12 时变负载下 PMSM 转速同步性能

Fig. 12 PMSM's speed synchronizing performance with time-varying load

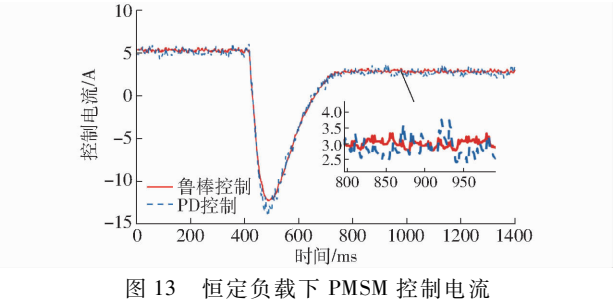

图 13 恒定负载下 PMSM 控制电流

Fig. 13 Control current of PMSM with constant load

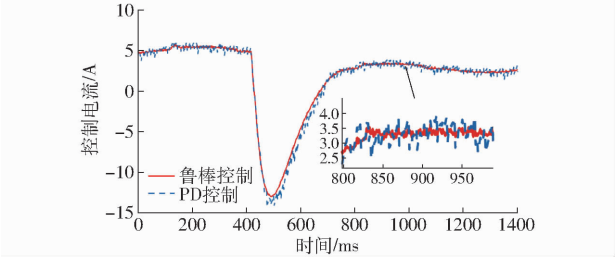

图 14 时变负载下 PMSM 控制电流

Fig. 14 Control current of PMSM with time-varying load

表 7 同步误差统计分析对比(试验)

Tab. 7 Statistical analysis and comparison of synchronizing error r/min

控制方法(负载)	$\bar{e}$	$e_{\max}$	σ_e
PD 控制(恒定)	6.16	15.61	3.26
鲁棒控制(恒定)	3.08	10.98	2.24
PD 控制(时变)	18.78	39.56	11.37
鲁棒控制(时变)	12.53	22.81	7.55

论是对于恒定负载还是时变负载,鲁棒控制相对于 PD 控制都具有更优的结果。同时,鲁棒控制器的控制电流输入峰值略有减小并且整体更加平滑,有利于降低功率变换器的负担,同时有利于电动车辆电路系统维护。试验结果表明鲁棒控制器具有更好的速度跟踪控制性能。

5 结论

(1)提出了一种 PMSM 速度同步非线性鲁棒控制算法,从传统 PD 控制和鲁棒控制两个方面分析了其误差控制和模型控制。针对农用车辆工作条件不稳定、负载扰动大等特点,将模型不确定性和外部干扰集中到一个具有假定上限的函数,并进行了鲁棒补偿控制。

(2)基于 Lyapunov 方法从理论上分析了控制的稳定性,证明其具有一致有界性和最终一致有界性。

(3)通过数值仿真验证了一般情况和初始条件不相容情况下的速度同步效果,并通过台架试验进一步验证恒定负载及时变负载下的同步性能。结果表明,对于同一 PMSM 目标转速轨迹,在相同 PD 控制参数条件下,鲁棒控制器的仿真转速同步误差平均值与标准差均具有明显优势,在台架试验中优于传统 PD 控制 30% 以上。

参 考 文 献

[1] 张铁民,闫国琦,温利利,等. 我国电动力农业机械发展现状与趋势[J]. 农机化研究,2012,34(4):236 - 240.
ZHANG Tiemin, YAN Guoqi, WEN Lili, et al. Current situation and development of electric agricultural machinery in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(4): 236 - 240. (in Chinese)

[2] KUMAR L, JAIN S. Electric propulsion system for electric vehicular technology: a review [J]. Renewable and Sustainable

Energy Reviews, 2014, 29: 924 – 940.
[3] CHAN C. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(4): 704 – 718.
[4] 陈黎卿,谭雨点,吴荣,等.基于遗传算法的电动四驱汽车轴间扭矩分配控制策略[J/OL].农业机械学报,2017, 48(7): 361 – 367.
CHEN Liqing, TAN Yudian, WU Rong, et al. Torque distribution control strategy of electronically controlled four-wheel drive axle based on genetic algorithm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 361 – 367. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170746&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.046. (in Chinese)
[5] 王丽绵,王书茂,宋正河.增程式电动拖拉机控制策略与启动方法研究[J/OL].农业机械学报, 2018,49(增刊):486 – 491.
WANG Limian, WANG Shumao, SONG Zhenghe. Control strategy and startup method of extended range electric tractors [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 486 – 491. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2018s066&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.066. (in Chinese)
[6] KIM Yongjoo, SONG Bongsob, KIM Jinho. Load torque estimation for a parallel hybrid agricultural tractor in field operations [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(10): 1865 – 1868.
[7] 李同辉,谢斌,宋正河,等.电动拖拉机双电机耦合驱动系统传动特性研究[J/OL].农业机械学报,2019,50(6):379 – 388.
LI Tonghui, XIE Bin, SONG Zhenghe, et al. Transmission characteristics of dual-motor coupling system for electric tractors [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 379 – 388. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190645&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.045. (in Chinese)
[8] 陈泳丹,梁万武,席军强,等.电动客车 AMT 换挡过程控制策略的研究[J].汽车工程,2011(5):405 – 410.
CHEN Yongdan, LIANG Wanwu, XI Junqiang, et al. A study on the control strategy for the gear shifting of AMT in a electric bus[J]. Automotive Engineering, 2011(5): 405 – 410. (in Chinese)
[9] LIU H, LEI Y, LI Z, et al. Gear-shift strategy for a clutchless automated manual transmission in battery electric vehicles [J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2012, 5(1): 57 – 62.
[10] 林树森.基于直接驱动的机械式自动变速器换挡控制技术研究 [D].南京:南京理工大学,2013.
LIN Shusen. Research on gearshift control for a direct-drive automated mechanical transmission [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
[11] 程潇骁.电机变速器耦合系统换挡过程动力学建模与控制策略研究 [D].北京:清华大学,2014.
CHENG Xiaoxiao. Dynamics modeling and control strategy for the shifting process of coupled motor-transmission system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
[12] WANG Xiangyu, LI Liang, HE Kai, et al. Position and force switching control for gear engagement of automated manual transmission gear-shift process[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2018, 140(8): 1010.1 – 1010.9
[13] ZHANG H, SHI Y, MU B. Optimal H∞-based linear-quadratic regulator tracking control for discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems with preview actions[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2013, 135(4): 044501.
[14] 祝小元.纯电动车驱动系统鲁棒控制与状态估计研究[D].西安:西北工业大学,2015.
ZHU Xiaoyuan. Robust control and state estimation of e-drive system for pure electric vehicles [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015. (in Chinese)
[15] LI X P, CHANG B C, BANDA S. Robust control systems design using H∞ optimization theory [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1992, 2: 1975 – 1980.
[16] PACKARD A, DOYLE J, BALAS G. Linear multivariable robust control with a perspective [J]. ASME Transactions on Systems, Measurement and Control, 1993, 115(2B): 426 – 438.
[17] BARTLETT A C, TESI A, VICINO A. Vertices and segments of interval plants are not sufficient for step response analysis [J]. System and Control Letters, 1992, 19(5): 365 – 370.
[18] CHEN Yehua, LEITMANN G. Robustness of uncertain systems in the absence of matching assumptions [J]. International Journal of Control, 1987, 45(5): 1527 – 1542.
[19] ZHEN Shengchao, ZHAO Han, CHEN Yehua, et al. A new Lyapunov based robust control for uncertain mechanical systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(5): 875 – 882.
[20] 沈文龙,周俊,姬长英,等.中国电动拖拉机研究进展[J].中国农机化学报, 2017,38(10):102 – 106.
SHEN Wenlong, ZHOU Jun, JI Changying, et al. Research review about electric tractor in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(10): 102 – 106. (in Chinese)
[21] COMINOS P, MUNRO N. PID controllers: recent tuning methods and design to specification [J]. IEEE Proceedings of Control Theory Applications, 2002, 149: 46 – 53.
[22] CORLESS M J, LEITMANN G. Continuous state feedback guaranteeing uniform ultimate boundedness for uncertain dynamic systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1981, 26(5): 1139 – 1144.
[23] SUN Hao, CHEN Yehua, ZHAO Han. Adaptive robust control methodology for active roll control system with uncertainty[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 92(2): 359 – 371.
[24] 刘姗梅.永磁同步电机伺服系统控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2007.
LIU Shanmei. Research on control strategies of PMSM sorvo system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
[25] 张琰,赵韩,黄康,等.基于 Udwadia – Kalaba 理论的自动离合器位置跟踪控制[J].汽车工程, 2018(4): 52 – 59.
ZHANG Yan, ZHAO Han, HUANG Kang, et al. Position tracking control of automatic clutch based on Udwadia – Kalaba theory [J]. Automotive Engineering, 2018(4): 52 – 59. (in Chinese)