Speed Sensing Control of Automotive Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Rotor Feedback Signal*

Zhan Huizhen*, Chen Zhengke
(School of Artificial Intelligence, Jiangxi University of Technology, Nanchang Jiangxi 330098, China)

Abstract: In the complex electromagnetic and mechanical vibration environment of automotive permanent magnet synchronous motors, the traditional sensor signal analysis methods have difficulty in accurately obtaining the operating status of the rotor, which affects the accuracy of speed control. Therefore, a speed sensing control method based on rotor feedback signals is proposed. A sine-cosine composite encoding sensor is employed and the signal period is accurately analyzed through arctangent interpolation operation to obtain precise rotor feedback signals. The methods of the fastest control comprehensive function, numerical integration, state estimation, and disturbance estimation are used to estimate the system state and identify unknown disturbances in real time. The control quantity is calculated through a nonlinear function to achieve real-time compensation for disturbances. By utilizing closed-loop feedback technology and combining the sliding mode control method and the Lyapunov stability principle, the error feedback is optimized to form a closed-loop circuit, which can continuously adjust the operating state according to the actual output. The experimental results show that the speed sensing control results of the proposed method are in line with the actual requirements, with the relative error remaining below 0.7 rad/s and a fast response speed, achieving high-precision motor speed sensing control.

Key words: rotor feedback signal; sine cosine composite coding sensor; automotive permanent magnet synchronous motor; extended state observer; sliding mode control method
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.11.014

基于转子反馈信号的汽车永磁同步电机转速传感控制*

詹慧贞*, 陈正科
(江西科技学院人工智能学院, 江西 南昌 330098)

摘 要: 对于复杂电磁和机械振动环境下的汽车永磁同步电机, 传统传感器信号解析方法难以精确获取转子运行状态, 影响转速控制准确性。为此, 提出基于转子反馈信号的转速传感控制方法。该方法采用正余弦复合编码传感器, 通过反正切插值运算精确解析信号周期, 获取精确的转子反馈信号。运用最速控制综合函数法、数值积分法、状态估计法和干扰估计法实时估计系统状态和识别未知干扰, 并通过非线性函数计算控制量, 实现扰动实时补偿。利用闭环反馈技术, 结合滑模控制法和 Lyapunov 稳定性原理优化误差反馈, 形成闭环回路, 根据实际输出不断调整运行状态。实验结果表明, 所提方法转速传感控制结果与实际需求相符, 相对误差保持在 0.7 rad/s 以下, 响应速度快, 实现了高精度的电机转速传感控制。

关键词: 转子反馈信号; 正余弦复合编码传感器; 汽车永磁同步电机; 扩张状态观测器; 滑模控制法
中图分类号: TM351 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)11-2032-07

永磁同步电机凭借其高功率密度、高效率以及出色的动态响应特性, 成为了汽车动力系统升级的理想选择。转速传感控制是控制永磁同步电机的关键手段, 对于确保电机稳定运行、提升汽车的动力性能和驾驶体验至关重要[1]。准确的转速信息能够为电机控制系统提供宝贵的反馈, 使系统能够及时调节电机的输出功率, 从而适应各种行驶条件的需求。然而, 传统的转速传感控制方法在实际应用中仍面临一些挑战。一方面, 永磁同步电机内部磁场分布随时间变化且不均匀, 同时汽车行驶中的振动以及外部电磁场等因素会干扰转子的运行状态; 另一方面, 传统的传感器信号获取方法在复杂的电磁干扰和机械振动环境下, 传感器输出信号会严重扭曲和失真, 导致信号周期难以精确解析, 无法有效提

项目来源: 2022 年江西省高等学校教学改革研究课题项目(JXJG-22-24-15); 2024 年度江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2402517)
收稿日期: 2024-11-19 **修改日期**: 2024-12-31

取电机转子的运行状态信号,进而影响电机转速控制的精度[2-3]。

为推动汽车动力系统的发展,国内外学者针对永磁同步电机转速传感控制方法展开了大量研究。卢志远等[4]利用线性自抗扰控制设计永磁同步电机转速传感控制律,采用电流偏差反馈算法对电机转速实时控制。此方法能使电机快速响应控制指令,提升系统动态性能。该方法在某些情况下无法有效提取电机转子的运行状态信号。高芮等[5]使用趋近律、滑模观测器获取电机转子运行状态信息,利用 super-twisting 算法求解电机转速传感控制量,实现控制。趋近律无法准确获取转子运行状态信息,进而影响电机转速控制的准确性。王栋栋等[6]使用单环滑模控制构建永磁同步电机转速传感控制模型,基于迭代学习算法求解模型参数,实现转速传感控制。单环滑模控制可能难以快速适应这种负载的剧烈变化,从而影响对电机转子运行状态信号的准确获取。Qu 等[7]借助传感器获取电机的实时转速信息,依据速度谐波的正交幅值与谐波电流之间的独特关系设计电机转速传感控制器。此方法依据转速信息和预设算法计算出所需的谐波电流,并将计算得出的谐波电流参考输入至电机驱动器中,从而产生相应的谐波电流,进而对电机转速进行控制。该方法传感器的输出信号可能夹杂大量噪声,这会干扰对电机转速信号的准确解析,进而影响对电机转子运行状态信号的有效提取。

基于上述传统方法存在的问题,本文提出一种基于转子反馈信号的高精度、高效率的汽车永磁同步电机转速传感控制方法。该方法通过正余弦复合编码传感器监测永磁同步电机转子运行信号变化,能够有效应对复杂环境下传感器信号扭曲失真的问题,准确地确定转子当前位置信息,为控制算法提供精确的反馈。同时,结合自抗扰控制技术与滑模控制法,自抗扰控制技术可以对系统中的未知干扰进行实时估计和补偿,滑模控制法则能增强系统的鲁棒性,二者协同作用,实现对电机转速的精确控制,有效克服传统方法在复杂环境下难以准确获取转子运行状态信号以及控制精度不足的难题。

1　汽车永磁同步电机转子反馈传感信号获取

在汽车永磁同步电机运行中,传统获取转子反馈传感信号的方法面临诸多挑战。传统方法依赖直接解析传感器输出信号,然而电机运行时内部磁场变化、分布不均,且汽车行驶振动与外部电磁场等因素干扰转子运行状态[8-9],这使得在复杂电磁干扰和机械振动环境下,传感器输出信号严重扭曲失真,难以精确解析信号周期来获取电机转子运行状态信号,无法有效形成闭环反馈回路,影响电机转速控制准确性。针对此问题,采用正余弦复合编码传感器获取转子反馈信号。该传感器可输出包含电机转子运行状态重要信息的正弦、余弦信号,通过反正切插值运算处理这些信号,可精确解析信号周期,进而获取转子运行状态信号。

正余弦复合编码传感器能抗干扰是基于其输出正弦、余弦信号的特性及信号处理方式。正弦、余弦函数的周期性使其在受干扰时周期性特征仍较明显,通过对多周期信号进行分析处理可滤除非周期性干扰成分;其正交性则可通过特定算法分离提取,减少干扰对有用信息的影响;反正切插值运算能进一步提高抗干扰能力,消除幅值变化或相位偏移等干扰,保证转子位置信息准确性。该传感器具备两种主要的工作模式:一种是能够直接提供转子绝对位置信息的绝对式模式;另一种是通过监测转子位置变化来推算转速的增量式模式。在绝对式工作模式下,每当汽车永磁同步电机的转子完成一整圈旋转,其会生成两路 A、B 正弦电压信号 V_A、V_B,这两路信号的波形与转子的机械角度 θ(即转子在无干扰情况下的理想角度位置)和由于干扰因素(如磁场不均匀、振动、外部电磁场等)导致的角度偏差 $\Delta\theta_d$ 之间存在的数学关系,如式(1)所示。通过解析这两路正弦电压信号,可以精确地确定转子在任何时刻的绝对位置。

$$\begin{aligned} V_A &= Q\cos(\theta-\Delta\theta_d)+n_A,\theta\in[0,2\pi] \\ V_B &= -Q\sin(\theta-\Delta\theta_d)+n_B,\theta\in[0,2\pi] \end{aligned} \tag{1}$$

式中:Q 为信号幅值,n_A 和 n_B 分别为正弦和余弦信号受到的外部电磁干扰分量。

为了精确地确定转子在任何时刻的绝对位置,可以通过反正切函数来解析这两路正弦电压信号。具体原理是,根据三角函数的性质,对 V_A、V_B 进行处理,先对受到干扰的信号进行滤波处理,假设滤波后的信号分别为 $\hat{V}_A$、$\hat{V}_B$,则有:$\hat{V}_A = V_A - n_A = Q\cos(\theta-\Delta\theta_d),\theta\in[0,2\pi]$;$\hat{V}_B = V_B - n_B = -Q\sin(\theta-\Delta\theta_d),\theta\in[0,2\pi]$。可得:$\tan(\theta+\Delta\theta_d)=\dfrac{V_A}{V_B}$,则转子角度(即位置)$\theta$ 的数学表达式为:

$$\theta = -\frac{V_A}{\arctan V_B}-\Delta\theta_d \tag{2}$$

通过该公式能够精确地确定转子在任何时刻的绝对位置。这一过程中,传感器输出的正弦、余弦信号成为了关键的传感信息源。通过对这些信号的准

确获取和基于公式的计算,克服了外界干扰因素对转子位置传感的影响,从而实现了精确的转子位置传感。

正余弦复合编码传感器的另一种工作模式为增量式模式,它通过监测转子位置变化来推算转速。在增量式工作模式下,汽车永磁同步电机的转子每旋转一周,产生一组(A、B)具有固定相位差($\pi/2$)的正交脉冲信号 C、D。设由于干扰导致的脉冲计数偏差为 Δn_d,使用脉冲计数器对 C、D 进行计数[10],计数结果为 $n+\Delta n_d$(n 为无干扰情况下的计数结果)。转子位置监测的数学表达式为:

$$\theta(t)=\frac{2\pi}{N}\left[(n+\Delta n_d)+\frac{\Delta\theta}{\varphi}\right] \tag{3}$$

式中:$\Delta\theta$ 表示转子角度偏差。通过这个公式(考虑并修正了干扰带来的计数偏差),能够追踪转子从起始点到当前位置的移动情况。并且,每当转子完成一整圈旋转,编码传感器发出的标志性单脉冲信号 R 参考零点标记信号)也为准确传感提供了辅助。此时,精确的转子反馈信号(即运行状态信号)$v(t)$ 可以表示为:

$$v(t)=\theta(t)=\frac{2\pi}{N}\left[(n+\Delta n_d)+\frac{\Delta\theta}{\varphi}\right] \tag{4}$$

根据电机转子工作模式选择相应公式求解转子位置信息,这种基于正余弦复合编码传感器的传感方式克服多种干扰,精确获取转子反馈信号,为电机转速传感闭环反馈控制奠定基础。

通过正余弦复合编码传感器采集某车所搭载的永磁同步电机的实时状态信息,运用反正切插值运算对信号周期进行解析,获取电机转子的运行状态信号,即精确的转子反馈信号,详情如图 1 所示。

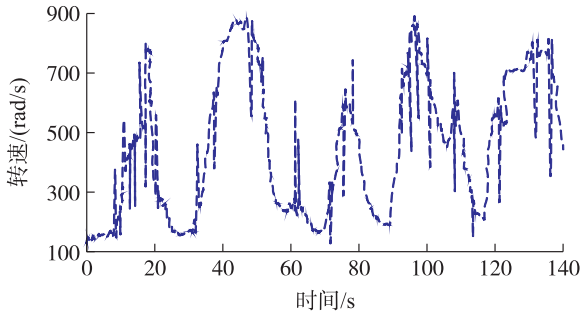

图 1 转子反馈信号获取

通过获取的永磁同步电机的反馈信号,为后续的电机转速传感闭环反馈控制奠定基础。准确的转子反馈信号能够为电机转速的精确控制提供关键的输入信息,使得控制系统能够根据实际的转子运行状态及时调整控制策略,从而提高电机的运行效率和性能。

2 汽车永磁同步电机转速传感闭环反馈控制

由于汽车运行环境复杂,传感器受到振动、电磁干扰等因素影响,其输出的反馈信号存在噪声和波动,这种不稳定的信号难以直接用于构建精确的闭环反馈回路,因为它不能准确反映电机的真实转速状态。且在电机转速快速变化的情况下,传感器可能无法及时、准确地捕捉到转速的变化并反馈相应的信号。这就使得反馈信号存在滞后性,无法构建闭环反馈回路,滞后的信号无法让控制器及时调整电机的转速,从而影响转速控制的准确性。针对这些问题,通过该汽车永磁同步电机转速传感闭环反馈控制方法,可以对传感器输出的反馈信号进行优化处理。

汽车永磁同步电机(PMSM)转速传感控制存在时变非线性参数、磁场非完全正弦分布和未知负载扰动等情况,自抗扰控制技术(Active Disturbance Rejection Control,ADRC)可应对这些问题[11-12]。在基于 ADRC 的 PMSM 转速传感控制中,传感操作贯穿各阶段:输入信号跟踪阶段(Tracking Differentiator,TD)用正余弦复合编码传感器获取转子反馈信号并预处理求解微分信号;系统内部状态和未知干扰估计阶段(Extended State Observer,ESO)基于 TD 处理后的信号,用状态和干扰估计法分析得出内部状态和干扰因素;状态误差反馈控制阶段(Nonlinear State Error Feedback,NLSEF)[13]对比传感信号与期望信号得到误差信号,再结合 ESO 的扰动估计值计算控制量以补偿扰动。

$v(t)$ 表示输入信号(转子反馈信号),即通过正余弦复合编码传感器得出的信号;v_1 表示 $v(t)$ 通过 TD 获取反馈信号的过渡阶段;v_n 表示 $v(t)$ 通过 TD 获取的 $n-1$ 阶微分信号;$y(t)$ 表示转速传感控制对象;$z_1,z_2,\cdots,z_n$ 表示转速传感控制输出信号;z_{n+1} 表示 ESO 得出转速传感控制所受扰动;$e_1,e_2,\cdots,e_n$ 表示 $v_1,v_2,\cdots,v_n$ 与 $z_1,z_2,\cdots,z_n$ 的误差信号;$u_0(t)$ 表示 NLSEF 得出的控制量;$u(t)$ 表示扰动补偿后的控制量;b 表示补偿系数。则汽车永磁同步电机转速传感控制系统的一阶表达式为:

$$\begin{cases}\dot{x}=F(x,t)v(t)+bu\\ y=x\end{cases} \tag{5}$$

式中:$\dot{x}$、x、u、y 表示系统及其一阶状态、输入、输出的变量。

基于式(5)可得 TD、ESO、NLSFF 数学表达式,分别如式(6)、式(7)、式(8)所示:

$$\dot{v}_1=\begin{cases}-r\dfrac{\operatorname{sign}\left(v_1-v+(d^2+8r)\dfrac{d}{T}\right)+1}{2} & \dfrac{r}{4}\leqslant\dfrac{d}{T}\\ -r\operatorname{sign}\left(v_1-v+(d^2+8r)\dfrac{d}{T}\right) & r\leqslant\dfrac{d}{T}\end{cases}\tag{6}$$

$$\begin{cases}\dot{z}_1=z_1-\beta_1\begin{cases}\dfrac{z_1-y}{\delta^{\alpha_1-1}}\operatorname{sgn}(z_1-y), z_1-y>\delta\\ (z_1-y)^{\alpha_1}\operatorname{sgn}(z_1-y), z_1-y\leqslant\delta\end{cases}\\ \dot{z}_2=-\beta_2\begin{cases}\dfrac{z_1-y}{\delta^{\alpha_2-1}}\operatorname{sgn}(z_1-y), z_1-y>\delta\\ (z_1-y)^{\alpha_2}\operatorname{sgn}(z_1-y), z_1-y\leqslant\delta\end{cases}\end{cases}\tag{7}$$

$$\begin{cases}e_1=v_1-z_1\\ u_0=\beta_3\begin{cases}\dfrac{z_1-y}{\delta^{\alpha_1-1}} & (e_1), e_1>\delta\\ e_1^{\alpha_3} & (e_1)\end{cases}\\ u=u_0-\dfrac{z_2}{b}\end{cases}\tag{8}$$

式中:z_1、z_2 表示 y 的跟踪信号、扰动估计值;$\dot{v}_1$、$\dot{z}_1$、$\dot{z}_2$ 表示 v_1、z_1、z_2 的一阶值;r 表示跟踪速度因子;d 表示采样因子;β_1、β_2、β_3 表示三个不同的非线性因子;δ 表示滤波因子;α_1、α_2、α_3 表示 β_1、β_2、β_3 的系数;T 表示采样周期。

引入滑模控制法(Sliding Mode Control,SMC)。滑模控制[14]依据永磁同步电机转速传感控制系统的当前转子位置信息,而转子位置信息也是通过传感器获取的。SMC 通过不断改变系统结构,使系统时刻按照期望的滑模轨迹运行,即将 SMC 替换 ADRC 的误差反馈环节,从而提升转速传感控制性能[15-16]。则其控制输出量数学表达式为:

$$\begin{cases}e^*=v_1-z_1^*\\ u_0=\dot{e}^*\\ u=\dfrac{(u_0-z_2^*)}{b}\end{cases}\tag{9}$$

式中:e^* 表示替换后状态误差变量;$\dot{e}^*$ 表示 e^* 的一阶形式;z_1^* 表示替换后系统扰动值。z_2^* 表示替换后 LSEO 输出 v 的观测值。

在这个过程中,为了降低转子传感控制分析难度,令 $x_1=e^*$,并求导,得出状态空间数学方程式为:

$$\begin{cases}x_1=v_1-z_1\\ x_2=\dot{x}_1=\dot{v}_1-\dot{z}_1\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}\dot{x}_1=\dot{v}_1-\dot{z}_1\\ \dot{x}_2=\ddot{x}_1\end{cases}\Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}u\tag{10}$$

式中:x_2 表示替换后转子速度变量;$\dot{x}_1$、$\dot{x}_2$ 表示 x_1、x_2 的导数。

基于 SMC 原理,需先构建滑模面,鉴于高频噪声及稳态误差,采用积分量构建滑模面,在存在高频噪声的情况下,积分运算具有低通滤波的特性,能够对高频成分进行有效滤除。其原理在于积分运算本质上是对信号在一段时间内的累积求和,高频噪声由于其快速变化的特性,在积分过程中正负部分相互抵消,从而使得积分结果中高频成分的影响大大减小。

对于稳态误差,积分量的引入可以通过不断累积误差信息来逐渐消除稳态误差。当系统存在稳态误差时,误差信号会持续存在,通过积分运算,误差信号会不断累积,从而产生一个与稳态误差相关的修正项,该修正项会作用于控制系统,促使系统逐渐调整输出,以减小直至消除稳态误差。

具体运算过程为:

$$s=x_1+\kappa\int x_1\mathrm{d}t\tag{11}$$

式中:κ 表示滑模面因子。

为了让控制系统的状态在指定时间内到达滑模面,并减少运动点在趋近过程中的时间、保证过渡过程顺畅。采用指数趋近律构建系统的滑动模态,即:

$$\dot{s}=-\psi\operatorname{sign}\left(x_1+c\int x_1\mathrm{d}t\right)-k\left(x_1+c\int x_1\mathrm{d}t\right)\tag{12}$$

式中:ψ、k 表示滑模面的两个大于 0 的可调参数;c 表示滑模面参数。

为了知道滑模面 $\dot{s}$ 的变化率,将滑模面的动态特性与系统的控制律联系起来,对式(11)进行求导,以得出控制律,这一系列运算过程都是围绕着传感器反馈信号进行的,其运算过程为:

$$\dot{s}=\dot{x}_1+cx_1\tag{13}$$

将式(10)、式(12)、式(13)整理得出系统的控制输入表达式,即:

$$u_0=-\psi\operatorname{sign}\left(x_1+c\int x_1\mathrm{d}t\right)-k\left(x_1+c\int x_1\mathrm{d}t\right)+cx_1\tag{14}$$

利用传感器的闭环反馈技术,结合滑模控制法和 Lyapunov 稳定性原理优化误差反馈结果,经过转换后的传感器测量信号被反馈到控制器。这样就形成了一个闭环的反馈回路,从输出(电机转速)到传感器,传感器获取电机转速相关的信息并将其转化为可处理的信号,再到控制器[17-18]。这个回路使得整个控制方法能够根据实际输出不断调整自身的运行状态,最终达成高精度的汽车永磁同步电机转速传感控制。为此,使用 Lyapunov 稳定性对控制系统的稳定性进行分析,即:

$$\dot{V}=-\psi|s|-k\left(x_1+c\int x_1\mathrm{d}t\right)^2\tag{15}$$

因 $\psi>0$,$k>0$,故 $\dot{V}<0$ 成立,这说明此方法构建滑模面极其稳定。则汽车永磁同步电机转速传感闭环反馈控制最终表达式为:

$$\begin{cases} e^* = v_1 - z_1^* \\ u_0 = -\psi \mathrm{sign}(x_1 + c\int x_1 \mathrm{d}t) - k(x_1 + c\int x_1 \mathrm{d}t) + ce_3 \\ u = \dfrac{(u_0 - z_2^*)}{b} \end{cases} \tag{16}$$

综上所述,通过先利用 ADRC 的优势,再针对其不足引入 SMC,结合传感器的反馈信号,经过一系列运算和构建过程,最后利用 Lyapunov 稳定性原理确保系统稳定性,实现了高精准的汽车永磁同步电机转速传感控制。这种方法有效解决了传统方法在复杂环境下难以准确控制电机转速的问题,为汽车永磁同步电机的转速控制提供了一种可靠的解决方案。

3 实验过程与结果分析

3.1 实验使用设备设定

实验以某车搭载的永磁同步电机作为被控对象,在电机的传感方面,采用了 ENC-1300 正余弦复合编码传感器和 SS495A 线性型霍尔传感器,二者协同工作以实现对电机状态的全面监测。

ENC-1300 正余弦复合编码传感器主要用于精确测量电机转子的位置信息。其相关参数设置如下:信号幅值范围为 0~5 V,相位精度为±0.1°,分辨率为 0.01°。通过该传感器输出的正弦、余弦信号,可以准确确定转子在任何时刻的绝对位置,为电机的精确控制提供关键的位置反馈信息。

SS495A 线性型霍尔传感器则主要用于采集电机转速信号。其相关参数详情如下:电源电压为 4.5 V~10.5 V,输出电流为 1.5 mA,工作温度范围为 -40 ℃~150 ℃。它能够实时感知电机的转速变化,为电机转速的监测和控制提供数据支持。

电机及传感器相关参数详情见表 1。

表 1 比亚迪汉 EV 搭载的永磁同步电机参数详情

设备名称	相关参数	详情介绍
永磁同步电机	最大功率	168 kW
	最大扭矩	350 N·m
	零百加速时间	7.9 s 左右
	电池容量	85.4 kWh
SS495A 线性型霍尔传感器	电源电压	4.5 V~10.5 V
	输出电流	1.5 mA
	工作温度	-40 ℃~150 ℃

为了实现对电机的精确控制,采用 SV680PS1R61 驱动器和大泰永磁同步六相电机控制器。在数据采集与处理方面,使用了 HIOKI 日置 MR8847-52 示波器、PCI-1711 数据采集卡和研华 AWS-8100 计算机。这些设备能够实时采集电机的转速及电力相关参数信息,并将数据传输至计算机进行进一步的处理和分析。为了提供稳定的电源电压并模拟实际工况下的负载条件,配备 62000D-60-80 电源设备和 DW100 负载设备。这些设备确保了实验环境的真实性和可靠性。实验操作现场如图 2 所示。

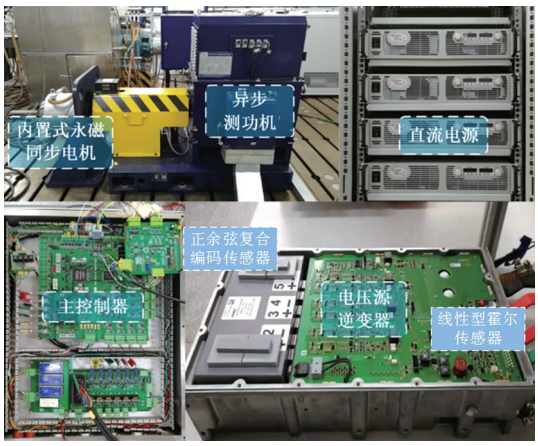

图 2 实验操作现场图

3.2 汽车永磁同步电机转速传感控制效果分析

在对汽车永磁同步电机转速传感控制效果进行分析的实验中,选用了某款搭载永磁同步电机的汽车作为实验对象,该电机装配有正余弦复合编码传感器,用于采集电机实时状态信息,并且具备转速传感控制装置。同时,为准确获取电机的实际转速数据,采用了高精度的转速测量仪器,并连接数据采集系统以实时记录与分析数据。将控制前和控制后的速度偏差值进行对比,对比结果如图 3 所示。

通过图 3 所示的结果可知,在调整前,速度偏差较大,整体波动在 0.06 rpm~0.24 rpm 之间波动,波动曲线幅度也较大,显示出明显的不稳定性。然而,在经过转速传感闭环反馈控制后,速度偏差的波动

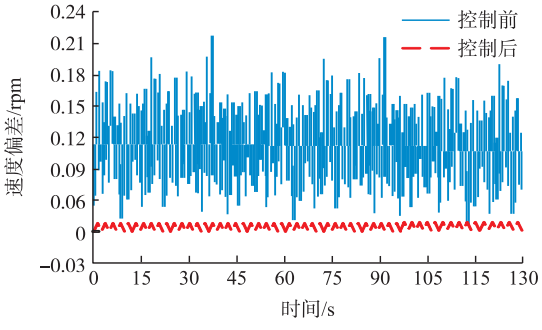

图 3 转速传感闭环反馈控制前后速度偏差对比

显著减小,速度偏差在 0 rpm 附近波动。这证明所提出的方法在控制速度偏差方面取得了显著的改善效果。这主要是因为所提方法采用正余弦复合编码传感器,利用正余弦信号精确测定转子的当前位置,使得控制器能够更准确地跟踪转子的运动轨迹,进而实现对电机转速的更为精细的控制。

相对误差是衡量汽车永磁同步电机转速传感控制效果的另一个关键指标。在保持实验环境不变的情况下,分别采用了文献[5]Super-Twisting 滑模观测器法、文献[6]迭代滑模控制法与文献[7]电机转速传感控制法对电机转速进行传感控制,并将这 3 种方法与所提出的方法的控制结果进行了相对误差的对比分析。对比分析的结果见图 4。

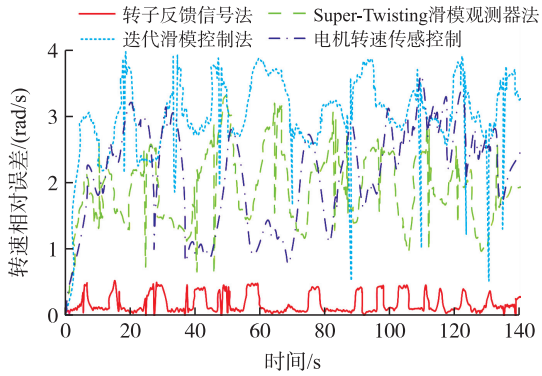

图 4　转速传感控制相对误差分析

从图 4 显示的结果可知,采用转子反馈信号法进行控制时,其相对误差性能表现最为显著。这得益于转子反馈信号法能够有效应对永磁同步电机(PMSM)控制中的非线性、时变性和不确定性因素。此外,该方法还结合了自抗扰控制技术,通过实时调整系统结构,确保系统能够精确地按照期望的转速轨迹运行。这一结合特性显著降低了控制的相对误差,进一步提升了系统的控制精度。

3.3　汽车永磁同步电机转速传感控制响应速度分析

响应速度是指从接收控制信号到系统开始产生响应之间的时间间隔。对于汽车永磁同步电机来说,快速的响应速度能够确保电机在需要的时候迅速调整转速,进而及时满足车辆的动力需求。

假设搭载的永磁同步电机正常运行中,在第 3.1 s 时突加扰动,分别采用所提方法与 3 种对比方法对其进行转速传感控制,分析各方法在转速传感控制中的响应速度,结果如图 5 所示。

通过图 5 可以清晰地看出,所提方法、Super-Twisting 滑模观测器法、迭代滑模控制法与电机转速传感控制法的响应时间分别为 0.186 s、0.201 s、0.256 s 与 0.248 s。相比之下,所提方法的响应速度

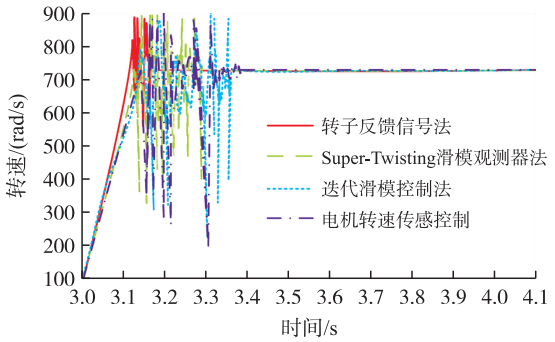

图 5　转速传感控制响应速度分析

最为优异。这主要得益于其采用的扩张状态观测器,该观测器能够实时观测并准确估计系统的内外部扰动。随后,这些扰动信息被即时用于对控制输入进行补偿,从而有效降低了扰动对系统性能的不利影响。提升了系统的响应速度。

4　结论

在电动汽车中,驱动电机的转速传感控制是确保车辆稳定、高效运行的关键。通过精确的转速传感控制,能够实现对电机转速的实时监测和精确调节,进而确保电动汽车在各种工况下都能保持最佳运行状态。这对于提高电动汽车的动力性能、降低能耗以及延长使用寿命具有重要意义。为此,提出基于转子反馈信号的汽车永磁同步电机转速传感控制研究方法。该方法利用正余弦复合编码传感器实时获取汽车永磁同步电机转子反馈信号,采用自抗扰控制技术构建电机转速传感控制模型,并使用滑模控制法优化模型控制误差,经过状态空间、指数趋近律等运算实现控制。实验结果表明,所提方法的电机转速传感控制相对误差小,且控制系统响应速度快。

参考文献:

[1] Tsai M F,Tseng C S,Li R M. Implementation of a DSP-Based Speed-Sensorless Adaptive Control for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives with Uncertain Parameters Using Linear Matrix Inequality Approach[J]. IET Electric Power Applications,2022,16(7):789-804.

[2] Liu H L,Wang X,Tian H,et al. Energy-Saving Starting Method of Electric Motor Based on the Battery-Accumulator Hybrid Drive[J]. Energy,2024,286:129565.

[3] 何延昭,王贞艳,郭炎龙,等. 基于模糊 MRAS 的高速永磁同步电机转速观测[J]. 计算机仿真,2022,39(12):317-322.

[4] 卢志远,柏受军,江明,等. 改进的线性自抗扰永磁同步电机转速控制器设计[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(4):73-81.

[5] 高芮,宗学军,何戡. 基于 Super-Twisting 滑模观测器的永磁同步电机转速控制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2022(7):62-65.
[6] 王栋栋,刘旭东. 基于迭代滑模和扰动观测器的永磁同步电机转速控制[J]. 电机与控制应用,2022,49(6):1-8.
[7] Qu J, Zhang P, Jatskevich J, et al. Torque-Ripple Reduction of Permanent Magnet Synchronous Machine Drives Based on Novel Speed Harmonic Control at Low-Speed Operation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2023,70(8):76837694.
[8] Pasqualotto D, Rigon S, Zigliotto M. Sensorless Speed Control of Synchronous reluctance Motor Drives Based on Extended Kalman Filter and Neural Magnetic Model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(2):1321-1330.
[9] 袁臣虎,董佳丽,周佳文,等. 迷宫机器人外置磁编码器最优位置的确定[J]. 天津工业大学学报,2022,41(6):70-75,82.
[10] 何良,王爽,李君伟. 基于自适应神经网络的磁编码器角度误差补偿算法[J]. 电机与控制应用,2023,50(6):15-20.
[11] 邵佳威,蒋全,倪燕青,等. 基于改进自抗扰控制的永磁同步电机位置控制策略[J]. 控制工程,2022,29(8):1487-1496.
[12] 尹诗荀,郑志安,朱俊杰. 基于延迟补偿的永磁同步电机并行自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报,2024,45(3):275-285.
[13] 赵希梅,吴岑. 基于滑模自抗扰的 PMLSM 电流偏差解耦控制[J]. 光学精密工程,2022,30(4):431-441.
[14] 吴社民,李素敏. 基于滑模变结构的交错并联 Boost 电路均流控制研究[J]电子器件,2023,46(6):1523-1527.
[15] 邵保领,刘凌,胡铭遥. 面向永磁同步电机负载转矩观测的自抗扰改进滑模控制[J]. 西安交通大学学报,2024,58(3):204-211.
[16] 贺虎成,邵贺,桂浩亚,等. 永磁同步电机改进型鲁棒模型预测转矩控制[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(4):155-165.
[17] 孔晓光,栾兆宇. 基于 ADRC 的电动汽车内置式永磁同步电机控制策略[J]. 大连工业大学学报,2024,43(3):222-227.
[18] 白艳祥,张元玮,余正东. 基于滑膜控制的船舶永磁同步推进电机直接转矩控制研究[J]. 舰船科学技术,2022,44(10):84-88.

詹慧贞(1984—),女,汉族,江西瑞昌人,硕士,副教授,研究方向:车辆工程,zhanhuizhen766@163.com。