

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2019.02.016

## 激光陀螺数字机抖电路优化

徐步峰<sup>1</sup>, 罗廷明<sup>1</sup>, 滕晓燕<sup>2</sup>, 马文宏<sup>1</sup>, 郑毅<sup>1</sup>

(1. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074;  
2. 中国航天科工飞航技术研究院, 北京 100074)

**摘要:**针对实际功率放大电路中存在的反向充电的问题,提出了双向放电的优化解决方案;针对电路中耦合电容器件导致驱动信号占空比调节范围窄的问题,提出了去除耦合电容器件,增加防共态导通保护电路的解决方案,并对优化后的电路进行了仿真和试验。结果表明,优化后的驱动电路可以解决目前存在的问题,获得更优的机抖驱动信号。

**关键词:**数字机抖控制;功率放大电路;机抖驱动;保护电路

中图分类号:V241.5

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2019)02-0105-06

## The Optimization of the Digital Dithered Driving Circuit for Laser Gyros

XU Bu-feng<sup>1</sup>, LUO Yan-ming<sup>1</sup>, TENG Xiao-yan<sup>2</sup>, MA Wen-hong<sup>1</sup>, ZHENG Yi<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China;  
2. Hiwing Technology Academy of CASIC, Beijing 100074, China)

**Abstract:** Aiming at of the problem of reverse charging in the actual power amplifier circuit, an optimization solution of bidirectional discharge was proposed. And for the narrow adjustment range of the duty cycle of the driving signal caused by the coupling capacitor component in the circuit, a solution to remove the coupling capacitor and increase the anti-common conduction protection circuit was also put forward. The simulation and test of the optimized circuit are carried out. The results show that the optimized drive circuit can obtain a better dithered drive signal.

**Key words:** Digital dithered control; Power amplifier circuit; Dithered driving; Protection circuit

### 0 引言

基于 Sagnac 效应<sup>[1]</sup>工作的激光陀螺作为高精度捷联惯性系统的首选传感器,具有精度高、性能稳定、抗干扰能力强、动态范围宽、可靠性高、启动迅速、寿命长等优势<sup>[2-3]</sup>,如今被应用在航天<sup>[4]</sup>、航空<sup>[5]</sup>、航海<sup>[6-8]</sup>、定位导航<sup>[9-11]</sup>等各个方面。

闭锁效应<sup>[12]</sup>是激光陀螺产生误差的主要因素之一,为了克服锁区对激光陀螺的影响,需要让激

光陀螺工作在偏频状态。目前,实现偏频的方法主要有四种,分别为机械抖动偏频、磁镜交变偏频、速度偏频与四频差动。其中,机械抖动偏频<sup>[13-14]</sup>是最早实际应用的偏频技术,同时机抖偏频陀螺也是目前广泛使用的激光陀螺之一,其核心思想是采用小振幅高速机械抖动装置强迫环形激光器绕垂直于谐振腔环路平面的轴线来回转动,为谐振腔内相向行波对提供快速交变偏频<sup>[15]</sup>。

传统的模拟机抖控制系统采用正弦波驱动,该

收稿日期:2018-07-26;修订日期:2018-08-11

作者简介:徐步峰(1994-),女,硕士研究生,主要从事激光陀螺电路方面的研究。E-mail: 121012464@qq.com

系统规模大、易受温度影响、可控性与可拓展性差,如今可用数字机抖控制系统代替来克服这些不足。

数字机抖控制<sup>[16]</sup>采用方波驱动,与正弦驱动相比,两种驱动模式产生的效果相近,在驱动幅度相等的情况下,方波驱动相较于正弦驱动能够得到更大的抖动响应,功耗更小。数字机械抖动电路通常由4个基本功能电路单元组成,分别为:鉴相电路单元、鉴幅电路单元、机抖驱动逻辑电路单元和功率放大电路单元。目前采用的数字机抖控制电路为保证电路安全,普遍存在耦合电容器件,导致电路的输出信号无法及时响应输入信号的变化,限制了驱动信号占空比的调节范围,从而限制了数字机抖的精确抖动控制和噪声注入控制。同时,在电路的实际应用中发现,抖轮的压电陶瓷上存在反向充电电压,从而导致抖轮无法工作在理想的自由振荡状态,进而达不到最佳的抖动控制效果。针对以上2个目前数字机抖控制电路中存在的不足,本文提出了去除耦合电容器件,添加逻辑保护电路,同时采用双向放电的改进方案,并对改进方案进行了仿真分析和试验验证。

## 1 数字机械抖动控制原理

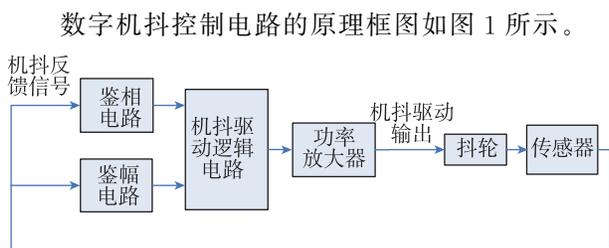


图1 数字机抖电路原理框图

Fig. 1 Digital dithered control circuit schematic

鉴相电路的功能是从机抖反馈信号中解调出机抖的谐振频率和过零点,以此作为机抖驱动逻辑控制的依据,确保陀螺能够在谐振频率点附近进行抖动。

鉴幅电路用于检测机抖反馈信号的幅度信息,该信息为机抖幅度的反馈信号,参与幅度的闭环控制。若机抖幅度减小,则增大机抖驱动方波信号的占空比,增加驱动信号的作用时间,机抖幅度将增大;若机抖幅度增大,则减小机抖驱动方波信号的占空比,缩短驱动信号的作用时间,机抖幅度将减小,以此来实现机抖幅度的稳定控制。

机抖控制回路的工作分为起动和闭环2个过程。起动过程中,机抖驱动逻辑电路首先发出驱

动信号作为抖轮的激励信号,频率接近谐振频率。在激励信号的作用下,抖动轮开始抖动,激励信号的作用时间结束后,抖动轮因惯性作用会保持抖动,这时的抖动为无激励的自由振荡,自由振荡的频率接近谐振频率。通过位置传感器从抖轮上采集机抖反馈信号,经信号调理后输入鉴相电路与鉴幅电路,机抖驱动逻辑电路通过相位信息和幅度信息计算输出相应频率和占空比的数字驱动信号,经功率放大器放大得到机抖驱动信号,作用于抖轮。当抖轮工作在谐振点时,抖动效率最高;当工作点偏离谐振频率时,抖动效率会急剧降低,该电路可以保证抖动幅度保持稳定,抖动频率稳定在谐振频率。

## 2 功率放大电路

机抖控制电路中,功率放大电路的功能是将机抖驱动逻辑电路输出的驱动信号电平放大为 $\pm 65\text{V}$ 。功率放大电路由推挽式放大电路实现,目前普遍采用的功率放大电路如图2所示。

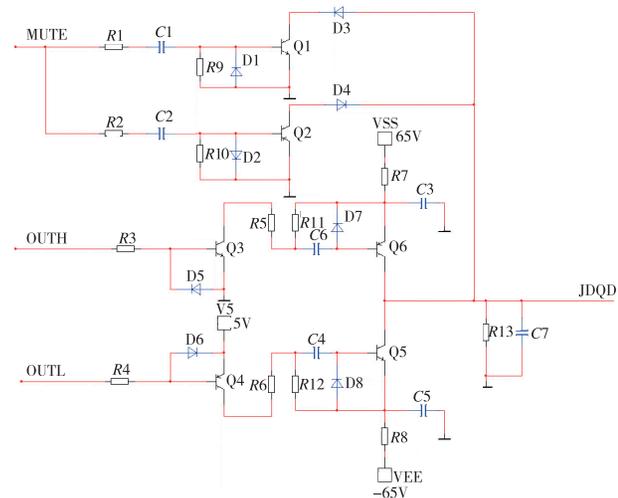


图2 功率放大电路

Fig. 2 Power amplifier circuit

从图2中可以看出,OUTH、OUTL和MUTE信号路径上都存在一个耦合电容,使3个信号均在边沿时有效,这样可以防止上电后OUTH、OUTL和MUTE信号的状态不固定导致误导通。电路采用的是两级放大形式,三极管Q3与Q4实现一级放大,三极管Q5与Q6实现二级放大。从图2中可知,当OUTH信号与OUTL信号都为高时,三极管Q3导通,三极管Q4截止,机抖驱动输出信号为 $+65\text{V}$ ;当OUTH信号与OUTL信号都为低时,三

极管 Q4 导通,三极管 Q3 截止,此时输出为 -65V。抖轮上贴有压电陶瓷,与电片的正负极相连,通电后压电陶瓷将发生伸缩变形,以此来实现抖轮的抖动。要使抖轮工作在自由振荡的状态,需要将压电陶瓷上存储的电荷进行释放,故功率放大电路中需要加入放电回路。图 2 中,三极管 Q1 与 Q2 组成了放电回路。三极管 Q1 构成正向电荷放电回路,三极管 Q2 构成负向电荷放电回路。控制信号时序如图 3 所示。

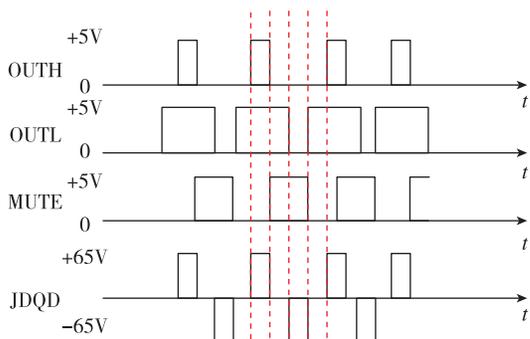


图 3 控制信号时序图

Fig. 3 Control signal timing diagram

在实际的方波驱动中,因机抖驱动信号通路上采用了电容耦合<sup>[17]</sup>,限制了机抖驱动信号占空比的调节范围,无法适应随机噪声注入等需要大范围调整占空比的应用场合。同时,由于抖轮采用压电陶瓷驱动,使电路在实际工作中输出的驱动存在反向充电的现象,同样会影响占空比的精确调节,实测波形如图 4 所示。

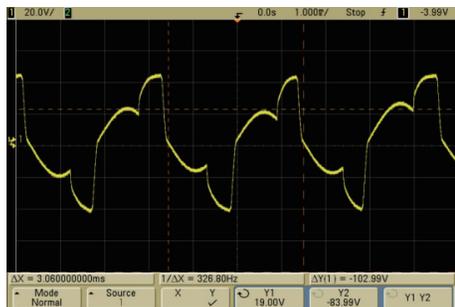


图 4 实测机抖驱动输出信号

Fig. 4 Waveform of actual dithered driving output

### 3 优化设计

为了解决机抖驱动信号通路耦合电容影响占

空比精确调节的问题,对机抖电路进行了优化设计,去掉信号通路中的耦合电容器件,同时为了使 Q2 可以正常工作,增加了稳压二极管 D9 和电阻 R9,为三极管 Q2 提供了一个负的基极工作电压。同时,为了防止在通电时由于机抖驱动信号电平的不定态导致推挽电路的上下两臂共态导通,需要对驱动信号加入一个逻辑保护来保证信号之间正确的时序关系。实现的逻辑关系为: $A' = A \cdot B \cdot \bar{C}$ ;  $B' = \bar{B} \cdot \bar{A} \cdot D$ ;  $C' = C \cdot \bar{A}$ ;  $D' = \bar{D} \cdot B$ (其中,  $A = \text{OUTH}$ ,  $B = \text{OUTL}$ ,  $C = \text{MUTEH}$ ,  $D = \text{MUTEL}$ )。该逻辑可以由硬件逻辑电路或软件逻辑算法来实现。

为了解决机抖驱动信号存在反向充电的问题,首先分析该现象产生的原因。由于电路中的放电回路是分时工作的,当电压由 +65V 变为 0V 时,正向电荷放电回路工作,释放正向电荷;当电压由 -65V 变为 0V 时,负向电荷放电回路工作,释放负向电荷。当压电陶瓷<sup>[18-19]</sup>在工作中产生反向电荷时,没有释放途径,因此产生了该现象。若 2 个放电回路同时工作,当压电陶瓷出现反向电荷时,通过放电回路可将其释放,这就可以避免反向充电现象的产生。用 2 个信号分别控制 2 个放电回路,正向电荷放电回路由 MUTEH 信号控制,负向电荷放电回路由 MUTEL 信号控制。优化后的电路图与时序图分别如图 5 与图 6 所示。

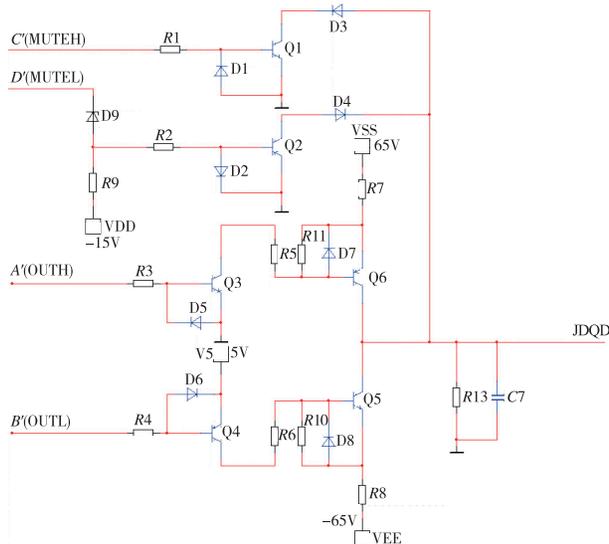


图 5 优化后的数字机抖电路

Fig. 5 Improved dithered circuit

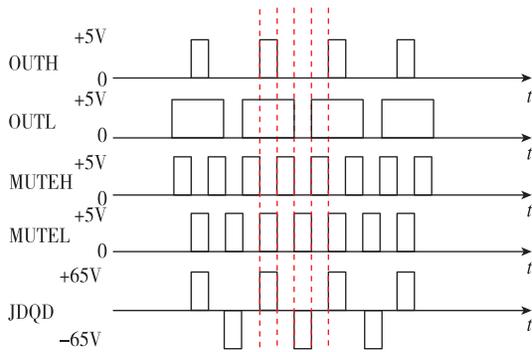


图6 优化后控制信号时序图

Fig. 6 Improved signal timing diagram

#### 4 仿真分析和试验验证

在 Multisim 仿真平台上对数字机抖电路进行了建模仿真。图7和图8所示分别为放电回路优化前后的仿真波形，图中通道1皆为机抖驱动输出信号，图7的通道2为MUTE信号，图8的通道2为MUTEH信号。

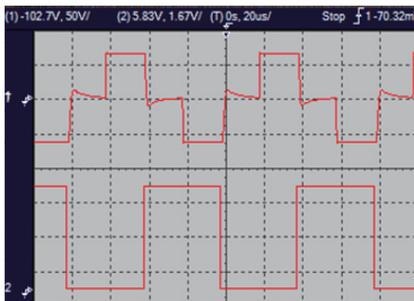


图7 优化前机抖驱动输出信号波形

Fig. 7 Waveform of the original dithered driving circuit output

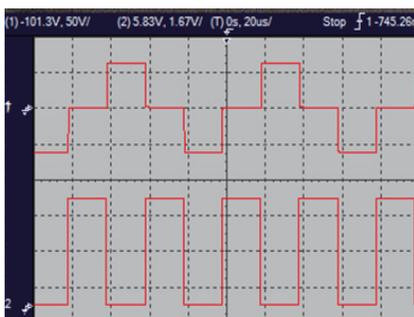


图8 优化后机抖驱动输出信号波形

Fig. 8 Improved dithered driving circuit output waveform

图7中，机抖驱动输出信号存在明显的反向充电现象。对比图7与图8的机抖驱动输出波形可以看出，优化后两路放电电路同时工作可有效避免反向充电的发生。

图9与图10所示分别为优化前后机抖控制信号占空比较小时机抖驱动的输出信号波形。图中通道1为机抖驱动输出信号，通道2为机抖控制信号 OUTH。从图9中可以看出，优化前由于耦合电容的作用，机抖驱动输出信号不能与机抖控制信号同步，无法实现小占空比的机抖控制。



图9 优化前机抖驱动电路小占空比输出波形

Fig. 9 Waveform of the original dithered driving circuit output with small duty cycle



图10 优化后机抖驱动电路小占空比输出波形图

Fig. 10 Improved dithered driving circuit output waveform with small duty

从图10中可以看出，优化后的电路由于不存在耦合电容的影响，当机抖控制信号占空比较小时，机抖驱动输出信号也能够很好地与机抖控制信号同步，可以实现小占空比的机抖控制。

图11所示为优化后数字机抖电路的实测输出波形。与仿真结果一致，进一步证明了优化方法的有效性。

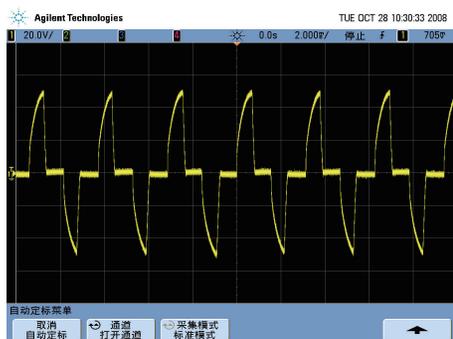


图 11 优化后的实测机抖驱动输出波形

Fig. 11 Measured dithered driving output waveform after optimization

## 5 结论

1)通过去掉耦合电容同时增加防共态导通保护逻辑的方式,解决了机抖驱动信号占空比调节范围窄的问题,可以实现精确的机抖控制和数字噪声注入控制。

2)通过采用双向放电的控制方式,解决了机抖驱动压电陶瓷存在反向充电电压的问题,使陀螺抖动可以达到比较理想的自由振荡状态。

3)仿真和试验结果证明,本文提出的优化设计方法可行,效果明显。通过系统级试验表明,精确的机抖控制和数字噪声注入控制能够将激光陀螺精度提高 3 倍以上,可应用于高精度的激光陀螺机抖控制。

## 参考文献

- [1] Post E J. Sagnac effect[J]. Review of Modern Physics, 1967, 39(2): 475-493.
- [2] Wang Jianzhong. Application and research of high precision data acquisition for laser gyro[J]. Advances in Natural Science, 2016, 9(2): 32-38.
- [3] 杨培根. 光电惯性技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1999.
- Yang Peigen. Photoelectric inertial technology[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1999(in Chinese).
- [4] Schwartz S, Guppy F, Feugnet G, et al. Solid-state ring laser gyro for aerospace applications[C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. 2017, 10564: 64.
- [5] 雷宏杰, 王晓斌, 刘放. 机载双轴旋转调制激光惯导系统误差特性及关键技术分析[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(4): 13-18.
- Lei Hongjie, Wang Xiaobin, Liu Fang. Analysis on error characteristics and key technology of airborne double-axis rotation-modulating RLG INS[J]. Navigation Positioning and Timing, 2016, 3(4): 13-18(in Chinese).
- [6] 周冉辉. 舰用高精度激光陀螺惯导内杆臂误差分析及补偿方法研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(7): 120-123.
- Zhou Ranhui. Rotating scheme designing for two-axis rotating laser gyro inertial navigation system[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(7): 120-123(in Chinese).
- [7] 魏建仓, 郭岳山, 刘东娜. 船用光学陀螺动态随机误差特性分析方法[J]. 水道港口, 2016, 37(6): 657-662.
- Wei Jiancang, Guo Yueshan, Liu Dongna. Dynamic analysis of random error properties for marine optic gyroscope[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2016, 37(6): 657-662(in Chinese).
- [8] 陈国安, 史炜. 舰载激光陀螺惯导系统重调过程中的抗干扰技术研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(S1): 214-217.
- Chen Guoan, Shi Wei. Research on anti-jamming technology in the process of re-adjustment of shipborne laser gyro inertial navigation system[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(S1): 214-217(in Chinese).
- [9] 李龙, 梁可, 陈林峰, 等. 基于菲涅尔透镜的零闭锁激光陀螺抗辐射方案[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(1): 115-118.
- Li Long, Liang Ke, Chen Linfeng, et al. Radiation-resistant scheme of zero-lock gyroscope based on Fresnel lens[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(1): 115-118(in Chinese).
- [10] 杨建强, 刘灿, 尹中锋, 等. 激光陀螺定位定向系统工作模式机理分析[J]. 激光与红外, 2017, 47(3): 332-336.
- Yang Jianqiang, Liu Can, Yin Zhongfeng, et al. Working mode analysis of position and direction determining system in RLG [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(3): 332-336(in Chinese).
- [11] 胡奇林, 李立新, 吴亮华, 等. 基于空间三轴激光陀螺的恒速偏频寻北技术[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(4): 61-65.
- Hu Qilin, Li Lixin, Wu Lianghua, et al. Constant-rate biased north finding technique based on monolithic triaxial ring laser gyro[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(4): 61-65(in Chinese).

- [12] Zhang G J, Dong H C, Wang L B. Research on measurement method of ring laser gyro lock-in threshold[J]. *Navigation & Control*, 2018, 17(2): 89-94.
- [13] Sakharov K V. Model of a laser gyro with frequency dithering[J]. *Quantum Electronics*, 2016, 46(6): 567-573.
- [14] 刘秀娟, 王浩, 钟颖, 等. 小型集成三通道机抖激光陀螺数字式控制电路设计[J]. *计算机测量与控制*, 2016, 24(8): 86-89.  
Liu Xiujian, Wang Hao, Zhong Ying, et al. A miniaturized integrated three-channel control circuit for mechanically dithered laser gyros [J]. *Computer Measurement & Control*, 2016, 24(8): 86-89 (in Chinese).
- [15] 谭汉清, 马二杰, 李超. 激光陀螺闭环抖动控制技术研究[J]. *导航定位与授时*, 2015, 2(4): 72-76.  
Tan Hanqing, Ma Erjie, Li Chao. Closed-loop dither control technology of laser gyro[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2015, 2(4): 72-76 (in Chinese).
- [16] 马仰华, 韩宗虎, 王继良. 机抖激光陀螺抖频匹配技术的优化[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1-6.  
Ma Yanghua, Han Zonghu, Wang Jiliang. Optimization of frequency-shifting matching technology for machine-shaking laser gyro [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1-6 (in Chinese).
- [17] 邱娜灵. 阻容耦合放大电路里耦合电容及旁路电容的深度分析[J]. *信息通信*, 2017(7): 68-71.  
Qiu Naling. The depth analysis of coupling capacitance and bypass capacitor in resistance capacitance coupled amplifier circuit [J]. *Information & Communications*, 2017(7): 68-71 (in Chinese).
- [18] 李颂华, 左闯, 张丽秀, 等. 压电陶瓷驱动器的力输出特性[J]. *沈阳建筑大学学报自然科学版*, 2018, 34(2): 350-359.  
Li Songhua, Zuo Chuang, Zhang Lixiu, et al. Force output characteristics of piezoelectric ceramic actuators [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science*, 2018, 34(2): 350-359 (in Chinese).
- [19] 范伟, 林瑜阳, 李钟慎. 压电陶瓷驱动器的迟滞特性[J]. *光学精密工程*, 2016, 2(5): 1112-1117.  
Fan Wei, Lin Yuyang, Li Zhongshen. Hysteresis characteristics of piezoelectric ceramic actuators [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 2(5): 1112-1117 (in Chinese).