

doi: 10.7690/bgzdh.2016.05.016

基于 Stribeck 模型的舰炮伺服系统摩擦力矩补偿

赵远征, 陈延伟, 程守虎

(中船重工第 713 研究所第一研究室, 郑州 450015)

摘要: 舰炮伺服系统中, 摩擦和间隙等非线性因素是提高系统性能的主要障碍。为了提高系统的低速平稳性和控制精度, 对基于 Stribeck 模型的舰炮伺服系统进行摩擦力矩补偿研究。分析研究摩擦特性对舰炮伺服系统低速性能的影响, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建伺服系统模型, 选择 Stribeck 摩擦模型对伺服控制系统进行摩擦补偿试验, 并与不含摩擦的理想系统进行仿真对比。仿真结果表明: Stribeck 摩擦模型可以较好地描述出摩擦环节对舰炮伺服系统的影响, 验证了理论分析的正确性, 为控制系统的工程设计提供了依据。

关键词: 舰炮伺服系统; 摩擦补偿; 低速性能

中图分类号: TJ391 **文献标志码:** A

Friction Compensation in Naval Gun Servo Systems Based on Stribeck Model

Zhao Yuanzheng, Chen Yanwei, Cheng Shouhu

(No. 1 Research Office, No. 713 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: Nonlinear factors of the system-friction and gear clearances are the major obstacles improving the positioning accuracy of naval gun servo systems. To improving the low speed performance and control precision, friction torque compensation based on Stribeck model is studied. Influence of friction characteristics on the low speed servo system is analyzed, then, the servo system model of the system is established under Matlab/Simulink, select Stribeck friction model to carry out friction compensation test for servo control system. And carry out simulation comparison with non friction ideal system. The simulation results show that the Stribeck friction model can exactly describe influence of friction cycle on naval gun servo system. The results prove the validity of the theoretical analysis, provides the theoretical basis for the design of control system.

Keywords: naval gun servo system; friction torque compensation; low speed performance

0 引言

舰炮伺服系统是舰炮武器系统中的关键执行结构, 其性能将直接影响到整个武器系统的作战性能和作战效果。与其他伺服系统相比, 舰炮伺服系统需要克服舰船摇摆的影响和舰炮射击带来的巨大冲击力矩。另外, 舰炮伺服系统对跟踪精度要求高, 转动惯量大, 而且需要很大的启动力矩; 然而摩擦环节存在会造成系统低速运行不平稳^[1]、速度过零波形畸变等^[2], 是影响舰炮系统精度的主要因素之一。为了提高系统的低速平稳性和控制精度, 有必要对舰炮伺服系统进行摩擦力矩补偿的研究。

目前处理摩擦问题的主要手段有摩擦补偿^[3]和控制器的改进^[4-5]。基于摩擦模型的补偿控制算法由于结构相对简单, 实时性较强; 因此, 仍是目前摩擦研究的重点。自 18 世纪起, 众多学者从多种不同的摩擦模型对摩擦力进行研究, 主要可分为静态摩擦模型和动态摩擦模型, 它们的区别是有没有采用

微分方程。静态摩擦模型有 Stribeck 模型、Kamopp 模型和 Armstrong^[6]模型, 将摩擦力表示为相对速度的函数, 优点是结构相对较简单、参数易辨识, 降低了工程实现的难度; 动态摩擦模型主要有 Dahl 模型、Bristle 模型和 LuGre 模型^[7]等, 特点是在静态摩擦模型的基础上考虑了位移的影响因素, 可以同时体现摩擦力的静态和动态特性。但这就不可避免地导致了动态摩擦模型结构的复杂程度, 并且使参数不易辨识, 增加了在工程中实现的难度。2 种摩擦模型各有优缺点, 通常根据实际系统的需要来选择适当的摩擦模型。

笔者分析了舰炮伺服系统摩擦力矩的特点, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建舰炮伺服系统模型, 采用 Stribeck 模型对系统进行摩擦补偿, 并对比有无摩擦环节的系统仿真结果。

1 舰炮伺服系统建模

舰炮伺服系统采用永磁同步电机作为伺服电

收稿日期: 2016-01-13; 修回日期: 2016-03-10

基金项目: 提高随动系统负载端控制精度(A0001A.KF1.FB); 多弹种供弹自动炮的发射动力优化设计与性能评估技术(A0820132003)

作者简介: 赵远征(1989—), 女, 河南人, 硕士, 助理工程师, 从事舰炮随动系统控制技术研究。

机,简化的舰炮伺服控制系统如图 1 所示。图中: θ^* 表示给定的位置信号; θ 表示系统反馈的实际位置信号; G_{AWR} 表示位置环调节器的传递函数,其输出 n_r^* 表示解算出的给定转速; θ_r 表示系统反馈的实际运行速度; G_{ASR} 表示速度调节器的传递函数,其输出 i_q^* 表示解算得到的给定电流值; G_{ACR} 表示电流调节器的传递函数,其输出为电机的端口电压 U_ϕ ; E_ϕ 是电机的端口的相电动势,它与端口电压都是等效的直流量; T_e 表示电机输出的电磁转矩; T_f 表示电

机的负载转矩输入; K_ϕ 表示电机的电势系数,其他各个量分别表示各自的反馈系数。

当速度很低时,可认为电动机端口相电势 E_ϕ 为零,将电流环与速度环简化,并采用 PID 控制与前馈控制相结合的复合控制算法,伺服系统结构图变为图 2。

其中: K_T 为转矩系数; $K_1 = \frac{1}{\beta}$; T_1 为一阶惯性时间常数; $-J$ 为等效到电动机转子上的转动惯量。

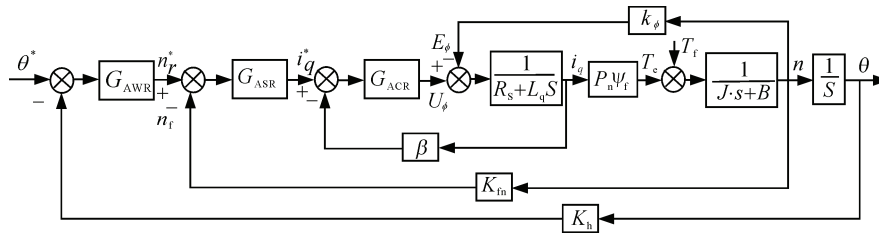


图 1 舰炮伺服控制系统结构框图

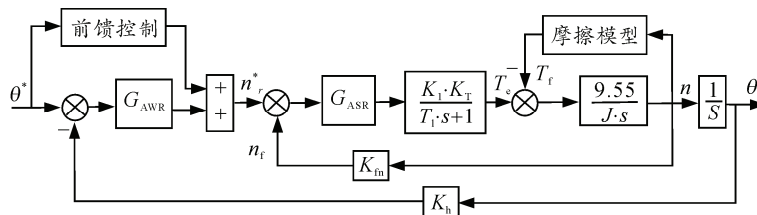


图 2 舰炮伺服控制系统简化结构框图

2 Stribeck 摩擦力矩模型

Stribeck 等人通过观察和总结,将摩擦模型从库伦+沾滞+静摩擦模型向前推了一步,指出过渡阶段摩擦力和速度是连续变化的,如图 3 所示。

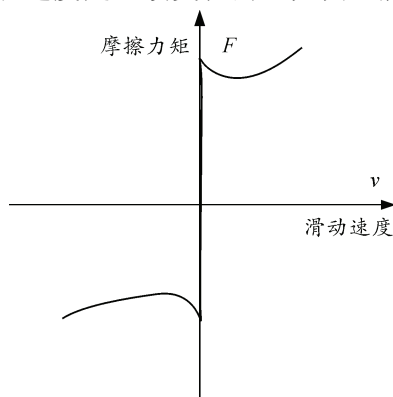


图 3 Stribeck 摩擦模型

Stribeck 摩擦模型可用下式描述:

$$F = \begin{cases} F(v) & v \neq 0 \\ F_c & v = 0 \text{ and } |F_c| < F_s \\ F_s \cdot \text{sgn}(F_c) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $F(v)$ 用来描述 Stribeck 现象。指数模型是最早被提出来描述 Stribeck 效应的,它的表达式如下式所示:

$$F_v = F_c \cdot \text{sgn}(v) + (F_s - F_c) \cdot e^{-(v/v_s)^\sigma} + B \cdot v \quad (2)$$

其中各变量含义如下:

F : 摩擦力; F_c : 库伦摩擦力; B : 黏性摩擦系数; F_s : 最大静摩擦力; v_s : Stribeck 速度,由它决定 Striceck 曲线的形状, v_s 和 σ 为经验参数。

Stribeck 摩擦模型的主要缺点在于当该模型以仿真或者控制为目的的时候,对零速的检测是个问题。为解决这一问题,有学者提出了采用 Karnopp 模型来避免系统在低速时在静止和滑动状态方程之间切换。该模型的特点是通过引入一个零速区间的概念,避免了速度为零时的检测问题。该模型中,当 $|v| < DV$ 时, Karnopp 模型的输出通过一个死区控制保持为零,根据速度是否在这个区间来判定摩擦力的值。模型变为:

$$F = \begin{cases} F(v) & |v| > dv \\ F_c & |v| < vand |F_c| < F_s \\ F_s \cdot \text{sgn}(F_c) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

但对于 Karnopp 模型，当外力作为一个输入量并不明确给出时，该模型不能得到精确的仿真结果；因此，Karnopp 模型过于依赖系统中其他部分。但对于工程实际，Karnopp 模型非常适合。

3 仿真研究

3.1 仿真模型的搭建

根据摩擦模型和舰炮伺服系统控制框图，将 Stribeck 摩擦模型应用于实际控制系统中，搭建 Matlab/Simulink 仿真模型如图 4 所示。仿真系统输

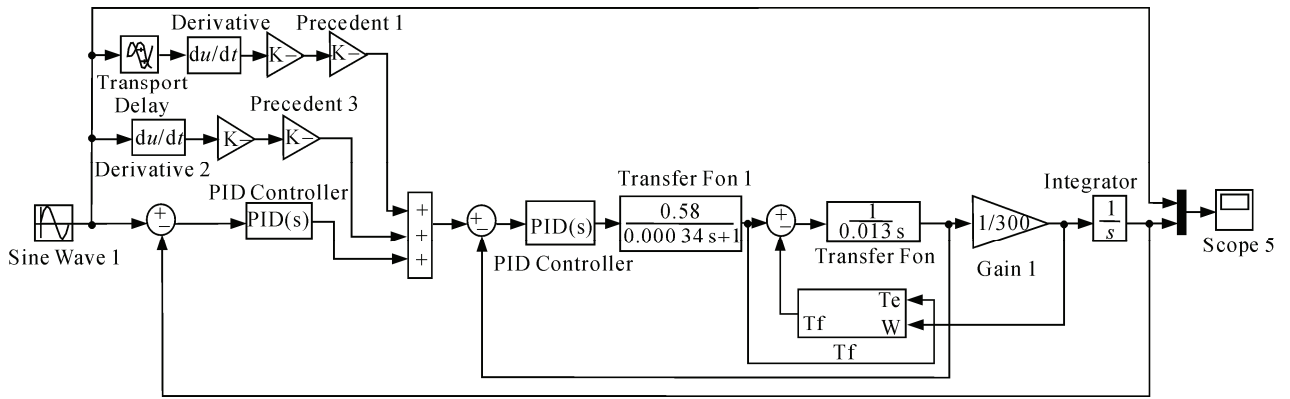


图 4 系统仿真

3.2 仿真结果

在输入端输入 $y = 0.1 \sin(\omega t)$ 的信号，分别对加入摩擦模型和理想模型的伺服系统进行仿真，分析仿真结果，将典型的评定参数汇总于表 1。

表 1 有无摩擦模型仿真结果对比

摩擦模型	速度跟踪误差 e/rad	控制力矩峰值 $F/(\text{N}\cdot\text{m})$
Stribeck 摩擦模型	1.46×10^{-3}	4.5
无摩擦	7.15×10^{-4}	0.4

图 5、图 6 为基于 Stribeck 摩擦模型的 PID 控制位置跟踪曲线和误差曲线；图 7 为基于 Stribeck 摩擦模型的 PID 控制转矩曲线。

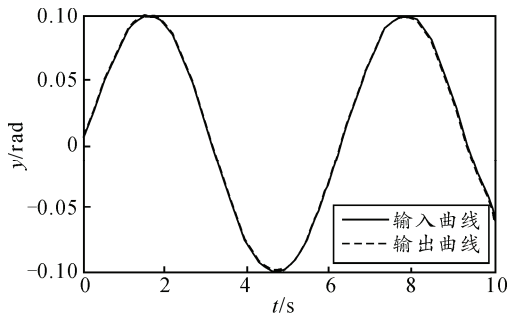


图 5 基于 Stribeck 摩擦模型的位置跟踪曲线

入为位置信号，电机的输出转矩和摩擦力矩叠加后转换成转速信号作为速度环的输入。图中“Tf”封装模块是摩擦模型观测模块。速度 w 进入摩擦力矩计算模块后有 2 种走向：大于定义零速区间边界时，由 Stribeck 模块按照 Stribeck 摩擦模型处理；在零速区间时，按照静摩擦力矩处理。对于静摩擦力矩，通过 saturation 模块来判断当前是否是最大静摩擦力。当输入大于 saturation 模块区间边界值时，摩擦力为最大静摩擦力矩值，在该区间内时，摩擦力等于输入转矩值^[8]。

各参数设置为： $T_{fc}=12$ ， $T_{fs}=15$ ， $\omega_s=0.005$ 。 B 和 σ 为经验参数，取 $B=0.04$ ， $\sigma=2$ 。

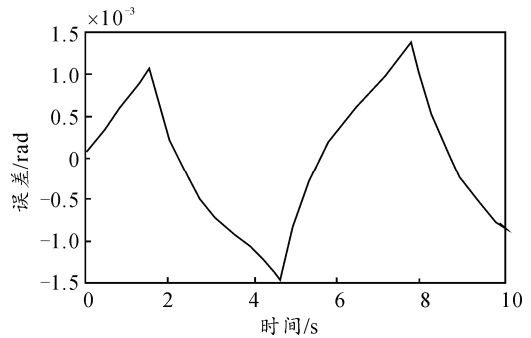


图 6 基于 Stribeck 摩擦模型的位置误差曲线

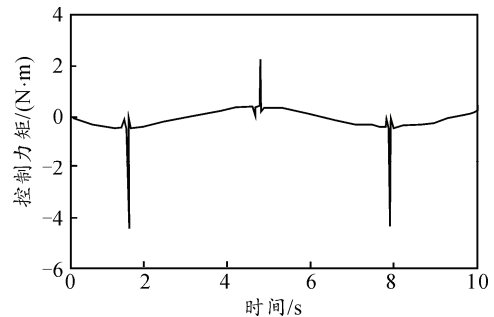


图 7 基于 Stribeck 摩擦模型的控制力矩曲线

图 8、图 9 为不含摩擦的 PID 控制位置跟踪曲线和误差曲线；图 10 为不含摩擦模型的 PID 控制

转矩曲线。

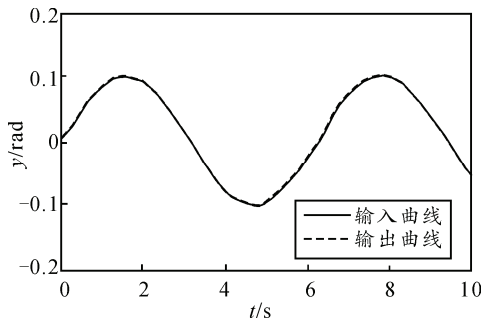


图 8 无摩擦模型的位置跟踪曲线

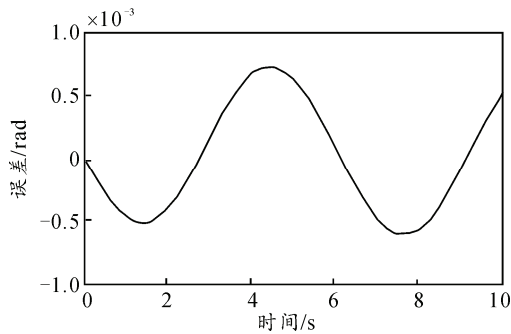


图 9 无摩擦模型的位置误差曲线

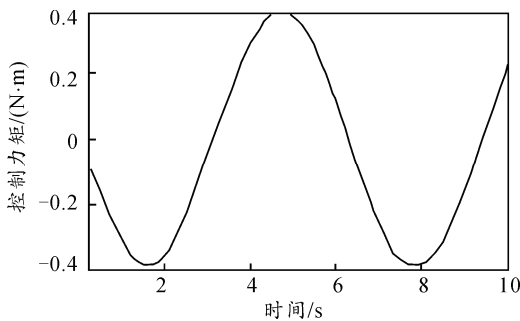


图 10 无摩擦模型的控制力矩曲线

对于图 5，由于摩擦环节的存在，使得跟踪曲线在速度过零时出现了失真现象。这是因为在换向时刻，控制力矩较小，不足以克服静摩擦力矩；因此，造成失真现象。对比图 6、图 7 和图 9、图 10

可以看出：含有摩擦的系统跟踪误差更大，在系统运行换向时，控制力矩增大并出现跳变，这与实际系统运行时观察到的情况是一致的。

通过以上的仿真分析可以看出：系统在低速运行时，Stribeck 摩擦模型可以较好地描述出摩擦环节的影响，为舰炮随动系统的低速性能的提高提供了理论依据。

4 结论

笔者以某型舰炮伺服系统为例，用 Stribeck 摩擦模型模拟了系统的摩擦环节。通过与不含摩擦环节的理想系统的仿真对比，得到了摩擦环节对系统造成滞后以及爬坡的不良影响。该研究结果为舰炮伺服系统的工程设计提供了基础。

参考文献：

- [1] 吴宇航, 崔敏. 摩擦力矩对舰炮随动系统低速平稳性的影响[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(7): 85-87.
- [2] 孔祥臻, 王勇, 蒋守勇. 基于 Stribeck 模型的摩擦颤振补偿[J]. 机械工程学报, 2010, 46(5): 68-73.
- [3] 杨帆. 基于 LuGre 摩擦模型的伺服系统自适应鲁棒控制研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [4] 毛保全, 汪凡, 徐礼, 等. 基于模糊神经网络的遥控武器站伺服系统 PID 控制器[J]. 兵工自动化, 2010, 29(9): 75-78.
- [5] 刘凤娟, 阎永清, 李欣刚. 含摩擦环节伺服系统的分析与控制补偿[J]. 自动测量与控制, 2007, 26(4): 59-61.
- [6] Armstrong Helouvry B, Dupont P, de Wit C C. A Survey of Models[J]. Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction. Automatica. 1994, 30(7): 1083-1138.
- [7] Wit C C, Olsson H, Astrom K J. A New Model for Control of Systems with Friction[J]. IEEE Transactions on Automatic Control. 1995, 40(3): 419-424.
- [8] 孙亚东, 赵彦森. 舰炮武器对岸火力支援系统的构建与集成[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(4): 50.