

doi: 10.7690/bgzd.2013.08.021

USB 伺服驱动速度环设计及仿真

王二建, 桑志勇, 吴云

(中国卫星海上测控部试验技术部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 根据 USB 伺服系统设备的原理和组成, 对 USB 伺服驱动速度环设计方法进行研究。分析速度环控制对象特性, 详细介绍速度环的设计, 给出具体速度环参数及其 PID 调节器设计方法, 运用 Matlab 建立其仿真模型, 检验速度环在不同 PID 调节参数下的稳态和动态性能。仿真结果表明: 该设计正确、可靠, 系统仿真形象、直观, 为位置环及其他控制方式设计打下了基础。

关键词: USB; Matlab; 伺服驱动; 速度环; PID 调节器

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** B

Design and Simulation of Speed Loop for USB Servo-Driven System

Wang Erjian, Sang Zhiyong, Wu Yun

(Technology Department, Satellite Maritime Tracking & Controlling Department of China, Jiangyin 214431, China)

Abstract: According to the principle and constitution of the USB servo drive system equipments, research the design method of the speed loop of USB servo drive system. Analyze the controlled object properties of the speed loop, introduce the design of the speed loop in detail, and put forward the detailed design method for the speed loop parameters and its PID adjustment. Use Matlab to establish its simulation model. Verify the steady and dynamic performance of the speed loop in the condition of different PID parameters. The simulation results show that this design is correct and reliable, the simulation is vivid and intuitive. Make the basis for the design of the position loop and other control methods.

Key words: USB; Matlab; servo drive; speed loop; PID regulator

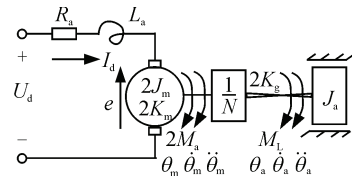
0 引言

一个高性能伺服系统不仅要指令做出快速响应, 当外部出现大的扰动或对象特性发生变化时, 还应保持良好的响应性能, 系统要具备很强的抗干扰性能, 使其动态特性不随外部参数的变化而变化。在转速、电流双闭环调速系统中, 各环节性能的优化是整个伺服系统性能提高的基础。速度环是伺服系统动态跟踪实现的重要环节, 系统需要速度环具有良好的动态响应速度、宽广的调速范围、优异的抗扰特性, 从而为伺服系统快速准确的定位与跟踪提供基础与条件。通过电流环设计, 已经为速度环提供了良好的控制对象, 在完成对电流环的设计之后, 即可将电流环作为速度环控制对象的一部分, 进行速度环的设计。某船载 USB 伺服系统需要在复杂海况和船摇情况下对空间目标进行跟踪测量, 并提供一定精度的测角数据用于目标定轨, 这就要求整个伺服控制系统具有较高的动态和稳态性能。笔者结合 USB 伺服系统设备的原理和组成, 研究 USB 伺服驱动速度环, 特别是速度环调节器的设计方法, 并通过分析和仿真检验系统设计的准确性。

1 速度环控制对象特性分析

控制对象是控制系统的重要组成部分。分析控

制对象, 取得控制对象的数学模型, 是进行系统分析的基础, 是系统设计的前提。USB 伺服驱动是由双电机驱动天线, 在不考虑齿轮箱齿隙以及电机与齿轮箱摩擦等非线性因素的前提下, 其简化等效模型如图 1 所示。



J_m : 电机转动惯量; K_m : 电机力矩系数; M_a : 电机电磁力矩; K_g : 齿轮箱输出端等效刚度; J_a : 天线转动惯量; M_L : 天线加速力矩; θ_m : 电机轴角位置; θ_a : 天线轴角位置; N : 齿轮箱变速比

图 1 双电机驱动简化模型

系统运动微分方程为:

$$U_d = e + R_a I_d + L_a \frac{dI_d}{dt}$$

$$e = K_e \dot{\theta}_m$$

$$2M_a = 2K_m I_d$$

$$2M_a = \frac{1}{N} M_L + 2J_m \ddot{\theta}_m$$

$$M_L = 2K_g \left(\frac{1}{N} \theta_m - \theta_a \right)$$

$$M_L = J_a \ddot{\theta}_a$$

收稿日期: 2013-02-11; 修回日期: 2013-03-11

作者简介: 王二建(1982—), 男, 江苏人, 硕士, 工程师, 从事航天器测控技术研究。

根据图 1 所示系统的运动微分方程可以得到双电机驱动天线时的控制对象方框图如图 2 所示。

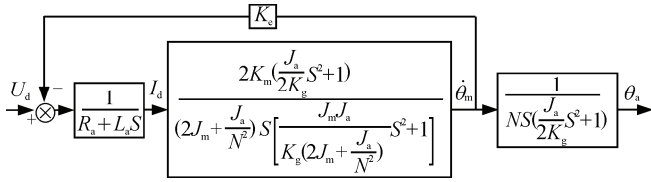


图 2 双电机控制对象方框图

在实际系统中，由于电流环对速度环控制对象的改造，反电势的影响可以忽略不计。于是电流环控制对象的传递函数就是 $\frac{I_d}{U_d} = \frac{1}{R_a + L_a S}$ ，速度环控制对象的传递函数除了电流环，还有 I_d 到 $\dot{\theta}_m$ 的传递函数。

令：

$$W_m(S) = \frac{\dot{\theta}_m(S)}{I_d(S)} = \frac{2K_m \left(\frac{J_a}{2K_g} S^2 + 1 \right)}{\left(2J_m + \frac{J_a}{N^2} \right) S \left[\frac{J_m J_a}{K_g \left(2J_m + \frac{J_a}{N^2} \right)} S^2 + 1 \right]}$$

按工程最佳参数，将电流环设计成典型 I 型环节，该环节是一个二阶振荡系统。一般电流环带宽比速度环带宽要高得多，因此在设计速度环时将电流环近似为一阶惯量环节，等效时常数 $T_i = 2T_{zi}$ (T_{zi} 为电流环时间常数)。当速度环截止频率 ω_c 较低时，原系统与近似系统只在高频段有一些差别。于是速度环控制对象传递函数为：

$$\left(\frac{K_i}{T_i S + 1} \right) W_m(S) = \left(\frac{K_i}{2T_{zi} S + 1} \right) \frac{2K_m \left(\frac{J_a}{2K_g} S^2 + 1 \right)}{\left(2J_m + \frac{J_a}{N^2} \right) S \left[\frac{J_m J_a}{K_g \left(2J_m + \frac{J_a}{N^2} \right)} S^2 + 1 \right]}$$

在设计位置环时，速度环闭环频率特性常以实测结果为准，除非特殊要求，通常不需要精确计算速度环的闭环传递函数。因为速度环闭环时在高频部分的开环响应在 0 dB 以下，所以可以忽略闭环的影响，直接用控制对象的曲线与计算的闭环中低频段曲线拟合。于是可将 $W_m(S)$ 简化为：

$$W_m(S) = \frac{K_m}{\left(J_m + \frac{J_a}{2N^2} \right) S} = \frac{K_m}{J_2 S}$$

简化后的速度环控制对象为：

$$\left(\frac{K_i}{T_i S + 1} \right) \cdot W_m(S) = \left(\frac{K_i}{2T_{zi} S + 1} \right) \cdot \frac{K_m}{\left(J_m + \frac{J_a}{2N^2} \right) S} = \left(\frac{K_i}{2T_{zi} S + 1} \right) \cdot \frac{K_m}{J_2 S}$$

2 速度环设计

速度环调节器常采用并联 PID 调节器、串联 PI 调节器或滞后-超前调节器。由于并联 PID 调节器对减小超调，抑制振荡和改善抗干扰性能更有利；因此，笔者将 USB 伺服驱动速度环调节器设计为并联 PID 调节器，反馈回路为测速负反馈。加入并联 PID 调节器校正环节的速度环方框图如图 3。

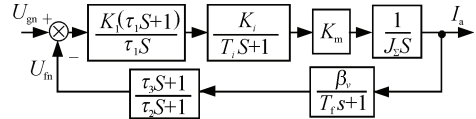


图 3 速度环方框图

为了使开环传递函数简单，可令 $\tau_1 = \tau_2$ ，于是 τ_1 、 τ_2 不出现在开环传递函数中，反馈回路中的 τ_3 成了开环校正的主微分时常数。当 $T_i T_i \omega_c^2 \ll 1$ 时，系统的开环传递函数等效为：

$$W(s) = \frac{K_i K_i K_m \beta_f}{\tau_1 J_2} \cdot \frac{\tau_3 S + 1}{S^2 (T_i S + 1)(T_i + 1)} = \frac{K(\tau_3 S + 1)}{S^2 (T_i S + 1)(T_i + 1)} = \frac{K(\tau_3 S + 1)}{S^2 (T_2 S + 1)}$$

式中：

$$T_2 = T_i + T_f \tag{1}$$

$$K = \frac{K_i K_i K_m \beta_f}{\tau_1 J_2} \tag{2}$$

根据调速系统在稳态无静差和在动态具有良好抗干扰性能的要求，将速度环校正成典型 II 系统^[1]。系统中频宽 h 取

$$h = \frac{\tau_3}{T_2} = 5 \tag{3}$$

此时系统抗干扰和跟随性能较好。系统对数幅频特性如图 4 所示。

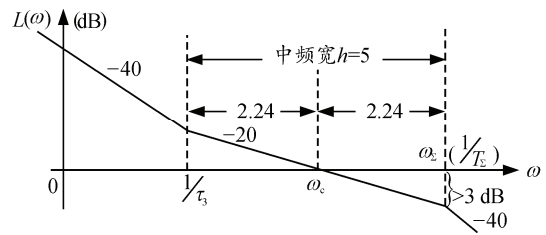


图 4 速度环对数幅频特性

将开环截止频率 ω_c 设计在 τ_3 和 ω_c 中间位置，系统可以得到最大的相角裕度^[2]。则：

$$\frac{1/T_2}{\omega_c} = \frac{\omega_c}{1/\tau_3} \tag{4}$$

由式 (3)、式 (4) 得：

$$\tau_3 = \sqrt{5} / \omega_c, \quad T_2 = \sqrt{5} / 5 \omega_c \tag{5}$$

在图 4 中，设 $0 \sim 1/\tau_3$ 之间是 -40 dB/dec 的特性段，则

$$20 \lg \omega_c - 20 \lg \frac{1}{\tau_3} + 40 \lg \frac{1}{\tau_3} - 40 \lg 1 = 20 \lg k \quad (6)$$

由式 (5)、式 (6) 得：

$$K = \frac{\omega_c}{\tau_3} = \frac{\omega_c^2}{\sqrt{5}} \quad (7)$$

根据式 (5)、式 (7) 和图 3 得系统闭环传递函数为：

$$\phi(s) = \frac{G_i(s)}{1+W(s)} = \frac{\frac{1}{\beta_v}(\tau_i s+1)(T_i s+1)}{\frac{T_v}{K}s^3 + \frac{1}{K}s^2 + \tau_3 s+1} = \frac{\frac{1}{\beta_v}(\tau_i s+1)(T_i s+1)}{\left(\frac{1}{\omega_c} s+1\right)\left(\frac{1}{\omega_c} s^2 + \frac{1.24}{\omega_c} s+1\right)}$$

取

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{1}{\omega_c} \quad (8)$$

则：

$$\phi(s) = \frac{\frac{1}{\beta_v}(T_i s+1)}{\left(\frac{1}{\omega_c} s^2 + 2 \times 0.62 \times \frac{1}{\omega_c} s+1\right)}$$

这样的参数设计使速度环闭环对输入的响应成为二阶系统，比三阶系统更快。此时，系统自然振荡角频率、阻尼比分别为 $\omega_n = 20$ ， $\zeta = 0.62$ 。系统单位阶跃响应调整时间为： $T_p = \frac{3}{\zeta \omega_n} = \frac{4.8}{\omega_c} \approx 239 \text{ ms}$ ，超调

量： $\sigma\% = \exp\left(-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\pi\right) \times 100\% \approx 6\%$ ，可看出经并联 PID

校正后的速度环，其快速性和超调都得到了改善。

3 速度环仿真设计

USB 伺服系统采用的是意大利生产的永磁直流伺服电机，参数 $K_m = 0.09955 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{A}$ ， $J_m = 0.00350 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 \times 10^{-6}$ 。取 $J_c = 0.0037 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ (包括电机惯量、齿轮箱惯量、天线座惯量)^[3]。设计速度环测速反馈系数：

$$\beta_v = \frac{V_{fmax}}{n_{max}} = \frac{10}{1500 \times \frac{2\pi}{60}} \approx 0.063662 \text{ V}/\text{rad}/\text{s}$$

速度环中频带宽设计为 $f_c = 3.2 \text{ Hz}$ ，则 $\omega_c = 2\pi f_c \approx 20.096$ 。根据电流环设计得 $K_i \approx 2.5$ 。分别由式 (1)、式 (2)、式 (5)、式 (7)、式 (8) 计算得：

$$K = 178.885, \quad K_1 = 2.08368 \text{ ms}, \quad \tau_3 = 111.269 \text{ ms},$$

$$T_f = 11.259 \text{ ms}, \quad \tau_1 = \tau_2 = 50 \text{ ms}.$$

在 Matlab Simulink 中建立速度环的框图仿真模型如图 5 所示。

选择输入信号为单位阶跃信号，用其类似于示波器功能的 Scope 模块显示仿真结果如图 6 所示。

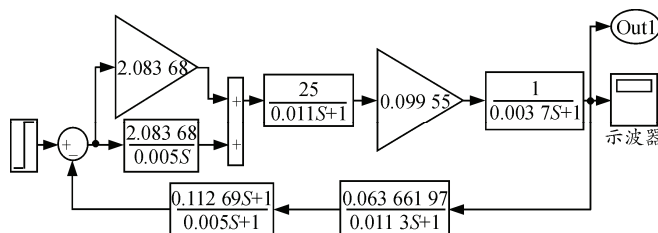


图 5 速度环系统框图

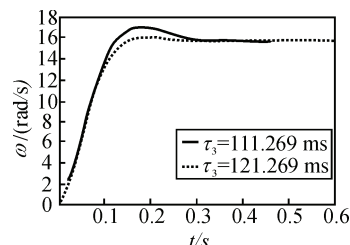


图 6 Scope 模块仿真结果

从仿真结果可以看出：当 $\tau_3 = 111.269 \text{ ms}$ 时，调整时间 $T_p \approx 270 \text{ ms}$ 超调量 $\sigma\% \approx 8\%$ 。微分时常数 $\tau_3 = 121.269 \text{ ms}$ 较 $\tau_3 = 111.269 \text{ ms}$ 时速度环上升时间长，但超调量小。微分时常数 τ_3 在某种程度上可以改变微分作用的时间和强弱，从而达到改善控制系统性能的目的^[4]；因此，在参数设计时要综合考虑，根据指标设计要求选择合适的参数值，也可通过位置环的设计来进一步校正，在此不再详述。

4 结束语

目前，具有转速反馈和电流反馈的双闭环调速系统都采用由内向外，一环包围一环的系统结构，通过每一环的具体设计构成一个完整的闭环系统，这为工程设计及调试带来了极大的方便。笔者在设计船载 USB 伺服驱动电流环的基础上，对速度环的设计做了详细分析，并建立其系统模型，利用 Matlab 软件进行仿真，验证了速度环设计的正确性和可靠性。通过参数调整和系统仿真获得预期性能指标下的具体参数值，为工程设计及调试提供一定方法和参考，为以后位置环以及其他控制方式的设计打下了良好的基础，具有一定的应用价值。

参考文献：

- [1] 唐永哲. 电力传动自动控制系统[M]. 中国：西安电子科技大学出版社, 1998: 19-22.
- [2] 汪进. 伺服系统的安全控制策略[J]. 兵工自动化, 2012, 31(6): 62-65.
- [3] 蒲迎军, 等. 统一微波测控系统测角分系统讲义[S]. 中国：电子工业部第三十九研究所, 1996.
- [4] 许可, 刘建都, 李晓鹏. 一种新型伺服系统智能 PID 控制器的设计[J]. 四川兵工学报, 2010, 30(5): 19.