

电动舵机与其 PWM 驱动器的 物理建模与参数估计*

姚 鹏,张胜修,王道平,蔡 铿

(第二炮兵工程学院,西安 710025)

摘 要:电动舵机与其 PWM(pulse width modulation)驱动器是某武器伺服系统的重要组成部分。针对其建模与参数估计的问题,文中首先较详细地介绍了电动舵机与其 PWM 驱动器使用特点和应用技术,然后选用 Simulink® 平台下的 SimDriveline™ 以及 SimPowerSystems™ 模块库建立起电动舵机与其 PWM 驱动器的物理模型;通过非线性最小二乘法拟合的方式,对模型中的参数进行了估计,最后通过校验数据集的输出响应验证了该物理模型有较高的精度。

关键词:电动舵机;PWM;物理模型;参数估计;Simulink

中图分类号:TJ760.35 文献标志码:A

Physical Model and Parameter Estimation of Electromechanical Actuator and Its PWM Driver

YAO Peng,ZHANG Shengxiu,WANG Daoping,CAI E

(The Second Artillery Engineering College,Xi'an 710025,China)

Abstract: The electromechanical actuator and its pulse width modulation(PWM) driver are important parts of servo system in certain weapon. Focused on the problem of the modeling and parameter estimation, the applied characteristics and techniques were introduced. Then, SimDriveline™ and SimPowerSystems™ modular libraries in Simulink® were selected to set up their physical models, and the parameters of this model were estimated by nonlinear least squares. The output response of checking date set validated high precision of this physical model.

Keywords: electromechanical actuator; pulse width modulation; physical model; parameter estimation; Simulink

0 引言

电动舵机系统是用来控制某武器舵面工作的角位置随动系统,其系统一般可由控制器、驱动器、电动舵机、减速传动装置、反馈电位器五大部分所组成。电动舵机作为电机转换组件,是电动舵机系统的核心部件,驱动器则通过改变电动舵机的输入电压从而调节电动舵机的输出转速^[1-2]。

1 电动舵机

电动舵机可分为电励磁式和永久磁铁励磁式两种,电励磁式电动舵机的磁场由励磁绕组产生,永磁式电动舵机的磁场由永久磁铁产生。由于永磁式电动舵机具有体积小、重量轻、效率高、输出转矩大、线性好、结构简单等优点,所以文中

研究仅针对永磁式电动舵机^[3]。

1.1 电动舵机的工作原理

如图 1 所示,电枢控制式永磁电动舵机,励磁磁通 Φ 由永磁体产生,电枢电压 $u_a(t)$ 为输入量,电动舵机转速 $\omega_m(t)$ 为输出量。图中 R_a 、 L_a 分别是电枢电路的电阻和电感, M_c 是折合到电动舵机转轴上的总负载转矩^[4]。

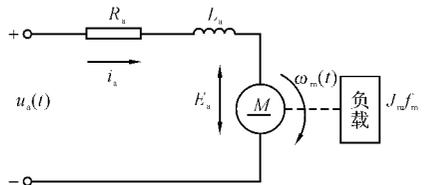


图 1 电枢控制式永磁电动舵机原理图

1) 电枢回路电压平衡方程:

$$u_a(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + E_a \quad (1)$$

* 收稿日期:2008-09-04

作者简介:姚鹏(1980-),男,四川人,讲师,硕士研究生,研究方向:精密仪器与机械设计。

$$E_a = C_c \omega_m(t) \quad (2)$$

式中: E_a 是电枢反电动势, C_c 是反电动势系数。

2) 电磁转矩方程:

$$M_m(t) = C_m i_a(t) \quad (3)$$

式中: C_m 是电动舵机转矩系数, $M_m(t)$ 是电枢电流产生的电磁转矩。

3) 电动舵机轴上的转矩平衡方程:

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + f_m \omega_m(t) = M_m(t) - M_c(t) \quad (4)$$

式中: f_m 是电动舵机和负载折合到电动舵机轴上的粘性摩擦系数, J_m 是电动舵机和负载折合到电动舵机轴上的转动惯量。

1.2 电动舵机的物理建模

如图 2 所示, Matlab 下的 Simulink[®] 是一款模块化的设计软件, 其平台下的 SimDriveline[™] 以及 SimPowerSystems[™] 这两个模块库提供了物理建模仿真的解决方案, 文中选用这两类模块库, 根据电动舵机的工作原理选择相应的模块, 从而较准确、较快速地建立起电动舵机的物理模型。

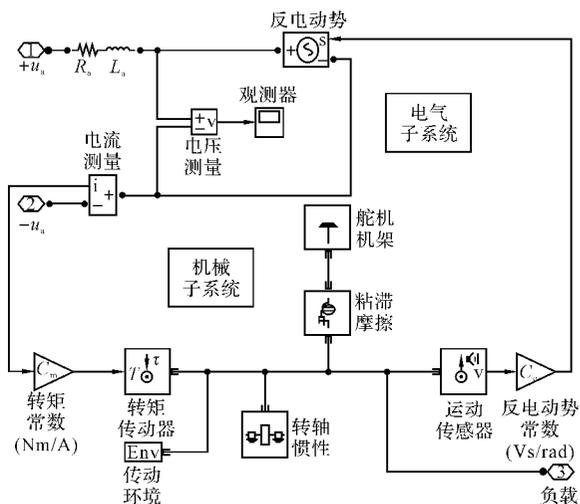


图 2 电动舵机在 Simulink[®] 平台下的物理模型

2 脉冲宽度调制式四象限全桥转换器

由于电动舵机伺服系统的角输出需为正、负相反的两个方向, 所以电动舵机旋转的极性也要随之改变, 脉冲宽度调制(PWM)式四象限全桥转换器是可以被用来作操作电动舵机工作的驱动器, 其构造允许输入信号控制输出电压信号的

大小与极性。

2.1 电动舵机转速与转矩的关系

如图 3 所示, 通过全桥转换器可以使电动舵机根据其应用要求建立起转速与转矩的不同关系。

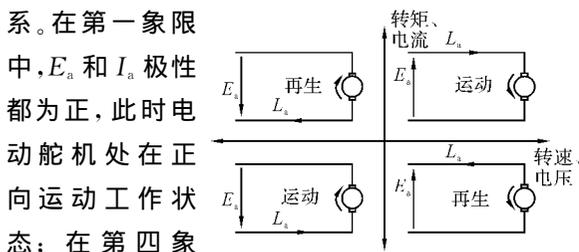


图 3 电动舵机转速与转矩的关系

在第一象限中, E_a 和 I_a 极性都为正, 此时电动舵机处在正向运动工作状态; 在第四象限, 通过减小 V_a 使其低于 E_a 以

至于 I_a 为负, 此时电动舵机处在制动或再生工作状态; 在第二、第三象限通过改变应用电压 U_a 的极性使其为负, 电动舵机可实现反向运动或制动工作状态, 因此通过四象限全桥转换器可以实现控制电动舵机电枢电压和电流的能力, 从而改变其工作状态^[4]。

2.2 脉冲宽度调制的驱动方式

电动舵机的控制, 是通过脉冲宽度调制的方式把固定电压的直流电源转换为电动舵机电枢所需要的可变电压, 以提供给电动舵机。

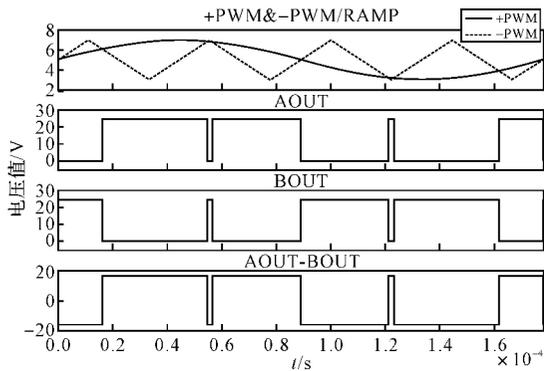


图 4 SA03 脉冲宽度调制放大器输入与输出的仿真波形

如图 4 所示, 以 SA03 脉冲宽度调制放大器为例, + PWM 一般为控制输入端, - PWM/RAMP 一般提供了内置 22.5kHz、3~7V 的三角波脉冲信号作为输入, 通过比较输入端信号大小决定 AOUT 和 BOUT 输出端的关系, 若 +PWM > -PWM/RAMP, 则输出 AOUT > BOUT, 反之相反^[5]。

3 低通功率滤波器

PWM 驱动器与电动舵机之间连接有低通

功率滤波器。低通功率滤波器主要起二个作用：其一，由于 PWM 驱动器一个输出为高时，另一个输出总是为低，脉冲信号 AOUT - BOUT 必须通过低通功率滤波器解调后，才能正确控制电动舵机；其二，事实上占空比不断变化的 PWM 信号掺杂了很多高频毛刺成分，会严重干扰反馈线路的参数，同时过高的载波频率可能会损坏电动舵机本身^[6-7]。

如图 5 所示，输入控制端 +PWM 恒为 6V，AOUT - BOUT 的振幅为 25V，-PWM/RAMP 采用内置脉冲信号时，则 AOUT - BOUT 占空比为 75%，采用截止频率为 2kHz、3 阶低通巴特沃斯滤波器，AOUT - BOUT 经滤波后 6ms 处控制在 12.5V 附近。

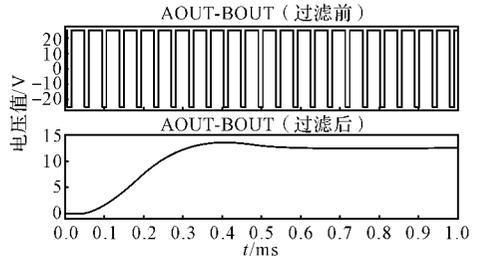


图 5 低通功率滤波器滤波前与滤波后的仿真波形

4 参数估计

设备制作商可以提供这些模型中的参考值，这也仅仅是估计值，除此之外由于设备的容差、元件的老化、外界条件的变化等等都会影响模型的参数，正确估计这些参数，使其尽可能的准确，以至于能正确的反应实物的输出响应，对于电动舵机伺服系统的设计、应用、维护是至关重要的。

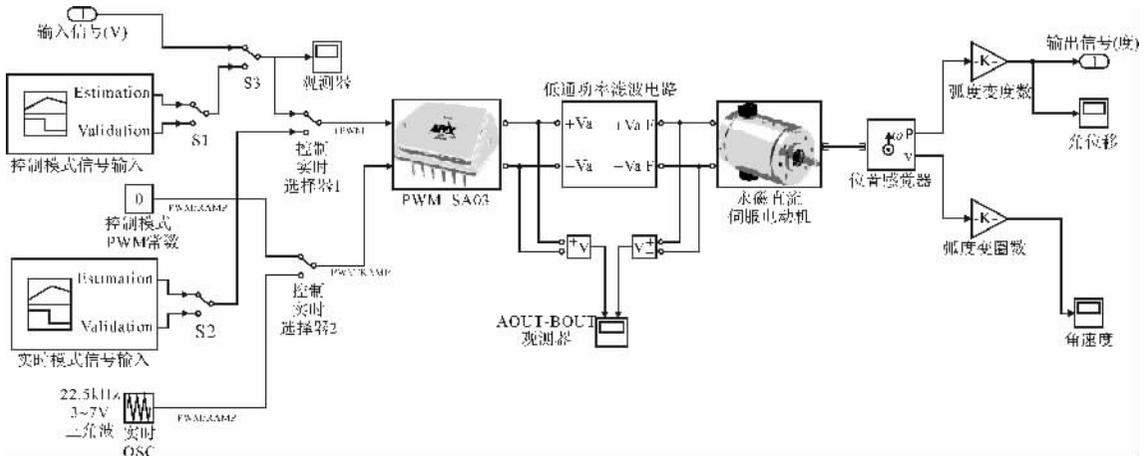


图 6 用于参数估计的物理模型

如图 6 所示，应用一系列电压脉冲信号作为电动舵机的输入，以电动舵机轴承的角位置作为输出响应。然而，如果该模型参数不匹配原有的物理系统，模型响应也就不匹配实际系统的响应。因此，需对模型进行参数估计，估计过程采用以下步骤：

- 1) 通过测试实物，采集相关数据；
- 2) 定义被估计的参数，包括初始猜测、参数范围等等；
- 3) 配置参数，运行适合的参数算法；
- 4) 改变测试设置以验证结果，如果必要重复上述过程。

如图 7 所示，为了估计或者验证数据集，需要对数据进行相关处理，诸如噪音滤波，趋势分析、数据分离等等。文中通过设置两组数据集作为

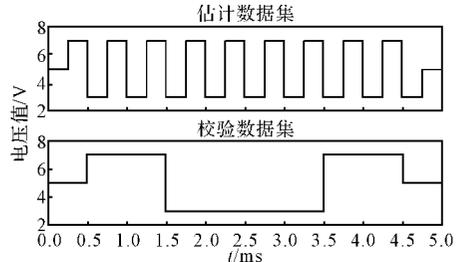


图 7 估计数据集与校验数据集

系统的输入，上图为用于估计的输入数据集，下图为用于验证的输入数据集。

如图 8 所示，估计所有 6 个电动舵机物理模型参数： C_m 、 C_e 、 B 、 J 、 L_a 与 R_a 。由于模型中含有非线性成分，所以拟合算法采用非线性最小二乘法，图中清晰地显示了模型参数的估计过程^[8-9]。

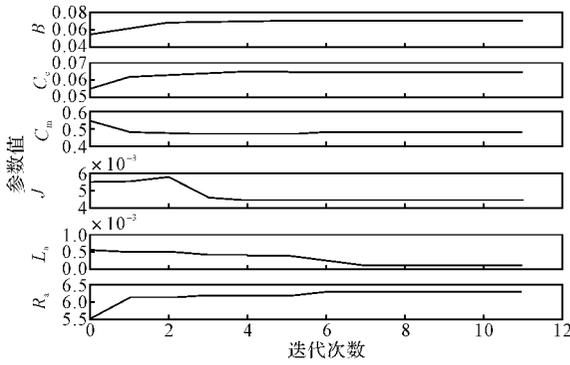


图 8 模型的参数估计过程

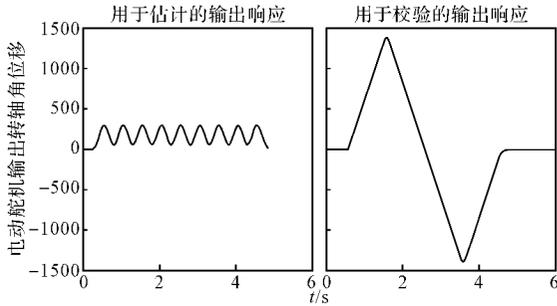


图 9 用于估计的输出响应与用于校验的输出响应

如图 9 所示,通过参数估计最终建立起的物理模型,其输出响应精确地匹配了校验输出响应。一个成功的参数估计不仅仅匹配于校验的数据集,也应该匹配其它任意设置的数据集。

5 结论

传统方法建立的动态系统模型有很多优点,采用基本控制理论建立的数学模型可以有效地

(上接第 90 页)

4 结论

引入普适变量进行迭代求解 Lambert 拦截问题,可以用于大气层外固定时间拦截初始变轨段制导。为减小各种轨道摄动引起的较大拦截偏差,文中给出了一种基于微分改正算法的初制导修正方法。该初制导修正方法在仅增加少量燃料消耗和制导计算量情况下,能基本消除轨道摄动的影响,大大提高轨道拦截初制导精度,并保留了 Lambert 拦截制导的快速性,可使拦截器在初制导段后不进行轨道修正或只需消耗较少燃料便能完成远距离轨道拦截任务。

参考文献:

[1] 林来兴. 从深度撞击探测器看空间拦截技术的发

展[J]. 航天控制,2006,24(1): 92-96.

观察系统行为,但缺少精度;采用数据驱动建立的对应模型可以提供精确的结果,但趋向于有限的系统理解。文中结合两者优点,阐述了在 Simulink® 平台下建立电动舵机与其 PWM 驱动器的物理模型,并利用实验数据仿真的方式,精确地对模型参数进行了估计。最终建立起的模型既可作为武器系统的设计与研制,也可用于其故障诊断技术的研究与开展。

参考文献:

[1] 潘荣霖. 飞航导弹测高装置与伺服机构[M]. 北京:宇航出版社,1993.

[2] 钱平. 伺服系统[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[3] 刘敏,刘藻珍,王金柱. 某型电动舵机建模与仿真研究[J]. 弹箭与制导学报,2004,24(5): 123-125.

[4] 胡寿松. 自动控制理论[M]. 北京:国防工业出版社,1994.

[5] Apex Microtechnology Corp. SA03 Product Data Sheet[EB/OL]. 2006.

[6] Apex Microtechnology Corp. PWM Low Pass Filtering [EB/OL]. 2001.

[7] Apex Microtechnology Corp. PWM BASICS [EB/OL]. 2002.

[8] The MathWorks, Inc. Simulink® Parameter Estimation™ User's Guide[EB/OL]. Matlab R2008a.

[9] The MathWorks, Inc. Simulink® Parameter Estimation™ Release Notes[EB/OL]. Matlab R2008a.

[2] 周须峰,唐硕. 固定时间拦截变轨段制导的摄动修正方法[J]. 飞行力学,2006,24(4): 46-49.

[3] Zes Dean. Exo-atmospheric Intercept with J2 Correction[R]. AIAA 98-4305. 1998:1061-1066.

[4] 汤一华,陈士橹. 基于遗传算法的有限推力轨道拦截优化研究[J]. 西北工业大学学报,2005(5): 671-675.

[5] Bate R R. 航天动力学基础[M]. 吴鹤鸣,李肇杰,译. 北京:北京航空航天大学出版社,1990.

[6] 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京:解放军出版社,1995.

[7] 林来兴. 空间交会对接技术[M]. 北京:国防工业出版社,1995.