

电动伺服基于 PD 控制闭环周期的影响分析

董 斌, 陈佳馨, 穆晓敬, 孙栋梁
(航空工业洪都 南昌 330024)

摘要: 随着电子技术和电机 PWM 控制技术的发展, 电动伺服系统逐渐由模拟体制向数字体制转变。闭环控制周期是数字化伺服系统中的一个关键参数, 它受到系统机动性、硬件资源、供电能力、功能性能等诸多制约, 因此必须权衡设计闭环周期。目前国内外针对伺服系统闭环周期论述的文献较少。本文以电动舵机伺服系统为研究对象, 首先详细分析了电动舵机伺服系统的组成、工作原理及信号传输链路; 接着对电动舵机伺服系统进行数学建模, 以及 P-D 控制律设计; 然后基于 Simulink 建立了伺服系统仿真模型, 分析不同闭环控制周期对系统各性能的影响; 最后搭建实验平台, 验证不同闭环周期对伺服系统性能的影响。仿真分析得出: 随着闭环周期增大, 阶跃响应速度有所减小; 适当地增加闭环周期, 能在一定程度上减小瞬态电流, 避免大的瞬态电流拉低系统电压从而造成计算机复位的风险。本文研究对开展伺服系统和与其交互的平台系统正向设计具有一定的指导意义。

关键词: 伺服系统; P-D 控制; 闭环控制周期; 电动舵机

中图分类号: TP273; TM921.54

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2025)06-0102-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20250210006

CSTR: 32406.14.ycyk.20250210006

引用格式: 董斌, 陈佳馨, 穆晓敬, 等. 电动伺服基于 PD 控制闭环周期的影响分析[J]. 遥测遥控, 2025, 46(6): 102-110.

Influence Analysis of Electric Servo Closed-Loop Cycle Based on PD Control

DONG Bin, CHEN Jiaxin, MU Xiaojing, SUN Dongliang
(AVIC Hongdu, Nanchang 330024, China)

Abstract: With the development of electronic technology and motor PWM control technology, the electric servo system has gradually changed from analog system to digital system. Closed-loop control cycle is a key parameter in digital servo system, which is restricted by system maneuverability, hardware resources, power supply capacity, function performance and so on. At present, there are few literatures on the closed-loop cycle of servo system at home and abroad. This paper takes servo system of electric actuator as the research object. Firstly, the composition, working principle and signal transmission link of electric actuator servo system are analyzed in detail. Then the mathematical modeling of the servo system of the electric actuator is carried out, and the P-D control law is designed. Then the servo system simulation model is established based on Simulink to analyze the influence of different closed-loop control cycles on the servo system performance. Finally, an experimental platform is built to verify the effects of different closed-loop cycles on servo system performance. The simulation results show that the step response speed decreases with the increase of the closed-loop period. Appropriately increasing the closed-loop period can reduce the transient current to a certain extent, and avoid the risk of computer reset caused by large transient current pulling down the system voltage. The research in this paper has certain guiding significance for servo system and the platform system interacting with them.

Keywords: Servo system; P-D control; Closed-loop control cycle; Electric actuator

Citation: DONG Bin, CHEN Jiaxin, MU Xiaojing, et al. Influence Analysis of Electric Servo Closed-Loop Cycle Based on PD Control[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(6): 102-110.

0 引言

电动舵机伺服系统作为导弹主要的执行机构, 它通过接收飞行控制计算机的控制指令, 使舵机

产生驱动力矩, 操纵舵面偏转, 从而控制弹体飞行姿态, 其性能直接影响平台的控制精度和动态性能。随着电力电子技术和电机 PWM 控制技术的发展, 大大促进了电动伺服系统由模拟体制向数字

体制转变步伐^[1-5]。早期导弹上使用的液压舵机或气动舵机因其构造复杂、加工难度大、质量重、制造成本高等弊端逐渐被淘汰，而控制精度更高、体积更小的电动舵机伺服系统成为未来的发展趋势^[6]。

随着电动舵机数字化理论不断发展，数字式电动伺服系统得到广泛的应用^[7-10]。美欧等西方国家和地区将电动舵机伺服系统广泛地应用在军工或民用的各类飞行器的设计中，比如美国的“全球鹰”、“捕食者”、F16 战机；美国的波音公司和欧洲的空客公司的大型民用客机，也在开展对电动舵机伺服系统的理论研究及试验验证工作。国内也在积极开展对电动舵机伺服控制技术的研究。基于无刷直流电机的电动舵机伺服系统具有使用寿命长、转速高、体积小、重量轻、可靠性高等诸多优点。随着微处理器的革新，电机控制算法可以通过软件编程的方式实现，因此各种基于传统控制算法的新的控制方法不断涌现^[11-13]。马晓阳等人提出一种含死区的积分分离PID(比例-积分-微分控制器)控制，在BLDCM(无刷直流电动机)实际输出与指令信号的偏差较大时，积分会使PID控制器输出信号逐渐累积，造成系统稳定性下降，因此分段介入积分作用，同时引入死区参数，对波动范围较小的给定信号不响应，增强了系统的抗干扰能力^[14]；张贺飞等人使用微分先行PID控制策略，只对系统输出量进行微分，而不对给定值进行微分，有效地减小了给定值变化所带来的超调量，使得系统运行稳定^[15]。多数文献针对电机控制策略和算法进行研究^[16]，而关于控制系统的闭环周期大小对系统性能影响的设计分析鲜少提及。随着电动舵机数字化理论不断发展沉淀，选择合适的伺服系统闭环周期也是系统设计中的关键环节。电动伺服系统闭环控制周期的选择受到平台机动性、硬件资源、供电能力、功能性能等诸多方面的制约，必须进行权衡设计。

本文以数字式电动舵机伺服系统为研究对象，首先详细分析了电动舵机伺服系统的组成、工作原理及内部信号交联关系，然后建立了伺服控制系统的数学模型，接着仿真分析不同闭环控制周期对系统性能的影响，最后通过试验验证了闭环周期的影响。本文对开展伺服系统及其交互的平台系统正向设计具有一定的指导意义。

1 数字式电动舵机伺服系统

1.1 电动舵机伺服系统组成和工作原理

数字式电动舵机伺服系统由电动舵机、伺服控制单元组成。电动舵机为伺服系统的控制对象，其由无刷直流电机、减速器、电位计等组成。电动舵机伺服系统的工作原理框图如图1所示：舵机伺服系统通过数字总线接收控制计算机单元发出的舵机控制指令，并实时采集电位计位置反馈信号，采用全数字伺服控制，综合舵机控制指令信号、位置反馈信号，根据控制策略计算PWM(脉冲宽度调制)控制信号输出量，结合电机霍尔输出的换相信号，形成电机驱动信号，控制舵机带动舵面偏转^[17]。

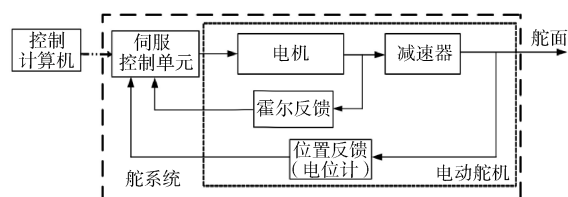


图1 电动舵机伺服系统工作原理框图

Fig. 1 Working principle block diagram of servo system of electric actuator

1.2 电动舵机伺服系统信号传输链路

数字式电动舵机伺服系统主要通过伺服控制单元与外部设备进行通信，伺服控制单元主要由主控模块、电机驱动模块、串口模块和舵面位置检测模块等组成，其信号传输链路如图2所示。伺服控制单元内的FPGA对外通过RS422总线接收任务机发出的舵控指令，将舵控指令通过内部总线传递到DSP单元；舵机电位计位置反馈信号经过信号调理和ADC转换，将模拟量转换成数字量输出到DSP单元；在DSP单元内，综合舵控指令、位置反馈信号，根据伺服控制算法解算出控制电压，输出到FPGA；在FPGA内，结合控制电压和舵机内电机霍尔输出的换相信号，经逻辑运算形成三相桥驱动信号，驱动控制舵机带动舵面偏转^[18,19]。

信号传输延时是数字式伺服系统的典型特征，它会影响平台稳定裕度和响应速度等性能。根据舵机伺服系统工作原理和对伺服系统内部信号传输链路的详细分析，舵机伺服系统信号传输延时分为软件和硬件两部分。软件部分主要包含RS422数字串口通信周期、舵面位置检测周期、DSP闭

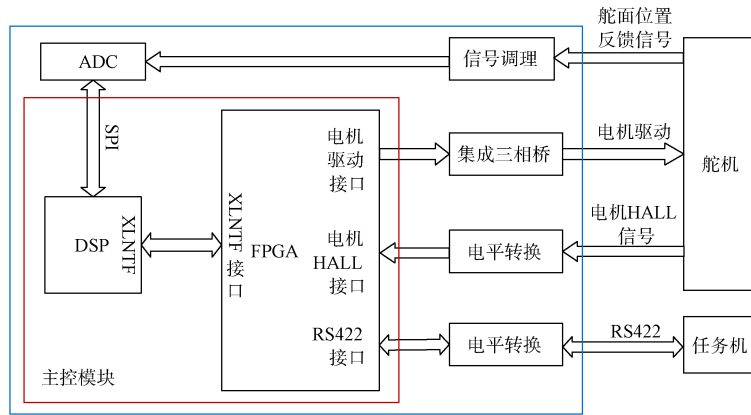


图2 电动舵机伺服系统信号传输链路

Fig. 2 Signal transmission link of servo system of electric actuator

环控制周期和FPGA逻辑运算周期, 硬件部分主要包含三相桥功率管开通关断延时、电机机械时间常数和舵机传动机构间隙。其中, 硬件引起的功率管开断延时、电机机械时间常数和舵机传动间隙在方案设计选型时早已确定, 而周期可以调节, 便于针对平台不同的性能要求进行设计。根据上述分析, DSP的作用是通过接收RS422串口舵控指令、采集舵面位置, 综合指令和位置解算出控制电压信号, 输出到FPGA逻辑解算出驱动信号, 可见DSP解算周期即伺服系统闭环控制周期是信号传输链路的主要环节, DSP闭环控制周期对舵机伺服系统的性能影响较大。

1.3 电动舵机伺服系统数学模型

1.3.1 电动舵机数学模型

根据电机学的基本理论可知, 无刷直流电机中每相绕组的相电压均由绕组电阻压降和绕组感应电势两部分组成, 无刷直流电机电压方程为:

$$U = R_a \times i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

其中, $L_a \frac{di_a}{dt}$ 为每相绕组总磁链产生的电动势; e_a 为每相绕组切割磁场产生的反电势。

电机机械运动方程为:

$$T_g - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + f \times \omega \quad (2)$$

由以上方程变换, 得出无刷直流电机模型框图如图3所示。

减速器模型为一个比例环节, 如图4所示。

以上公式和框图中各符号的定义见表1。

根据舵机模型, 由拉普拉斯变换, 得到逆变器控制电压到舵机偏转角的传递函数为:

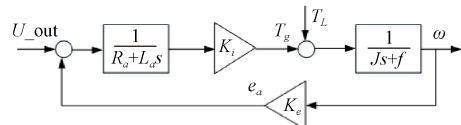


图3 无刷直流电机模型框图

Fig. 3 Block diagram of brushless DC motor model

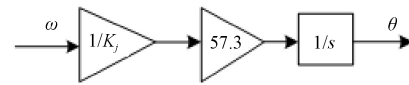


图4 减速器模型框图

Fig. 4 Retarder model block diagram

表1 符号定义

Table 1 Symbol definitions

符号	定义	单位
U	端电压	V
R_a	电机线圈电阻	Ω
L_a	电机线圈电感	H
i_a	电流	A
e_a	感应电动势	V
T_g	电磁转矩	Nm
T_L	外部负载	Nm
ω	电机转速	Rad/s
J	电机转子及附件惯量	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
f	电机转子动摩擦系数	$\text{N}/(\text{rad}/\text{s})$
U_{out}	逆变器输出电压	V
K_t	电机转矩系数	Nm/A
K_e	电机感应电动势系数	$\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$
K_j	减速比	
θ	舵偏角	$^\circ$

$$G_{U\theta} = \frac{K_t \times 57.3 / K_j}{L_a J S^2 + (R_a J + L_a f) S + K_e K_t + R_a f} \cdot \frac{1}{S} \quad (3)$$

不考虑死区等非线性因素, 电机转子动摩擦

系数很小，为 10^{-7} 数量级，可忽略不计。由于 $L_a \times J$ 很小， $L_a \times f$ 远远小于 $R_a J$ ， $R_a \times f$ 远远小于 $K_e K_i$ ，忽略 $L_a \times J$ 、 $L_a \times f$ 、 $R_a \times f$ 项，舵机控制电压到角度的传递函数可近似为：

$$G_{U\theta} = \frac{57.3/K_f K_e}{(R_a J/K_e K_i)S+1} \times \frac{1}{S} \quad (4)$$

1.3.2 P-D调节

以电动舵机为被控对象，设计控制器。控制器的作用是与被控对象组合，使系统满足稳定性、响应速度、稳态精度的性能指标要求。在控制系统设计中，常常用串联校正方式，使得整个系统特性发生变化，从而满足各项性能指标^[20]。电动舵机系统中，比例项P能保证舵机伺服系统带宽能力，微分项D能增大系统阻尼，起到抑制系统超调或抖动的效果，P-D串联校正方式即能够满足舵机伺服系统功能性能要求和使用要求^[21]。本文通过比例-微分组合控制规律，实现对被控对象的有效控制。

比例-微分控制模型为：

$$G(s) = K_p \times \Delta e + K_D \times \frac{d\Delta e}{dt} \quad (5)$$

其中， K_p 为比例系数， K_D 为微分系数， Δe 为指令与反馈的误差， t 为系统闭环控制周期。

比例-微分调节器串联在伺服系统内逆变器电压前端，该部分算法在DSP内实现。由以上公式变换，结合电动舵机模型，整个伺服系统的模型框图如图5所示。

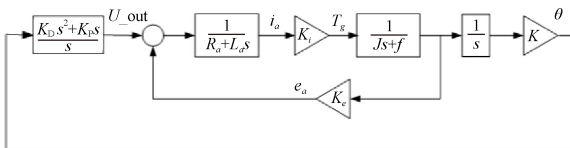


图5 伺服系统模型框图

Fig. 5 Block diagram of servo system model

以某款舵机为被控对象，进行比例 K_p 、微分 K_D 参数设计； K_p 、 K_D 的变化会影响闭环系统带宽、系统稳定性、闭环系统阶跃响应上升时间等性能，在一定范围内对参数 K_p 、 K_D 进行遍历，如图6~图8所示。

由图6、图7、图8可以看出，闭环系统带宽主要受 K_p 影响，随 K_p 增大而增加，根据要求的闭环系统带宽选择合适的 K_p 值； K_D 在0.01~0.06范围内时，开环相位裕度随 K_D 增大而增大， K_D 大于

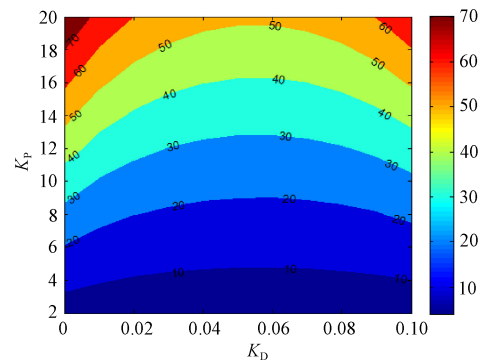


图6 系统闭环带宽

Fig. 6 Closed-loop bandwidth of the system

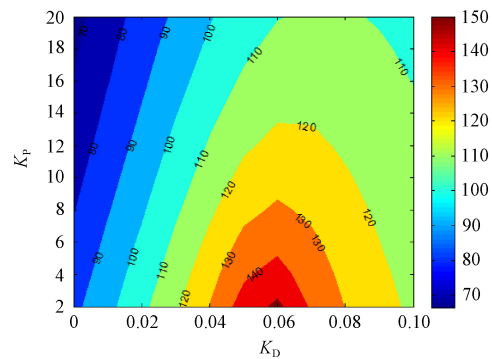


图7 系统开环相位裕度

Fig. 7 Open-loop phase margin of the system

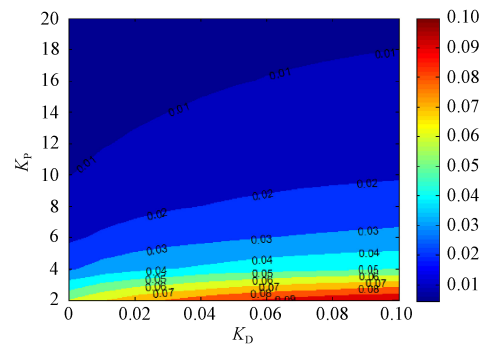


图8 闭环系统阶跃响应上升时间

Fig. 8 Step response rise time of closed-loop system

0.06时，开环相位裕度随 K_D 增大而减小，相位裕度要求大于 90° ； K_p 越大，闭环系统阶跃响应上升时间越短；综合图6、图7、图8中的参数对应系统特性，能够选取合适的 K_p 、 K_D 控制参数。

2 不同闭环控制周期的仿真分析

根据上述电动伺服系统数学模型，在MATLAB/Simulink中搭建舵机伺服系统仿真模型，如图9所示。实际舵机伺服系统回路具有非线性，

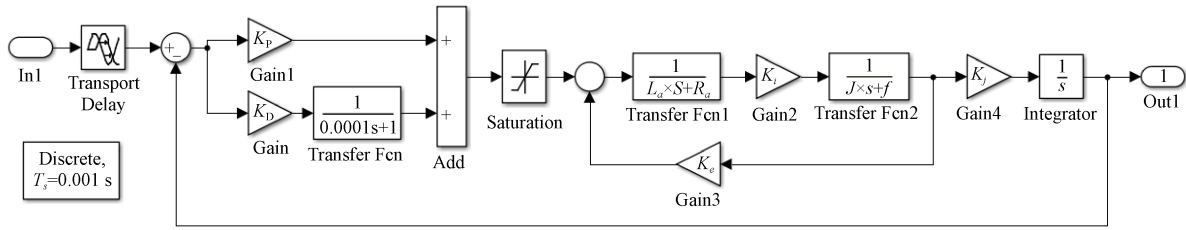


图9 伺服系统仿真模型

Fig. 9 Servo system simulation model

包括线路传输的延时、电压饱和、舵机非线性等,模型中对伺服回路的部分非线性作了处理。其中,电枢电压 U_a 进行 $\pm 27\text{ V}$ 的限幅处理;角速度 ω 进行最大速度限幅处理;角度 θ 进行最大角度限幅处理;舵指令进行 2.5 ms 通信延时处理,舵反馈进行一个闭环控制周期的采样延时处理。

下面针对不同闭环控制周期进行仿真,分析闭环控制周期对舵机伺服系统频带、响应速度、电流、灵敏度等各性能指标的影响。闭环控制周期分别设为 0.25 ms 、 0.5 ms 、 1 ms 、 1.25 ms 。

2.1 阶跃响应

在一定的控制参数下,令阶跃指令幅值分别为 1° 、 10° 。

空载条件输入幅值为 1° 时,不同闭环控制周期的输入/输出角度、电枢电压、电流、角速度的仿真曲线如图 10 所示。在图 10~图 14 中,黑/红/绿/蓝颜色曲线对应的闭环控制周期分别是 0.25 ms 、 0.5 ms 、 1 ms 、 1.25 ms (虚线表示指令),角度单位为 $^\circ$,电流单位为 A ,电枢电压单位为 V ,角速度单位为 rad/s 。

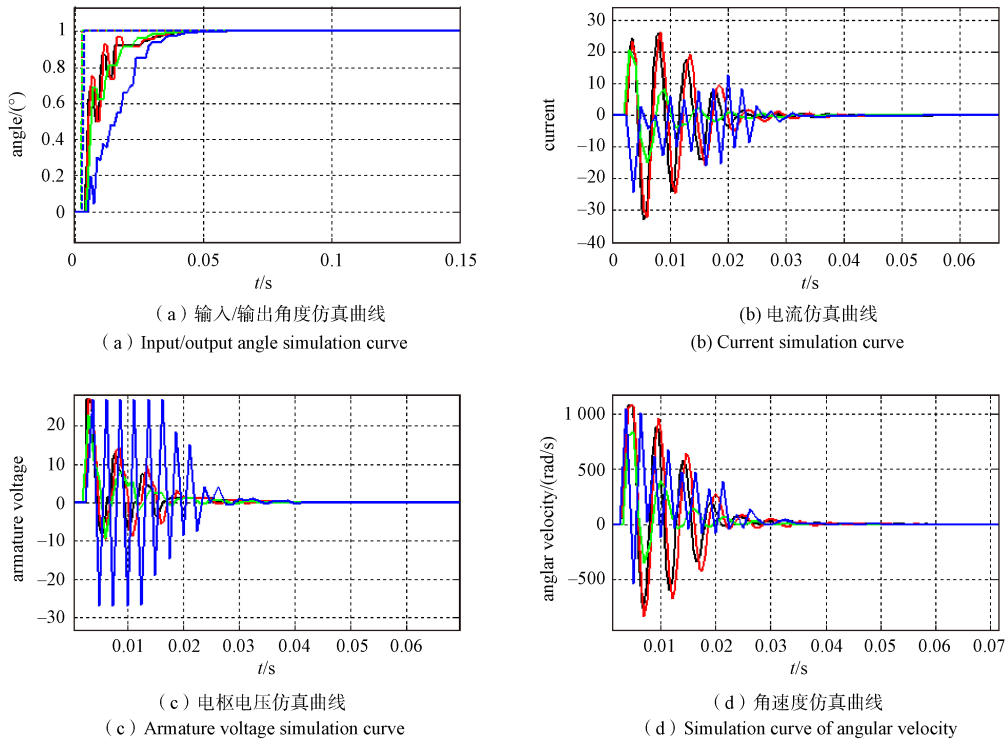


图 10 空载输入 1° 闭环控制周期仿真曲线

Fig. 10 Simulation curve of no-load input 1° closed-loop control cycle

表 2 统计了空载输入 1° 时不同闭环控制周期下各性能指标。由图 10 和表 2 可知,闭环控制周期越大,阶跃响应上升时间越长,响应速度就越慢;

由图 10(b) 看出,总体趋势上, 0.25 ms 和 0.5 ms 闭环周期比 1.25 ms 和 1 ms 周期的瞬态电流更大,这是因为 PD 控制中微分项由指令和反馈误差除以闭环

表2 输入 1° 时不同闭环周期下的性能指标Table 2 Performance indicators under different closed-loop cycles with input 1°

空载, 阶跃指令 1°			
闭环控制周期/ms	阶跃响应上升时间/s	稳态误差/ $^\circ$	电流最大峰值/A
0.25	0.015 5	0	-32.8
0.5	0.016	0	-32.07
1	0.019	0	20.94
1.25	0.028 75	0	-24.31

控制周期计算, 当闭环周期增大, 指令与反馈误差增大的程度小于闭环周期增大的程度, 因此微分项会减小, 总的控制电压减小, 从而瞬态电流减小; 由图10(d)看出, 闭环控制周期越小, 角速

度越大。

空载条件输入幅值为 10° 时, 不同闭环控制周期的输入/输出角度、电枢电压、电流、角速度的仿真曲线如图11所示。

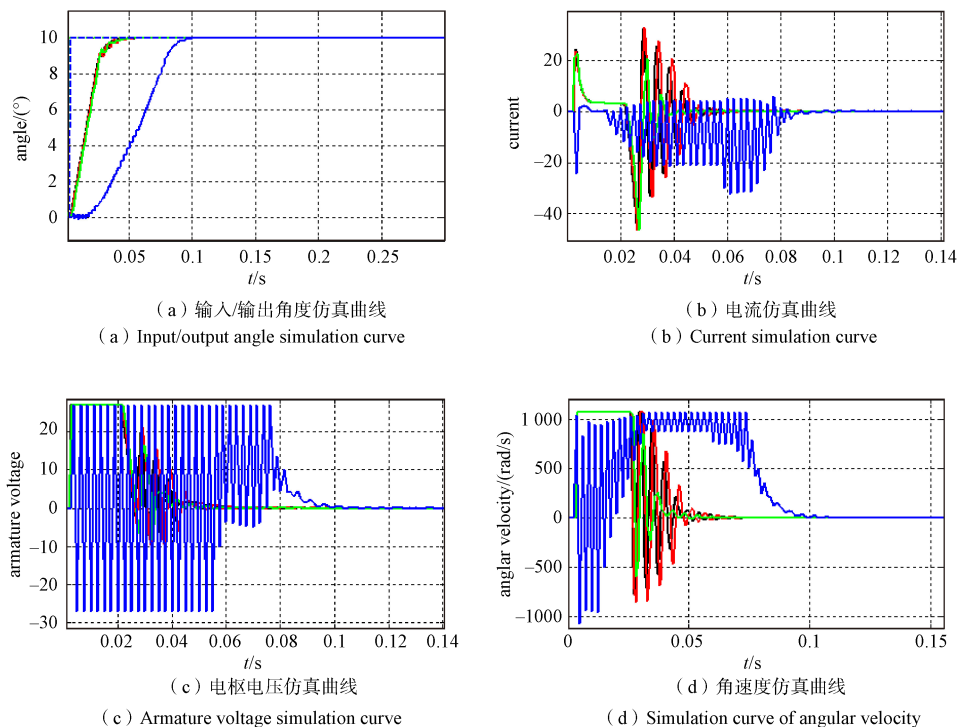
图11 空载输入 10° 闭环控制周期仿真曲线Fig. 11 Simulation curve of no-load input 10° closed-loop control cycle

表3统计了空载输入 10° 时不同闭环控制周期下各性能指标。由图11和表3可见, 闭环控制周期在1 ms内时, 上升时间和瞬态电流随闭环周期变化的差距较小, 这是由于在阶跃响应上升过程中电枢电压和角速度已达到饱和; 闭环周期1.25 ms时的瞬态电流峰值较小, 但它趋于稳态的时间也 longer。

负载条件下输入幅值 10° 时, 不同闭环控制周期下, 输入/输出角度和电流仿真曲线如图12所示。由图可见, 角度响应和电流的变化随闭环周

期变化的趋势现象与空载条件下一致, 负载下不同闭环控制周期的稳态电流最后都趋于0.98 A。

2.2 正弦响应

空载条件下, 输入频率20 Hz, 幅值 2° 的正弦信号指令, 不同闭环控制周期的输入/输出角度和电流仿真曲线如图13所示。

由图13可见, 不同闭环控制周期的正弦响应相位滞后一样, 幅值随周期变大而略微增大; 电流最大峰值分别是11.77 A、12.18 A、8.55 A、7.26 A, 随着闭环周期增大, 瞬态电流减小。

表3 输入 10° 时不同闭环周期下的性能指标

Table 3 Performance indicators under different closed-loop cycles with input 10°

空载, 阶跃指令 10°			
闭环控制周期/ms	阶跃响应上升时间/s	稳态误差/(°)	电流最大峰值/A
0.25	0.026 5	0	-45.7
0.5	0.026 5	0	-45.7
1	0.027	0	-46.21
1.25	0.08	0	-32.13

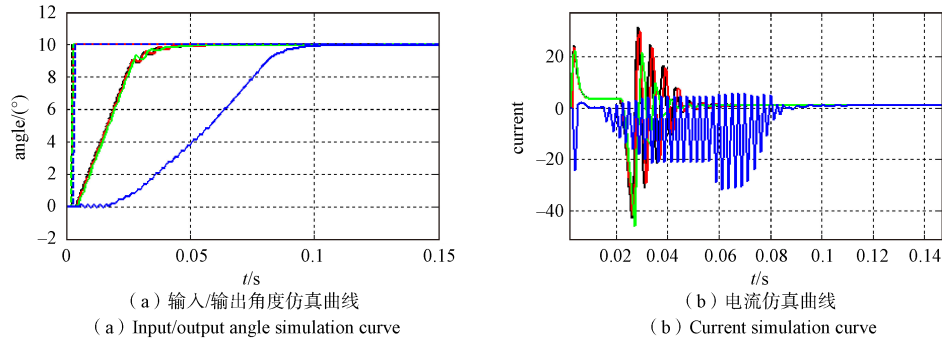


图 12 负载输入 10° 闭环控制周期仿真曲线

Fig. 12 Load input 10° closed-loop control cycle simulation curve

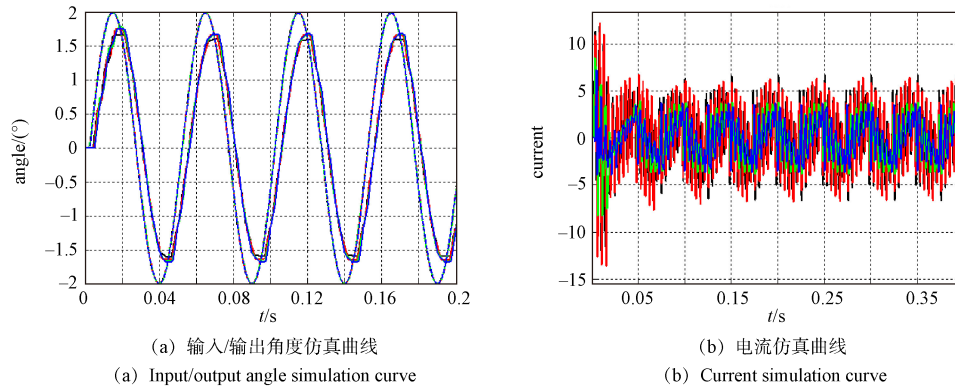


图 13 正弦信号闭环控制周期仿真曲线

Fig. 13 Simulation curve of sinusoidal signal closed-loop control cycle

2.3 斜坡响应

斜坡响应主要测试舵机灵敏度指标, 给定斜率为 0.1°/s 的斜坡指令, 响应曲线如图 14 所示。可见不同闭环控制周期下, 指令都是从 0 变化到 0.1° 舵机才开始响应, 闭环周期变化, 舵机伺服系统灵敏度无显著变化。

3 实验验证

为了实际验证闭环周期对伺服系统的影响, 搭建了实验平台, 设备连接关系如图 15 所示。

28 V 直流电源给舵机伺服系统供电, 工控机

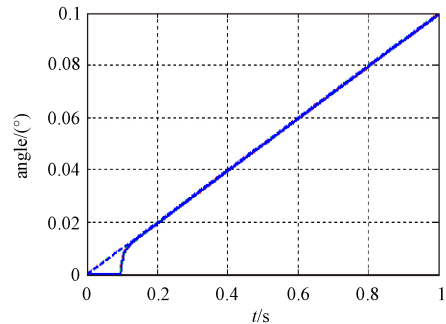


图 14 斜坡信号闭环控制周期角度仿真曲线

Fig. 14 Simulation curve of slope signal closed-loop control cycle angle

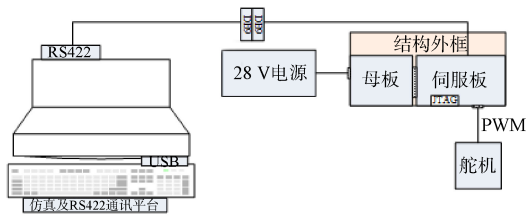
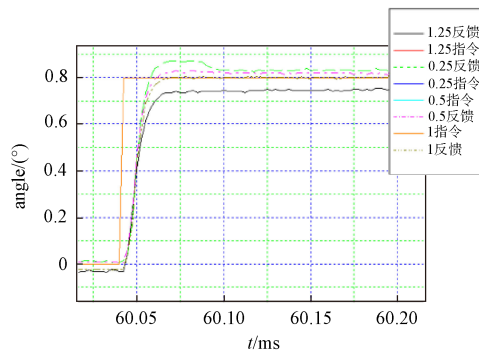


图15 实验设备连接图

Fig. 15 Connection diagram of test equipment

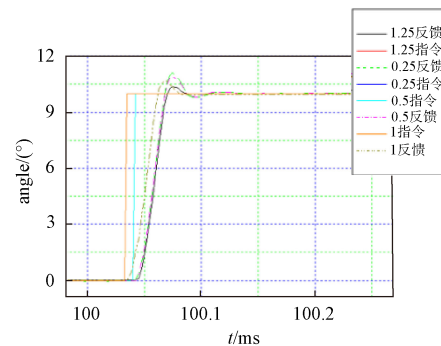
通过RS422串口经转接插头(DB9)连接到伺服板的RS422串口上, 伺服板输出的驱动信号直接控制舵机转动。将DSP运行解算的闭环周期分别设置为0.25 ms、0.5 ms、1 ms、1.25 ms, 通过上位机测试程序给伺服系统发送不同角度的阶跃信号指令, 具体试验结果如下:

① 工作电流



(a) 阶跃响应实验曲线 (0.8°指令)

(a) Step response test curve (0.8° command)



(b) 阶跃响应实验曲线 (10°指令)

(b) Step response test curve (10° command)

图16 阶跃响应实验曲线

Fig. 16 Step response test curve

4 结论

本文以电动舵机伺服系统为例, 分析闭环控制周期大小对数字伺服系统各性能指标的影响。首先详细分析了数字式电动舵机伺服系统的组成及信号交联关系; 接着对电动舵机伺服系统进行数学建模, 系统设计中采用PD控制规律; 然后基于Simulink建立了伺服系统仿真模型, 在不同条件下进行仿真分析, 最后搭建试验平台进行不同闭环控制周期的系统性能测试验证。仿真分析得出: ① 在电枢电压未进入饱和时, 随着闭环周期增大, 阶跃响应上升时间有所增加, 响应速度变慢; ② 适当地增加闭环周期, 能在一定程度上减小瞬态电流, 避免瞬态电流大拉低系统电压从而造成计算机复

由于实验条件有限, 只能通过28 V电源显示器读取电流, 在舵机打大角度的过程中捕获并读取最大瞬态电流, 闭环周期为0.25 ms、0.5 ms、1 ms、1.25 ms时, 捕捉到的最大瞬态电流分别为1.32 A、1.34 A、1.33 A、1.34 A, 该数据通过肉眼判断读取, 存在漏拍误差。

② 阶跃响应

当指令分别为0.8°、10°时阶跃响应波形如图16所示。当闭环周期为0.25 ms、0.5 ms、1 ms、1.25 ms时, 响应上升到指令90%的时间分别为14 ms、16 ms、17 ms、23ms。10°阶跃响应最大值分别为11.103°、10.874°、10.707°、10.343°, 超调量分别为11.03%、8.74%、7.07%、3.43%。可以看出, 随着闭环周期增大, 上升时间变长, 超调量减小。

位的风险; ③ 不同闭环周期的正弦响应相位滞后差别很小, 幅值随周期变大略微增加; ④ 不同闭环周期下, 舵机伺服系统灵敏度不变。经试验验证, 不同闭环周期下最大瞬态电流基本一致, 该数据通过肉眼捕获, 存在漏判的可能, 实验数据可作为参考; 试验得出随着闭环周期增大, 阶跃响应上升时间变长, 超调量有所减小。

参考文献

- [1] 张旭, 基于DSP的电动舵机伺服系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
 - [2] 郭背背. 基于DSP的液压伺服机构控制器的研究[J]. 现代制造技术与装备, 2021(10): 170-174.
- GUO B B. Research on controller of hydraulic servo

- mechanism based on DSP[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021(10): 170-174.
- [3] BONE G M, XUE M, FLETT J. Position control of hybrid pneumatic-electric actuators using discrete-valued model-pre-dictive control[J]. Mechatronics, 2015, 25(6): 1-10.
- [4] 吴建刚, 高玉文, 王阔. 基于新型数字电位器的伺服控制系统[J]. 机电产品开发与创新, 2021, 34(5): 132-134.
WU J G, GAO Y W, WANG K. Servo control system based on a new type of digital potentiometer[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2021, 34(5): 132-134.
- [5] 王晓初, 张林健, 张国平, 等. 基于非接触式磁编码器的高精度数字舵机控制研究[J]. 微电机, 2017(12): 46-50.
WANG X C, ZHANG L J, ZHANG G P, et al. High-precision digital steering gear control based on non-contact magnetic encoder[J]. Micromotors, 2017(12): 46-50.
- [6] 汪军林, 解付强, 刘玉浩. 导弹电动舵机的研究现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2008(3): 42-46.
WANG J L, XIE F Q, LIU Y H. Research status and development trend of missile electric steering gear[J]. Aerodynamic Missiles, 2008(3): 42-46.
- [7] FALLAHI M, et al. Precise position control of an electro-hydraulic servo system via robust linear approximation [J]. ISA Transactions, 2018(80): 503-512.
- [8] 郭扬光, 赵怀林, 祝波. 基于 DSP 的高可靠舵机控制器设计[J]. 电气传动, 2020, 50(7): 74-78.
GUO Y G, ZHAO H L, ZHU B. Design of a highly reliable actuator controller based on DSP[J]. Electric Drive, 2020, 50(7): 74-78.
- [9] 刘鹏. 基于 DSP 的无刷直流电机驱动器研制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [10] 聂磊. 无人机电动舵机系统设计与控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [11] 张元. 基于 DSP 的小型电动舵机伺服控制系统研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [12] BO L, HUANG L, DAI Y, et al. Mitigation of DC components using adaptive BP-PID control in transformless three-phase grid-connected inverters[J]. Energies, 2018, 11(8): 2047-2069.
- [13] WENPING C. Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012: 3523-3531.
- [14] 马晓阳, 米珂, 杜巍, 等. 基于新型积分分离 PID 控制算法的无刷直流电机控制系统[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(4): 30-34.
MA X Y, MI K, DU W, et al. Brushless DC motor control system based on a new integral separation pid control algorithm[J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(4): 30-34.
- [15] 张贺飞, 李志锟, 黄宜庆. 基于变速积分与微分先行 PID 的无刷直流电机串级调速控制[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 6-10.
ZHANG H F, LI Z K, HUANG Y Q. Brushless dc motor cascade speed control based on variable speed integral and differential forward PID[J]. Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition), 2020, 36(1): 6-10.
- [16] 王孝武. 现代控制理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [17] 何小辉. 电动舵机数字伺服控制系统的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [18] 邓健辉. 基于 FPGA 的电动舵机控制器设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [19] 王生明. 制导炮弹电动舵机控制器设计与分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [20] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 北京科学出版社, 2013.
- [21] 张强, 张军, 蔡权林, 等. 基于 LADRC 的电动舵机高动态控制方法[J]. 电子机械工程, 2020, 36(1): 60-64.
ZHANG Q, ZHANG J, CAI Q L, et al. High dynamic control method of electric steering gear based on LADRC[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2020, 36(1): 60-64.

[作者简介]

董 斌 1979 年生, 博士研究生, 正高级工程师。

陈佳馨 1997 年生, 硕士, 工程师。

穆晓敬 1988 年生, 硕士, 高级工程师。

孙栋梁 1988 年生, 本科, 高级工程师。

(本文编辑: 杨秀丽)