

伺服加载系统的摩擦预测模型研究

翟逸阳, 陈光胜*

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年8月28日; 录用日期: 2025年9月21日; 发布日期: 2025年9月28日

摘要

针对伺服加载系统中摩擦力矩对测量精度的影响, 提出了一种考虑速度与压力双变量影响的摩擦力矩预测建模方法。首先, 通过实验平台采集了主轴在不同速度与加载压力条件下的扭矩响应数据, 基于传统 Stribeck 摩擦模型, 提出了带压力影响项的改进模型, 并结合遗传算法进行参数辨识, 最后采用最小二乘法进行精确逼近。实验结果表明, 该模型在中、高速区间都具有较好的拟合精度, 模型预测值与实测数据的最大相对误差在 3.5% 以内, 能有效描述实际摩擦力矩变化趋势, 并在实际工程应用中具有较高的建模精度。

关键词

伺服系统, Stribeck 模型, 摩擦辨识, 遗传算法

Research on Friction Prediction Model of Servo Loading System

Yiyang Zhai, Guangsheng Chen*

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: August 28, 2025; accepted: September 21, 2025; published: September 28, 2025

Abstract

Aiming at the influence of friction torque on measurement accuracy in servo loading systems, a friction torque prediction modeling method considering both velocity and pressure effects is proposed. Firstly, torque response data of the spindle under different velocity and loading pressure conditions were collected through an experimental platform. Based on the traditional Stribeck friction model, an improved model with pressure influence terms was established, and the parameters were identified using a genetic algorithm. Finally, the least squares method was applied for accurate approximation.

*通讯作者。

文章引用: 翟逸阳, 陈光胜. 伺服加载系统的摩擦预测模型研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(10): 21-27.
DOI: 10.12677/mos.2025.1410602

Experimental results show that the proposed model achieves good fitting accuracy in both medium- and high-speed ranges, with the maximum relative error between the predicted and measured values within 3.5%. The model can effectively describe the actual variation trend of friction torque and has high modeling accuracy in engineering applications.

Keywords

Servo System, Stribeck Model, Friction Identification, Genetic Algorithm

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于伺服系统精度高、响应速度快,且可以输出线性推力的特点,被广泛应用于许多工程场景中,如结构件性能评估、疲劳测试与力学仿真等。而这些系统中存在许多运动副,在运动的过程中,会产生许多摩擦力矩,影响系统的输出扭矩、响应速度和测量精度。为了准确描述摩擦力与速度之间的非线性关系,研究者们已经提出了多种摩擦建模方法,如库仑摩擦模型、粘性摩擦模型、Stribeck 模型以及更为复杂的 LuGre 动态模型等[1]-[3]。其中, Stribeck 模型能够较好地描述低速区间的摩擦现象,具有良好的工程适应性,被广泛应用于高精度伺服系统中[4]。

近年来,针对摩擦力模型中存在的参数非线性、多变量等问题,研究者开始采用遗传算法、粒子群算法等智能优化方法对摩擦模型进行辨识,以提高其建模精度和鲁棒性[5]。例如, Li 等人通过实验构建了改进 Stribeck 模型,并采用优化算法识别参数,从而有效补偿了精密平台中的低速摩擦扰动;朱家辉等人提出了一种基于扩张状态观测器(ESO)的 RBF 神经网络滑模控制(RBF-SMC)策略,可有效解决非线性摩擦造成的“平顶”现象[5]; Gao 等人分析了近年来典型摩擦模型的优缺点,提供了一些非线性摩擦控制策略的选型参考[6]。

本文针对运动副中的摩擦力矩问题,提出了一种考虑速度和负载两个影响因素的摩擦力矩预测建模方法。先搭建了实验平台,通过实验采集了主轴在不同速度与加载压力下,一共 40 个不同工况的扭矩响应数据,然后基于传统的 Stribeck 模型,构建了带压力参数的改进模型,并采用了遗传算法和最小二乘法进行参数的辨识,同时,文章还选取了一些特定的工况对模型进行验证。最终得到的预测模型在低速区间有良好的拟合精度,能够有效反映实际摩擦力矩变化趋势,具备较高的建模精度与工程应用价值。

本文的研究给加载系统摩擦力的预测提供了一个建模方法,也可以对后续扭矩的效率测试进行补偿。

2. 系统模型建立

2.1. 主轴旋转系统的结构组成

本文研究的对象为一套用于丝杆效率测试的横向伺服加载系统,从左到右分别为伺服电机、扭矩传感器、联轴器、气动夹头与用于加载的电缸。电机通过联轴器带动滚珠丝杆旋转,丝杆端部通过夹头与滑块相连,电缸施加轴向加载力,实现对丝杆传动过程中的摩擦损耗特性建模,系统结构如图 1 所示。

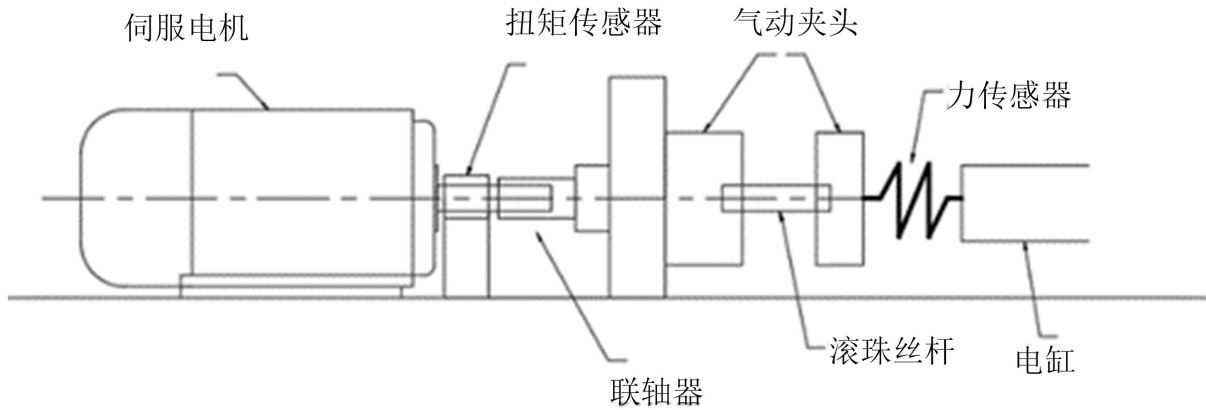


Figure 1. Structure of the servo loading system

图 1. 伺服加载系统结构示意图

本文所用伺服电机为 SGMXA-30AUA61C2 永磁同步电机, 额定功率 3.0 kW, 额定转矩 9.8 N·m, 额定转速 3000 rpm; 电缸为 SGMXA-10AUA61C2, 额定功率 1000 W, 额定转矩 3.18 N·m, 额定转速 3000 rpm。同时, 本实验平台还配置了独立的扭矩传感器, 型号为 EAGOS ET5 高精度扭矩传感器, 量程为 20 N·m, 精度等级 0.1。

本文使用的伺服电机为永磁同步电机, 为了准确描述它的动态行为, 采用在同步旋转坐标系下的建模方法。与传统三相静止坐标系相比, d-q 建模能够将交变变量变换为直流变量, 从而实现对磁链和转矩的独立控制, 广泛应用于现代伺服控制系统中。

伺服电机电气侧的电子定压方程和电磁转矩方程为:

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

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

其中: u_d 、 u_q 为 d 轴和 q 轴电压; i_d 、 i_q 为 d 轴和 q 轴电流, R 为定子电阻; L_d 和 L_q 为 d 轴、q 轴电感; ω_e 为电角频率; ψ_f 为永磁体磁链。在恒磁链控制策略下, 常将 $i_d = 0$, 此时电磁转矩简化为:

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_f i_q \quad (3)$$

系统机械侧的动力学模型可由牛顿第二定律建立。伺服电机输出的电磁转矩需克服负载扭矩和摩擦扭矩, 并驱动系统转动, 因此可写出以下力矩平衡方程:

$$J \frac{d\omega}{dt} + T_f = T_e \quad (4)$$

其中, J 为电机及丝杆系统的等效转动惯量, ω 为电机角速度, T_f 为系统摩擦力矩, T_e 为由电机产生的电磁转矩。该方程表示系统的输出转矩一部分用于克服系统摩擦力矩, 另一部分用于维持转动或加速。

2.2. 摩擦来源分析

在丝杆的效率测试中发现, 丝杆在不同的轴向压力条件下的效率测量结果都明显低于预期值, 猜测

系统中存在显著的摩擦损失, 如果不消除主轴结构中的摩擦干扰, 会导致扭矩读数偏高, 所测得丝杆传动效率偏低。为了进一步分析摩擦的来源和特性, 本文进行了专门的实验, 来研究主轴在不同工况下的摩擦力变化规律。

实验发现, 即使没有施加额外的压力, 主轴旋转, 扭矩也不为零, 这说明系统中存在一部分不可忽略的摩擦力矩, 而随着转速的增加, 空载状态下的扭矩也会增大, 体现出明显的粘性摩擦特性。当施加压力后, 扭矩显著上升, 且随着负载的增加, 扭矩呈现非线性加速增长, 这可能是由于夹头内部存在润滑油, 有粘性阻尼造成的摩擦影响。而无论在固定压力下改变转速, 还是在固定转速下改变压力, 主轴扭矩都呈现出非线性变化。这说明主轴系统的摩擦不仅与转速相关, 还与轴向压力存在耦合的关系。因此仅通过传统的摩擦模型很难准确预测当前系统中的摩擦力矩进行补偿, 需要对摩擦建模方法进行研究。

3. 摩擦模型建立和参数辨识

3.1. 摩擦模型建立

为了对系统中的摩擦行为进行精确建模, 本文首先采用经典的 Stribeck 模型作为基础。它的核心是描述摩擦力矩随速度变化的非线性特性, 也可以体现低速状态下摩擦力随速度下降的 Stribeck 效应。其标准形式如下:

$$T_f(V) = F_c + (F_s - F_c) \cdot \exp\left(-\left(\frac{V}{V_s}\right)^\beta\right) + \eta V \quad (5)$$

其中, T_f 表示摩擦力矩, V 为系统转速; F_c 为库仑摩擦力矩, F_s 为静摩擦力矩, V_s 为 Stribeck 速度系数, 用于控制非线性下降段的变化范围; η 为粘性摩擦系数, β 为指数形状因子。

由于此模型为基础形式, 不能很贴切地描述本研究的问题, 可以在此基础上增加一些项进行改进。例如, 齐智斌等[7]提出了改进的 Stribeck 模型:

$$\begin{aligned} F_c^+ + (F_s^+ - F_c^+) e^{-\left(\frac{u}{u_s^+}\right)^2} + \alpha_1^+ v h(v) + \alpha_2^+ (1 - e^{-\alpha_3^+ v}) (1 - h(v)) (v \geq 0^+) \\ F_c^- + (F_s^- - F_c^-) e^{-\left(\frac{u}{u_s^-}\right)^2} + \alpha_1^- v h(v) + \alpha_2^- (1 - e^{-\alpha_3^- v}) (1 - h(v)) (v \leq 0^-) \end{aligned} \quad (6)$$

这个模型引入了粘性摩擦系数和高速下摩擦比例因子, 以提升中高速区间的拟合精度。其参数较多, 主要适用于补偿控制的高精度场合, 但本文需要解决的是法向压力的影响, 因此需要更加简洁直接的模型。

正如前文描述的, 本实验平台的摩擦不仅与速度有关, 更受到法向上的加载压力的直接影响。根据摩擦学理论, 摩擦力与法向压力在多数工程条件下可近似视为线性关系, 因此在改进模型中引入了与压力成正比的附加项, 以反映加载作用对摩擦力矩的影响。此外, 在高速运行时, 由于润滑油膜的粘性摩擦逐渐增强[8], 因此在模型中增加了速度二次项, 用以更好地拟合高速区间的摩擦特性。

因此, 可以构建出如下的改进模型:

$$T_f(V, P) = F_c + \alpha P + (F_s - F_c) \cdot \exp\left(-\left(\frac{V}{V_s}\right)^\beta\right) + \eta_1 V + \eta_2 V^2 \quad (7)$$

其中, α 为粘性摩擦系数, 用于描述加载压力对摩擦力矩的影响。在高速情况下, 粘性摩擦力会逐渐占主导地位, 而速度的一次项和二次项的摩擦系数 η_1 、 η_2 , 能够更加精确地拟合高速运动时的摩擦行为。使

其更贴合本文测试平台在不同加载工况下的摩擦变化规律。

3.2. 实验数据处理和遗传算法设计

为获得改进的 Stribeck 模型中各参数的最优取值, 本文设计并执行了一套完整的实验数据采集与参数辨识流程。由于摩擦力矩受到系统转速与负载的双重耦合影响, 在测试过程中, 分别设定四种恒定转速, 每种转速下施加九组不同的夹紧压力, 采集到表 1 的数据, 其中, 假定沿主轴轴线向电机方向看, 逆时针方向为正。因此, 在实验数据和参数辨识结果中会出现负值, 并不影响摩擦力矩大小的分析与建模。

Table 1. Measured friction torque data under different speeds and pressures

表 1. 不同转速与压力下的摩擦力矩测量数据

转速\压力	880	1940	2900	3940	4920	5800	6930	8030	0	0 (仅主轴)
50 rpm	-0.5341	-0.6671	-0.7942	-0.9244	-1.1010	-1.1783	-1.3385	-1.5462	-0.4180	-0.4110
100 rpm	-0.6330	-0.7543	-0.8719	-1.0178	-1.1738	-1.2583	-1.4329	-1.6194	-0.5022	-0.4925
200 rpm	-0.8229	-0.9239	-1.0522	-1.1877	-1.2791	-1.4335	-1.5562	-1.7841	-0.6638	-0.6273
300 rpm	-0.9344	-1.0967	-1.1827	-1.3098	-1.3997	-1.5511	-1.6768	-1.8886	-0.7963	-0.7185

为了获得更加准确的参数, 本文采用遗传算法对模型参数进行初步全局搜索[9]。遗传算法是一种模拟自然界的进化过程, 首先生成一个初始种群, 每个个体代表一组参数 $(F_c, F_s, V_s, \eta, \alpha)$ 。这些参数的取值范围根据实验设计或者其他文献中的经验值进行设定。以种群个体为单位进行适应度评估与迭代优化。本模型的目的是最小化该误差, 所以将目标函数定义为模型输出与实验数据之间的误差平方和:

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^n (T_i^{\text{exp}} - T(v_i, P_i; \theta))^2 \quad (8)$$

其中, 参数向量 $\theta = [F_c, F_s, V_s, \eta, \alpha]$, T_i^{exp} 为第 i 个实验点的实测扭矩, n 为参与建模的数据点数目。通过不断优化模型参数, 将目标函数的值 J 逐渐减小, 直到找到使得误差最小化的最优参数值。

在 Matlab 平台中, 设置初始种群规模为 100, 最大进化代数为 200, 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.02, 选择操作采用锦标赛选择策略生成新一代个体, 并在每代中保留最优个体以加速收敛, 遗传算法采用 `ga()` 函数完成全局搜索, 最小二乘优化采用 `lsqcurvefit()` 函数完成局部拟合。最终, 算法收敛后得到的最优参数组合如表 2 所示:

Table 2. Genetic algorithm identification results of optimized parameters

表 2. 优化参数的遗传算法辨识结果

参数	数值	单位
F_c	-0.0629	N·m
F_s	-0.3320	N·m
V_s	400.02	rpm
η_1	-0.001 67	N·m/rpm
η_2	-3.12×10^{-7}	N·m/rpm ²
β	3.84	—
α	-1.345×10^{-4}	N·m/N

4. 验证模型

4.1. 验证点误差分析

图 2 是不同转速下模型的预测值和实测数据的对比图。图中空心圆点为实测值，而实线表示模型的预测结果。整体上摩擦力矩随着负载的增加而上升，而在不同的转速条件下，预测曲线也能较好地体现实测数据的变化，尤其是在中低速区间，模型的预测值与实验数据有很好的拟合精度，且整体的最大误差也在±5%之内。

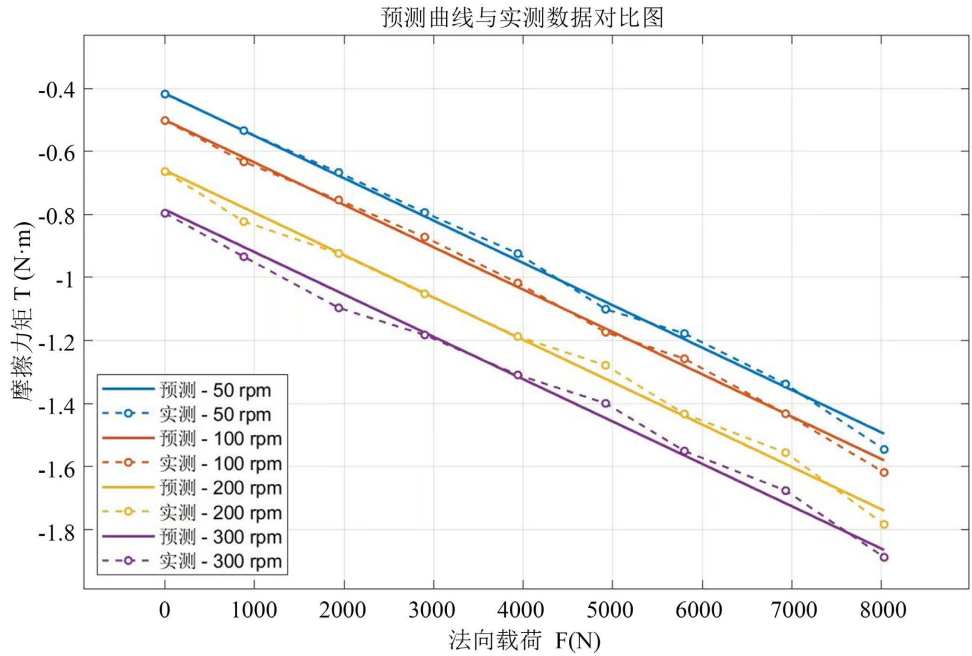


Figure 2. Comparison between predicted curves and experimental data
图 2. 预测曲线与实测数据对比图

为验证本文建立的基于速度 - 压力双变量改进 Stribeck 摩擦模型的准确性与泛化能力，将原始采集的实验数据中 3 个未参与拟合的样本作为验证集，且这三组验证点分别代表了低速 - 中压、中速 - 高压及高速状态。

将三组未参与拟合的验证点代入已建立的模型，计算其预测值与实测值的差异，结果如表 3 所示：

Table 3. Comparison of fitting errors between different friction models and measured torque
表 3. 不同摩擦模型与实测摩擦扭矩的拟合误差对比

验证点	转速(rpm)	压力(N)	实测值(N·m)	预测值(N·m)	绝对误差	相对误差(%)
1	50	1940	-0.6671	-0.6626	0.0101	1.52%
2	200	4920	-1.2791	-1.2954	0.0434	3.39%
3	300	5800	-1.5511	-1.5659	0.0149	0.96%

结果表明，该模型在典型验证工况下均具有良好的拟合精度，平均相对误差仅为 1.96%，可满足摩擦补偿对预测精度的要求。

4.2. 残差分析

为进一步验证所提出的摩擦力矩预测模型在不同工况下的拟合效果及稳定性, 本文继续对模型进行了残差分析[4]。模型在全部样本点上的残差分布如图 3 所示。

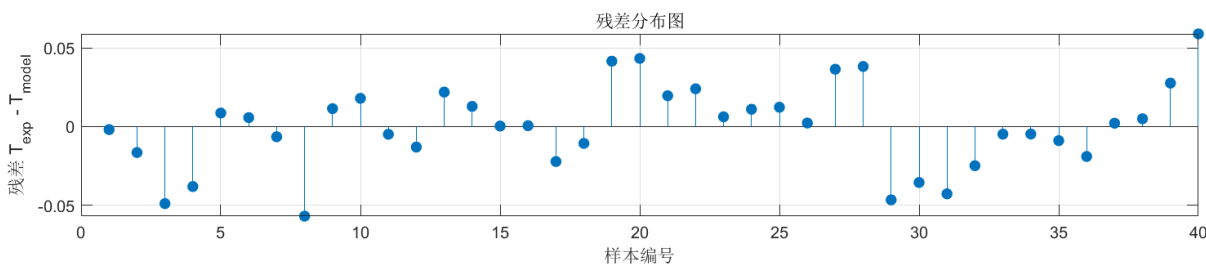


Figure 3. Residual distribution diagram

图 3. 残差分布图

从图中可以看出, 这些实测点残差分布得比较均匀, 都在零均值附近的随机波动, 没有很明显的系统性偏差, 也未呈现出随转速或压力的趋势性增长或衰减。整体的波动范围集中在 $\pm 0.05 \text{ N}\cdot\text{m}$ 以内, 即 4% 以内, 除去极端低速情况下的最大残差为 $0.0434 \text{ N}\cdot\text{m}$, 对应的相对误差为 3.39%。

5. 结论

本研究针对伺服加载系统在运行过程中因摩擦力引起的测量误差问题, 提出了一种基于 Stribeck 模型的摩擦力建模与参数辨识方法。根据实验所得的数据, 改进的 Stribeck 模型能够比较准确地预测加载系统存在的非线性摩擦干扰, 有良好的预测能力, 模型的残差波动较小, 最大相对误差控制在 3.5% 以内。未来的研究可以考虑更多的影响因素, 如温度变化、润滑状态等, 在现有的基础上构建通用性更强的摩擦模型, 从而提升模型的适应性和控制系统的鲁棒性。

参考文献

- [1] 刘丽兰, 刘宏昭, 吴子英, 王忠民. 机械系统中摩擦模型的研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(2): 201-213.
- [2] 黄德民, 秦立果, 曾朝晖, 易鑫, 彭帅, 李隽. 基于 AMESim 的液压缸抖动爬行影响因素分析[J]. 液压气动与密封, 2025, 45(3): 105-111.
- [3] 李忠群, 欧阳芷楠, 曾朝朋, 孙健聪, 朱思佳. 基于 LuGre 摩擦模型参数辨识与误差补偿方法的综述[J]. 制造技术与机床, 2024(6): 82-88.
- [4] Li, F., Ma, L., Mi, L., Zeng, Y., Jin, N. and Gao, Y. (2017) Friction Identification and Compensation Design for Precision Positioning. *Advances in Manufacturing*, 5, 120-129. <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0171-z>
- [5] 朱家辉, 兰帅航, 桑勇. 竖向电动伺服加载系统间隙与摩擦补偿控制[J]. 自动化与仪器仪表, 2025(1): 89-93.
- [6] Gao, B., Shen, W., Zheng, L., Zhang, W. and Zhao, H. (2022) A Review of Key Technologies for Friction Nonlinearity in an Electro-Hydraulic Servo System. *Machines*, 10, Article No. 568. <https://doi.org/10.3390/machines10070568>
- [7] 齐智斌, 郭联龙, 兰帅航, 桑勇. 基于改进 Stribeck 模型的伺服系统摩擦补偿研究[J]. 微电机, 2024, 57(8): 20-25, 42.
- [8] Gao, L., Yuan, J., Han, Z., Wang, S. and Wang, N. (2017) A Friction Model with Velocity, Temperature and Load Torque Effects for Collaborative Industrial Robot Joints. 2017 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, 24-28 September 2017, 3027-3032. <https://doi.org/10.1109/iro.2017.8206141>
- [9] 刘明贵, 彭俊伟, 岳向红, 杨永波. 基于改进遗传算法的基桩缺陷自动识别[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2188-2192.