

文章编号 1004-924X(2007)05-0741-05

方位角测量跟踪系统设计及实验

肖影^{1,2}, 金龙旭¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了使跟踪设备快速、准确地跟踪飞行目标并精确测量目标方位角,设计了一种测量跟踪系统,该系统根据跟踪设备发出的方位角偏差信号推动带有跟踪设备的伺服转台,驱动子系统采用H型双极模式PWM电路驱动伺服转台的直流电机以提高响应速度。使用测速机反馈速度信号以提高系统稳定性,使用高精度编码器输出目标方位角信号以提高测量精度。提出了系统动态传递函数,并对传递函数进行分析,给出了仿真动态曲线并计算动态参数。计算了电路的开关频率及延迟时间等关键参数。通过实验得到系统阶跃响应的位移曲线和速度曲线以及其他实验结果。实验结果显示,系统随动精度为 $0.1 (^{\circ})/s$,最大跟踪速度为 $38.3 (^{\circ})/s$,最大跟踪加速度为 $23.5 (^{\circ})/s^2$,满足了技术指标和设计要求。

关键词:光电跟踪;方位角测量;PWM电路;开关频率;延迟时间

中图分类号:V556.5 **文献标识码:**A

Design and experiment of tracking and detecting system for azimuth

XIAO Ying^{1,2}, JIN Long-xu¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: A system for tracking and detecting flying object rapidly and exactly is designed and the accurate azimuth of the flying object is obtained synchronously. In this system, the azimuth error signal from detecting devices drives a servo running flat with detecting devices and an H-type bipolar PWM project is used in driving subsystem to drive DC motor in the servo running flat to improve response speed. A speed-detected motor is used to get speed feedback signal for better stability. A high precision encoder is adopted to get azimuth signal of flying object for higher measure precision. For analysis on system dynamic transfer function, the dynamic curve is emulated and dynamic parameter is calculated, also switch frequency and delay time are given. Displacement curve and speed curve of step response and other results of the system are obtained by experiment. The results indicate that the system can meet the technique requirements, it shows the excellent parameter in dynamic precision of 0.1° , max tracking velocity of $38.3 (^{\circ})/s$ and max tracking acceleration of $23.5 (^{\circ})/s^2$.

Key words: photoelectric tracking; azimuth measurement; PWM circuit; switch frequency; delay

1 引言

随着半导体集成电路的发展, PWM 伺服控制技术获得了迅速的发展和广泛的应用, 采用 PWM 控制的永磁式直流伺服电机驱动装置可实现宽范围的速度和位置控制, 优于常规的驱动方式, 已成为高精度伺服控制领域应用得最为广泛的驱动形式。开关频率, 延迟时间和电流纹波, 对系统性能和电气指标有重要影响。

设计的方位角测量跟踪系统用于测量无人驾驶飞机在空中飞行的方位角, 由测向天线、测向接收机、伺服转台、角度测量子系统及驱动子系统组成, 其中驱动子系统是设备的核心。系统工作原理: 测向天线和测向接收机作为伺服转台的负载; 当测向天线对准目标时, 测向接收机输出的方位角偏差电压 $V_1 = 0$, 测向天线和测向接收机静止不动; 当目标偏离测向天线时, 测向接收机输出方位角偏差电压 $V_1 \neq 0$, 驱动子系统控制测向天线和测向接收机随伺服转台向减少方位角偏差电压的方向转动直至 $V_1 = 0$ 。角度测量子系统利用与直流伺服电机同轴安装的编码器测量无人驾驶飞机的方位角。驱动子系统是设备的动力装置, 直接决定设备的动态性能及工作精度。驱动子系统采用 H 型双极模式 PWM 功率转换电路, 由误差放大、电流反馈、速度反馈、电机及 PWM 等单元电路组成。通过经典控制理论计算系统的传递函数, 并通过调整关键参数使系统达到如下技术指标:

- (1) 随动系统精度 0.15° ;
- (2) 最大跟踪速度 $25^\circ/\text{s}$;
- (3) 最大跟踪加速度 $7^\circ/\text{s}^2$;
- (4) 过渡过程 1s (1° 阶跃输入, 振荡次数 < 2 次)。

2 系统方案选择及动态分析

2.1 方案选择

方位角测量跟踪系统是车载测量设备, 要求体积小, 重量轻, 操作简便, 反应迅速, 定位准确。选择低压永磁式宽调速伺服电动机作为伺服转台的执行元件。编码器、测速电机和伺服电机同轴安装。驱动子系统采用 H 型双极模式 PWM 功率转换电路。

编码器参数: 12 位增量式编码器, 测量精度 0.088° 。

测速电机参数: 输出斜率 $30\text{ V}/(\text{rad}/\text{s})$; 最大时速电压 62 V ; 纹波系数 $\leq 1\%$; 输出电压不对称度 1% ; 激磁静摩擦力矩 $1.6 \times 10^{-2}\text{ kg} \cdot \text{m}$ 。

直流伺服电机参数: 峰值堵转力矩 $11.76\text{ N} \cdot \text{m}$; 峰值堵转电流 5.26 A ; 空载最大转速 $115\text{ r}/\text{min}$; 电枢转动惯量 $1617 \times 10^{-5}\text{ kg} \cdot \text{m}$ 。

H 型双极模式 PWM 功率转换电路特点: 单一电源供电, 晶体管的耐压相对要求较低; 电枢电流无断续现象; 电动机不转时, 正、负脉冲电压的宽度相等, 电枢电压瞬时值不为零, 电枢回路中流过可使电动机发生高频颤动的交变电流, 有利于减小静摩擦; 电枢两端电压悬浮, 不便引出反馈; 基极驱动回路比 T 型电路多; 增大了电动机的空载损耗^[1]。

2.2 动态特性分析

驱动子系统由信号放大电路及电机驱动电路组成, 其动态特性结构如图 1 所示。信号放大电路将来自测向接收机的方位角偏差信号 V_1 和来自测速电机的速度反馈信号 V_2 合成为电机驱动电路的输入信号 V_i 。电机驱动电路包括多种功能单元电路: 电平移 (a)、误差放大器 (bc)、电机及 PWM (d)、滤波器 (e)、电流反馈环 (f) 等, 动态结构图参量定义如下:

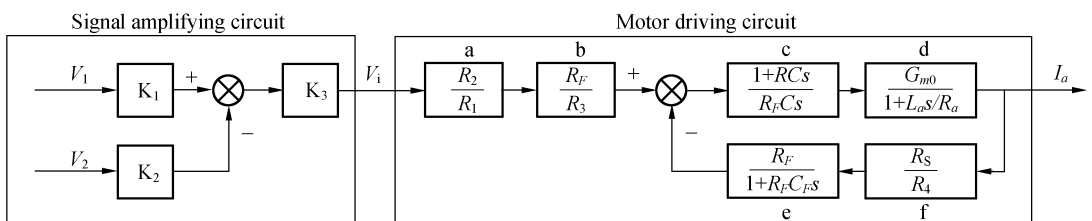


图 1 驱动子系统动态特性结构图

Fig. 1 Dynamic characteristic structure diagram of driving subsystem

L_a ——电机电枢电感;
 R_a ——电机电枢电阻;
 I_a ——电机电枢电流;
 R_s ——电流检测电阻;
 $1/R_4$ ——电流检测放大器的跨导能力;
 G_{mo} ——PWM 功率放大器的直流量系数;
 为保证电流环路的稳定, 使极点对消, 调节器

的参数选择须满足: $1+sRC=1+s \cdot L_a/R_a$

得闭环传递函数

$$\frac{I_a(s)}{V_i(s)} = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} G_{mo} \frac{1 + R_F C_F s}{G_{mo} R_s + R_4 C_s + R_F C_F R_4 C_s^2}$$

系统开环增益

$$A\beta = \frac{1}{R_F C_s} \cdot G_{mo} \frac{R_s}{R_4} \frac{R_F}{1 + R_F C_F s} = \frac{G_{mo} R_s}{R_4 C_s (1 + R_F C_F s)}$$

通过计算, 得到系统阶跃响应曲线和幅频特性曲线, 如图 2 和图 3 所示。

$$(f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = 3.62 \times 10^3 \text{ Hz})$$

$$\text{阻尼系数 } \xi = \sqrt{\frac{R_4 C}{4 R_F C_F G_{mo} R_s}} = 0.92$$

$$\text{上升时间 } t_r = 53.9 \text{ ms}$$

$$\text{调整时间 } t_s = 179 \text{ ms}$$

3 系统关键参数的确定

3.1 开关频率选择

开关频率对系统性能和电气指标有重要影响。合适的开关频率可使系统低速平稳性得到改善, 效率得到提高, 而开关频率的合理选择需要折中考虑相互矛盾的因素。

对于小功率伺服系统, 效率不是主要问题, 一般选择较高的开关频率; 中、大功率传动系统中效率问题较为关注, 需要在满足性能要求的同时把开关频率的功率损耗减到最小; 在 PWM 系统中, 与开关频率有关的功率损耗主要是功率转换电路 GTR 的动态损耗和电动机的附加功耗。为提高电机利用率而降低电枢回路的附加损耗, 应努力提高开关频率; 而为提高功率转换效率, 减小开关过程中 GTR 的动态损耗, 应尽量降低开关频率。可见, 提高电机有效利用率(减小电机附加功耗)和减小 GRT 动态损耗是矛盾的。因此, 从 PWM 功率转换效率最高的观点出发, 常以两者合成损耗最小为设计目标, 选择最佳开关频率^[2,5,6]。

(1) 如果规定电机在零位时的微振幅度不大于某一值, 则满足微振精度要求的开关频率为

$$f^3 \geq \frac{K_T U_s}{96 L_a J_{Ge} \delta}$$

(2) 在双极模式控制时, 应使电动机在零位处于动力润滑状态, 以改善静摩擦对伺服系统低速性能的影响, 要求

$$\frac{\Delta I_a \cdot \max}{2} > \frac{T_f}{K_T}$$

式中 T_f ——电动机轴上的静摩擦转矩。

(3) 为了使开关频率不致于对系统的动态性能产生不良影响, f 应当远高于伺服系统本身的通频带 f_c , 一般取

$$f > (10 \sim 30) f_c$$

另外, 开关频率还应高于系统中所有回路的谐振频率 f_r , 以避免共振。

(4) 为了提高电机利用率, 减小附加损耗, 必

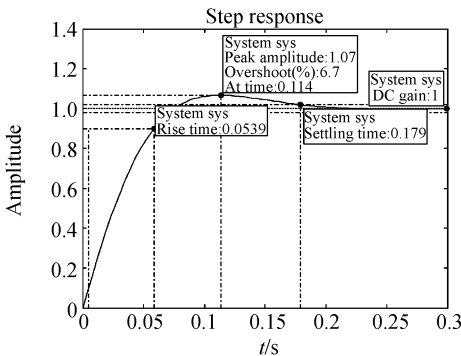


图 2 阶跃响应曲线

Fig. 1 Step response curve

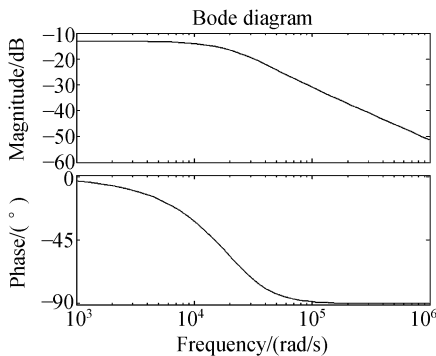


图 3 波特图

Fig. 3 Bode diagram

$$\text{截止频率 } \omega_c = \sqrt{\frac{G_{mo} R_s}{R_4 C R_F C_F}} = 2.27 \times 10^4 \text{ rad/s}$$

须限制电流脉动量,这就要求:

$$2\pi fL_a \gg R_a$$

(5) 开关频率的上限要受到 GTR 的开关损耗和开关时间的限制。

在双极模式控制方式下,电动状态和发电机状态均有两个 GTR 起开关控制作用,只有轻载时,四个 GTR 才能都起控制作用。因此,双极模式输出时,要考虑两个 GTR 的动态损耗。双极模式工作时 GTR 动态损耗与电机附加损耗之和:

$$P_B = U_S I_N$$

$$\left[\frac{t_r + t_f}{T_e} (T_e f + 0.232\alpha_s) + 0.0208 \frac{\alpha_s}{T_e^2 f^2} \right]$$

$$\text{取标称值 } P_B' = \frac{P_B}{U_S I_N} = \frac{t_r + t_f}{T_e} (T_e f +$$

$$0.232\alpha_s) + 0.0208 \frac{\alpha_s}{T_e^2 f^2}$$

取 $\partial P_B' / \partial f = 0$, 解之可得使合成功耗为最小的开关频率,即最佳频率

$$f_{OP \cdot B} = 0.347 \sqrt[3]{\frac{\alpha_s}{T_e^2 (t_r + t_f)}}$$

式中 $\alpha_s = \frac{I_S}{I_N} = \frac{\text{起动电流}}{\text{额定电流}}$

$$T_e = \frac{L_a}{R_a} = \frac{\text{电枢电感}}{\text{电枢电阻}} \frac{1}{2\pi f_B} \text{--- GTR 放大区}$$

的时间常数

t_r --- 开启时电流上升时间

t_f --- 下降时间

按公式 1 计算最佳频率 $f_{OP \cdot B} = 1400 \text{ Hz}$

3.2 延迟时间设定

H 型输出级桥臂晶体管开启延迟可避免切换瞬间的共态直通现象。

延迟时间 $\delta = t_r + t_f$

输出级晶体管关断延迟时间为 $0.5 \mu\text{s}$, 选择开启延迟 $2.25 \mu\text{s}$, 有足够的裕量。

3.3 电流纹波(电流脉动)

PWM 伺服系统的电流脉动为

$$\Delta T_a = \frac{U_s}{L_a} \cdot \frac{T}{2}$$

式中 T --- PWM 振荡周期

实际工作中,通常将 ΔT_a 限制到小于最大电流 $I_{a \cdot \max}$ 的 10%, 即 $\Delta T_a = 0.1 I_{a \cdot \max}$ [4]

4 实验验证

4.1 实验方法

最大角速度测量方法:系统输入端给 1° 阶跃,检测转动位移,得到输出过渡过程曲线,计算最大角速度 $\omega_{\max} = \frac{\theta}{\Delta t}$, 为了便于测量,将转动位移转换为电压值,则 $\omega_{\max} = \frac{\Delta U_\theta}{\Delta t}$ 。

最大角加速度测量方法:系统输入端给 1° 阶跃,测量测速机输出曲线,计算最大角加速度 $\dot{\omega}_{\max} = \frac{V_\omega}{K_\omega \cdot \Delta t}$, 其中测速机灵敏度 $K_\omega = 30 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 。

4.2 实验结果

系统阶跃响应曲线如图 4 所示,根据曲线得出以下实验结果:

- (1) 随动系统精度 0.1° ;
- (2) 最大跟踪速度 $38.3 (^\circ)/\text{s}$;
- (3) 最大跟踪加速度 $23.5 (^\circ)/\text{s}^2$;
- (4) 过渡过程 1 s (1° 阶跃输入,振荡次数 < 2 次)。

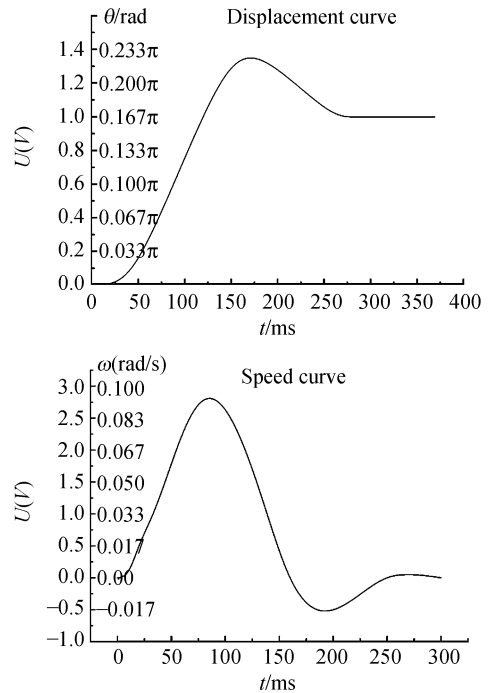


图 4 系统阶跃响应曲线

Fig. 4 Step response curve of system

5 结 论

本文设计了一个由测向天线、测向接收机、伺服转台、角度测量子系统及驱动子系统组成的跟踪测量系统。提出并分析系统动态传递函数,仿真动态曲线,计算动态参数。通过计算确定系统关键参数:最佳开关频率 $f_{OP,B} = 1400$ Hz,输出级晶体管关断延迟时间 $\delta = 2.25 \mu\text{s}$,电流脉动 $\Delta T_a = 0.1 I_{a,\max}$ 。

设计了实验检测方法,通过实验获得系统实际动态响应曲线,并得出以下结论:随动系统精度 0.1° ;最大跟踪速度 $38.3 (\circ)/\text{s}$;最大跟踪加速度 $23.5 (\circ)/\text{s}^2$;过渡过程 1s (1° 阶跃输入,振荡次数小于2次)。

实验结果表明系统性能优于设计要求,验证了方案设计及参数选择的正确性。

综上所述,合理地设计系统方案并选择关键参数对于系统性能的提高是有益的。

参考文献:

- [1] 秦继荣,沈安俊.现代直流伺服控制技术及其系统设计[M].北京:机械工业出版社,1999.
QIN J R, SHEN A J. *Modern DC Servo Control Technology and System Design* [M]. Beijing: Mechanics Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [2] 丁武,尹征琦,冯祖仁.高精度随动系统中的 PWM 驱动器[J].微电机,1993(2):17-21.
DING W, YIN ZH Q, FENG Z R. PWM driver of high precision in follow-up system[J]. *Micromotor*, 1993(2): 17-21. (in Chinese)
- [3] Switch-mode driver for DC motors. SGS-THOMSON microelectronics group of companies[Z].
- [4] 冯国楠.现代伺服系统的分析与设计[M].北京:机械工业出版社,1990.
FENG G N. *Analysis and Design of Modern Servo System* [M]. Beijing: Mechanics Industry Press, 1990. (in Chinese)
- [5] 杨树臣,刘建芳,杨志刚,等.外驱动双向推力型压电步进精密驱动器研究[J].光学精密工程,2006,14(4):652-657.
YANG SH CH, LIU J F, YANG ZH G, *et al.*. Study on outer driving precision PZT linear step actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 652-657. (in Chinese)
- [6] 张元生,徐国柱.转台速率波动自适应抑制方案的设计[J].光学精密工程,2005,13(1):81-87.
ZHANG Y SH, XU G ZH. Design of adaptive suppression plan for rate ripple of simulation test table [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 81-87. (in Chinese)

作者简介:肖影(1978—),女,吉林长春人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员,光学工程专业硕士研究生,主要研究方向为光电设备中的电子应用技术;E-mail:rainbowice@sina.com
金龙旭(1965—),男,吉林龙井人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,主要研究方向为空间仪器设备的智能化控制。