

文章编号 1004-924X(2007)12-1974-08

动力调谐陀螺再平衡回路数字化的研究与实现

张连超, 范世珣, 范大鹏, 李 玲

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为克服模拟再平衡回路时由控制补偿和温度补偿引起的各种问题,研究了动力调谐陀螺仪再平衡回路的数字化设计和实现方法。采用基于DSP的SVPWM数字化方法设计了频率可调的高精度三相逆变电源,解决了传统陀螺电机电源频率调整困难、相位稳定性低、效率低等问题;基于dSPACE半实物仿真系统设计了双输入双输出频率特性分析仪,辨识出数字再平衡回路的开环离散传递函数矩阵;利用矩阵求逆法与经典控制器设计方法设计了数字解耦校正环节,使陀螺系统能够获得更好的动态性能。实验结果表明:所设计的陀螺电机电源频率稳定性优于 $\pm 1.5 \times 10^{-6}$,波形失真度 $< 5\%$,满足陀螺使用要求;控制后的锁定回路带宽 > 70 Hz,阶跃响应超调量 $< 5\%$,上升时间 < 5 ms,输入信号频率为10 Hz时,两轴交叉耦合 $< 1\%$ 。在保证稳定裕度的前提下,实现了比模拟再平衡回路更好的系统动态性能,为深入研究现代控制方法在动调陀螺再平衡回路中的应用奠定了基础。

关键词:数字化;动力调谐陀螺;再平衡回路;传递函数辨识

中图分类号:V241.5;O318 **文献标识码:**A

Research and implementation of digital control of dynamically tuned gyroscope rebalance loop

ZHANG Lian-chao, FAN Shi-xun, FAN Da-peng, LI Ling

(School of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To overcome the problems caused by the controller compensation and temperature compensation in the analog rebalance loop, the method and implementation of the digital control were researched. A highly precision, adjustable three-phase inverter power source of Dynamically Tuned Gyroscope(DTG) motor was designed using SVPWM method based on DSP to solve the problems on adjusting the frequency, low stability of phase and low efficiency of motor power source. The two-input-two-output frequency characteristic analyzer was designed using dSPACE Hardware-in-loop(HIL) system, the open loop discrete transfer function matrix of digital rebalance loop was identified. Based on matrix inverse and traditional controller method the decoupling and compensation controller was designed to get better dynamic performance of DTG. The experiment shows that the frequency stability of designed DTG motor power source is better than $\pm 1.5 \times 10^{-6}$, waveform distortion is lower than 5%, which meets the demand of DTG. The band width of lock loop under control is higher than

收稿日期:2007-09-29;修订日期:2007-10-28.

基金项目:“十五”国防预研资金资助项目(No.18YXGFKD118)

70 Hz, overshoot is lower than 5%, rising time is shorter than 5 ms, and the cross coupling is lower than 1% between the two axis when there is a 10 Hz sinusoidal input, which has better dynamic performance than the analog rebalance loop in guaranteeing the stability margin, establishing the basis of modern control method application in DTG rebalance loop.

Key words: digital design; dynamically tuned gyroscope; rebalance loop; transfer function identification

1 引 言

动力调谐陀螺仪主要由机械表头和再平衡回路构成。在现有的动力调谐陀螺仪设计中,其再平衡回路大都通过模拟电路实现^[1]。这种常规的控制方式具有精度较高、技术成熟、易于实现等优点,但其问题也很明显^[1-2],主要表现在:由于生产中表头参数不一致而与电路联调比较耗时,制约着生产的批量化;模拟电路校正网络的元器件特性易受环境条件影响而变化,从而直接影响整个仪表的性能;模拟电路温度补偿网络,线路复杂,实现困难;陀螺工作环境复杂多变,常规的控制方案有时难以满足其性能的要求。因此,人们考虑采用数字控制电路实现再平衡回路,通过辨识来确定表头参数,采用软件来补偿表头参数不一致的影响并实现数字校正网络和温度补偿网络,以解决元件参数变化影响陀螺性能及模拟电路难以实现温度补偿的问题,从而提高动力调谐陀螺仪的性能、精度和可靠性;同时,采用软件方便地实现各种必要的现代控制算法等复杂的控制规律。文献[3-4]分别以单片机和 DSP 为处理器通过脉冲施矩的方法实现了挠性陀螺仪的数字化伺服系统,而文献[5-6]则通过模拟施矩的方法同样实现了陀螺再平衡回路的数字化。

陀螺电机转速的稳定性直接决定了陀螺仪的精度等级^[7-8]。为使陀螺仪的磁滞同步电机获得高稳定且可以精确调整的转速以满足调谐条件^[7-13],需要设计幅度、频率高度稳定的三相交流电源,频率还应能够精确可调。目前大量使用的陀螺电机电源以石英晶振为振荡源,经数字电路分频后,再由模拟电路进行选频、移相、稳幅和功率放大,实现三相交流电源^[14]。这种交流电源频率调整困难、相位精度和稳定性不高、效率低且发

热严重。文献[15-16]采用基于 DSP 的锁相环方法实现了陀螺电机的高精度稳速控制,但是仅适用于无刷直流电机,不能用于磁滞同步电机。

在陀螺系统中,再平衡回路既是实现角速度跟踪的锁定回路,又是一个测量回路^[8],为达到要求的测量精度,必须在陀螺仪的再平衡回路中设置适当的校正环节,以满足所要求的动静态指标,使再平衡回路在恶劣的工作环境中稳定地工作。因此,离散解耦与校正控制算法的设计是再平衡回路控制器设计的核心问题;另一方面,要使用校正控制算法达到再平衡回路的控制目标,挖掘控制系统的潜力,使系统性能得到尽可能的提高,必须获得控制对象的高精度传递函数^[17]。因而需要在理论推导的被控对象开环传递函数基础上,通过频域建模方法获得控制对象的精确开环传递函数。

文献[7]指出,采用以计算机为核心的数字化测控方法,实现陀螺仪、加速度计和陀螺稳定平台的全数字化,可以改善仪表的测量精度和可靠性。因此,本文从理论和实践两个方面入手,重点研究了以下三个关键技术问题:一、高稳定性陀螺电机电源的数字化设计;二、数字再平衡回路高精度传递函数模型的数字化辨识方法;三、再平衡回路数字化解耦、校正环节设计,并给出了相应的仿真设计结果和实验参数及曲线,以期对高精度动力调谐陀螺数字化测控技术的开发奠定理论分析和应用基础。

2 高稳定性陀螺电机电源数字化设计

针对现有陀螺电机电源频率调整困难、相位精度和稳定性受元件参数变化影响且发热严重的问题,本文采用基于 DSP 的 SVPWM 方法设计了频率可调的高精度三相逆变电源。电源频率的

精确调整以及电压输出的相位关系均可由软件实现,频率精度和稳定度仅与 DSP 所用的温补晶振有关。功率放大电路采用三相 H 桥,属于 PWM 形式的 D 类功率放大器,理论上效率可高于 70%,发热较小。电路的原理框图如图 1 所示。

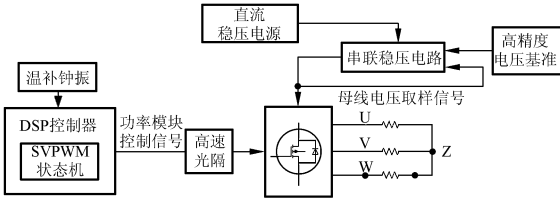


图 1 陀螺电机数字化电源原理框图

Fig. 1 Block diagram of gyro motor digital power

该电源采用串联稳压电路稳定母线电压,采用集成功率运算放大器实现,开环放大倍数可达 80 dB,稳幅精度高,电路简单可靠。逆变器部分的主控器采用了 TI 公司的数字信号处理器 TMS320LF2407,配以 10 MHz 温补晶振,频率稳定性优于 $\pm 1.5 \times 10^{-6}$ 。智能功率模块选用了 ST 公司集成三相电机驱动芯片 L6234,内部集成了功率 MOSFET、栅极驱动电路及智能保护电路,外围电路简单,可靠性高。由于电源负载陀螺电机的电路时间常数很小,无法起到滤波作用,电源电压波形中的载波成分基本没有被滤除,电压波形失真严重,并且主要为高次谐波分量。为了降低电源线电压波形的谐波含量,在电源输出处加入了一个一阶电源滤波器,用于滤除 20 kHz 的 SVPWM 载波频率,滤波器的截止频率为 10 kHz。加入电源滤波器后,在带负载情况下对电源进行测试,线电压的波形如图 2 所示,其频谱如图 3 所示,其前 10 次谐波的谱值,如表 1 所示。

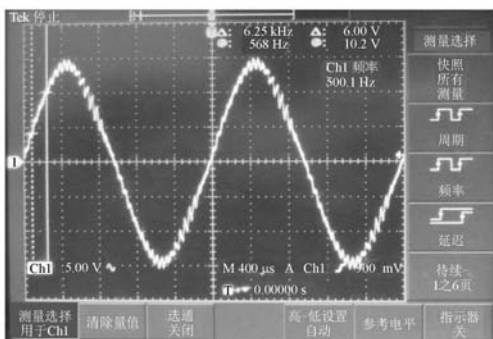


图 2 陀螺电机电源线电压波形

Fig. 2 Voltage waveform of DTG motor power source

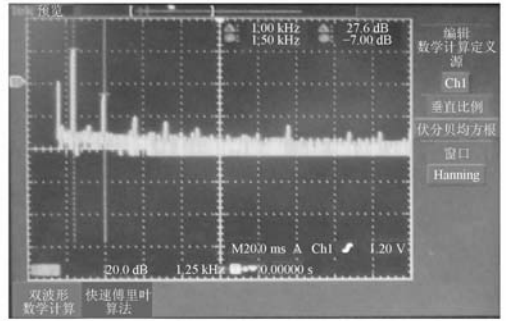


图 3 陀螺电机电源线电压频谱

Fig. 3 Voltage spectrum of DTG motor power source

表 1 电机电源线电压谐波测试结果

Tab. 1 Measuring results of harmonic of motor power

	频率 (kHz)	幅值 (dB)
1	0.5	27.6
2	1.5	-7.6
3	2.5	-21.6
4	3.5	-24.4
5	4.5	-28.4
6	5.5	-32.8
7	6.5	-34.0
8	7.5	-26.8
9	8.5	-36.8
10	9.5	-30.8

计算可得其波形失真度小于 5%,可见,使用 SVPWM 方法设计的陀螺电机电源可满足较高的频率、幅度稳定性要求和波形失真度指标要求。

3 采样控制系统高精度传递函数辨识

一个典型的采样控制系统传递函数方块图如图 4 所示。由于 D/A 转换器给系统引入了零阶保持环节 (Zero Order Holder, ZOH),因此系统的控制对象由原来的 $G(s)$ 变为 $G(s)$ 与 ZOH 的串联,相应的其传输特性也发生了一定变化。以典型的正弦激励信号为例,由于 ZOH 环节对系统输入的采样、保持作用,其平均作用效果与原信号相比,增加了 $T/2$ (半采样周期) 的延迟,运用频率响应分析的方法可知,该延迟导致驱动信号频域中的一个相移:

$$\delta\phi = -\frac{f}{f_s}\pi, \quad (1)$$

上式中 f 为输入正弦信号的频率, f_s 为采样频率。

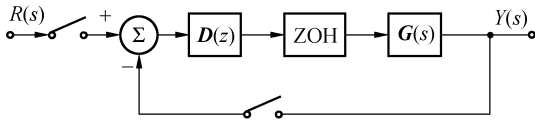


图 4 采样控制系统

Fig. 4 Sampled-data control system

由上述分析可知,使用普通的频率特性测量仪进行系统辨识获得的是单纯的控制对象模拟部分的频率特性,不能直接用于采样系统的控制器设计,不能精确的反映 ZOH 环节的特性。为此,本文基于 dSPACE 半实物仿真系统设计了适用于数字再平衡回路的双输入双输出频率特性分析仪,该方法的测试原理如图 5 所示。

图中由 dSPACE 接口板上的 A/D 与 D/A 代替了所设计的数字再平衡回路中的 A/D 与 D/A,根据(1)式可知,只要保证分析仪的采样频率与实际控制系统采样频率一致,原回路控制对象中的 ZOH 环节特性不会发生改变。按照以上方法对某型动力调谐陀螺进行了频率特性测试,结果如图 6 所示。

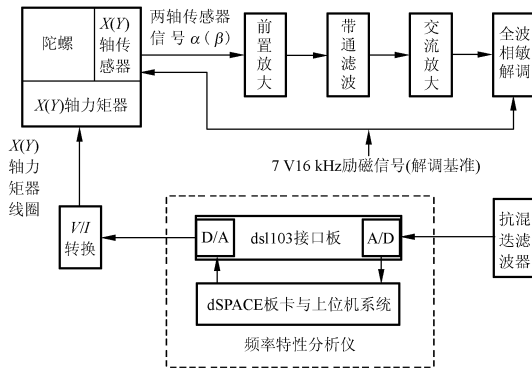


图 5 数字再平衡回路的频率特性测试原理图

Fig. 5 Frequency response measuring schematic of digital rebalance loop

图 6(a)为 X 输入到 X 轴输出的频率特性,习惯上将其命名为直接轴传输频率特性,对应的

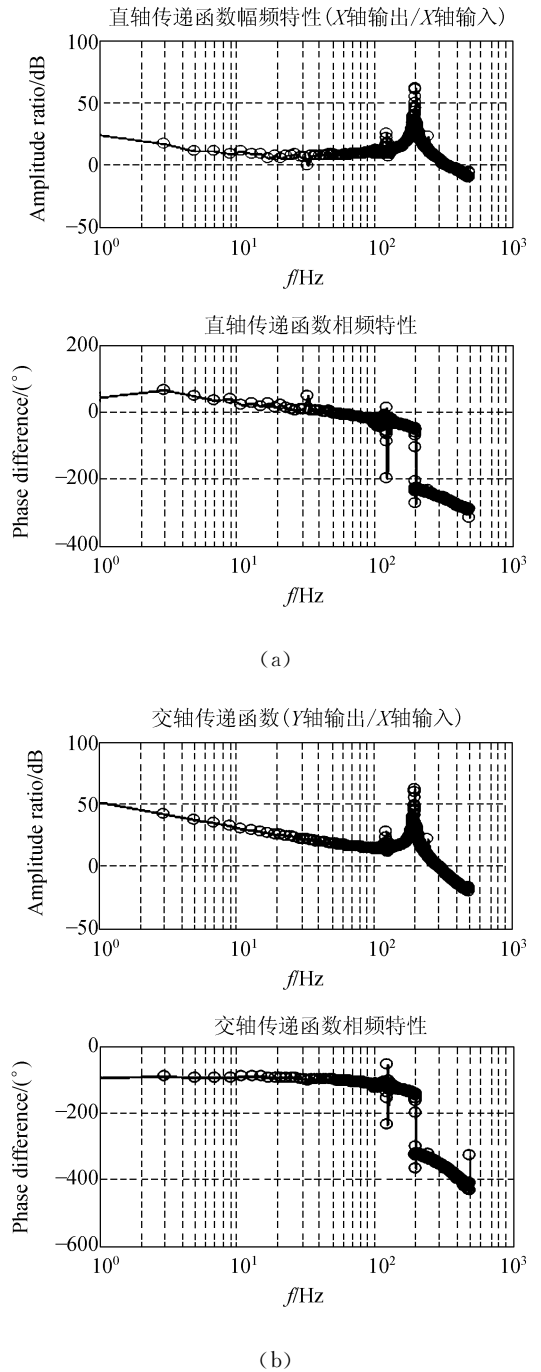


图 6 再平衡回路的频率特性

Fig. 6 Frequency response of rebalance loop

传递函数称为直接轴传递函数(简称直轴传函),以符号 $G_{XX}(s)$ 表示;图 6(b)部为 X 输入到 Y 轴输出的频率特性,习惯上将其称为交叉轴传输频率特性,对应的传递函数称为交叉轴传递函数(简称交轴传函),以符号 $G_{XY}(s)$ 表示。由于再平衡回路结构上的对称性,理论上讲 $G_{XX}(s)$ 与 $G_{YY}(s)$ 之间、 $G_{XY}(s)$ 与 $G_{YX}(s)$ 之间的零极点分布是完全

一致的。根据先验知识给系统定阶后,不难辨识

得到系统的离散传递函数矩阵:

$$G(z) = \begin{bmatrix} \frac{0.009\ 713\ 3(z+1)}{z^2-1.984z+1} & -\frac{4.064\ 6 \times 10^{-5}(z+3.729)(z+0.268\ 2)}{(z-1)(z^2-1.984z+1)} \\ \frac{4.064\ 6 \times 10^{-5}(z+3.729)(z+0.268\ 2)}{(z-1)(z^2-1.984z+1)} & \frac{0.009\ 713\ 3(z+1)}{z^2-1.984z+1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

4 再平衡回路的数字化设计

数字再平衡回路为双输入、双输出系统,由传递函数矩阵(2)式可以看出,其两个控制通道之间存在耦合关系。运用经典控制方法设计此类系统的控制器时,一般分为两个步骤:解耦环节设计和校正环节设计。解耦环节的设计一般可以采用

矩阵求逆法,即将解耦环节设计为 $G(z)$ 的逆矩阵 $D(z)$,将 $G(z)$ 对角化,同时,考虑解耦后,能够得到的单个通道为 I 型系统,一般可将解耦环节设计为如下形式:

$$D(z) = \begin{bmatrix} d_{11}(z) & d_{12}(z) \\ d_{21}(z) & d_{22}(z) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

上式中的各项分别为:

$$d_{11}(z) = \frac{1.503\ 0 \times 10^{29}(125z^2-248z+125)(z+1)^3}{4.562\ 4 \times 10^{20}z^4+6.386\ 7 \times 10^{16}z^3-9.123\ 3 \times 10^{20}z^2+6.387\ 5 \times 10^{16}z+4.562\ 4 \times 10^{20}}$$

$$d_{12}(z) = \frac{1.257\ 9 \times 10^{20}(125z^2-248z+125)(5\ 000z+134\ 1)(1\ 000z+3\ 729)(z+1)^2}{(z-1)(4.562\ 4 \times 10^{20}z^4+6.386\ 7 \times 10^{16}z^3-9.123\ 3 \times 10^{20}z^2+6.387\ 5 \times 10^{16}z+4.562\ 4 \times 10^{20})}$$

$$d_{21}(z) = -d_{12}(z) \quad d_{22}(z) = d_{11}(z)$$

解耦后控制模型为:

$$G(z)D(z) = \begin{bmatrix} \frac{2.5 \times 10^{-9}(z+1)^2}{(z-1)^2} & 0 \\ 0 & \frac{2.5 \times 10^{-9}(z+1)^2}{(z-1)^2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

第二步是在 W 域进行单轴校正器设计,校正

后的单轴开环伪频率特性如图 7 所示,过零频率为 43.3 Hz,相位裕度 74.4°。校正后数字再平衡回路的单轴闭环频率特性如图 8 所示,其-3 dB 截止频率为 61 Hz,相位滞后 69°。可见该设计具有较高的闭环带宽和稳定裕度。

按照以上方法设计的数字再平衡回路的阶跃响应仿真结果如图 9 所示。

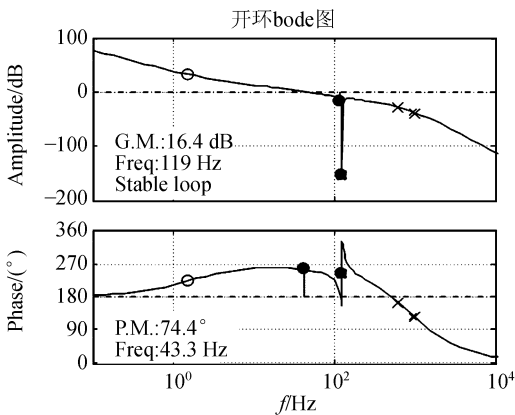


图 7 校正后系统开环频率特性

Fig. 7 System open-loop frequency response with compensator

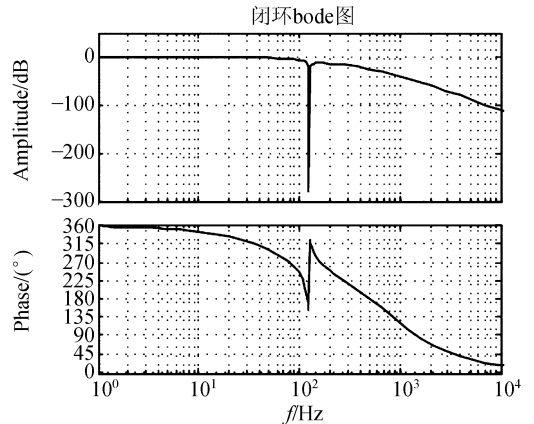


图 8 再平衡回路闭环频率特性

Fig. 8 Close-loop frequency response of digital re-balance loop

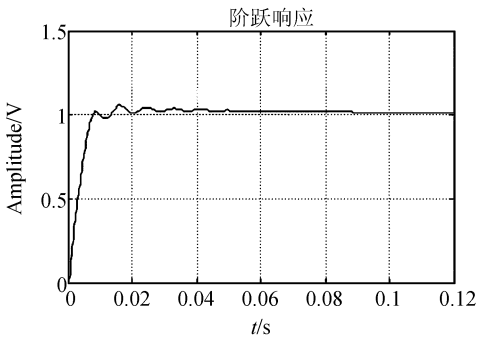


图 9 数字再平衡回路阶跃响应仿真结果

Fig. 9 Simulation results of step response of digital rebalance loop

5 数字化伺服控制板的实现与测试

本文设计的动调陀螺数字化伺服控制板实物照片如图 10 所示。再平衡回路数字控制器采用了 TI 公司的数字信号处理器 TMS320F2812, 转子偏角的测量采用了 14 位 A/D 转换芯片, 控制器输出采用了 16 位高精度 D/A 转换芯片, 为了进一步提高施矩电路的分辨率, 设计了双量程切换高精度施矩电路, 可以满足地速测量要求。



图 10 数字化动力调谐陀螺仪实物照片

Fig. 10 Photo of DTG and digital rebalance loop

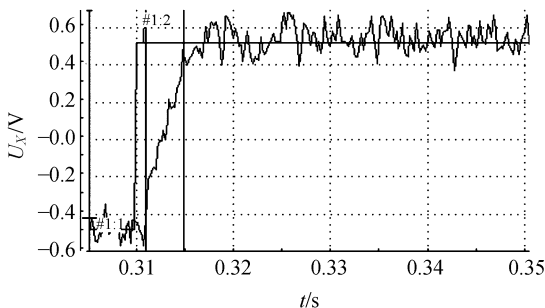


图 11 数字再平衡回路阶跃响应试验曲线

Fig. 11 Experiment step response of digital rebalance loop

对所设计的数字锁定回路 X 轴施加幅度为 1 V 的阶跃信号, 响应曲线如图 11 所示, 可见转子偏角超调量 < 5%, 上升时间 < 5 ms。图中给出的是数字陷波器滤波之前的原始转子偏角信号的测量, 故存在较大的尖峰噪声, 该噪声的频率对应了转子自转频率。

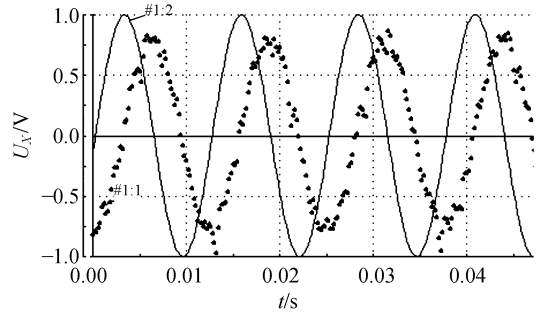
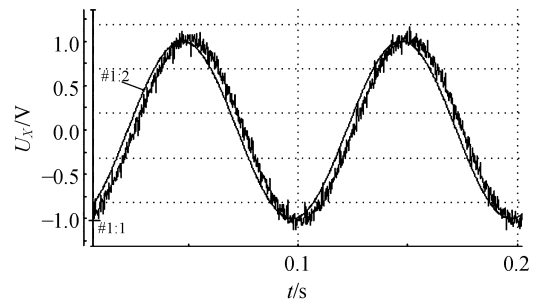


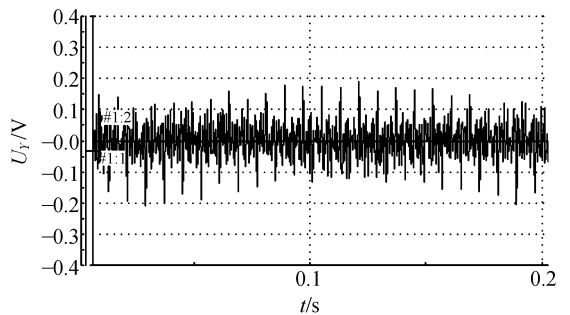
图 12 数字再平衡回路对 80 Hz 信号响应曲线

Fig. 12 Experiment response of digital rebalance loop with 80 Hz sinusoidal input



(a) X 轴响应

(a) Response of X axis



(b) Y 轴响应

(b) Response of Y axis

图 13 X 轴输入 10 Hz 正弦信号时两轴转子偏角信号响应图

Fig. 13 Experiment response of rotor pickoffs when X axis has 10 Hz sinusoidal input

当对数字锁定回路 X 轴输入幅度为 1 V 的 80 Hz 正弦激励信号时, 锁定回路的输入输出特性关系如图 12 所示, 图中实线部分为输入信号, 离散点组成的曲线为输出信号。

图 13 为对 X 轴输入幅度为 1, 频率为 10 Hz 信号时, X 轴与 Y 轴的转子偏角信号。经过计算可知, 输入信号频率为 10 Hz 时, 数字锁定回路两轴交叉耦合 $< 1\%$ 。

从上述试验可知, 该数字伺服控制板的锁定回路 -3 dB 带宽 ≥ 70 Hz, 阶跃响应超调量 $< 5\%$, 上升时间为 < 5 ms, 输入信号频率为 10 Hz 时两轴交叉耦合为 $< 1\%$, 与设计仿真结果吻合。

6 结 论

本文针对现有陀螺电机电源频率调整困难、相位精度和稳定性受元件参数变化影响且发热严

重等问题, 采用基于 DSP 的 SVPWM 方法设计了高精度三相的陀螺电机电源。电源频率稳定性优于 $\pm 1.5 \times 10^{-6}$, 波形失真度 $< 5\%$, 满足陀螺使用要求。设计了基于 dSPACE 半实物仿真系统的双输入双输出频率特性分析仪, 能够快速辨识出数字再平衡回路的精确离散传递函数矩阵, 并据此设计了再平衡回路的数字解耦环节和校正环节, 满足陀螺使用要求, 使控制后的锁定回路带宽 < 70 Hz, 阶跃响应超调量 $< 5\%$, 上升时间 < 5 ms, 输入信号频率为 10 Hz 时两轴交叉耦合 $< 1\%$, 在保证稳定裕度的前提下, 实现了比模拟再平衡回路更好的系统动态性能。可见, 动力调谐陀螺仪再平衡回路的数字化实现是可行的, 这种利用软件实现控制算法的方式为深入研究现代控制方法在动调陀螺再平衡回路中的应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 张文焕. 关于再平衡回路数字化的一些设想[J]. 自动驾驶仪与红外技术, 2001, (4): 13-14, 26.
ZHANG W H. Some imagine about digital design of rebalance loop [J]. *Autopilot and Infrared Technology*, 2001, (4): 13-14, 26. (in Chinese)
- [2] 严晓军, 张乐. 基于 DSP 的陀螺加速度计数字伺服回路研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2002, (4): 44-48.
YAN X J, ZHANG L. Research on PIGA's digital servo loop based on DSP [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2002; 44-48. (in Chinese)
- [3] 李保海. 挠性陀螺仪数字化伺服系统设计研究[D]. 天津大学硕士学位论文, 2005.
LI B H. *Study on digital servo system design of dynamically tuned gyroscope*[D]. Tianjin University Master Degree Paper, 2005. (in Chinese)
- [4] 龙文强, 秦继荣. 基于 DSP 和 FPGA 的挠性陀螺数字力反馈回路的设计[J]. 电脑开发与应用, 2006, 19(11): 4-6.
LONG W Q, QIN J R. Design of digitized force feedback loop in dynamically tuned gyro based on DSP and FPGA [J]. *Computer Development and Application*, 2006, 19(11): 4-6. (in Chinese)
- [5] 任宾, 马建辉. 液浮速率积分陀螺再平衡回路的数字化[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(3): 49-52.
REN B, MA J H. The digitizing of LRIG'S rebalance loop[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(3): 49-52. (in Chinese)
- [6] 张朝霞, 张树侠, 吴春晖. 动力调谐陀螺仪线路一体化设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1999, 20(2): 91-93.
ZHANG CH X, ZHANG SH X, WU CH H. Integrated design of dynamically tuned gyroscope and circuit[J]. *Journal Harbin Engineering University*, 1999, 20(2): 91-93. (in Chinese)
- [7] 陆元九. 惯性器件[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
LU Y J. *Inertia Components* [M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 1990. (in Chinese)
- [8] 周百令. 动力调谐陀螺仪设计与制造[M]. 南京: 东南大学出版社, 2002.
ZHOU B L. *Design and Manufacture of Dynamically Tuned Gyroscope* [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2002. (in Chinese)
- [9] 李宏生, 万德均. 动力调谐陀螺仪再平衡回路的多变量频域设计[J]. 东南大学学报, 1996, 26(5): 81-87.
LI H SH, WAN D J, Design of a rebalance loop for dynamically tuned gyroscopes on multivariable frequency domain[J]. *Journal of Southeast Univrsity(Natural Science Edition)*, 1996, 26(5): 81-87. (in Chinese)

- [10] 林士愕. 动力调谐陀螺仪[M]. 北京:国防工业出版社, 1983.
LIN SH E. *Dynamically Tuned Gyroscope* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983. (in Chinese)
- [11] 陈忻彦, 黄一, 韩京清, 等. 自抗扰控制思想在动力调谐陀螺仪力平衡回路中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(6): 84-89.
CHEN X Y, HUANG Y, HAN J Q, *et al.*. Application of active disturbance rejection control technique in the force equilibrium circuit of dynamically tuned gyro [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2003, 11(6): 84-89. (in Chinese)
- [12] 戴绍忠, 汪渤. 动力调谐陀螺平衡回路的全解耦鲁棒控制[J]. 导弹与航天运载技术, 2006, (4): 37-41.
DAI SH ZH, WANG B. Decoupling and robust control on servo loop of DTG[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2006, (4): 37-41. (in Chinese)
- [13] RAJAGOPAL K R. Design and development of a permanent magnet torquer for a gyroscope[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37(4):2630-2633.
- [14] 季小尹, 张万红. 无刷直流陀螺电机的高精度恒速控制[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(6):108-110.
JI X Y, ZHANG W H. High accuracy constant speed control of brushless DC gyro motor[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2003, 11(6): 108-110. (in Chinese)
- [15] 马隽, 孙纯祥. 一种高精度无刷直流陀螺电机锁相稳速系统[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(4): 43-46.
MA J, SUN CH X. Phase-locked constant-speed system of a high-accuracy brushless DC gyro motor[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2005, 13(4): 43-46. (in Chinese)
- [16] 王京锋, 孙纯祥. 基于 DSP 和 ML4428 无刷直流陀螺电机锁相稳速控制的研究[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 3(4):62-65.
WANG J F, SUN CH X. Phase-locked loop steady speed control of BLDCM in gyro based on DSP and ML4428 [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2005, 3(4): 62-65. (in Chinese)
- [17] 胡浩军. 运动平台捕获、跟踪与瞄准系统视轴稳定技术研究[D]. 国防科技大学博士学位论文, 2005.
HU H J. *Line-of-sight Stabilization of Acquisition, Tracking and Pointing System on Moving Bed* [D]. National University of Defense Technology PH. D. Paper, 2005. (in Chinese)
- [18] 孟中, 张涛. 降低动力调谐陀螺输出噪声的方法[J]. 光学精密工程, 2002, 10(4):420-424.
MENG ZH, ZHANG T. Method used in the suppression of DTG output noise[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4): 420-424. (in Chinese)
- [19] 张文博, 范大鹏, 张智永, 等. 光电稳定跟踪装置中微机电陀螺应用研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 690-696.
ZHANG W B, FAN D P, ZHANG ZH Y, *et al.*. Research on application of MEMS gyro to servo system for E-O stabilization and tracking devices[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 690-696. (in Chinese)
- [20] 解旭辉, 刘危, 张明亮, 等. 微惯性测量组合关键技术与应用[J]. 光学精密工程, 2002, 10(2): 154-159.
XIE X H, LIU W, ZHANG M L, *et al.*. Key technologies and applications of micromechanical inertial measurement units[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2): 154-159. (in Chinese)
- [21] 张智永, 范大鹏, 范世珣. 光电稳定跟踪装置的控制系统设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 682-688.
ZHANG ZH Y, FAN D P, FAN SH X. Servo System Design for E-O Stabilization and Tracking Devices[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 682-688. (in Chinese)

作者简介:张连超(1979—),男,安徽太和人,国防科学技术大学机电工程与自动化学院博士研究生,研究方向为机电系统测控理论与技术。E-mail:lchzhang@nudt.edu.cn

范世珣(1982—),男,河北石家庄人,国防科技大学机电工程与自动化学院博士研究生,研究方向为机电系统测控理论与技术。

范大鹏(1964—),男,河南周口人,国防科技大学机电工程与自动化学院教授,博士生导师,研究方向为机电系统测控理论与技术,精密工程与计算机控制。

(本栏目编辑 黄廉卿)