

基于 Sigmoid 滑模观测器的永磁同步电机无感控制

李明杰

贵州航天林泉电机有限公司 贵州 贵阳 550000

【摘要】：永磁同步电机的无速度传感器控制系统中，常规滑模观测器易引发高频抖振。为此，本文设计了一种采用 Sigmoid 函数的改进型滑模观测方案。通过使用连续且光滑的 Sigmoid 曲线替代传统符号函数，并融合边界层切换策略，有效削弱了系统抖振，提高了反电动势、转速及转子位置信息的估算准确性。在 MATLAB/Simulink 环境下搭建对比仿真模型，将所提使用 Sigmoid 函数的 SMO 与传统开关函数的 SMO 进行性能对比。结果表明，改进后的算法显著减小了转速估计和转角估计的波动与偏差，反电动势波形质量获得明显改善，证实了该方法的有效性与优越性。

【关键词】：永磁同步电机；Sigmoid 函数；滑模观测器；抖振抑制

DOI:10.12417/2705-0998.26.07.085

1 引言

永磁同步电机（PMSM）因具备效率高、功率密度大及控制品质优良等优势，在工业伺服、电动汽车及航空航天等多个领域得到普遍应用。要实现高性能闭环调控，必须获取精确的转子位置与转速信息。然而，传统机械式传感器存在成本偏高、可靠性不足、安装条件受限等缺点，因此无速度传感器控制技术逐渐成为研究热点。

滑模观测器（SMO）由于能够有效抵抗系统参数变化和外部扰动，被大量应用于 PMSM 的无速度传感器控制中。但传统 SMO 所引入的符号函数会带来高频切换项，使系统产生剧烈抖振，这不仅降低了估计精度，还可能激发未建模动态。

为缓解抖振问题，本文提出一种基于 Sigmoid 函数的改进型滑模观测器。该函数融合了饱和函数边界层切换概念与理想滑模设计思想，在边界层外采用开关控制，边界层内实施线性连续切换，并通过补偿项保证切换过程的平滑性。合理调节曲线系数，可以在抑制抖振与维持滑模跟踪性能之间取得平衡。仿真结果验证了该方法的有效性。

2 传统滑模观测器

传统滑模观测器通常借助系统输出误差来构造滑模面。其基本思路是在系统数学模型基础上，加入由开关函数驱动的非线性反馈项，迫使观测值收敛至真实值。在静止坐标系（ $\alpha\beta$ 轴）下，PMSM 的电流状态方程可表达为：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} e_{\alpha} \\ e_{\beta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 e_{α} 与 e_{β} 为反电动势，包含转子的转速与位置信息，传统 SMO 通过符号函数构造切换控制项来估计反电动势，如下式（2）与式（3）所示：

$$\hat{e}_{\alpha} = k \cdot \text{sign}(\tilde{i}_{\alpha}) \quad (2)$$

$$\hat{e}_{\beta} = k \cdot \text{sign}(\tilde{i}_{\beta}) \quad (3)$$

3 基于 Sigmoid 函数的改进滑模观测器

为抑制抖振，本文采用 Sigmoid 函数代替符号函数，其表达式如下（4）：

$$\text{Sigmoid}(x) = \frac{1 - e^{-\alpha x}}{1 + e^{-\alpha x}} \quad (4)$$

其中， $\alpha > 0$ 为曲线系数，决定控制函数的平滑程度。当 α 较大时，Sigmoid 函数趋近于符号函数，跟踪能力增强，但对抖振的抑制效果下降；当 α 较小时，函数更加平滑，抖振抑制效果更佳，但可能使系统偏离滑模面。实际应用中可通过试凑法选取合适的 α 值。

Sigmoid 函数天然具备边界层方法的特点：在边界层外部等效为开关控制，在边界层内部为线性控制，并且在切换过程中引入补偿项，使系统运动保持连续、光滑，从而有效降低抖振。

改进后的反电动势估计公式如下（5）与（6）所示：

$$\hat{e}_{\alpha} = k \cdot \text{sigmoid}(\tilde{i}_{\alpha}) \quad (5)$$

$$\hat{e}_{\beta} = k \cdot \text{sigmoid}(\tilde{i}_{\beta}) \quad (6)$$

4 系统仿真及结果分析

为了验证采用 Sigmoid 函数替代传统符号函数的控制策略的有效性，在 MATLAB/Simulink 软件中搭建了 PMSM 无传感器控制系统仿真模型。主要仿真参数设置为：控制周期：控制周期为 1×10^{-4} s，电机部分计算周期为 1×10^{-6} s；PMSM 的具体参数为：额定功率 1.5kW，定子电阻 2.875 Ω ，d-q 轴电感 8.5mH，永磁体磁链 0.175Wb，极对数 4，模型框图如图 1 所示。

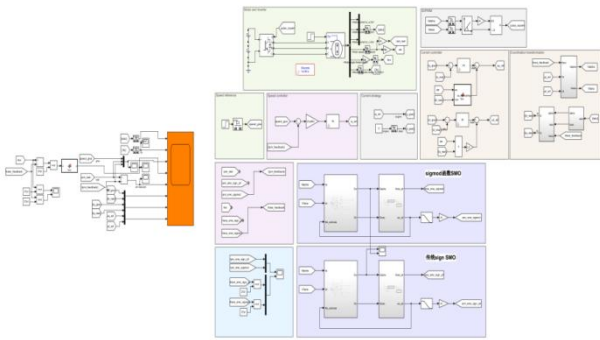


图 1 传统开关函数与 Sigmoid 函数滑模模型框图

仿真工况设定为：电机从零速空载启动，在 0 s 时刻给定 1000 rpm 的阶跃转速指令，0.5 s 时突加额定负载。图 2（左）为传统开关函数 SMO 下的转速曲线，图 2（右）为 Sigmoid 函数 SMO 下的转速曲线，二者与给定转速、实际转速共同展示。

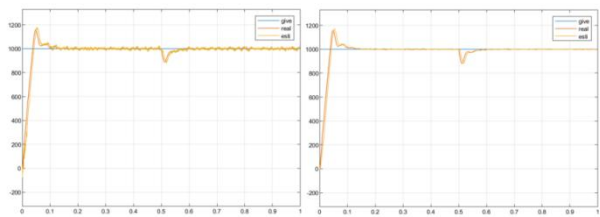


图 2 传统开关函数与 Sigmoid 函数滑模观测器转速曲线

传统 SMO 在稳态阶段存在明显的转速抖振（图 2 左），加载后波动进一步加剧。而 Sigmoid-SMO 的估计转速波形（图 2 右）较为平滑，与实际转速贴合良好，动态响应迅速，稳态误差更小。

图 3（左）与图 3（右）分别给出了两种观测器的转速估计误差对比。

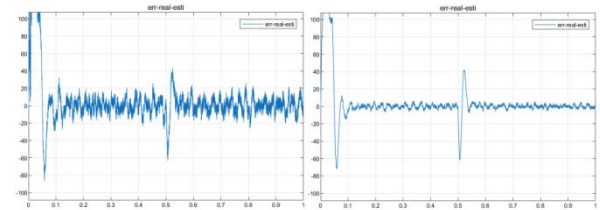


图 3 传统开关函数与 Sigmoid 函数滑模观测器转速误差曲线

传统 SMO 的转速误差波动范围约为 ± 30 rpm（图 3 左），而 Sigmoid-SMO 的误差被压缩至 ± 5 rpm 以内（图 3 右），估计精度显著提高。

图 4（左）、图 4（右）以及图 5（左）、图 5（右）分别展示了两种观测器下角估计值与实际角度的对比，以及对应的转角误差曲线。

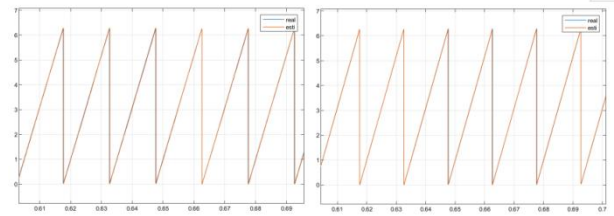


图 4 传统开关函数与 Sigmoid 函数滑模观测器估计转角与实际转角曲线

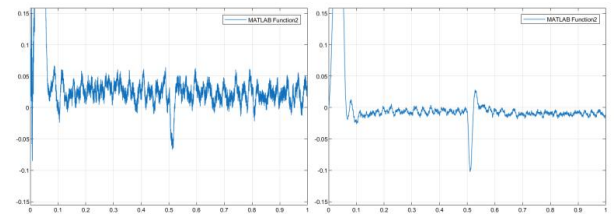


图 5 传统开关函数与 Sigmoid 函数滑模观测器估计转角与实际转角误差曲线

传统 SMO 的转角及误差波形（图 4 左、图 5 左）中存在高频毛刺，误差约为 0.1 rad，且误差累积明显；而 Sigmoid-SMO 的转角及误差波形（图 4 右、图 5 右）更加平滑，误差被控制在 0.02 rad 以内，位置跟踪性能获得显著提升。

图 6 给出了两种观测器估计所得的反电动势波形对比。

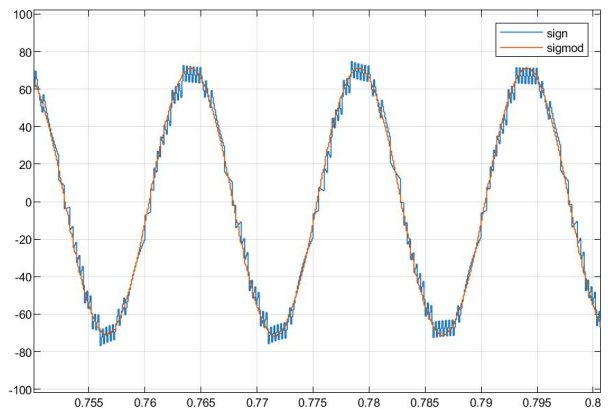


图 6 传统开关函数与 Sigmoid 函数估算反电动势

传统 SMO 估计的反电动势存在明显的高频锯齿状抖动；相比之下，Sigmoid-SMO 输出的反电动势波形连续、光滑，谐波成分较少，为后续的转速与位置解算提供了更高质量的输入信号。

5 结论与展望

针对永磁同步电机无速度传感器控制中常规滑模观测器容易产生高频抖振的问题，本文提出并实现了一种基于 Sigmoid 函数的改进滑模观测方案。该方案融合边界层切换理念，用连续光滑的 Sigmoid 函数取代传统的符号函数，有效抑

制了系统抖振。仿真对比结果表明:

(1) Sigmoid-SMO 大幅降低了转速估计和转子位置估计的波动幅度与偏差;

(2) 反电动势波形品质获得显著提升, 高频抖振被有效削弱;

(3) 在启动、稳态运行及突加负载等工况下均展现出良好的估计性能。

(4) 所提出的方法结构简洁, 便于工程实现, 具有较好的应用价值。

参考文献:

- [1] 刘青.永磁同步电机无传感器性能提升实现及死区补偿[D].湖北:华中科技大学,2019.
- [2] 蒲瑞强.高速 PMSM 无位置传感器控制策略研究[D].陕西:西安工业大学,2023.
- [3] 王昱棠,张宇鹏,徐钰蕾.压电陶瓷驱动快速反射镜双闭环控制[J].仪器仪表学报,2014(z1):68-72.
- [4] 孙方方,陈珂.基于滑模观测器的 PMSM 无位置传感器控制策略[J].防爆电机,2020,55(4):42-46,51.
- [5] 邱凌烽,杨凯,杨帆,等.基于改进重复自抗扰控制的永磁同步电机谐波抑制[J].组合机床与自动化加工技术,2023(1):1-5.
- [6] 邱凌烽,杨凯,杨帆,等.基于改进重复自抗扰控制的永磁同步电机谐波抑制[J].组合机床与自动化加工技术,2023(1):1-5.
- [7] 江苏科技大学.一种 FOGI 两级滤波滑模观测器的永磁同步电机无感控制方法:CN202511224418.5[P].2025-12-05.