

基于 LuGre 模型的伺服系统参数辨识与补偿方法

王绍伟 盛小波 赖欢 潘琦 冉琴
重庆长安望江工业集团有限公司 重庆 401120

摘要: 装备伺服系统受非线性摩擦干扰力矩影响,在低速运行段通常表现出爬行、稳态误差、运动不平稳等特性,其性能成为打击“低、慢、小”移动目标成败的关键因素。为了降低非线性摩擦干扰力矩对伺服系统低速运行性能的影响,本文首先确定非线性摩擦干扰力矩补偿模型,其次,采用最小二乘法对模型参数进行辨识,最后,通过仿真手段探究摩擦力矩补偿对提升伺服系统性能的有效性。

关键词: 伺服系统; 摩擦补偿; LuGre模型

引言

伺服系统作为装备等高精度装备的核心部件,其性能直接影响到装备控制精度和稳定性。面对“低、慢、小”目标,对伺服系统的位置跟踪性能,特别是在低速工况下的平滑性、稳定性和快速性,提出了更为苛刻要求。然而,非线性摩擦干扰力矩作为伺服系统中无法避免的物理现象,一直是制约系统性能提升的主要瓶颈之一。研究表明,摩擦引起的非线性误差是影响伺服系统性能的主要因素,尤其是在低速运行时容易导致系统出现稳态误差、“爬行”现象,严重制约了装备高精度伺服系统的应用。

目前,针对伺服系统中非线性摩擦干扰力矩的补偿方法主要分为两大类:一类是不基于模型的方法,如传统的PID控制及其改进形式,这类对于非线性摩擦干扰力矩的补偿效果有限,难以满足高精度控制的需求;另一类是基于模型的方法,通过建立精确的摩擦模型,设计相应的补偿控制器,从而有效抑制摩擦非线性对系统性能的影响。在摩擦模型方面,从最初的库仑摩擦模型、Stribeck模型等静态模型,发展到能够更好描述摩擦动态特性的LuGre模型等动态模型。LuGre模型因其能够准确描述摩擦的预滑动、变静态下降及粘滑振荡等动态特性,其作为伺服系统非线性摩擦干扰力矩补偿模型。

1 伺服系统稳定平台建模与分析

装备通常采用两轴伺服系统,分别为方位转动平台和俯仰转动平台,两轴在空间呈交叉、垂直状态,二者彼此独立运动。因此本文以方位转动平台的电流环非线性摩擦干扰力矩建模及补偿方法的分析对象。在忽略电流环电感作用的前提下,得到方位转动平台的开环控制框图^[1]如图1所示。

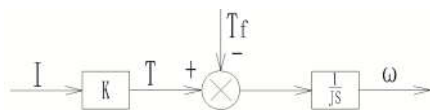


图1 开环控制框图

由图1可知,该系统的动力学方程为:

$$\omega_s = \frac{1}{JS} [K \times I(s) - T_f(s)] \quad (1)$$

其中, I 为控制电流; J 为折算到电机轴端总转动惯量; K 为伺服放大器和电机等效模型的比例系数; T_f 为非线性摩擦干扰力矩; ω 为装备身管方位轴向上的角速度。对于伺服系统,转动惯量、比例系数均为常量,因此装备在某特定转速下运行,在进行非线性摩擦干扰力矩补偿时,只需要计算与该干扰因素相关的等效控制电流。

2 LuGre摩擦力矩模型

LuGre模型假设接触面之间存在鬃毛状的弹性结构,当相对运动发生时,这些鬃毛会产生弹性变形,从而产生摩擦力。LuGre模型的数学表达式如下:

$$\frac{dz}{dt} = \omega - \frac{\sigma_0}{s(\omega)} \times z \times |\omega|$$

$$s(\omega) = T_c + (T_s - T_c) \times e^{-(\omega/\omega_s)^2} \quad (2)$$

$$T_f = \sigma_0 \times z + \sigma_1 \times \frac{dz}{dt} + \sigma_2 \times \omega$$

该模型中包含6个模型参数,分别为, T_c 、 T_s 、 ω_s 、 σ_0 、 σ_1 、 σ_2 其中 T_c 为库仑摩擦力矩(单位: $N \cdot m$) T_s 为静摩擦力矩(单位: $N \cdot m$); ω_s 为临界stribeck速度(单位: $^\circ/s$); σ_0 为刚毛接触面间刚性系数(单位: $N \cdot m/^\circ$); σ_1 为刚毛阻尼系数(单位: $N \cdot m/^\circ$); σ_2 为黏性摩擦系数(单位: $N \cdot m/(^\circ/s)$); T_f 为负载端摩擦力矩(单位: $N \cdot m$) Z 为刚性鬃毛平均变形; ω 为旋转角速度(单位: $^\circ/s$)。

3 参数辨识

LuGre模型参数可划分为静态参数和动态参数。静态参数为 T_c 、 T_s 、 ω_s 、 σ_2 ,其主要对伺服系统在高速和稳态运行时产生影响;动态参数为 σ_0 、 σ_1 ,其主要对伺服

系统在低速运行时产生影响^[2]。对摩擦模型参数辨识时,分两步进行,首先进行静态参数辨识;再进行动态参数辨识。

3.1 静态参数辨识

在进行静态参数识别时,采用阶跃速度信号,使方位转动平台处于稳定运行状态。伺服系统软件界面获取当前输入电流值与力矩常数乘积,即可计算伺服电机输出力矩值。根据牛顿第三定律,伺服系统进入稳定运行状态后,摩擦力矩与伺服电机输出的力矩大小相等,方向相反,即可求出对应速度下的摩擦力矩大小。

当伺服系统进入稳态运行后,刚性鬃毛的位移为零,即 $\frac{d_z}{d_t} = 0$,根据公式(2)可得到静态摩擦力矩方程

$$T_f = \left[T_c + (T_s - T_c) \times e^{-\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2} \right] \times \text{sgn}(\omega) + \sigma_2 \times \omega \quad (3)$$

由公式(3)可知,摩擦力与角速度呈非线性关系,其静态参数为 T_c 、 T_s 、 ω_s 、 σ_2 。假设在角速度为 ω 时,其对应的实际摩擦力矩为 T_{rf} ,则根据最小二乘法的最小化误差的平方根,寻求数据最佳函数匹配^[3]。即:

$$T_{efmin} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (T_{f(w_k)} - T_{rf(w_k)})^2} \quad (4)$$

其中, T_{efmin} 为采用最小二乘法得到的最小误差平方根; $T_{ef(w_k)}$ 表示角速度为 w_k 时,通过最小二乘法计算的摩擦力矩; $T_{rf(w_k)}$ 表示角速度为 w_k 时,摩擦力矩实验值。数据检测结果见表1。

表1 稳态下角速度与摩擦力矩对应表

序号	电机转速(r/min)	负载端角速度(°/s)	实测电流值(A)	摩擦力矩实际值(N·m)
1	20	0.412499	1.25	0.80625
2	30	0.618748	1.54	0.9933
3	45	0.928122	2.00	1.29
4	60	1.237496	2.41	1.55445
5	80	1.649995	2.8	1.806
6	100	2.062494	3.1	1.9995
7	120	2.474992	3.38	2.1801
8	150	3.09374	3.65	2.35425
9	170	3.506239	3.68	2.3736
10	200	4.124987	3.83	2.47035
11	240	4.949985	3.97	2.56065
12	280	5.774982	4.08	2.6316

注:传动比为290.91;力矩常数为0.645 N·m/A;摩擦力矩实际值等于实测电流值和力矩系数乘积;折算至电机端总转动惯量 $J = 17.215 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2$ 。

由图2可知,摩擦力矩拟合曲线与实验值拟合较好,辨识所得的静态参数符合要求。

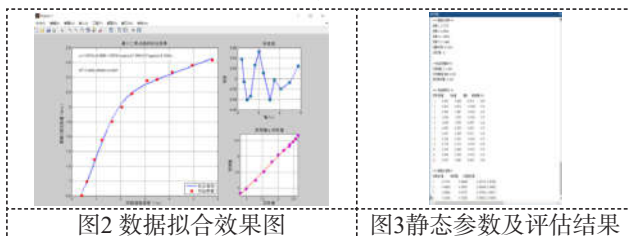


图2 数据拟合效果图

图3 静态参数及评估结果

由图3可知,优化后的静态参数结果:

$$T_c = 1.937367 \text{N} \cdot \text{m}; T_s = 0.688530 \text{N} \cdot \text{m};$$

$$\omega_s = 1.399051^\circ / \text{s}; \sigma_2 = 0.124481 \text{N} \cdot \text{m} / [^\circ / \text{s}]$$

拟合优度指标,决定系数 $R^2 = 1.0005$,均方根误差RMSE = 0.0297,最大绝对误差 $e_{max} = 0.0525$ 。

3.2 动态参数辨识

当伺服系统处于低速运行时,摩擦力体现为库伦摩擦力形式,此时 $z \approx \theta$, $\frac{d_z}{d_t} \approx \omega = \dot{\theta}$,则公式(2)可化简:

$$T_f = \sigma_0 \times \theta + (\sigma_1 + \sigma_2) \times \dot{\theta} \quad (5)$$

当只考虑伺服系统非线性摩擦干扰力矩时,结合该系统力矩稳定回路可得:

$$J \times \ddot{\theta} = M_m - T_f \quad (6)$$

公式(6)中 M_m 为电机转矩,单位: N·m。

由公式(5)和(6)可以推导出电机转矩:

$$M_m = \sigma_0 \times \theta + \sigma_1 + \sigma_2 \times \dot{\theta} + J \times \ddot{\theta} \quad (7)$$

由公式(7)推到公式可得:

$$\frac{\theta(s)}{M_{m(s)}} = \frac{\frac{1}{J}}{s^2 + \frac{(\sigma_1 + \sigma_2) \times s + \sigma_0}{J}} \quad (8)$$

由经典控制理论中的二阶系统传递函数:

$$\varphi(s) = \frac{K}{s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

公式(9)中 ε 为阻尼比, ω_n 为无阻尼自然震荡角频率。

由公式(8)和(9)可得:

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= J \times \omega_n^2 \\ \sigma_1 &= 2 \times J \times \varepsilon \times \omega_n - \sigma_2 \end{aligned} \quad (10)$$

刚毛接触面间刚性系数可以近似:

$$\sigma_0 = \frac{T_f}{\theta_k} \quad (11)$$

公式(11)中, θ_k 为对应摩擦力矩 T_f 下的电机转动角位移。

装备伺服系统在初始时刻存在超调, 会以较快的速度稳定下来, 该系统属于欠阻尼系统, 取最佳阻尼比, $\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 。根据公式(10)可得:

$$\sigma_1 = \sqrt{2 \times J \times \sigma_0} - \sigma_2 \quad (12)$$

由实验可测得, 当摩擦力矩 $T_f = 0.875 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, 电机转动的角位移 $\theta_k = 0.0624^\circ$ 。根据公式(11)、(12)及已知装备折算到电机端总转动惯量 $J = 17.215 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ 和 $\sigma_2 = 0.124481 \text{ N} \cdot \text{m}/[\text{r}/\text{s}]$, 可得:

$$\sigma_2 \approx 14.0224 \text{ N} \cdot \text{m}/^\circ$$

$$\sigma_1 \approx 0.57035 \cdot \text{m}/^\circ$$

4 基于LuGre模型摩擦力矩前馈补偿

根据已建立的模型和识别的参数值, 根据伺服系统状态变量信息估计摩擦力矩值, 结合伺服电机的力矩系数, 可以计算出前馈补偿的电流值, 将其与控制电流值进行叠加, 形成补偿后新的电流控制量, 通过该方法可以降低摩擦干扰力矩的影响^[1]。该方法的伺服系统控制框图如图4所示:

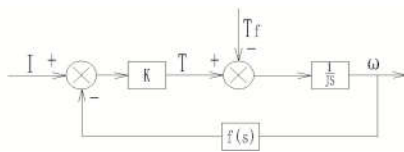


图4 前馈补偿控制框图

5 仿真

为了验证模型的有效性, 伺服系统受到干扰摩擦力矩时, 对比精度及响应速度情况。在伺服系统负载端输入 $0.12 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $0.20 \text{ N} \cdot \text{m}$ 阶跃干扰力矩, 摩擦补偿前后对比效果如图5、6所示:

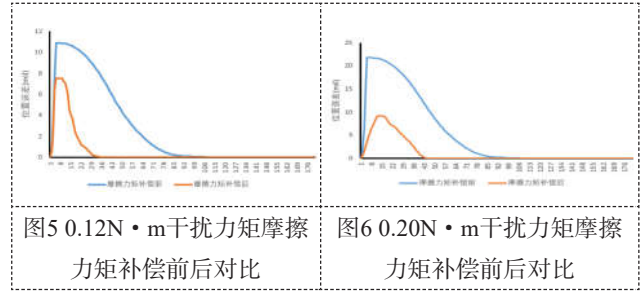


图5 0.12N·m干扰力矩摩擦力矩补偿前后对比

图6 0.20N·m干扰力矩摩擦力矩补偿前后对比

根据图5、6可知, 伺服系统输入 $0.12 \text{ N} \cdot \text{m}$ 阶跃干扰力矩后, 采用摩擦力矩补偿前后最大位置误差分别为 10.85 mil 、 7.2 mil , 进入稳态时间分别为104个控制周期与41个控制周期; 伺服系统输入 $0.20 \text{ N} \cdot \text{m}$ 阶跃干扰力矩后, 补偿前后最大位置误差分别为 21.72 mil 、 9.1 mil , 进入稳态时间分别为111个控制周期与47个控制周期。

对比摩擦力矩补偿前后数据, 验证了使用LuGre模型后, 伺服系统的控制精度、响应速度等技术指标得到了改善, 可改善装备的低速稳定性。

6 总结

本文为了提升装备伺服系统低速稳定性能, 探究了摩擦力矩补偿的模型, 对模型参数进行辨识, 通过仿真手段验证了基于LuGre模型的摩擦力矩前馈补偿方法的有效性。

参考文献

[1] 晋超琼, 张葆, 李贤涛等. 基于LuGre模型的航空光电稳定平台的摩擦力矩补偿[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(30): 103-107.
 [2] 毛喆, 王汀, 赵军虎等. 基于LuGre模型的惯导伺服稳定回路摩擦补偿[J]. 导航与控制, 2025, 24(1): 99-106.
 [3] 刘玉栋. 永磁同步直线电机摩擦力补偿方法研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2022.