基于模糊STSM-LADRC的EMC测试装备控制策略研究*

刘璇[1] 荆阳[1] 刘玉卿[1] 张小俊[1] 马鸣[2]

（1.河北工业大学机械工程学院，天津 300401；2.中国汽车技术研究中心工程院，天津 300300）

【摘要】针对汽车转向系统电磁兼容性（EMC）测试装备在复杂环境中的强鲁棒性要求，提出一种融合模糊控制与超螺旋滑模算法的自抗扰控制策略。在线性自抗扰控制基础上，将超螺旋滑模算法引入扩张状态观测器及误差反馈控制律中，提升了系统的动态响应与抗干扰能力，并结合模糊控制实时优化关键参数。MATLAB仿真表明，该方法较传统线性自抗扰控制响应更快、抗干扰能力更强。此外，为应对复杂的EMC环境，设计了改进型电源滤波器以抑制噪声。最终，EMC暗室试验验证了所设计的装备具有高测试精度与强鲁棒性，能够满足车辆转向系统的测试需求。

主题词：电磁兼容性 测试装备 自抗扰控制 超螺旋滑模算法 EMC暗室试验

中图分类号：U467.4 **文献标志码：**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20250419

Research on Control Strategy of EMC Test Equipment Based on Fuzzy STSM-LADRC

Liu Xuan[1], Jing Yang[1], Liu Yuqing[1], Zhang Xiaojun[1], Ma Ming[2]

（1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401; 2. Academy of Engineering, China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300）

【Abstract】To address the stringent robustness requirements of electromagnetic compatibility (EMC) test equipment for automotive steering systems in complex environments, this paper proposes a novel active disturbance rejection control strategy that integrates fuzzy control with a super-twisting sliding mode algorithm. Building upon the linear active disturbance rejection control framework, the super-twisting sliding mode algorithm is incorporated into both the extended state observer and the error feedback control law, thereby enhancing the system's dynamic response and disturbance rejection capability. Furthermore, fuzzy control is employed to dynamically optimize key parameters in real time. Matlab simulations demonstrate that the proposed method achieves faster response and stronger anti-interference performance compared to traditional linear active disturbance rejection control. Additionally, to cope with complex EMC environments, an improved power filter is designed to suppress noise. Finally, EMC anechoic chamber tests validate that the developed equipment exhibits high testing accuracy and strong robustness, meeting the testing requirements for vehicle steering systems.

Key words: Electromagnetic compatibility, Test equipment, Active disturbance rejection control, Super-twisting sliding mode control, EMC anechoic chamber test

【引用格式】刘璇, 荆阳, 刘玉卿, 等. 基于模糊STSM-LADRC的EMC测试装备控制策略研究[J]. 汽车技术, 2026(4): 54-62.

LIU X, JING Y, LIU Y Q, et al. Research on Control Strategy of EMC Test Equipment Based on Fuzzy STSM-LADRC[J]. Automobile Technology, 2026(4): 54-62.

1 前言

汽车电子架构日益复杂，电磁兼容性已成为关乎汽车功能安全的核心指标。国家强制标准《汽车转向系基本要求》对转向系统的电磁兼容性作出了严格约束，规定当转向力矩恒定时，转向盘在无电磁干扰和有电磁干扰下两次转角误差应小于10%[1-2]。为避免人工操作的不确定性及辐射风险，有必要对车辆转向系统电磁兼容

*基金项目：国家重点研发计划（2022YFB4701104）；国家自然科学基金重点项目（U1913211）。

通信作者：刘璇（1980—），博士，副教授，主要研究方向为特种机器人，xuaner1007@163.com。

性（Electromagnetic Compatibility，EMC）测试装备开展研究。

作为转向测试装备的核心部件，永磁同步电机因其强耦合和非线性时变的特性，存在控制复杂、参数整定困难等问题[3-6]。自抗扰控制器通过观测器对系统总扰动进行估计和补偿，提高了控制系统的稳定性[7]。但是传统的自抗扰控制包含非线性函数，致使参数调节困难[8]。MUNOZ[9]提出线性自抗扰控制（Linear Disturbance Rejection Control，LADRC），降低了参数整定难度。然而传统的线性自抗扰控制难以兼顾快速动态响应与鲁棒性，常表现为响应时间长、抗扰能力不足[10]。

肖芳[11]和Qu[12]将滑模控制引入误差反馈控制律中，后者还结合观测器的结果动态调整滑模控制的控制律，增强了系统鲁棒性。然而，滑模控制固有的抖振特性在一定程度上影响了系统控制的平稳性[13-14]。超螺旋滑模（Super Twisting Sliding Mode，STSM）通过二阶滑模结构生成连续控制量，有效克服了传统滑模的抖振缺陷[15]。Hu[16]将超螺旋滑模算法引入非线性状态误差反馈控制律中，提高了系统的鲁棒性，降低了系统抖振。陈德海[17]利用超螺旋滑模算法改进自抗扰控制中的跟踪微分器和状态误差反馈控制律，提高了系统的响应速度，降低了系统的转矩脉动。

现有研究在应对复杂EMC环境时仍显不足，对自抗扰控制的改进多采用静态参数，难以适应强电磁干扰环境。因此，为提升转向测试装备在EMC环境下的测试精度，引入超螺旋滑模算法来改善线性自抗扰控制中的误差反馈控制律和扩张状态观测器，并通过模糊控制实现对控制器关键参数的实时自适应整定，以应对EMC环境下参数适应性问题。同时，针对EMC环境下的电磁干扰，设计了适配的滤波器进行噪声抑制。最后，通过EMC暗室试验验证所设计的转向测试装备在复杂电磁环境下的测试精度。

2 驱动电机模型建立

2.1 基本数学模型建立

转向测试装备对驱动电机的动态响应、转矩控制精度及运行平稳性有较高的要求。为满足这些要求，采用三相永磁同步电机作为其驱动电机，由于三相绕组工作过程中会和转子形成相互作用的磁动势，两者磁场空间位置的变化导致了复杂的耦合关系，因此为更精确地研究三相永磁同步电机数学模型，假设电机为理想电机[18]，则定子电压方程为：

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} - \omega_m L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} - (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \tag{1}$$

式中：i_d、i_q、u_d、u_q分别为电机d-q轴的电流和电压，R为电机定子绕组电阻，ω_m为电机转子角速度，L_d、L_q分别为d-q轴的电感，ψ_f为永磁体的磁链。

因此电机的转矩方程表达式为：

$$T_e = \frac{3P}{2} i_q\left[\psi_f + i_d(L_d - L_q)\right] \tag{2}$$

式中：T_e为电磁转矩，P为电机的极对数。

永磁同步电机运动学方程为：

$$T_e - T_N - B\omega_m = J\frac{\mathrm{d}\omega_m}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中：T_N为负载干扰力矩，B为摩擦因数，J为电机的转动惯量。

2.2 控制策略

针对永磁同步电机非线性强耦合的数学模型，利用矢量控制进行解耦，并在解耦模型基础上采用i_d=0控制，将i_d=0代入式（2），并联立式（2）和式（3），可得永磁同步电机的运动方程为：

$$\dot{\omega} = -\frac{1}{J}(T_N + B\omega_m) + \frac{3}{2}Pi_q\psi_f \tag{4}$$

永磁同步电机伺服系统采用位置环、速度环和电流环构成的三闭环控制策略。其原理如图1所示。

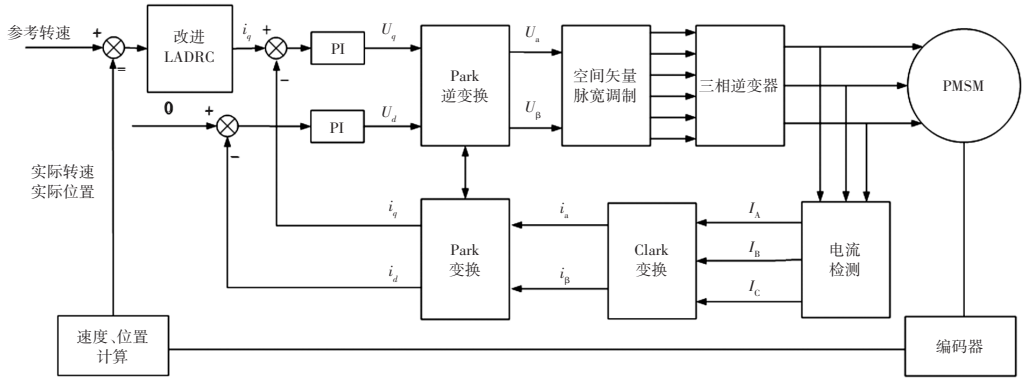


图1 PMSM矢量控制系统原理

3 控制器设计

3.1 线性自抗扰控制器

线性自抗扰控制器由线性跟踪微分器(Linear Tracking Differentiator，LTD)、线性扩张状态观测器(Linear Extended State Observer，LESO)以及线性误差反馈控制律(Linear States Error Feedback，LSEF)3部分组成。

线性跟踪微分器(LTD)：

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - \omega^* \\ \dot{v}_1 = -re_1 \end{cases} \tag{5}$$

式中：e_1为跟踪误差，v_1为电机转速的跟踪值，ω^*为电机转速的参考值，r为速度因子。

线性扩张状态观测器(LESO)：

$$\begin{cases} e_2 = z_1 - \omega \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e_2 + bu \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 e_2 \end{cases} \tag{6}$$

式中：e_2为转速的误差值，ω为电机转速，z_1为对电机转速的观测值，z_2为对扰动的观测值，β_1、β_2为观测器的误差校正增益，b为常数。

线性反馈误差跟踪律(LSEF)：

$$\begin{cases} e_3 = v_1 - z_1 \\ u_1 = ke_3 \\ u = (u_1 - z_2)/b \end{cases} \tag{7}$$

式中：u_1为线性反馈输出，u为LSEF的输出，e_3为LSEF的误差信号，k为比例增益系数。

一阶LADRC的结构图如图2所示。

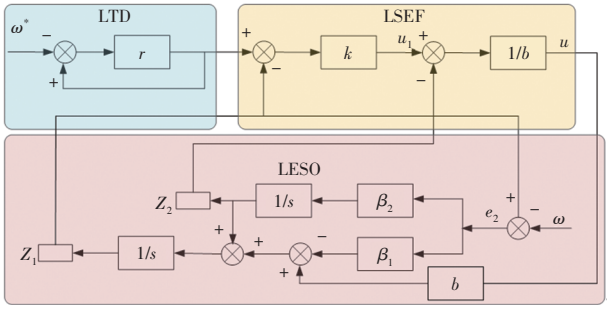


图2 一阶LADRC结构

3.2 超螺旋滑模控制

由于线性控制器无法完全适应非线性系统的动态响应，致使系统无法快速到达稳定状态，进而增加系统响应时间[19]。因此引入超螺旋滑模控制算法以改善传统LADRC的性能。

设滑模面$s=y-y^*$，则超螺旋滑模控制算法的表达式为：

$$\begin{cases} u = -k_1 |s|^r \operatorname{sign}(s) + u_s \\ \dot{u}_s = -k_2 \operatorname{sign}(s) \end{cases} \tag{8}$$

式中：k_1和k_2为增益系数，其中k_1主要影响系统的收敛速度，k_2影响滑模面到达的平滑性和系统抖振；r通常取0.5；u和u_s为状态变量。

由于符号函数的不连续性，将导致输入产生突变，进而引起系统的抖振现象[20]。因此，采用双曲正切函数减小系统抖振，提高控制器性能。

双曲正切函数表达式为：

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \tag{9}$$

图3为符号函数和双曲正切函数图像。由图3可知，相较于符号函数，双曲正切函数连续性更强，不会发生突变。当经过饱和区后，函数值的变化速率会减缓，能有效降低控制信号的振荡。

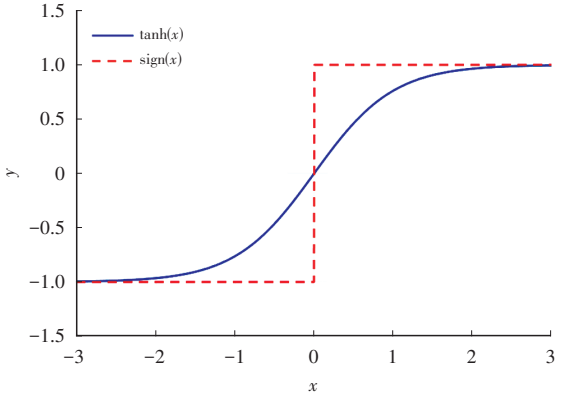


图3 符号函数和双曲正切函数图像

引入饱和函数的超螺旋滑模控制表达式为：

$$\begin{cases} u = -k_1 |s|^r \tanh(s) + u_s \\ \dot{u}_s = -k_2 \tanh(s) \end{cases} \tag{10}$$

3.3 改进线性扩张状态观测器

扩张观测器的作用是对系统的总扰动进行观测和补偿，引入超螺旋滑模算法来跟踪转速误差信号可以使误差快速收敛到零，进而提高系统的观测性能。

定义误差的滑模面为：

$$\begin{cases} s_1 = z_1 - \omega \\ s_2 = \dot{z}_1 - \dot{\omega} \end{cases} \tag{11}$$

根据超螺旋滑模控制算法可以得到：

$$\begin{cases} u = -k_1 |s_1|^r \tanh(s_1) + u_s = \dot{s}_1 \\ \dot{u}_s = -k_2 \tanh(s_1) = \dot{s}_2 \end{cases} \tag{12}$$

联立式(6)和式(12)可以得到超螺旋滑模-线性扩张状态观测器(Super Twisting Sliding Mode-Linear Etended State Observer，STSM-LESO)表达式为：

$$\begin{cases} s_1 = z_1 - \omega \\ \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1 [-k_1 |s_1|^r \tanh(s_1) + u_s] + bu \\ \dot{z}_2 = \beta_2 [-k_1 |s_1|^r \tanh(s_1) + u_s] \\ \dot{u}_s = -k_2 \tanh(s_1) \end{cases} \tag{13}$$

引入超螺旋滑模控制后的STSM-LESO如图4所示。

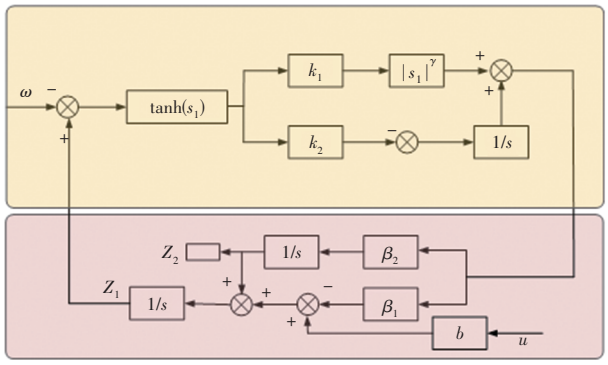


图4　STSM-LESO结构

对该系统进行稳定性分析，设d为系统总扰动，并假设系统扰动有界。STSM-LESO的误差动态方程为：

$$\begin{cases}\dot{s}_1 = e_d - \beta_1(k_1|s_1|^{0.5} + k_2)\tanh(s_1)\\ \dot{e}_d = -\beta_2(k_1|s_1|^{0.5} + k_2)\tanh(s_1) + d\end{cases} \tag{14}$$

式中：e_d为转速跟踪误差。

令$\eta = e_d - \beta_1 k_2|s_1|^{0.5}\tanh(s_1)$，

构造李雅普诺夫函数：

$$\boldsymbol{V} = \boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi} \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{P} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix}4k_2 + k_1^2 & -k_1\\ -k_1 & 2\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{P}>0$，$\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix}|s|^{0.5}\tanh(s_1)\\ \eta\end{bmatrix}$。

对李雅普诺夫函数求导，并代入式(14)可得：

$$\dot{\boldsymbol{V}} = \dot{\boldsymbol{\xi}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\dot{\boldsymbol{\xi}} \tag{16}$$

将式(14)代入并化简，可得：

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \begin{bmatrix}\frac{1}{2}|s_1|^{-1/2}\eta - \frac{1}{2}\beta_1 k_1\tanh(s_1)\\ d - \beta_2 k_1|s_1|^{1/2}\tanh(s_1) - \beta_2 k_2\tanh(s_1)\end{bmatrix} \tag{17}$$

将式(17)代入式(16)，可得：

$$\dot{\boldsymbol{V}} = -\frac{1}{|s_1|^{1/2}}\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\xi} \tag{18}$$

式中：$\boldsymbol{Q} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix}\beta_1 k_1^2 & 0\\ 0 & \beta_1 k_1\end{bmatrix}$，当$k_1>0$、$\beta_1>0$时，$\boldsymbol{Q}$正定，此时$\dot{\boldsymbol{V}}<0$。

因此，当$k_1>0$、$k_2>0$、$\beta_1>0$、$\beta_2>0$时，系统稳定。

3.4　改进线性误差反馈控制律

在设计线性状态误差反馈控制律时，过大的设计偏差将引起系统超调、振荡，进而削弱系统的稳定性和鲁棒性。利用超螺旋滑模控制鲁棒性好、响应快的优势，可以有效改善系统性能。

定义滑模面为：

$$\begin{cases}e_1 = z_2 - z_1\\ e_2 = \dot{z}_2 - \dot{z}_1\end{cases} \tag{19}$$

可得：

$$\begin{cases}u = -k_3|s|^r\tanh(e_1) + u_s = \dot{e}_1\\ \dot{u}_s = -k_4\tanh(e_1) = \dot{e}_2\end{cases} \tag{20}$$

式中：k_3、k_4为增益系数，k_3影响系统的收敛速度，k_4影响系统的平稳性。

可以得到超螺旋滑模-线性误差反馈控制律(Super Twisting Sliding Mode-Linear States Error Feedback，STSM-LSEF)表达式为：

$$\begin{cases}e_1 = z_2 - z_1\\ u_1 = -k_3|e_1|^r\tanh(e_1) + u_s\\ \dot{u}_s = -k_4\tanh(e_1)\\ u = (u_1 - z_2)/b\end{cases} \tag{21}$$

引入超螺旋滑模控制后的线性误差反馈控制律结构图如图5所示。

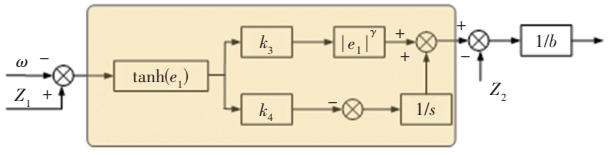


图5　STSM-LSEF结构

对该系统进行稳定性分析，定义李雅普诺夫函数为：

$$V = k_4|e_1| + \frac{1}{2}e_2^2 \tag{22}$$

对李雅普诺夫函数求导可得：

$$\dot{V} = k_4\tanh(e_1)\left(e_2 - k_3|e_1|^{\frac{1}{2}}\tanh(e_1)\right) + e_2(-k_4\tanh(e_1))$$
$$= -k_3k_4|e_1|^{\frac{1}{2}} < 0 \tag{23}$$

因此，在$\dot{V}<0$时，存在$k_3>0$、$k_4>0$，使系统在有限时间内达到稳定。

超螺旋滑模-线性自抗扰控制(Super Twisting Sliding Mode-Linear Disturbance Rejection Control，STSM-LADRC)结构如图6所示。

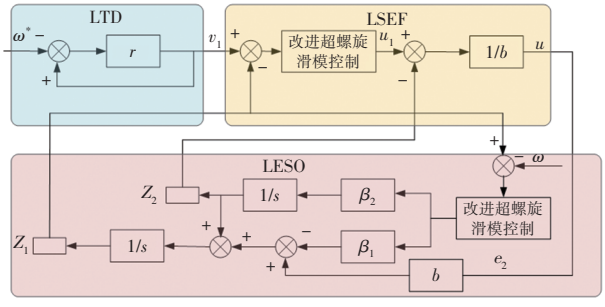


图6　STSM-LADRC结构

3.5　模糊-超螺旋滑模-线性自抗扰控制器

线性自抗扰控制器的控制效果受参数设置的影响，

将参数设置为常数无法适应状态误差的变化进而降低控制系统的动态响应特性。为进一步提高控制器的性能，使其能满足EMC环境下的抗扰要求，引入模糊控制实现自抗扰参数在线自适应调整。设计模糊-超螺旋滑模-线性自抗扰控制器（FUZZY-STSM-LADRC）。以系统的误差信号e及其导数e_c作为模糊控制器的输入，以自抗扰控制器中的$\Delta\beta_1$和$\Delta\beta_2$作为输出。其控制策略如图7所示。

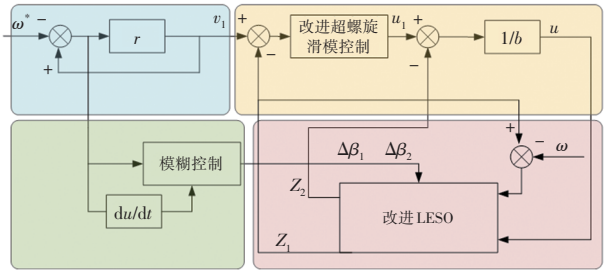


图7　FUZZY-STSM-LADRC控制器结构

隶属度函数选择三角形函数，输入e和e_c的论域设定为[-8,8]，输出$\Delta\beta_1$和$\Delta\beta_2$的论域设定为[-500,+500]和[-300,+300]。根据模糊控制原理，补偿控制器参数为：

$$\begin{cases}\beta_1 = \beta_{01} + \Delta\beta_1 \\ \beta_2 = \beta_{02} + \Delta\beta_2\end{cases} \tag{24}$$

式中：β_{01}、β_{02}为参数的初始值，$\Delta\beta_1$、$\Delta\beta_2$为参数的调整值。

模糊规则使用7个隶属函数，分别为NB（负大）、NM（负中）、NS（负小）、ZO（零）、PS（正小）、PM（正中）和PB（正大），根据被控系统特性和控制器参数的调节规律，得到$\Delta\beta_1$和$\Delta\beta_2$的模糊控制规则如表1、表2所示。

表1　$\Delta\beta_1$模糊控制规则

s	$\dot{s}$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

3.6　系统仿真

在MATLAB/Simulink环境中建立PMSM控制系统的仿真模型，分别搭建LADRC、STSM-LADRC和FUZZY-STSM-LADRC系统进行比较分析。

电机参数如表3所示，控制器参数如表4所示。

表2　$\Delta\beta_2$模糊控制规则

s	$\dot{s}$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	PS	PM	PS	NS
ZO	PS	PM	PS	ZO	PM	NM	NS
PS	NS	PS	PS	NS	PM	NM	NM
PM	PM	ZO	NS	NM	PB	PB	PB
PB	PB	ZO	NM	NM	PB	PB	PB

表3　电机参数

参数名称	数值
永磁体磁链/Wb	0.18
阻尼系数/N·m·s	0.007
转子惯量/kg·m^2	0.002
定子电阻/Ω	0.62
极对数	4
电感/mH	2.61

表4　控制器参数

参数名称	数值
k_1	1 000
k_2	6
k_3	800
k_4	10
β_1	4 200
β_2	1 600
b	3 000

仿真时模拟手动转动转向盘的速度，设定转速为45 r/min，在t=0.15 s时突加大小为3 N·m的干扰负载，图8所示是采用不同控制方法进行仿真得到的电机转速对比结果，表5所示为3种控制方法的动态性能数据。

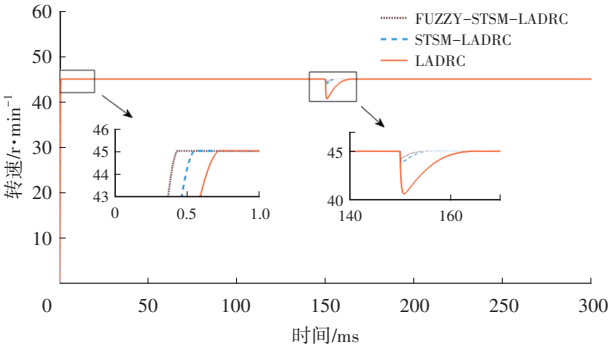


图8　3种控制方式电机速度响应曲线

图8和表5可知，在电机启动阶段，3种控制方法均未出现超调现象且能快速达到稳定状态。采用线性

自抗扰控制时，启动阶段的响应时间为0.66 ms，受到负载扰动后转速下降约4.4 r/min，并在14.5 ms后重新达到稳定；采用超螺旋滑模自抗扰控制时，启动阶段的响应时间为0.5 ms，受到负载扰动后转速下降约1.22 r/min，并在6 ms后重新达到稳定。采用模糊超螺旋滑模自抗扰控制时，启动阶段的响应时间为0.4 ms，受到负载扰动后转速下降约0.78 r/min，并在4.5 ms后重新达到稳定。综上所述，相较于传统的线性自抗扰控制，改进后的模糊超螺旋滑模自抗扰控制响应速度更快、鲁棒性更强。

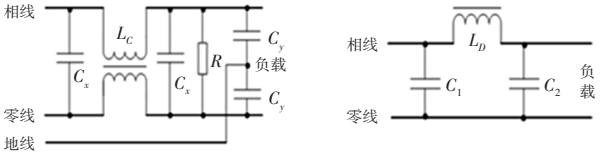
表5　3种控制方法动态性能数据

	LADRC	STSM-LADRC	FUZZY-STSM-LADRC
响应时间/ms	0.66	0.5	0.4
突变量/r·min^{-1}	4.4	1.22	0.78
恢复时间/ms	14.5	6	4.5

4　EMC抗干扰设计方案

在EMC测试过程中，电磁干扰主要来自开关电源、传输线路和硬件板。其中开关电源的干扰最为严重。滤波器是抑制开关电源电磁干扰的重要技术之一，通过设计合适的滤波器电路结构，可以有效提高电路的抗干扰性能。

由于开关电源的噪声分为差模噪声和共模噪声两种，所以电源滤波器分为差模信号抑制滤波器和共模信号抑制滤波器。共模信号抑制滤波器如图9a所示，主要由共模滤波扼流圈L_C、差模滤波电容C_x和共模滤波电容C_y组成。由于L_C可以使产生的磁场相互抵消，进而有效抑制共模噪声。差模信号抑制滤波器如图9b所示，其中L_D为差模滤波扼流圈，能够有效抑制差模噪声。



(a)共模信号抑制滤波器　　(b)差模信号抑制滤器

图9　滤波器拓扑结构

为了使滤波器对共模噪声和差模噪声都有良好的抑制效果，对两种滤波器进行整合改进，改进效果如图10所示。在共模抑制滤波器的基础上加上对称的L_D来抑制差模噪声，同时L_D的存在能有效降低C_x的充电电流，从而减少差模噪声产生。依据设计经验，各元件参数：C_x为0.2~1 μF；C_y为3.0~30 nF；L_C为1~10 mH；L_D为10~100 mH。

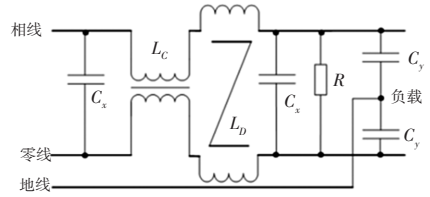


图10　改进后的滤波器

为限制漏电流的大小，需要设计合适的C_y值。当滤波器安装在接地的固定设备上时，漏电流I_i应该低于35 mA。C_y计算如下：

$$C_y = I_i/(2\pi Uf) \tag{25}$$

式中：U为峰值电压，f为电源工作频率。

5　试验验证

试验选用德国的Sensodrive驾驶测试平台，可以通过更改转向盘阻尼系数模拟不同车辆转向力矩的变化，从而更好地对比3种控制方法的实际效果。首先将转向测试装备组装完成，安装在Sensodrive驾驶测试平台上，如图11所示，并将转向盘力矩设置为5 N·m。

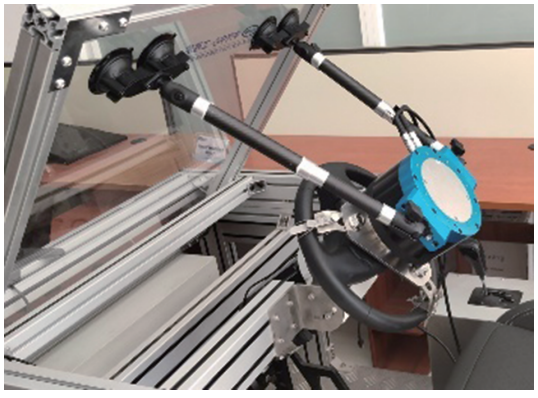


图11　德国Sensodrive驾驶测试平台

依据GB 17675—2021《汽车转向系基本要求》试验要求，用三角波的角度模式对力矩信息进行采集，根据采集的力矩分别进行2次10 min的运行，将两次运行得到的角度进行对比并计算差值，结果如图12～图14所示。

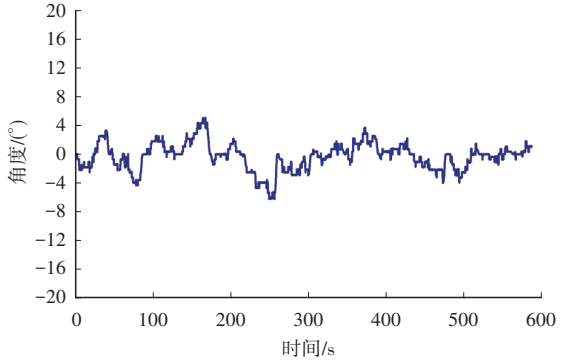


图12　LADRC控制下角度差值曲线

从试验结果中可以看出，线性自抗扰控制下两次试验结果角度差值最大达到6.24°，且差值曲线呈现出幅

度较大的波动，说明在电机正反转的周期上误差较大；超螺旋滑模自抗扰控制下两次角度最大差值约为2.49°，该方法虽然两次试验角度差值较小，稳定在0.2左右，但是出现了大幅度波动；采用模糊超螺旋滑模自抗扰控制的两次试验角度最大差值降为0.19°左右，误差曲线波动小，相比于其他系统更加稳定。

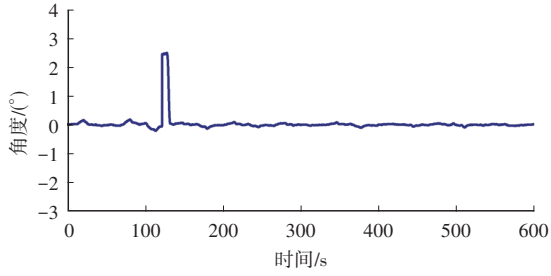


图13　STSM-LADRC控制下角度差值曲线

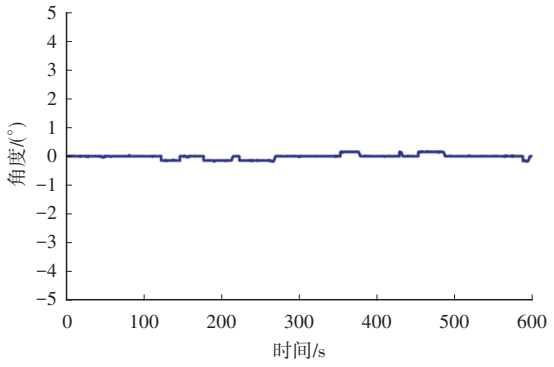


图14　FUZZY-STSM-LADRC控制下角度差值曲线

为了验证转向测试装备是否满足GB 17675—2021《汽车转向系基本要求》要求，进行EMC暗室试验，对其抗电磁干扰能力进行测试，试验车型为某款机械式转向系统的汽车，试验环境如图15所示。



图15　EMC暗室试验环境

分别用3种控制方式先在无电磁干扰模式下运行10 min，然后设置电磁干扰环境（场强为50 V/m，调制频率为20~800 MHz时采用AM（振幅调制），调制频率为800~2 000 MHz时采用PM（相位调制），调制深度为80%，脉宽为577 μs，周期4 600 μs）。在有电磁干扰环境下运行10 min，最终比对两次试验过程中转向角度的差值，标准要求差值小于5°。在无电磁干扰和有电磁干扰下3种控制策略角度差值曲线对比如图16~图18所示，3种控制方法在不同试验场景的最大角度误差如表6所示。

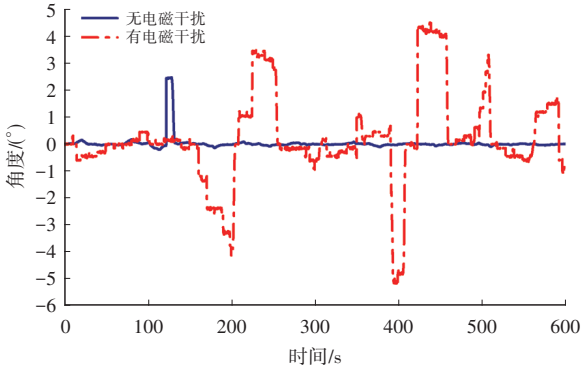


图17　STSM-LADRC控制下角度差值曲线对比

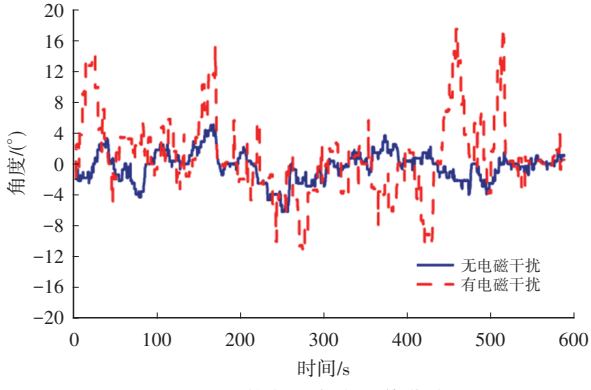


图16　LADRC控制下角度差值曲线对比

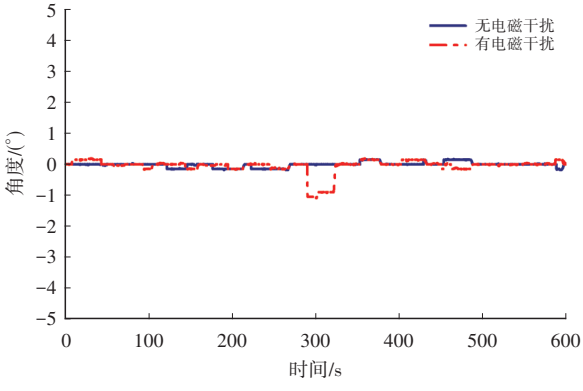


图18　FUZZY-STSM-LADRC控制下角度差值曲线对比

表6　3种控制方法的最大角度误差　(°)

试验场景	LADRC	STSM-LADRC	FUZZY-STSM-LADRC
无电磁干扰	6.24	2.49	0.19
有电磁干扰	17.54	5.19	1.10

从试验结果中可以看出，线性自抗扰控制策略受电磁干扰程度较大，角度误差最大值达到17.54°，受干扰频段多，自身鲁棒性和抗干扰能力较差，不能满足使用要求；引入超螺旋滑模算法的线性自抗扰控制策略整体较平稳，个别频段抗干扰能力较弱，角度误差最大值为5.19°；采用模糊超螺旋滑模自抗扰控制策略的试验结果整体非常平稳，角度误差最大值为1.10°，自身鲁棒性和抗干扰稳定性较强，能够满足测试要求。

6　结束语

面向车辆转向系统EMC测试装备对高鲁棒性的迫切需求，本文设计了模糊超螺旋滑模自抗扰控制策略。通过超螺旋滑模算法优化线性自抗扰控制器的LSEF和LESO，并引入模糊控制实现LESO关键参数的实时在线自适应整定。MATLAB/Simulink仿真表明，电机启动响应时间缩短至0.4 ms，负载扰动下的转速突变量从4.4 r/min大幅降低至0.78 r/min，使控制系统兼顾了动态响应性能和强鲁棒性。针对强电磁干扰环境，设计了差/共模电源滤波器。经EMC暗室试验验证，在50 V/m电磁干扰下转向角度误差最大值仅为1.10°，远低于国家标准规定的5°限值，满足测试标准要求。因此本文设计的控制策略为复杂电磁环境中的转向系统高精度测试提供了可靠技术支撑。

参　考　文　献

[1] 工业和信息化部. 汽车转向系基本要求: GB 17675—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Ministry of Industry Information Technology. Steering System of Motor Vehicles-basic Requirements: GB 1765—2021[S]. Beijing: China Standards Press, 2021.

[2] 工业和信息化部. 道路车辆电磁兼容性要求和试验方法: GB 34660—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Ministry of Industry Information Technology. Road Vehicles—Requirements and Test Methods of Electromagnetic Compatibility: GB 34660—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.

[3] AHN H, PARK H, KIM C, et al. A Review of State-of-the-Art Techniques for PMSM Parameter Identification[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 15(3): 1177-1187.

[4] KIM H, SON J, LEE J. A High-Speed Sliding-Mode Observer for the Sensor Less Speed Control of a PMSM[J]. IEEE transactions on Industrial Electronics, 2010, 58(9): 4069-4077.

[5] CHOI H H, VU N T T, JUNG J W. Digital Implementation of an Adaptive Speed Regulator for a PMSM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 26(1): 3-8.

[6] ZHANG H, WANG Y, ZHANG G, et al. Research on LADRC Strategy of PMSM for Road-Sensing Simulation Based on Differential Evolution Algorithm[J]. Journal of Power Electronics, 2020, 20: 958-970.

[7] 白芳华, 张强, 郭雅各, 等. 基于自抗扰控制的电控机械式制动器弯道制动力控制策略研究[J]. 汽车技术, 2023(6): 55-62.
BAI F H, ZHANG Q, GUO Y G, et al. Research on Curve Braking Force Control Strategy of EMB System Based on ADRC Algorithm[J]. Automobile Technology, 2023(6): 55-62.

[8] LIU C, LUO G, CHEN Z, et al. Measurement Delay Compensated LADRC Based Current Controller Design for PMSM Drives with a Simple Parameter Tuning Method[J]. ISA Transactions, 2020, 101: 482-492.

[9] MUNOZ D, BARBARO D. An Adaptive Sliding-Mode Controller for Discrete Nonlinear Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(3): 574-581.

[10] 孙斌, 王海霞, 苏涛, 等. 永磁同步电机调速系统非线性自抗扰控制器设计与参数整定[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6715-6726.
SUN B, WANG H X, SU T, et al. Nonlinear Active Disturbance Rejection Controller Design and Tuning for Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Control System[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6715-6726.

[11] 肖芳, 谢元宇, 王明辉, 等. 基于改进型ADRC的PMSM无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(4): 50-60.
XIAO F, XIE Y Y, WANG M H, et al. Improved ADRC-Based PMSM Control Without Positionsensor[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(4): 50-60.

[12] QU L Z, QIAO W, QU L Y. Active-Disturbance-Rejection-Based Sliding-Mode Current Control for Permanent-Magnet Synchronous Motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(1): 751-760.

[13] LI J, GAO Y, WANG L, et al. A Sensor Less Control System of PMSM Based on LADRC and SMO[C]// Tianjin: 2020 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA). IEEE, 2020: 66-71.

[14] 王淑旺, 范诚, 徐群龙. 永磁同步电机调速系统新型滑模

变结构控制策略[J]. 汽车技术, 2022(1): 1-7.
WANG S W, FAN C, XU Q L. Control Strategy of New Sliding Mode Variable Structure on Speed Regulation System of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Automobile Technology, 2022(1): 1-7.

[15] HAO W, LIN X, LIU J, et al. Conditioned Super-Twisting Sliding Mode Control for Speed Control of PMSMs[C]// Tianjin: 2023 42nd Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2023: 4048-4052.

[16] HU Z H, GAO H, DU H M, et al. Research on SVM-DTC Control Strategy of PMSM Based on Super Twisting Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control[C]// Nanjing: 2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference, 2022.

[17] 陈德海, 刘祥, 王海峰. 改进超螺旋滑模自抗扰的PMSM无传感器控制[J]. 北京航空航天大学学报,2025, 5/(10): 3337-3344.
CHEN D H, LIU X, WANG H F. Modified Sensorless Control of PMSM Based on Super-Twisting Sliding Mode Auto Disturbance Rejection[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 5/(10): 3337-3344.

[18] LI Y, CHEN Y. The Research of Gain Adaptive Linear Extended State Observer (ALESO) Based Active Disturbance Rejection Speed Control For Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. ELECTRICA, 2021, 21(1): 20-31.

[19] LI S, ZHOU M, YU X. Design and Implementation of Terminal Sliding Mode Control Method for PMSM Speed Regulation System[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 9(4): 1879-1891.

[20] LUO S. Nonlinear Dynamic Surface Control of Chaos in Permanent Magnet Synchronous Motor Based on the Minimum Weights of RBF Neural Network[J]. Abstract and Applied Analysis, 2014(1): 1-9.

（责任编辑　王　一）
修改稿收到日期为2025年7月21日。

《汽车技术》征稿启事

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊，为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库（CSCD）来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊（A）、Scopus数据库收录期刊、俄罗斯《文摘杂志》（AJ）收录期刊、日本科学技术振兴机构数据库入选期刊、EBSCO学术数据库收录期刊、欧洲学术出版中心（EuroPub）数据库收录期刊。

《汽车技术》杂志以报道汽车整车及其零部件设计、研究、试验等方面的前瞻与应用技术为主，并兼有理论研究内容，是中国汽车行业核心学术和知识传播与共享的平台。

《汽车技术》将在国家提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念的指引下，把握《节能与新能源汽车技术路线图》和“低碳化、信息化、智能化”的汽车技术主流发展趋势，努力在传统内燃机汽车高效动力系统、轻量化、低阻力领域，新能源汽车和互联智能汽车技术领域，大力吸收优质稿源，为广大科研和工程技术人员服务，为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

《汽车技术》欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员及相关人员不吝赐稿，反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将被优先选择刊登。

投稿要求：

1. 文章字数最好控制在6 000~8 000字范围之内；

2. 请按科技论文要求撰写文章摘要，摘要中文字数控制在180字左右；

3. 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献，且在文中应标注文献引用处；

4. 文章主要作者应提供其简介，包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等；

5. 来稿的保密审查工作由作者单位负责，确保署名无争议，文责自负；

6. 请勿一稿多投；

7. 本刊使用网站投稿，请先登陆网站注册成功后投稿，详细投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏的“作者指南”，网址：http://qcjs.cbpt.cnki.net。

《汽车技术》编辑部