

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.015

基于改进型滑模观测器的电主轴 STA 控制策略

陈昆鹏, 单文桃, 曹伟长, 何之渊

(江苏理工学院 机械工程学院, 江苏 常州 213001)

摘要: 为了改善永磁同步电主轴调速的观测精度, 解决传统滑模观测器控制存在抖振的现象, 提出一种将改进型滑模观测器与 STA 滑模相结合的控制方式。将传统的 PI 转速控制器替换成 STA 滑模控制器。采用积分滑模控制和饱和函数理论来搭建改进型滑模观测器仿真模型, 李雅普诺夫判据可以为这一策略的稳定性提供有力的支持。搭建基于 Matlab 的仿真实验平台进行实验验证表明: 采用该方法的永磁同步电主轴无位置传感器控制系统抗干扰能力及鲁棒性较好, 有利于降低滑模抖振, 改善电主轴系统的稳定性。

关键词: 高速电主轴; 滑模观测器; STA 滑模控制; 饱和函数; 矢量控制

中图分类号: TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)01-0067-05

STA Control Strategy of Motorized Spindle Based on Improved Sliding Mode Observer

CHEN Kunpeng, SHAN Wentao, CAO Weichang, HE Zhiyuan

(Institute of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: To better the observation accuracy of speed regulation of permanent magnet synchronous motorized spindle and solve the problem of chattering in traditional sliding mode observer control, a control method combining the improved sliding mode observer with STA sliding mode is proposed. The traditional PI speed controller is replaced by STA sliding mode controller. Integral sliding mode control and saturation function theory are applied to build the simulation model of the improved sliding mode observer. Lyapunov criterion can be of strong support for the stability of the proposed strategy. The experiment verifies that the sensorless control system of permanent magnet synchronous motorized spindle with this method has good anti-interference ability and robustness, which is conducive to reducing sliding mode chattering and improving the stability of motorized spindle system.

Keywords: high speed motorized spindle; sliding mode observer; STA sliding mode control; saturation function; vector control

0 引言

近年来, 永磁同步电主轴技术已成为数控机床领域的一项重要发展方向, 它将机床主轴与电机完美结合, 为《中国制造 2025》提供了强有力的支撑, 并为高档数控机床产业的发展提供了战略目标和重点发展方向。电主轴能够实现升降速快、对于设定位置准停速度快等功能, 这些优点使其推动高速机床行业快速发展。电主轴具备高质量、低噪声、高精度等优势, 是一种理想的机床功能部件。电主轴因其独特的结构, 有着多种称谓, 如“高频主轴”、“直接传动主轴”、“内装式电主轴”, 一般将其通称为永磁同步电主轴(permanent magnet synchronous motorized spindle, PMSMS)^[1]。

由于 PMSMS 技术的蓬勃发展, 其高速化已作为未来数控系统开发的重点所在。然而, 由于电

主轴在高速运行时, 其内在机械、物理性质等技术参数会产生巨大变化, 因此采用无传感器控制方式的永磁同步电主轴驱动控制系统已变成国内外研究者们关注的焦点^[2-4]。它是一种不依靠机械传感器来估计电主轴转子位置和速度的技术, 通常采用基于电机数学模型的多种控制方法, 一般分为滑模观测器法(sliding mode observer, SMO)^[5-6]、龙伯格观测器法(luenberger observer, LO)^[7]、卡尔曼滤波器法(kalman filter, KF)^[8-9]和模型参考自适应法(mode reference adaptive system, MRAS)^[10]等。

滑模观测器(SMO)因具有高鲁棒性、低复杂度等优势故应用较为广泛。滑模观测器具有开关控制特性, 由于开关时间和空间迟滞, 它们容易产生强烈的抖振问题, 所产生的各种延迟现象会降低系统的估计精度。因此, 迫切需要研究更加深

基金项目: 江苏省高校自科重大项目(19KJA510001); 江苏省青蓝工程中青年学术带头人项目(KYQ20004)

第一作者简介: 陈昆鹏(1999—), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 研究方向为高速永磁同步电主轴控制, 1710136458@qq.com。

人的控制策略来提高电主轴系统的调速性能。对此,国内外学者提出了许多控制解决策略与改进方式。文献[11]设计了自适应超螺旋滑模观测器,该无位置传感器控制策略可以根据控制系统速度的变化实时调整滑动模式参数,这种控制策略比传统的滑模观测器更有效抑制系统的抖振。文献[12]和文献[13]分别分析了传统滑模观测器存在抖振的现象,并提出了新的抑制抖动的方法。文献[12]使用饱和函数代替符号函数,以准确估计转速,并减小转子位置估计过程中产生的抖振。文献[13]还提出了一种新的控制策略,即使用 PLL 来代替反正切函数和相位补偿,从而大大提高了滑模观测器的估算精度。文献[14]设计了新型滑模观测器的控制策略,在把双正切函数引入滑模控制的同时,将传统观测器里的滑模控制与模型参考自适应控制相结合,有效地抑制了传统滑模控制抖振,并精确地观测出了电机转子相位信息。文献[15]将连续切换函数替换为不连续切换函数,并与指数趋近律相结合,从而有效控制了传统观测器存在系统抖振的问题,使得控制更加精确可靠。文献[16]可以有效地解决电机空间矢量的直接转矩控制难题,例如超调频繁和响应时间慢。为了解决直接转矩控制存在的超调频繁的问题,利用 Super-twisting 理论设计了滑模速度控制器,能进一步提高动态响应性能。文献[17]通过把传统滑模观测器的切换函数替换为 Sigmoid 函数,有利于减小抖振,反正切估算转子位置替换为 PLL 锁相环,改善了转子位置的估算精度。

基于上述研究,要实现滑模控制与表贴式永磁同步电主轴的集成,需要进行滑模面设计、状态观测和反馈、控制律设计以及参数调整等一系列步骤。本次实验设计了新型控制策略,即将 STA (super-twisting algorithm) 滑模速度控制器与改进型滑模观测器相结合的永磁同步电主轴控制策略。首先本设计将 2 阶滑模的理论替换传统滑模控制理论,设计出了 STA 滑模控制器,从而减小系统抖振。然后把传统的滑模观测器理论替换为饱和函数理论,有利于抑制传统滑模观测器带来的抖振,改善了永磁同步电主轴控制性能。最后利用李雅普诺夫判据进行稳定性验证。通过 Matlab 实验仿真表明:该控制策略不仅能够有利于减少传统滑模观测器带来的抖振问题,而且还能够改善永磁同步电主轴调速系统的鲁棒性和抗负载扰动能力。

1 表贴式永磁同步电主轴数学模型分析

表贴式永磁同步电主轴是本实验的研究对象,永磁体被直接安装在电机转子的外部表面,而不是嵌入转子内部,该非线性系统有着复杂、强耦合等特性。为设计出所需的数学模型,可将旋转坐标系引入两相静止坐标系中,静止坐标系与旋转坐标系之间存在一个旋转的角度值 θ ,如图 1 所示。即可将 α - β 坐标系下的电流矢量值转化为 d - q 坐标系下的标量值,将交流电机等效成直流电机来控制定子电流和转矩。

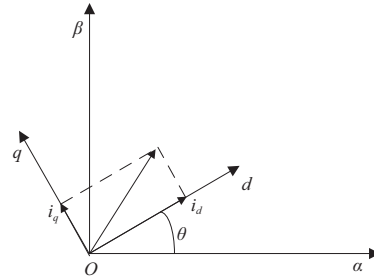


图 1 两相静止与同步旋转坐标系

永磁同步电主轴在 d - q 旋转坐标系数学模型的电压方程可表示为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \Psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 和 u_q 分别为旋转坐标系 d - q 轴的定子电压分量; i_d 、 i_q 分别为旋转坐标系下 d - q 轴的定子电流分量; ω_r 是电角速度; R_s 是定子相电阻; Ψ_f 为磁链。

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3}{2} p_n \Psi_f i_q - T_L \quad (2)$$

式中: J 为转动惯量; ω_m 为机械角速度; p_n 为磁极对数; T_L 为永磁同步电主轴负载转矩。

$$L_d = L_q = L_s \quad (3)$$

式中: L_d 和 L_q 分别为 d 轴、 q 轴的等效电感; L_s 为定子电感。

结合式(2)一式(3),式(1)可变为如下形式:

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} (-R_i i_q - p_n \Psi_f \omega_m + u_q) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left(-T_L + \frac{3}{2} p_n \Psi_f i_q \right) \end{cases} \quad (4)$$

忽略电主轴在稳定运行时产生的定子压降,改写电压方程为

$$\begin{cases} u_d = -\omega_r L_q i_q \\ u_q = \omega_r L_d i_d + \omega_r \Psi_f \end{cases} \quad (5)$$

表贴式永磁同步电主轴的电磁转矩 T_e 方程为

$$T_e = p_n \left[\Psi_f i_s \sin \beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) i_s^2 \sin 2\beta \right] \quad (6)$$

2 STA 滑模控制器

Super-Twisting 算法:

$$\begin{cases} u = -\lambda |s|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(s) + u_1 \\ \dot{u}_1 = -\alpha \operatorname{sgn}(s) \end{cases} \quad (7)$$

为了使参数 λ 、 α 达到收敛,需满足:

$$\begin{cases} \lambda > \sqrt{\frac{2}{K_m \alpha - C}} \times \frac{(K_m \alpha + C) K_m (1+q)}{K_m^2 (1-q)} \\ K_m \alpha > C \end{cases} \quad (8)$$

高阶滑模 STA 的具体表达式可写为

$$u = \lambda |s|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sign}(s) + \int a \operatorname{sign}(s) dt \quad (9)$$

在滑模面上收敛且稳定的充分条件:

$$\begin{cases} \lambda > \frac{A_M}{B_m} \\ \alpha \geq \frac{4A_M}{B_m} \cdot \frac{B_m(K_p + A_m)}{B_m(K_p - A_m)} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $A_M \geq |A|$; $B_M \geq B \geq B_m$; $\lambda > 0$, $\alpha > 0$, 为待设计参数。

为了获得速度控制器的表达式,定义转速滑模面函数为

$$S_\omega = \omega^* - \omega \quad (11)$$

其速度控制器表达式为

$$\begin{cases} i_q^* = \lambda |s_\omega|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sign}(s_\omega) + i_q \\ \frac{di_q}{dt} = \alpha \cdot \operatorname{sign}(s_\omega) \end{cases} \quad (12)$$

3 改进型滑模观测器

PMSMS 在静止坐标系 (α - β 轴) 的模型为:

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_\alpha + \frac{1}{L_s} u_\alpha - \frac{1}{L_s} e_\alpha \\ \frac{di_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_\beta + \frac{1}{L_s} u_\beta - \frac{1}{L_s} e_\beta \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} e_\alpha = -\Psi_f \omega_e \sin \theta_e \\ e_\beta = \Psi_f \omega_e \cos \theta_e \end{cases} \quad (14)$$

式中: i_α 、 i_β 分别为电主轴 α 、 β 轴定子电流; u_α 、 u_β 分别为 α 、 β 轴电压分量; θ_e 为永磁同步电主轴转子相位。

传统滑模观测器数学模型为

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_s} u_\alpha + H_\alpha \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s} u_\beta + H_\beta \end{cases} \quad (15)$$

式中: “ $\wedge$ ” 代表各状态量估算值; H_α 、 H_β 为控制律。

由式 (14) 反电动势分别为 e_α 、 e_β ; 将式 (13) 与式 (15) 作差可得滑模观测器的方程为:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \bar{i}_\alpha + \frac{1}{L_s} e_\alpha + H_\alpha \\ \frac{d\bar{i}_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \bar{i}_\beta + \frac{1}{L_s} e_\beta + H_\beta \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \bar{i}_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \bar{i}_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta \end{cases} \quad (17)$$

设计观测器积分滑模面, 即

$$s = c_1 \bar{i} + c_2 \int \bar{i} dt \quad (18)$$

式中: $c_1 > 0$; $c_2 > 0$ 。

滑模观测器采用指数趋近律, 即

$$\dot{s} = -\varepsilon |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - \eta s \quad (19)$$

式中: $\varepsilon > 0$; $\eta > 0$; $0 < \alpha < 1$ 。

传统滑模观测器控制律为

$$H = \frac{1}{c_1} \left[-(\varepsilon |s|^\alpha + \gamma) \operatorname{sgn}(s) - \eta s + \left(\frac{R_s}{L_s} c_1 - c_2 \right) \bar{i} \right] \quad (20)$$

式中

$$\gamma > \frac{c_1}{L_s} \max(e_\alpha, e_\beta) \quad (21)$$

系统在达到一定的工作条件时, 状态变量及其变化率均为 0, 即

$$\begin{cases} \frac{d\bar{i}_\alpha}{dt} = \bar{i}_\alpha = 0 \\ \frac{d\bar{i}_\beta}{dt} = \bar{i}_\beta = 0 \end{cases} \quad (22)$$

PMSMS 反电动势模型为

$$\begin{cases} e_\alpha = -L_s H_\alpha \\ e_\beta = -L_s H_\beta \end{cases} \quad (23)$$

通过建立 Lyapunov 方程验证, 即

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (24)$$

对式 (24) 进行求导, 得

$$\dot{V} = s \dot{s} = s (c_2 \bar{i} + c_1 \dot{\bar{i}}) = s \left[c_2 \bar{i} + c_1 \left(-\frac{R_s}{L_s} \bar{i} + \frac{1}{L_s} e + H \right) \right] \quad (25)$$

故:

$$\dot{V} \leq -\varepsilon |s|^{\alpha+1} - \eta s^2, \quad \dot{V} \leq 0$$

$$F(s) = \begin{cases} \frac{s}{a}, & |s| \leq a \\ \text{sgn}(s), & |s| > a \end{cases} \quad (26)$$

经过验证,本文设计的积分滑模观测器符合李雅普诺夫判据要求,并且具有良好的稳定性,可实现永磁同步电主轴滑模控制要求。

式(26)中的饱和函数的线性范围内,滑模增益的斜率和滑模边界层厚度由 α 的数值来决定,其中 α 为常数。当 γ 满足式(21)的要求时,本实验设计的改进型滑模观测器依然满足李雅普诺夫判据。

此时滑模观测器控制律可改写为

$$H' = \frac{1}{c_1} \left[-(\varepsilon |s|^{\alpha} + \gamma) F(s) - \eta s + \left(\frac{R_s}{L_s} c_1 - c_2 \right) \dot{i} \right] \quad (27)$$

4 实验分析

通过对表贴式永磁同步电主轴在 Simulink 仿真环境建模仿真,选用 Simulink 元器件库搭建改进型滑模观测器模块与 STA 滑模速度控制模块。本实验所研究的表贴式永磁同步电主轴仿真参数如表 1 所示,本实验搭建模型如图 2 所示。从图中可以看出 STA-SMC 模块为高阶滑模控制模型,PLL 与 SMO 模块为改进型滑模观测器模型,然后通过相对应的公式计算得出估计转速和电主轴转子估计位置信息。

表 1 高速磨削电主轴参数

参数名称	数值	参数名称	数值
转速/(r/min)	10 000	定子电阻/ Ω	0.15
磁链 Ψ_f /Wb	0.1	转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.015
直流侧电压 U /V	540	磁极对数 p_n	2
定子电感 L_d /H	0.002 8	定子电感 L_q /H	0.002 8

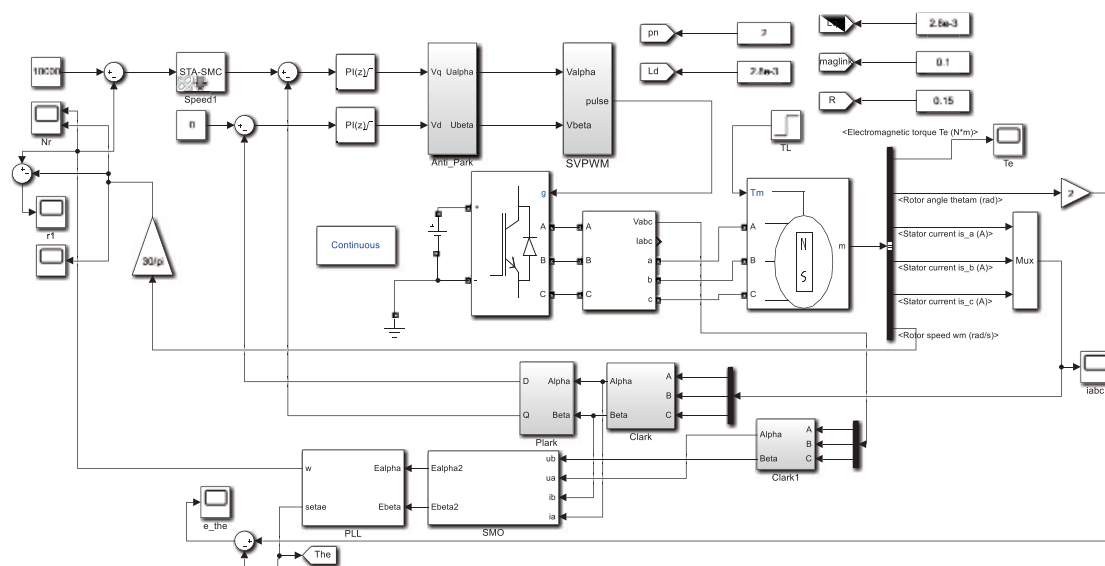


图 2 基于改进型滑模观测器的 PMSMS 的 STA 滑模控制模型

本次仿真为 $i_d=0$ 的矢量控制策略,STA 滑模控制代替 PI 速度控制器,改进型滑模观测器代替传统滑模观测器。分别对电机转速、转子位置误差、电流时间关系和转矩时间关系进行了仿真分析,如图 3—图 6 所示。

设定电主轴的转速为 10 000 r/min,从图 3 可以看出在 3 s 时对永磁同步电主轴施加一个 1 Nm 的阶跃负载,转速时间关系曲线如图 3 所示,主轴转速上升时间为 0.8 s,从图 3 纵向放大图可以看出,电主轴转速超调量约为 0.005%,在 3.0 s 时加

入阶跃负载,此时系统受到扰动,并在 0.6 s 内恢复到设定转速。由图 4 转子位置估计值与实际值的误差图可以看出,滑模观测器只有在电主轴低速阶段即提速时有较大误差,随着转速升高,误差逐渐减小。由此可见双滑模控制的观测值能很好地跟随实际值,改善了观测精度。

由图 5 可以看出,当转速达到设定转速时,电流快速减小,符合系统过程分析。由图 6 可知,改进型滑模观测器的转矩曲线平滑,改善了观测精度,有利于抑制系统抖振。

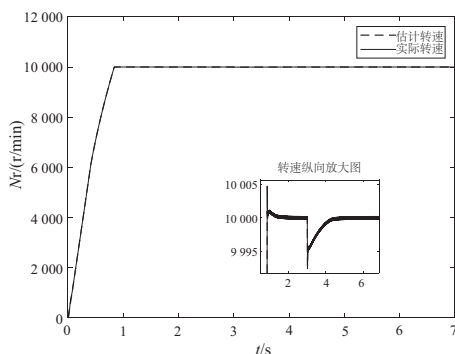


图3 转速时间关系

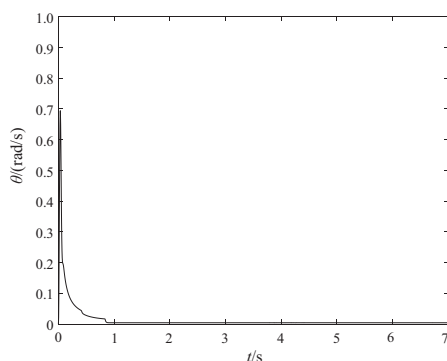


图4 转子位置误差

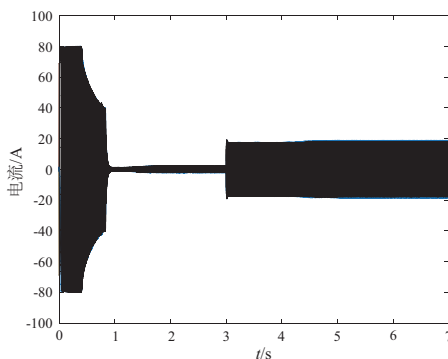


图5 电流时间关系

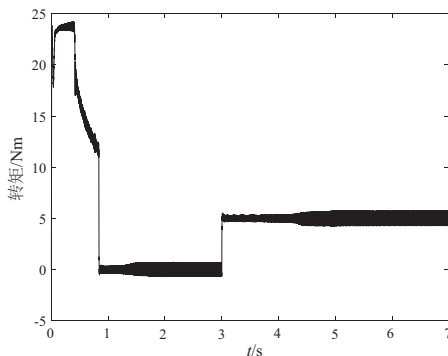


图6 转矩时间关系

5 结语

为了改善永磁同步电主轴调速的观测精度,解决抑制传统滑模观测器控制存在抖振抗负载扰动能力弱等现象,本文将 STA 滑模控制与改进型滑模观测器相结合。传统滑模控制由于 SMC 的固有性质,在滑模面间来回切换结构,导致滑模控制有较大的抖振。而本设计所采用的 STA 滑模控制器像线性控制器一样在运行的时候没有抖振,并且能够像传统滑模控制器那样有着非常强的鲁棒性。通过改进型滑模观测器,能够实现对转子位置和转速的精确观察,而且不需要采用相位补偿,大大减少了系统抖振,即使在突加负载时也能保持良好的特性,从而表明改善了追踪精确度。

通过 Simulink 搭建仿真模型,对本文设计的电主轴仿真进行结果分析,结果证明所设计的双滑模控制系统结构简单、效果卓越。该双滑模控制改善了系统观测精度、鲁棒性和稳定性,有利于抑制传统滑模带来的抖振问题。

参考文献:

- [1] 单文桃,李坤.内置式永磁同步电主轴模糊滑模联合矢量控制[J].机械工程学报,2022,58(3):177-185.
- [2] 单文桃,王鑫.基于模糊滑模切换控制的 PMSMS 弱磁调速控制策略[J].振动与冲击,2020,39(4):222-228.
- [3] 孙荣俊,孙中圣,鲁明.基于自抗扰控制器的永磁同步电主轴速度扰动控制研究[J].组合机床与自动化加工技术,2016(11):108-111.
- [4] 陈晓,赵亚东.永磁同步电主轴电机电磁与控制策略仿真分析[J].机床与液压,2021,49(3):159-165.
- [5] 张亮,许傲然,白迪,等.基于滑模观测器的永磁直线同步电机速度控制[J].微特电机,2016,44(1):51-54,63.
- [6] ZHANG X G, LI Z X. Sliding - mode observer - based mechanical parameter estimation for permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5732-5745.
- [7] 刘计龙,肖飞,沈洋,等.永磁同步电机无位置传感器控制技术研究综述[J].电工技术学报,2017,32(16):76-88.
- [8] 汪凤翔,柯哲涵,柯栋梁,等.基于强跟踪扩展卡尔曼观测器的三电平逆变器永磁同步电机无模型预测电流控制[J].中国电机工程学报,2023,43(22):8910-8922.
- [9] 詹国兵,宗子皓,吉智.采用扩展卡尔曼滤波的永磁同步电机转矩控制[J].微电机,2020,53(10):94-98,106.

(下转第 80 页)

载。先使推拉压力传感器读数 $\geq 8\text{ kN}$,利用深度尺测量举升机构搭载平台下端与基座上端面距离 $L_{z1}=278.0\text{ mm}$;而后改变千斤顶加载方向,使推拉压力传感器读数 $\leq -8\text{ kN}$,利用深度尺测量距离 $L_{z2}=278.6\text{ mm}$;则 8 kN 推拉引起的轴向窜动量 $\sigma_z=L_{z2}-L_{z1}=0.6\text{ mm}$ 。

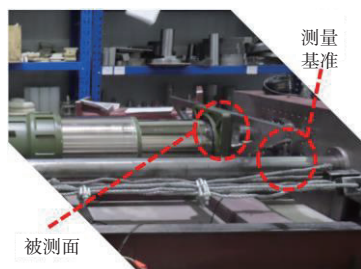


图9 高位偏摆加载试验



图10 轴向推拉加载试验

5 结语

本文提出的某雷达天线举升机构采用缸筒一体化集成设计,实现了举升机构的小型化、轻量

化、高精度及高机动性,同时通过理论计算对机构的具体载荷情况进行分析,其中包含风载荷、离心载荷及惯性载荷。接着分析了机构间隙对举升机构高位工作状态下工作精度的影响,进一步通过仿真分析验证结构变形对举升机构高位工作状态下工作精度的影响,最后通过试验验证了本文所设计的举升机构满足该型雷达的高精度使用需求。

参考文献:

- [1] 张炎.某型车载雷达举升机构转动副间隙与位置误差的分析[D].武汉:武汉理工大学,2018.
- [2] 胡晓峰.某雷达双丝杠驱动举升机构精度分析与力学性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.
- [3] 钱海涛,刘湛,程林.新型雷达天线俯仰举升机构设计[J].电子机械工程,2012,28(1):29-32.
- [4] 康伟.车载雷达举升装置装配精度控制关键技术研究[D].武汉:武汉理工大学,2017.
- [5] 楚波.一种双级并行联动电动缸结构设计[J].现代制造技术与装备,2021,57(3):73-74.
- [6] 曹勇.多级套筒升降机构设计与分析[J].现代制造技术与装备,2020,56(9):57-59.
- [7] 龚振邦,陈守春.伺服机械传动装置[M].北京:国防工业出版社,1980.
- [8] 马晓丽,黄云峰.机械设计[M].北京:机械工业出版社,2018.
- [9] 成大先.机械设计手册—轴承:单行本[M].6版.北京:化学工业出版社,2017.
- [10] 乔凤斌,张松,张华德.具有抗8级风性能的天线举升机构的设计与分析[J].液压与气动,2012(8):13-16.

收稿日期:2023-06-20

(上接第71页)

- [10] 郭亮,梁状,杨阳.基于自适应滑模电流控制算法的仿真研究[J].计算机仿真,2021,38(11):207-214.
- [11] 王杰,周立,苏美霞,等.基于模糊控制的自适应超螺旋滑模观测器无传感器控制[J].电气工程学报,2023,18(1):32-42.
- [12] 华志广,窦满峰,赵冬冬,等.基于改进型滑模观测器的PMSM无位置传感器控制[J].西北工业大学学报,2018,36(4):754-760.
- [13] 林巨广,王涛,李晶晶.基于新型SMO的PMSM无传感器控制[J].组合机床与自动化加工技术,2022(12):53-56.
- [14] 白洪芬,朱景伟,秦俊峰,等.基于变结构模型参考自

适应的双绕组永磁容错电机转子位置估计算法[J].控制与决策,2018,33(1):27-36.

- [15] 吕德刚,李子豪.表贴式永磁同步电机改进滑模观测器控制[J].电机与控制学报,2021,25(10):58-66.
- [16] 万东灵,赵朝会,王飞宇,等.基于Super-twisting滑模永磁同步电机驱动的转速和转矩控制[J].电机与控制应用,2017,44(10):42-47.
- [17] 任志斌,房梦程,陈柳彬.优化L/F起动的PMSM改进型SMO无位置传感器控制[J].微电机,2021,54(12):56-60.

收稿日期:2023-05-25