

超低速、高可靠空间二维转台伺服控制系统设计*

冯汝鹏^{1,2} 何鉴伦³ 朴永杰^{1,2} 谢晓光^{1,2} 徐 伟^{1,2}

(1.中国科学院 天基动态快速光学成像技术重点实验室 长春 130033; 2.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 3.重庆大学 重庆 401331)

摘 要: 为了实现空间二维转台在轨高可靠性和低成本的应用,同时具有低速平稳运动、高精度跟踪和 360°全范围连续工作能力,建立了以 FPGA 芯片为核心的步进电机矢量控制系统,通过电流正弦细分表的 PWM 斩波调节实现步进电机的 128 细分精准控制,以 21 位光电编码器作为位置反馈,谐波减速器作为传动机构,实现了二维转台的开环控制、速度实时调整跟踪控制、最优路径规划控制和运动超时保护等功能,并对场效应管开关时间对斩波频率和最大细分数的影响进行了分析。实验结果表明,四轴的跟踪精度 3σ 下优于 0.005° ,速度稳定性小于 5%,伺服控制带宽大于 4 Hz,具有连续过零能力。该控制系统可以简化硬件设计、增加软件适用性,适用于超低速运动,满足二维转台对伺服控制系统的指标要求。

关键词: 二维转台;步进电机;矢量控制;128 细分;伺服控制

中图分类号: TP394.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3040

Design of servo control system for ultra low speed and high reliability
space two dimensional turntableFeng Rupeng^{1,2} He Jianlun³ Piao Yongjie^{1,2} Xie Xiaoguang^{1,2} Xu Wei^{1,2}

(1.Key Laboratory of Space-Based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 3.Chongqing University, Chongqing 401331, China)

Abstract: In order to realize the high reliability and low-cost application of the space two-dimensional turntable in orbit, as well as the ability of low-speed smooth motion, high-precision tracking and 360° full range continuous operation, a vector control system of stepper motor based on FPGA chip is established. The 128 subdivision precision control of stepping motor is realized by PWM chopping adjustment of current sine table. A 21 bit photoelectric encoder used as position feedback and a harmonic reducer used as mechanism drive to realize open-loop control, real-time speed adjustment and tracking control, optimal path planning control and motion timeout protection. The influence of MOSFET on chopping frequency and maximum subdivision is analyzed. The experimental results show that the tracking accuracy of the two axes is better than 0.005° at 3σ , the speed stability is less than 5%, and the servo control bandwidth is more than 4 Hz, and it has the ability of continuous zero crossing. The control system can simplify the hardware design, increase the applicability of software, more suitable for ultra-low speed motion, and meet the requirements of two-dimensional turntable for servo control system.

Keywords: two dimensional turntable; stepping motor; vector control; 128 subdivision; servo control

0 引 言

随着空间伺服控制系统的广泛运用,空间激光通信扫描摆镜和天线跟踪等高精密机构对于伺服系统的要求越来越高,其速度稳定性、跟踪精度、指向精度、驱动能力和可靠

性直接制约着伺服系统设计的好坏。基于无刷电机和永磁同步电机的伺服控制系统由于其有转动平滑、响应迅速、过载力矩大、瞬间启停等优点非常适合于空间伺服系统的应用,但是其控制系统复杂、缺少自锁能力也使其受到很大限制^[1-3]。蜗轮蜗杆加步进电机的方法在轨连续运动使用寿

收稿日期:2020-12-09

* 基金项目:国家自然科学基金(51705497)、吉林省重点科技研发计划(20190303094SF)项目资助

命很难评估^[4]。伴随着混合式步进电机伺服系统的不断完善与发展,高细分的驱动技术可以有效地改善易失步、低频颤振和启动力矩小等不足,加上具有零电流自锁能力,因此步进电机可以满足二维转台的在轨应用需求^[5-6]。

理想的细分电流应该为光滑的正弦波曲线,理论上其细分分数越多越逼近理想波形,但在实际分析中当细分分数到达 128 时,电流曲线基本已经近似正弦曲线^[7]。传统的细分方法是利用高精度 DA 器件或者 AD 器件采集电流,然后通过给定的细分值比较产生相应的 PWM 波,达到电流的细分功能,虽然可以抑制反电动势对绕组电流的影响,在高速下具有很好的电流跟踪能力,但是由于采集噪声、控制稳定性等因素影响,导致细分波形失真、过零阶跃,电机出现轻微震动。对于采用 DSP 或者单片机的控制系统,由于频繁进出定时器也会导致系统实时性下降,尤其在多轴联动实时调整时,对各轴同步运动精度影响较大^[8-9]。

本文针对二维转台的需求分析和低速下反电动势的影响,提出了电流正弦细分表的 PWM 斩波控制方法,利用 FPGA 强大的并行处理和逻辑控制能力,基于步进电机的矢量控制产生 128 细分下不同占空比输出波形,通过 21 位光电编码器位置反馈和减速比为 1:100 的谐波减速器实现二维转台的伺服控制系统^[10-11]。该系统具有实时速度调整跟踪、最小路径运动规划和四轴联动等功能。整体设计复杂度低、稳定性好、可靠性高,非常适用于空间低速下伺服控制。

1 系统分析

1.1 系统组成

如图 1 所示,空间二维转台是一个复杂的综合体,需要机械、电子、反馈系统和控制算法相互配合。该系统主要由双绕组步进电机、双处理电路光电编码器、谐波减速器和伺服控制器等组成。结构上采用高精度轴系和碳纤维支撑框架,力求满足结构轻量化和稳定性,重量 < 3 kg,一阶基频应 > 100 Hz。

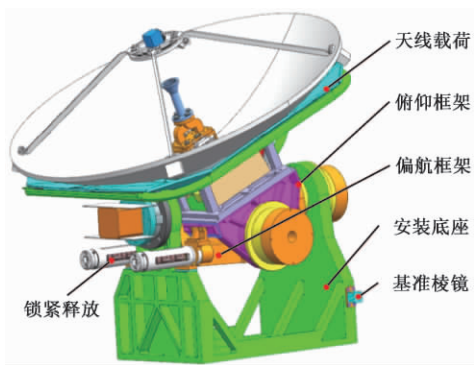


图 1 空间二维转台结构

1.2 混合式步进电机

两相混合式步进电机是由定子部分、转子部分和机壳

构成。通过线圈电流不断改变定子磁场运动,在不采用电流矢量合成情况下,电机实际每转动一个步距角 1.8° 都相当于一个微小的阶跃,达到一定速度时阶跃变得越不明显^[12]。同时步进电机有具备自锁能力,定制的步进电机定位转矩可以做到保持转矩的 1/10,加上谐波减速器力矩可以放大到 100 倍以上,有效解决空间产品发射段和在轨断电保持定位等问题。

J35BYG250 双绕组步进电机额定电压 15 V,有效电流 1 A,负载转矩大于 40 mNm (50 r/min),定位转矩大于 4 mNm,重量 220 g。

1.3 谐波减速器

二维转台天线跟踪补偿速度为 $0.05^\circ/\text{s} \sim 0.15^\circ/\text{s}$,利用谐波减速器对步进电机减速后驱动天线负载。考虑到负载力矩要求大于 1.2 Nm 和指向精度不大于 0.05° ,力矩安全系数取 3。综合考虑电机的矩频特性和转动工况,采用北京中技克美公司生产的 XBS 系列谐波减速器,减速比 $i=100$,额定输出扭矩 5 Nm。

1.4 反电动势分析

步进电机反电动势是影响电机高速转动动力矩下降、转动颤动和细分电流衰减难以逼近正弦运动的主要原因,采用 PWM 斩波方式虽然不能弥补电机反电动势对电流的影响,但是如果忽略定转子的漏磁、磁滞、涡流、定子线圈自感谐波分量及库伦摩擦等因素的影响,考虑到低速运动反电动势非常微弱,正弦电流的精确控制可以确保电机运动的更加平稳,步进电机单相绕组的单相等效电路如图 2 所示。

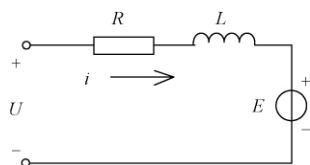


图 2 步进电机的单相等效电路

从图 2 可以知道电机的电压 U_a 和反电动势 E_a 的方程式为:

$$U_a = R_a i_a(t) + L \frac{di_a}{dt} - E_a \quad (1)$$

$$E_a = \phi_m P \omega \sin \theta \quad (2)$$

式中: i_a 、 U_a 分别表示 a 相电流和电压; R_a 是 A 相绕线电阻; E_a 是 A 相反电动势; ϕ_m 为转子永磁体磁通量或者称为电机绕组最大磁链值; L 是每相的电感; θ 为电机的电角度,单位 rad; ω 为电机的角速度,单位 rad/s; P 为电机极对数。

本文只关注绕组中反电动势对电流的影响, E_a 会影响绕组电流,在低速运动中 ($\omega < 0.35 \text{ rad/s}$),切割磁场 ϕ_m 基本为 0,从而推算反电动势值趋于 0。可以得知,对于步进电机的电压选择越高,其高速转动时反电动势影响越小,在低速运动时反电动势对于 PWM 斩波产生的正余弦电流

影响基本可以忽略。

1.5 PWM 斩波原理

在不考虑反电动势的影响下,电机绕组可以等效为阻性负载,由 $I_a = U_a / R_a$ 和矢量控制合成算法可知 128 细分电流实际就是产生 128 档阶梯的电压,对于数字开关电路而言,PWM 斩波是控制电压的最有效方式,占空比的精度直接影响到每档电压的精度。

若伺服电机供电电压 15 V,转动下力矩需要电机有效电流 1 A,如果对 15 Ω 绕组的电机进行 128 细分,PWM 占空比可以从 0%~100%线性增加,如果选用电阻值为 5 Ω ,则 PWM 占空比只能从 0%~33%线性增加。若 FPGA 晶振为 40 MHz,PWM 斩波频率为 20 kHz,15 Ω 下可用于调整电流占空比的 CLK 时钟数为 2 000 个,2 000 个 CLK 要完成 128 细分台阶,最小需要 16 个 CLK,即 400 ns。驱动器要求最小输入脉冲宽度为 1 μ s,前 2 个细分阶梯已经失真。如果采用 5 Ω 绕组则最小需要 5 个 CLK,即 125 ns,前 8 个细分阶梯将失真,所以对于高细分电机的选型也将影响到控制的精度^[13]。

同时步进电机为开环电机,在 128 细分下理论步距角为 1.8°/128,其转动速度的大小完全取决于细分阶梯的保持时长,实际就是对不同占空比的 2 000 个 CLK 的组数输出,很明显速度越快其每个阶梯可以调节的时间越短,每个细分阶梯输出 PWM 也就越少,降低控制频率会导致电流毛刺突起,细分电流不均匀,因此控制频率也是根据经验的一个综合参考值,如图 3 所示。

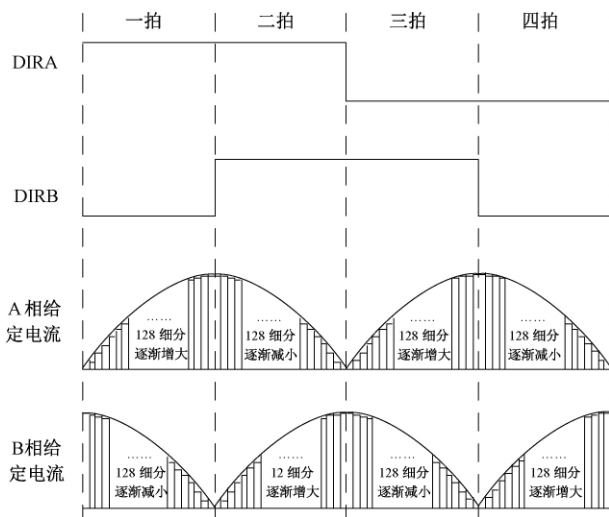


图3 步进电机 128 细分时序图

1.6 运动控制

如图 4 所示,利用 FPGA 可以同时完成四组天线机构的跟踪,各控制之间相互独立运行。FPGA 根据运行距离和剩余运行时间调整电机速度,系统中设计 10 ms 更新一次速度值,确保电机丢步和机构不稳定性对跟踪精度的影响^[14]。

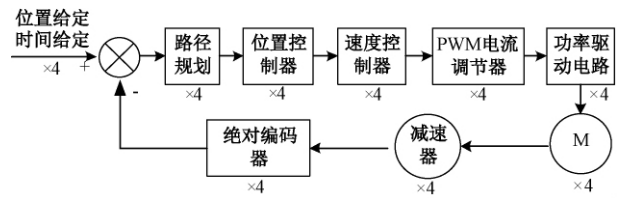


图4 运动控制流程

二维转台要求为 360°全向运动,为满足机动时间最优,采用最小路径规划原则。如果旋转角度 $\theta > 180^\circ$,旋转方向取反,要求机构具备过零能力,同时编码器绝对零位漂移误差 $< 0.001^\circ$ 。

为了防止各轴系统跑飞,均设计运动超时保护功能,指定时间内如果没有运动到预期位置,50 ms 后进入超时保护状态,停止当前运动并进入加电停止状态,直到接收到新的控制指令。

2 电子学设计

2.1 硬件设计

硬件设计为主备冷备份设计,采用隔离电源+FPGA+驱动器的设计方案^[15],处理器为主备冷备份设计,最大可以支持四路伺服机构闭环控制。电源输入端由过流保护、浪涌抑制、EMI 滤波和 Interpoint 公司隔离电源转换等模块组成;FPGA 选用 Microsemi 公司 SmartFusion2 系列产品 M2S090TS-FGG484 M,该 FPGA 基于 Flash 架构,具有单粒子免疫特性;驱动器选用 TI 公司专用 H 桥驱动器 LMD18200-QML,在轨广泛应用,单芯片可以驱动一套步进电机正常工作,同时具有温度检测功能;与外部接口通信为 RS422 双工接口,选用 TI 公司收发独立芯片 DS26LV31 W-QML 和 DS26LV32AW-QML。电子学硬件实物如图 5 所示。

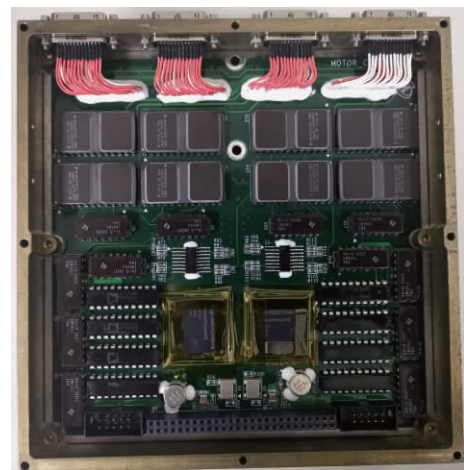


图5 硬件实物

2.2 软件设计

本文设计的核心是利用 FPGA 实现步进电机的 128

细分调节功能,采用硬件语言 Verilog HDL 实现。FPGA 程序主要由 PWM 调节模块、正弦余弦查找表、速度调节器、速度计算器、时钟管理模块、编码器回采模块、指令处理模块等组成,软件流程如图 6 所示。

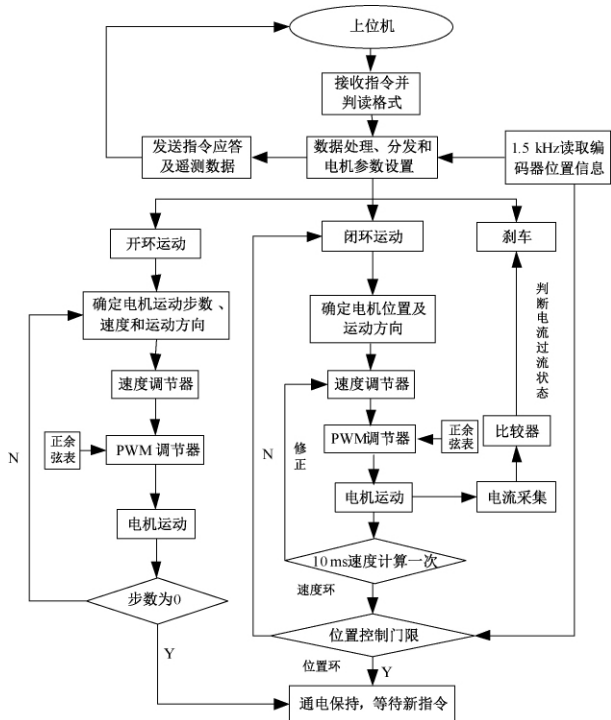


图 6 软件流程

其中,PWM 调节模块、正弦余弦表、速度调节器、速度计算器和编码回采模块共同构成伺服控制单元,如图 7 所示。输入接口参数为误差门限、控制周期、限速门限、运动范围门限;输入变量为时钟信号、复位信号、驱动输出使能、电流调节参数、细分数、信号输出使能、紧急刹车、控制类型、运动路径选择、目标位置、运动细分步数、运动速度;输出信号为运动状态、位置有效标志、位置反馈信息、总运动步数、A 相和 B 相运动方向、A 相和 B 相驱动脉冲。

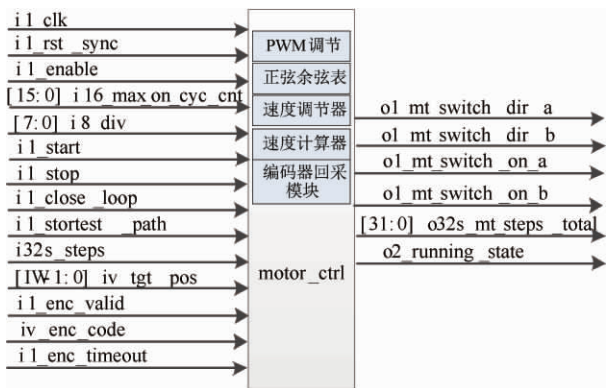


图 7 伺服控制单元信号流图

伺服控制单元作为顶层处理核心,决定本次运动的模式选择。其中,开环运动指令内容为速度与开环运动步数,闭环运动中指令内容为速度与位置。闭环运动中当速度参数为 0x000000 时表示执行自动速度计算,当速度参数为其他参数时为实际给定速度值。

PWM 调节模块用于产生不同占空比的脉冲信号从而控制驱动器的开关时间,控制频率为 20 kHz,占空比变量 iv_on_cyc_cnt 为速度调节器中输出高电平时钟个数,实际表示 A 相或 B 相绕组导通时长,其中, $0 \leq iv_on_cyc_cnt \leq 2\ 000$ 。

速度调节器用于步进电机的速度调整,指令处理模块将运动速度转换为定时器填充数 i32_step_period_cyc,速度调节器根据填充数定时产生一个到时标志信号 w1_timer_tick,表示上一个细分阶梯结束,运动步数 i32_s_steps 减 1,正弦余弦地址 r9_step_pos 加 1,正弦余弦表产生下一个阶梯的 PWM 占空比信号 i32_step_period_cyc 和电流方向控制信号,其中:定时器填充数=晶振频率×步距角/细分数/减速比/角速度(取整)。

伺服控制单元以 10 ms 周期将当前编码器位置、目标信息和剩余运动时间传递给速度计算器,利用 FPGA 内部除法器实时计算运动速度,并立刻更新到速度调节器填充数 i32_step_period_cyc,调整细分阶梯转换时间,传递到除法器中两个整型参数为距离差值[35:0]r36_dividend 和剩余时间[35:0]rv_d。其中,更新填充数=晶振频率×剩余时间×步距角/细分数/减速比/360×(2÷编码器分辨)/目标差值码值。

时钟管理模块通过 PLL 锁相环将 20 MHz 主频倍频到 40 MHz,负责系统的时间基准和超时判断功能,对编码器 2 ms 内未收到有效位数据输出超时状态标志,对闭环跟踪 250 ms 内未达到目标位置容限输出运动超时标志。

指令处理模块作为对外接口模块,负责指令解析、指令判读、遥测组帧和返参等功能。

3 仿真与实验

3.1 软件仿真

本文设计 FPGA 程序采用 ModelSim Microsemi 10.c 对细分频率和细分后 PWM 占空比进行仿真分析,为了直观从仿真中看出 PWM 的变化情况,在 128 细分下分别设置输出轴转速为 $0.36^\circ/\text{s}$ 和 $0.72^\circ/\text{s}$ 的开环运动。

如图 8 和 9 所示,可以看出电机速度越快一个细分步内 o1_swth_on_a 可以调整的 PWM 波形越少,电流维持稳定时间越短。o1_swth_on_a 在转速 $0.36^\circ/\text{s}$ 下的脉冲数量是转速 $0.72^\circ/\text{s}$ 的脉冲数量的 2 倍。当输出轴速度超过 $2\ 812.5^\circ/\text{s}$ 时,细分步运动频率为 $2\ 812.5 \times 100 \times 128 / 1.8 = 20\ \text{kHz}$,与 PWM 控制带宽 20 kHz 相同,相当于每个细分步内产生一个相应脉宽的 PWM 波形,电流保持时间短导致细分电流易失真。

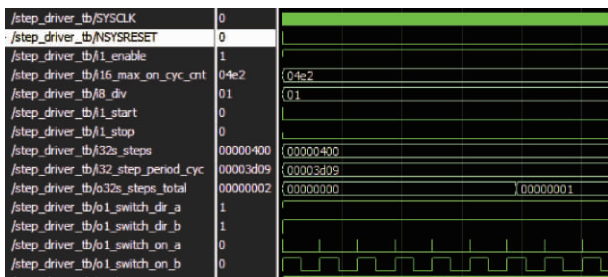
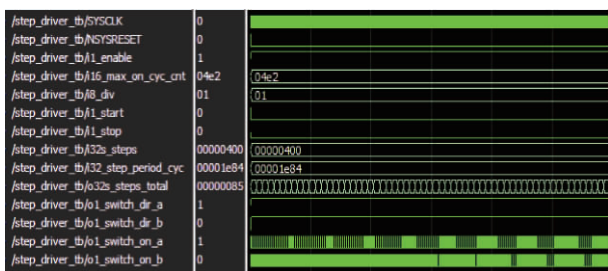


图8 0.36°/s 时序仿真



图9 0.72°/s 时序仿真

如图10所示,看出电机运动 1.8° ,即在一个 $1/4$ 的正弦波电流下,o1_swth_on_a的PWM脉宽按照128档逐渐增加,由于绕组电压和电阻为线性关系,可以保证电流在阶梯性平稳调整,当有效电流最大时为满占空比输出。该方法不存在传统系统电流反馈误差对PWM脉宽的影响。

图10 $1/4$ 正弦波时序仿真

3.2 系统测试

系统谐波减速器减速比 $1:100$,电机绕组阻值 $15.8\ \Omega$,相电感 $9.5\ \text{mH}$,输出轴转速为 $0.36^\circ/\text{s}$,电机供电为 $15\ \text{V}$,利用 $10\ \text{mV/A}$ 电流钳测得A相绕组电流波形如图11所示。

可以看出A相电流毛刺较少,峰峰值最大 $0.95\ \text{A}$,正弦波频率 $5\ \text{Hz}$,对应电机转速 $36^\circ/\text{s}$,经过减速器后转速速度与设定值相同,同时单每相电流过零处无明显阶跃,符合预期设计。

通过上位机从 249.375° 每 $250\ \text{ms}$ 递减 0.125° 发送一个目标位置,同时采集当前编码器位置,过程中累计发送380个目标位置值,伺服控制器接收到指令进行实时跟踪。

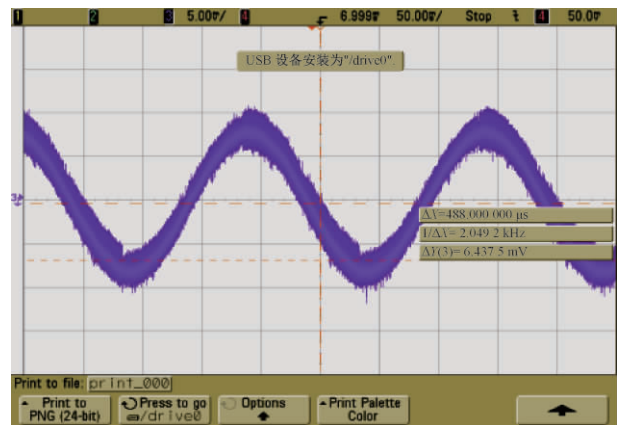


图11 A相电流波形

如图12所示可以看出380个目标点中有2个点跟踪精度超过 0.005° ,整体跟踪误差标准差为 0.0016° ,小于 0.005° 要求。如图13所示,可以看出380个目标点实际跟踪速度与理论速度 $0.5^\circ/\text{s}$ 相同,跟踪速度标准差 $0.0096^\circ/\text{s}$,达到速度稳定性 1.92% 。在 $4\ \text{Hz}$ 控制带宽下系统性能远远满足指标要求,该系统没有累计误差,对于转台连续实时转动仍能很好地进行跟踪。

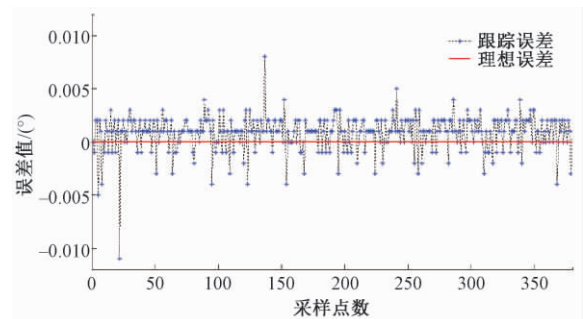


图12 跟踪仿真

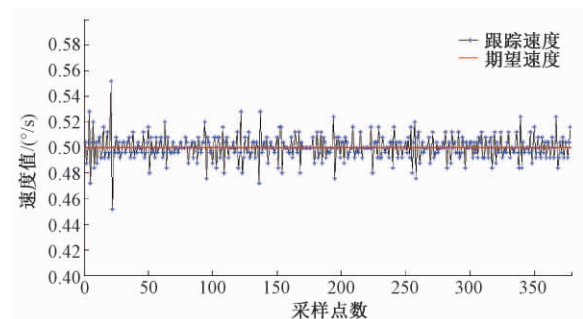


图13 速度稳定性仿真

4 结 论

本文以FPGA作为核心控制器,基于查找表的PWM斩波调节方法实现了空间二维转台的伺服控制设计,硬件

电路可靠性高、复杂度低,软件基于参数输入模块化设计,适应性强。整个系统具备开环模式、实时速度调整跟踪、最小路径规划和运动超时保护等主要功能。同时在设计中分析了细分数对步进电机控制的影响,可以说高速运动的电机不适用高分辨控制。最后通过预先规划的运动曲线对二维转方位轴进行跟踪试验,得到系统跟踪误差 0.0016° ,速度稳定度 1.92% ,实验结果表明该方法具有电流跟踪效果好、运行平稳、实时性高等特点,适用于有自锁要求的步进电机低速伺服控制,后续将对如何降低控制系统中反生电动势的影响进行进一步研究。

参考文献

- [1] 李朝辉,王忠素,胡庆龙,等.月基极紫外相机跟踪转台设计与刚度分析[J].仪器仪表学报,2013,34(11):2534-2541.
- [2] 刘玉章,李贤涛.基于dsPIC33F的高可靠步进电机细分驱动系统[J].国外电子测量技术,2016,35(4):85-90.
- [3] 黄宣淋,陈思思,黄永梅,等.旋转音圈电机驱动的摆镜控制系统设计[J].国外电子测量技术,2018,37(1):111-115.
- [4] 鲁月林,王煜,司福祺,等.星载差分吸收光谱仪摆镜控制系统设计[J].光学精密工程,2019,27(3):630-636.
- [5] 张博威,曹小涛,徐文生,等.基于FPGA的空间光学遥感器的步进电机控制[J].国外电子测量技术,2017,36(3):51-55.
- [6] 张西龙,孙宝玉,孙建伟,等.高精度二维转台指向误差分析[J].长春工业大学学报(自然科学版),2012,33(4):347-350.
- [7] 王永成,徐抒岩,韩诚山.基于ICL7667实现步进电机高频斩波控制[J].光学精密工程,2008,16(11):2193-2198.
- [8] 陈亚,史钊亮,高锦宏,等.基于STM32+FPGA的六自由度机器人运动控制器设计[J].机械设计与制造,2020(4):240-243.
- [9] 陈祖霖,沈英,吴靖.结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J].福州大学学报(自然科学版),2020,48(1):27-33.
- [10] 孔德杰.高精度中频双极性PWM信号发生器的FPGA实现[J].国外电子测量技术,2015,34(11):32-34.
- [11] 郑雪钦,郭东辉.基于混合模式PWM二相步进电机驱动控制的研究[J].系统仿真学报,2012,24(2):456-461.
- [12] 王睿.高动态特性步进电机驱动控制系统设计与实现[D].杭州:浙江大学,2016.
- [13] 贾建援,柴伟,于大林,等.方位俯仰转台误差参数辨识与指向精度分析[J].仪器仪表学报,2016,37(7):1501-1508.
- [14] 韩庆阳,陈赞,张红胜,等.耐高温增量式光电编码器的研制[J].光学精密工程,2019,27(7):1458-1464.
- [15] 郝少帅,杨玉华,王淑琴,等.基于FPGA的高精度采集系统的研究与实现[J].电子测量技术,2020,43(19):154-158.

作者简介

冯汝鹏,助理研究员,主要研究方向为星上电子学产品设计。

E-mail: xinlan_feng@163.com

何鉴伦,学士,主要研究方向为现代电子技术和信号与信息处理。

E-mail: 1402303632@qq.com

朴永杰,副研究员,主要研究方向为星上电子学系统及图像传输处理等。

E-mail: pyj0314@163.com

谢晓光,副研究员,主要研究方向为卫星结构及机构、卫星热设计等。

E-mail: 7801046ab@163.com

徐伟,研究员,主要研究方向为新型高分辨率空间有效载荷总体设计等。

E-mail: xwciomp@126.com