

文章编号: 2096-1618(2024)02-0131-07

基于双驱动模型的雷达伺服控制系统设计

谢静^{1,2}, 姚振东^{1,2}, 田丰豪³

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225; 3. 成都互波雷达科技有限公司, 四川 成都 610225)

摘要: 雷达伺服系统中天线转台需要较低的转速和较大的转矩, 因此使用齿轮传动系统, 但齿轮传动过程中齿隙的存在会降低伺服系统的性能。为满足雷达天线转台高性能的需求, 设计并制作了基于双驱动模型的雷达伺服控制系统。首先对整个双驱动系统的整体方案进行设计, 阐述双电机消除的原理, 并对硬件和软件进行设计。最终通过硬件平台的搭建测试, 双电机驱动伺服系统比单电机驱动伺服系统的性能有明显的提升。

关键词: 控制理论与控制工程; 伺服系统; 双电机消除; 偏置电流; 磁场定向控制

中图分类号: TV734.4

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.02.001

0 引言

伺服系统是雷达非常重要的部分, 作用是驱动天线在预定情况下运行。随着技术的发展, 对伺服系统性能的要求越来越高, 它的性能直接影响天线转台的稳定性与精度^[1]。天线转台依靠齿轮与电机相连, 由于齿轮做工的问题, 两个齿轮之间存在齿隙, 直接影响天线的性能, 造成伺服系统的不稳定。因此, 齿隙对伺服系统的影响最大^[2-3]。

目前抑制齿隙影响的方法主要是: (1) 增加齿轮加工精度, 这种方法对齿轮加工的要求很高, 成本会急剧增加。(2) 采用控制方式补偿齿隙, 即在闭环回路增加补偿控制器^[4-7], 可以降低成本, 但不能保证齿隙完全消除。(3) 使用双电机消除, 即对两个电机施加大小相等、方向相反的偏置力矩, 理论上能达到完全消除齿隙的影响^[8-10]。因此使用双电机消除能更好地解决齿隙带来的问题, 提高伺服系统精度。

上述研究都只是对双电机系统进行仿真分析, 并未在伺服系统中实际应用。对此, 本文对总体方案进行设计, 完成双电机系统的硬件设计, 并根据实际的功能需求, 完成双电机系统的软件开发, 最后完成系统的测试, 验证双电机消除的有效性。

1 总体方案设计

双电机驱动系统原理图见图 1, 两个电机分别连接

两个减速机再与天线的大齿轮相连, 驱动器侧完成三相电流的检测, 实现电流闭环; 电机旋转时编码器输出脉冲给控制器计算电机转子的位置及转速, 实现转速闭环; 旋转变压器输出的携带天线位置信息的电信号经过 RDC 解码成为携带天线位置信息的数字信号送入控制器进行计算, 实现位置闭环; 上位机直接通过 RS-485 串口与控制器相连, 实现指令的发送、驱动器参数的设置、电机运行状态的监测和天线位置角码的抓取。

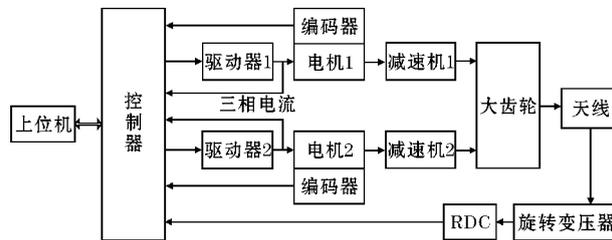


图 1 双电机驱动系统原理图

2 硬件方案设计

2.1 总体硬件方案设计

对双电机消除系统进行整体设计, 硬件主要是对控制电路、驱动电路和反馈电路进行设计。控制板的设计需要考虑控制器的性能、硬件资源等要素, 驱动板需要考虑电机功率需求、开关管开关速度及升级改造等要素。设计的整体系统框图见图 2。

模块主要由 1 片 DSP(TMS320F28377)、栅极驱动芯片(2EDF7275K)、IGBT(IGB20N65S5)组成的三相全桥电路、RDC(AD2S1210)解码电路和编码器接口电路组成。

收稿日期: 2023-03-31

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(42075001); 国家自然科学基金资助项目(U2142210); 中国气象局大气探测重点开放实验室资助项目(U2021Z02)

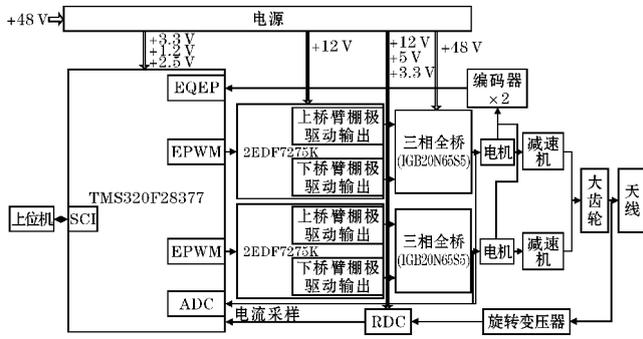


图2 整体系统框图

2.2 控制部分设计

控制芯片选用TI公司生产的TMS320F28377,主频可达200 MHz,有大量的外设接口;SPI、SCI、EPWM、EQEP(增强型正交编码器脉冲)、16位和14位可调的ADC通道等,满足上位机接口、编码器接口、电流采样

表1 IGBT参数表

开关频率/kHz	V_{CE}/V	$I_C(25^\circ \sim 100^\circ)/A$	Q_C/nC	$t_d(\text{on})/ns$	t_r/ns	$t_d(\text{off})/ns$	t_f/ns
2~20	650	40~28	48	13	14	115	22

IGBT的死区时间为

$$t_{DTC} = t_{d(\text{on})} + t_r + t_{d(\text{off})} + t_f = 164 \text{ ns}$$

IGBT栅极开通电流为

$$I_{\text{通}} \approx \frac{Q_C}{t_r} = \frac{48}{14} = 3.43 \text{ A}$$

IGBT栅极关断电流为

$$I_{\text{断}} \approx \frac{Q_C}{t_f} = \frac{48}{22} = 2.18 \text{ A}$$

由于控制器输出的控制信号不足以驱动IGBT,因此需要添加栅极驱动器来驱动IGBT,设计选用英飞凌公司生产的2EDF7275K,它是一款带隔离的半桥栅极

表2 旋转变压器参数

变压比	激励电压/V	频率/kHz	电气误差	零位电压/mV	相位移/($^\circ$)
1±10%	7	5	±6', ±4'	≤30	11±3

因为DSP收取的是数字信号,旋转变压器输出的是模拟信号,因此还需添加RDC解码电路,选用ADI公司生产的AD2S1210,它有10位和16位两种模式可调,10位模式下最大跟踪速率为3125 rps(分辨率21弧分),16位模式下最大跟踪速率为156.25 rps(分辨率19弧分),它的功能是给旋转变压器提供一个励磁信号,并且获取所产生的正余弦信号,再通过解码将角位置信息送给DSP处理。

2.4.2 电机转子速度及位置检测

电机转子速度和位置检测使用的是与电机配套的

接口、RDC接口等功能需求。

2.3 驱动部分设计

电机选用的是鸣志公司生产的SM0803GSL-KCY-NNV(无刷直流电机),额定电压48 V,额定功率750 W,额定电流18.8 A,峰值电流56.7 A。

无刷直流电机需要使用三相全桥电路进行驱动,对比三极管和MOS管,IGBT具有更高的电压和电流处理能力、驱动功率低、导通电阻小等优势,因此设计使用IGBT作为三相全桥电路的功率开关管。

IGBT的通断时间之和为IGBT的死区时间,如果死区时间设置不合理会引起全桥电路上下桥臂同时导通,导致电路短路,极大的电流容易烧毁芯片及电机,因此需要控制好死区时间,选取IGBT的通断时间应尽量短。综合考虑,IGBT选用英飞凌公司生产的IGB20N65S5,其参数见表1。

驱动芯片,拉/灌电流为4 A/8 A,满足IGBT驱动电流为3.43 A的要求;并且它可以通过外部接下拉电阻来进行死区时间的控制,可编程的死区时间为15~350 ns,由于驱动器的传输延时为37 ns,因此整个驱动电路的死区时间为201 ns,满足设计要求。

2.4 反馈部分设计

2.4.1 位置检测

旋转变压器拥有耐冲击、高可靠、长寿命和高精度等优点,非常适用于天线的位置检测。设计使用的型号为RE-21-1-A01,其参数见表2。

光电编码器,编码器输出5 V的差分信号,DSP的EQEP模块接收的是3.3 V的单端信号,因此需要添加差分转单端,且将信号幅值改为3.3 V的电路,设计采用的是TI公司生产的AM26LV32将编码器信号送给DSP处理。

2.4.3 三相电流检测

由于电机的额定电流为18.8 A,在同时考虑电流大小与精度的情况下,以电流幅值为±30 A进行设计,因此设计使用2 mΩ的采样电阻将采得的电压经过电流感应放大器(INA240A1)放大在送入DSP进行处

理。INA240A1 的放大倍数为 20 倍,使用 1.25 V 的基准电压,在 ±30 A 的情况下,输出的电压在 0.05 ~ 2.45 V,DSP 的 ADC 使用 2.5 V 的参考电压,满足设计需求。

3 主要软件方案设计

双电机系统的主要软件是对磁场定向控制(FOC)程序和双电机消除程序设计,最终输出电流信号来控制两个电机。

3.1 磁场定向控制算法

磁场定向控制理论在 20 世纪 70 年代由西门子工程师提出^[11],是无刷直流电机和永磁同步电机最好的控制方法之一,它通过精确地控制磁场的大小和方向,让电机运动转矩平稳、噪声小、效率高,并且有高速的动态响应^[12]。

磁场定向控制的流程见图 3,整个流程是对三相电流进行采样得到 I_a, I_b, I_c ,再经过 Clarke 变换得到 I_α, I_β ,再经过 Park 变换得到 I_q, I_d ,再计算与设定值 I_{q_ref} 和 I_{d_ref} 的误差,送入 PI 控制器得到 U_α, U_β ,再送入 SVPWM 模块进行调制,最终输出该时刻 3 个半桥的状态编码值。

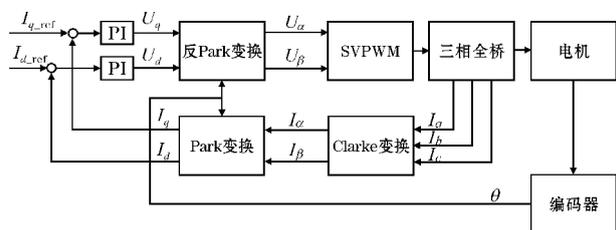


图 3 磁场定向控制的流程图

因此,经过设计电机磁场定向控制算法流程图见图 4。

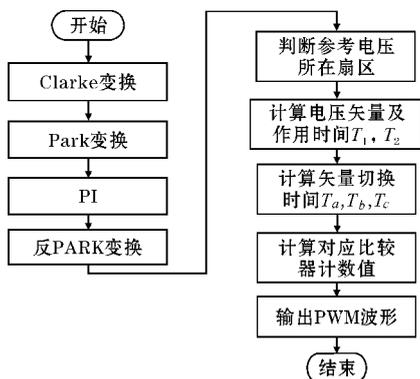


图 4 磁场定向控制算法流程图

3.2 双电机消除算法

双电机消除的原理是 2 个小齿轮反向啮合大齿

轮,使大齿轮不会在齿隙间摆动。常用的双电机消除方法有 3 种:定向偏置力矩消除^[13],常值偏置力矩消除^[14],变偏置力矩消除^[15]。

定向偏置力矩消除是主电机做正向驱动时,副电机始终存在一个反向力矩,使 2 个小齿轮随时啮合大齿轮,这种方法的弊端是所需电机的功率会大于实际需求的功率。

常值偏置力矩消除是 2 个电机在同时、同向获得相等的正向驱动力矩的基础上,始终给 2 个电机施加一个大小相等、方向相反的偏置力矩,由于这种方法使 2 个电机的输出力矩一直有差异,会让 2 部电机速度存在差异,影响同步性能。

变偏置力矩消除是在常值偏置力矩消除的基础上设计一个随着控制信号变化而变化的偏置力矩。因为电机力矩正比于电流,所以对偏置力矩的设计在控制系统中是对偏置电流的设计,本次设计电机的控制信号从天线的实际角度与期望角度的判断(即位置误差)中得到,变偏置电流设计见图 5,其过程是在位置误差为零时,给两部电机施加一个大小为、方向相反的偏置电流,随着位置误差到达一定值($-e_0, e_0$)时,偏置电流开始减小直到零。

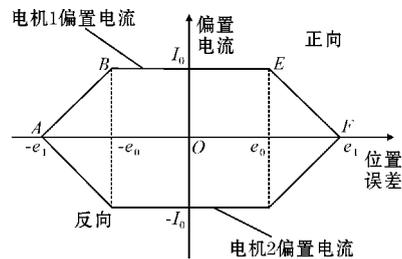


图 5 变偏置电流曲线

由图 5 可得偏置电流大小 $I_{偏}$ 与位置误差 e 的关系为

$$I_{偏} = \begin{cases} I_0 & |e| \leq e_0 \\ I_0 - \frac{I_0}{e_1 - e_0}(e - e_0) & e_0 < |e| < e_1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

可得偏置电流曲线由 $I_{偏} = K_1 |e| + C$ 加上限幅构成,即:

$$I_{偏} = \text{sat}_1(K_1 |e| + C)$$

式中 $K_1 = \frac{I_0}{e_0 - e_1}, c = \frac{I_0 e_1}{e_1 - e_0}$ 。

电机的控制电流与位置误差近似呈线性变化,且电机的控制电流有一定的阈值,因此电机的控制电流 $I_{控}$ 可以看作由 $I_{控} = K_2 e$ 加上限幅构成,即:

$$I_{控} = \text{sat}_2(K_2 e)$$

因此 2 个电机的合电流 I_1, I_2 为

$$I_1 = I_{\text{控}} + I_{\text{偏}} = \text{sat}_2(K_2 e) + \text{sat}_1(K_1 |e| + C)$$

$$I_2 = I_{\text{控}} - I_{\text{偏}} = \text{sat}_2(K_2 e) - \text{sat}_1(K_1 |e| + C)$$

由于电机的力矩与电流成正比关系,可以得出变偏置消除示意图见图6。

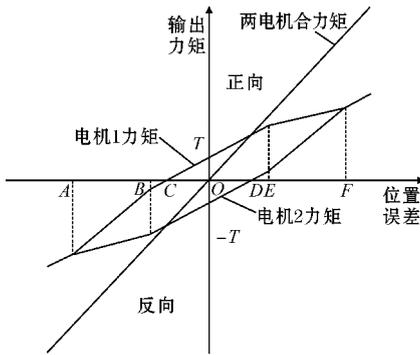


图6 变偏置消除示意图

以图6正向运动为例分析其运动过程,在位置误差为零时,给2部电机施加一个大小相等、方向相反的偏置力矩,使2个小齿轮反向啮合大齿轮,随着位置误差的增加,2部电机的控制力矩同时同向增大,位置误差到达一定值后偏置力矩开始下降,反向电机的齿轮慢慢越过齿隙与正向电机同向啮合大齿轮,最终偏置力矩降为零,2部电机同向驱动负载,这种方法在降低齿隙影响的基础上也提高了驱动能力,更适合工程实用。

经过分析,设计使用变偏置力矩消除,偏置电流的算法流程图见图7。

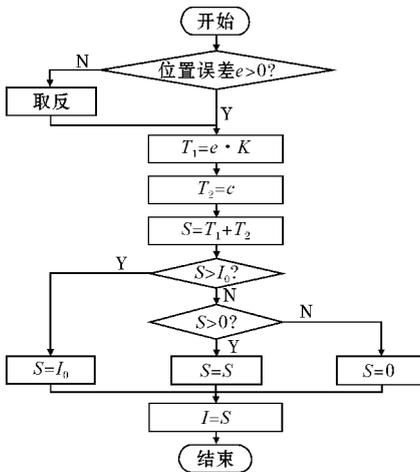


图7 偏置电流算法流程图

4 实验测试

4.1 指标体系

文献[16]指出啮合刚度、摩擦力、齿隙对伺服系

统的性能有主要的影响,并提出这些影响因素与传动误差的数学关系为

$$\ddot{e} + \frac{c}{m}\dot{e} + \frac{k}{m}g_n = \frac{r_1}{J_1}T_1 + \frac{r_2}{J_2}T_2 + \frac{f}{m} \quad (1)$$

其中 \ddot{e} 、 \dot{e} 为传动误差的角加速度和角速度, c 为反电势系数, k 为啮合刚度, f 为摩擦力, g_n 为法向齿侧间隙宽度, r_1 、 r_2 为大小齿轮的分度圆半径, J_1 、 J_2 为大小齿轮的转动惯量, T_1 、 T_2 为大小齿轮的转矩, $m = J_1 J_2 / (r_1^2 J_1 + r_2^2 J_2)$ 。

本次伺服系统各参数见表3。

表3 伺服系统参数表

$c/(V/K)$	$k/(N \cdot m/rad)$	f/N	g_n/m	r_1/m
1.2	100	0.03	0.46×10^{-3}	0.1
r_2/m	$J_1/kgcm^2$	$J_2/kgcm^2$	T_1/Nm	T_2/Nm
0.3	0.97	0.97×10^4	2.4	240

设计测量速度稳定时的速度误差,角加速度几乎为零,即 $\ddot{e} = 0$,再将系统参数带入式(1)可以得到由于啮合刚度、摩擦力、齿隙带来的误差角速度大小 $\dot{e} \approx 0.21^\circ/s$,系统其他因素及控制方式也可能会带来 $0.1 \sim 0.2^\circ/s$ 左右的速度误差。

单电机系统中天线在到达指定位置时,电机就会立马停止并输出反向力矩,但是天线由于惯性的作用会继续向前运行一段距离,因为伺服系统是一个闭环系统,电机就会将天线反向拉回,这样就会导致天线产生锥摆。因为选取的电机功率足够大,天线只会在旋转角侧隙之间摆动。齿轮传动系统中,圆周侧隙的计算公式为

$$g_t = \frac{g_n}{\cos \alpha_n \cos \beta}$$

其中 α_n 为法向压力角, β 为螺旋角。变量都是通过安装时的设定值, $\alpha_n = 20^\circ$ 、 $\beta = 20^\circ$,旋转角侧隙 g_θ 的计算公式为:

$$g_\theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{g_t^2}{2r_2^2} \right) \quad (2)$$

将变量的值带入式(2)计算得到旋转角侧隙 $g_\theta \approx 0.11^\circ$ 。

因此单电机系统中,天线的摆动范围在 $\pm 0.11^\circ$ 左右,由于实际系统其他因素的影响,摆动范围可能会略微增加。在双电机系统中,在快到达指定位置时,会给2部电机施加一个偏置力矩,这样会使反向电机的齿轮提前反向啮合大齿轮,从而使天线在到达指定位置时迅速停止转动,几乎不会发生锥摆现象。

4.2 测试结果及分析

双电机驱动伺服结构见图8。

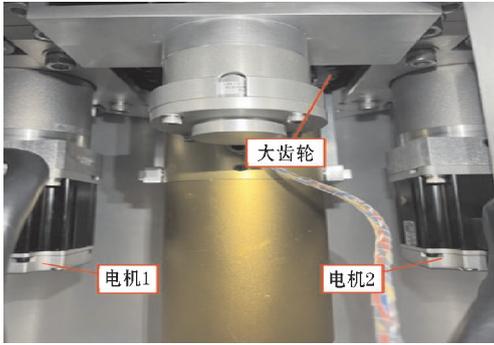
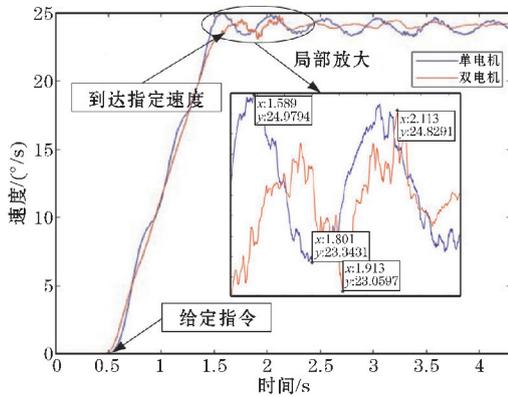


图 8 双电机伺服结构

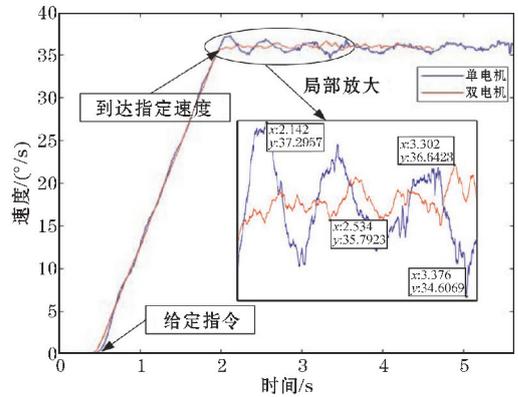
用上位机给控制器下发指令,通过RS-485总线抓

取实时角码信息。并将抓取到的角码信息使用 Matlab 计算并绘制出相应图形,为了验证双电机系统的优越性,本次设计对天线到达指定速度和天线受外力作用两种情况下进行了实验测试。

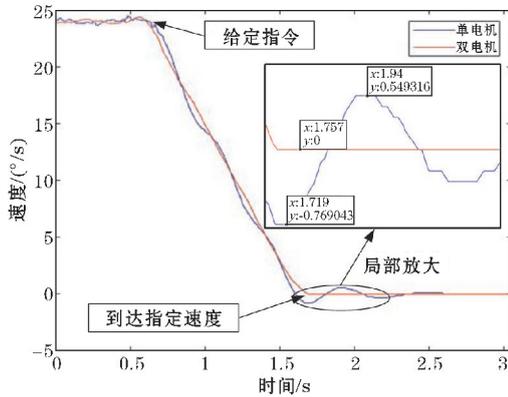
(1)天线能否快速稳定的到达指定速度是伺服系统一项非常重要的指标,由于齿隙的影响天线在到达指定速度时,天线的速度会在指定速度附近不停地跳变。为测试双电机系统能否解决这一问题,本次实验对单电机系统和双电机系统在正负加速度为 $24^\circ/s^2$ 和 $36^\circ/s^2$ 的条件下进行了测试,其中正负加速度为 $24^\circ/s^2$ 的结果见图 9,正负加速度为 $36^\circ/s^2$ 的结果见图 10。



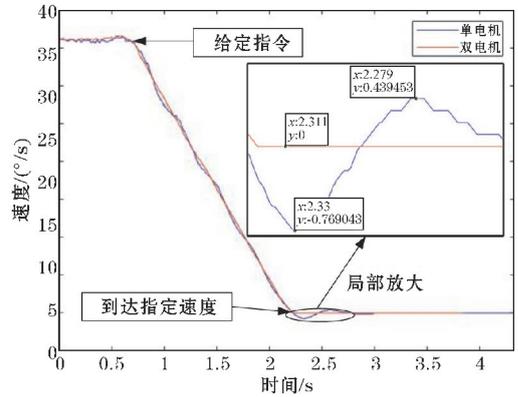
(a)加速度 $24^\circ/s^2$,加速到 $24^\circ/s$



(b)加速度 $24^\circ/s^2$,加速到 $36^\circ/s$

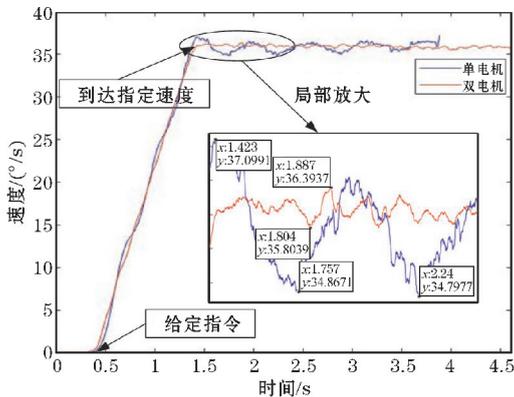


(c)负加速度 $24^\circ/s^2$, $24^\circ/s$ 负加速到 $0^\circ/s$

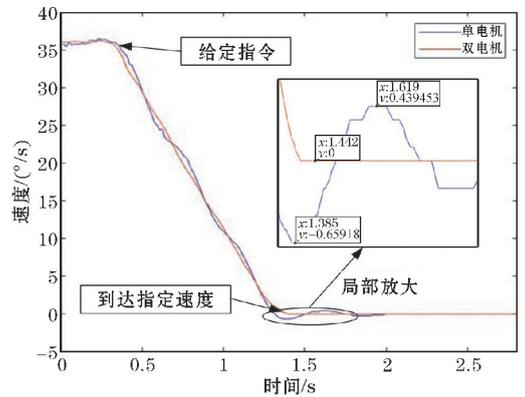


(d)负加速度 $24^\circ/s^2$, $36^\circ/s$ 负加速到 $0^\circ/s$

图 9 正负加速度测试结果图



(a)加速度 $36^\circ/s^2$,加速到 $36^\circ/s$



(b)负加速度 $36^\circ/s^2$, $36^\circ/s$ 负加速到 $0^\circ/s$

图 10 正负加速度测试结果图

将图9和图10的速度信息经过计算得到单电机系统到达指定速度后的均方根误差在 $0.38^\circ/\text{s}$ 左右,系统在运行过程也不够稳定,并且在到达指定速度时会出现过冲与抖振的现象;双电机系统到达指定速度后的均方根误差在 $0.17^\circ/\text{s}$ 左右,系统运行平滑,且能快速到达指定速度,不会发生过冲和抖振的现象,通过本次系统设计,能够将系统的速度误差降低到由于啮合刚度、摩擦力、齿隙带来的理论速度误差之下,并且在较高的加速度下,双电机伺服系统的速度误差也满足指标要求。

(2)天线的定位能力也是伺服系统非常重要的指标,由于齿隙的影响,会增大天线的定位性能。为了测试双电机系统能否解决此问题,分别对单电机系统和双电机系统的定位能力进行了测试;并且在零速时给定一个大小 49 Nm 来回摆动的外力。单电机系统受外力影响测试结果见图11,双电机系统受外力影响测试结果见图12。

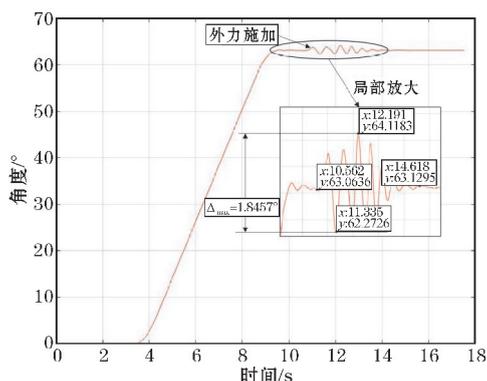


图11 单电机系统受外力影响测试结果图

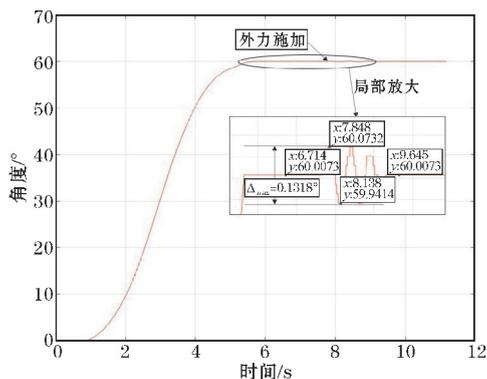


图12 双电机系统受外力影响测试结果图

由图11和图12可以看出单电机系统在到达指定位置时会出现过冲现象,系统一直在 $\pm 0.2^\circ$ 左右来回摆动,说明实际测量结果与理论分析一致,并且系统在受到外力影响时位置误差为 0.9° 左右。双电机系统由于偏置力矩的作用,能够迅速直接到达指定位置,不发生摆动,说明双电机系统的实际测量结果与理论分

析一致,并且系统在受到相同外力影响时位置误差仅为 0.07° 左右。

通过对上述结果的分析,设计的双电机伺服系统满足设计指标要求,说明双电机伺服系统在抑制齿隙的负面影响有显著的效果,在实际使用中能够显著提升伺服系统的性能。

5 结束语

本文对整个双驱系统进行设计,控制器使用DSP,在此基础上实现硬件电路及软件的设计与制作。最后通过系统测试,验证了此方案的可行性,解决了齿隙对伺服系统的影响,在工程上有很强的实用性。

参考文献:

- [1] 杨文清. 双电机消隙伺服系统的研究与应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.
- [2] 杨艳辉,陈松波. 某武器随动系统双电机消隙设计[J]. 兵工自动化,2021,40(7):13-16.
- [3] 袁新星. 多电机同步联动消隙伺服系统动力学建模与控制研究[D]. 南京:南京理工大学,2014.
- [4] Su S Y, Stepanenko Y, Svoboda J, et al. Robust Adaptive Control of a Class of Nonlinear Systems with Unknown Backlash-like Hysteresis[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(12): 2427-2432.
- [5] Menon K, Krishnamurthy K. Control of Low Velocity Friction and Gear Backlash in a Machine Tool Feed Drive System[J]. Mechatronics (Oxford), 1999, 9(1): 33-52.
- [6] Zarei M, Arvan M, Vali A, et al. Back-stepping Sliding Mode Control of One Degree of Freedom Flight Motion Table[J]. Asian Journal of Control, 2020, 22(4): 1700-1713.
- [7] Sun G, Zhao J, Chen Q. Observer-based Compensation Control of Servo Systems with Backlash[J]. Asian Journal of Control, 2021, 23(1): 499-512.
- [8] 王轩,张翔,刘艳行. 双电机消隙技术在武器伺服系统中的应用[J]. 火控雷达技术, 2020, 49(1): 78-83.
- [9] 胡晓璐. 双电机驱动系统消隙技术研究与应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
- [10] Zeeshan H, Fanhad H. Design, Control and Implementation of 2-DOF Motion Tracking Platform

- using Drive-Anti Drive Mechanism for Compensation of Backlash[C]. Proceedings of IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments, Ottawa, Canada, 2007.
- [11] Blaschke F. A new method for the structural decoupling of A. C. induction machines[A]. Conf. Rec. IFAC[C]. Duesseldorf, Germany, 1971;1-15.
- [12] 刘伟. 永磁同步电机 FOC 算法研究及控制器设计[D]. 石家庄:河北科技大学, 2020.
- [13] 周东. 数控转台双电机消隙驱动系统的研究与设计[D]. 长沙:湖南大学, 2013.
- [14] 黄磊. 基于双电机驱动系统的间隙消除技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.
- [15] 李莉. 双电机驱动伺服系统消隙及同步控制方法[D]. 天津:天津工业大学, 2017.
- [16] 刁玫胜. 机械结构因素对雷达伺服系统(齿轮传动)性能影响研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.

Design of a Radar Servo Control System based on a Dual-Drive Model

XIE Jing^{1,2}, YAO Zhendong^{1,2}, TIAN Fenghao³

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information, Chengdu 610225 China; 2. CMA key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu 610225, China; 3. Genera Best Observation, Chengdu 610225, China)

Abstract: In a radar servo system, the antenna turntable requires low speed and large torque, so it needs to use a gear transmission system, but there will be a backlash in the process of gear transmission, which will also reduce the performance of the servo system. To meet the high-performance requirements of radar antenna turntables, a radar servo control system based on a dual drive model is designed and implemented. Firstly, the whole scheme of the dual drive system is designed, and the principle of dual motor backlash elimination is described. Hardware and software components are then developed accordingly. Finally, through the establishment of the hardware platform, the performance of the dual motor driven servo system is significantly improved compared to that of the single motor driven servo system.

Keywords: control theory and engineering; servo system; dual-motor backlash elimination; bias current; field oriented control