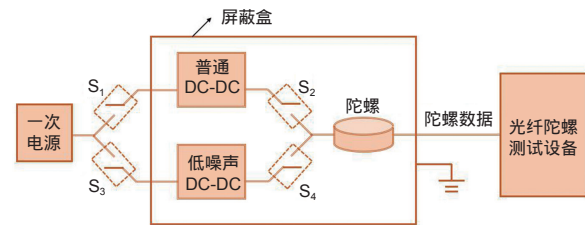


DOI: 10.12086/oe.2018.170517

一种低噪声开关电源在光纤陀螺系统中的应用

陈贤^{1,2}, 杨建华^{1,2*}, 周一览^{1,2}, 舒晓武^{1,2}¹浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;²现代光学仪器国家重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310027

摘要: 在高精度光纤陀螺系统中, 开关电源中的 spike 毛刺噪声会串扰光纤陀螺的信号处理电路, 造成系统采样误差。本文分析了开关电源 spike 噪声的成因及其对光纤陀螺性能的影响机理, 并在此基础上提出摆率控制是一种适用于光纤陀螺系统电源的低噪声电源技术。利用摆率控制技术, 一种低噪声特性的开关电源模块被开发出来, 并应用于光纤陀螺系统。该开关电源模块由 DC-DC 电路和 LDO 电路两部分组成, 并在 DC-DC 电路中通过摆率控制电路实现其低噪声性能。完成后的低噪声电源模块能够在 200 MHz 的测试带宽下实现 1 mV 量级的峰峰值噪声水平。经过对比测试, 采用低噪声电源的两支被测光纤陀螺分别表现出了 3.1% 和 4.4% 的噪声优化特性。

关键词: 光纤陀螺; 开关电源; spike 毛刺噪声; 摆率控制

中图分类号: TN96

文献标识码: A

引用本文: 陈贤, 杨建华, 周一览, 等. 一种低噪声开关电源在光纤陀螺系统中的应用 [J]. 光电工程, 2018, 45(1): 170517

The application of low-noise DC-DC power source in fiber-optic gyroscope system

Chen Xian^{1,2}, Yang Jianhua^{1,2*}, Zhou Yilan^{1,2}, Shu Xiaowu^{1,2}¹College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;²State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation (Zhejiang University), Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract: In high-precision fiber-optic gyroscope (FOG) system, the spike noise of DC-DC power source can lead to a considerable disturbance to the signal processing circuit of FOG, which results in a sampling error. In this work, the cause of spike noise and the influence mechanism were clarified. The slew rate control technology was researched and proved to be an effective solution to prevent spike noise of FOG power source. Using slew rate control technology, a kind of low-noise power module has been developed and applied successfully in the FOG system. This power module consists of DC-DC circuit and LDO circuit, and slew rate control circuit was used in the DC-DC circuit to realize low-noise performance. The peak-to-peak noise value of the developed power module was tested to be about 1 mV in a bandwidth of 200 MHz. Two typical FOG systems were tested with the use of this low-noise power source, and their output noise improvement were 3.1% and 4.4%.

Keywords: fiber-optic gyroscope; DC-DC converter; spike noise; slew rate control

Citation: Chen X, Yang J H, Zhou Y L, et al. The application of low-noise DC-DC power source in fiber-optic gyroscope system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(1): 170517

收稿日期: 2017-09-25; 收到修改稿日期: 2017-12-08

作者简介: 陈贤 (1990-), 男, 博士研究生, 主要从事光纤陀螺及其应用的研究。E-mail: xian@zju.edu.cn

通信作者: 杨建华 (1971-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事光纤陀螺电路及应用。E-mail: xxianhua@zju.edu.cn

1 引言

光纤陀螺是一种基于光学 Sagnac 效应的精密角速度传感器，其工作原理是检测角速度旋转引起的 Sagnac 相移，并由此解调出待测角速度。相比于传统机械陀螺，光纤陀螺具有体积小、质量轻、精度范围广、无运动部件等优点^[1]，在航空、航天、航海等领域应用广泛^[2]。

高精度光纤陀螺系统在调制解调的工作过程中，需要采集并产生复杂的微弱电信号，电信号精度普遍要求达到微伏甚至纳伏量级。因此，光纤陀螺系统对电路噪声提出了很高的要求^[3]。在光纤陀螺电路中，电源噪声是高精度光纤陀螺工作性能的重要影响因素之一^[4]。

国内外针对光纤陀螺供电系统的研究主要集中在电源噪声的抑制和系统的分布式供电方面。美国 Honeywell 公司的 Keith 等针对噪声较大的光纤陀螺供电系统开发了专用的电源滤波网络^[5]，同时通过陀螺系统的分布式供电设计，降低陀螺调制解调系统之间的串扰^[6]；张敬佩等针对中低精度的光纤陀螺，探究了开关电源工作时占空比变化特性对负载陀螺精度的影响^[7]。目前国内关于高精度光纤陀螺系统专用电源的研究与开发，尚处于不成熟的状态，但是高精度光纤陀螺对电源供电质量的要求较高已经是业内的共识^[8]。

供电电源的噪声抑制技术主要分为有源抑制技术和无源抑制技术。有源滤波技术通过谐波补偿的方式来旁路或滤除供电网络中存在的谐波电流，在大中型设备中使用广泛^[9-12]；无源抑制技术的电路相对简

单，非常适合小型化，具有代表性的是开关电源的软开关技术和摆率控制技术。软开关技术利用谐振电路对开关电源中的波形进行整形，可以减少电源中的高频分量，在减少器件开关损耗的同时，对 EMI 噪声有一定的抑制作用^[13-14]。摆率控制技术主要针对开关电源的 EMI 干扰^[15-16]，可以有效抑制开关器件动作时产生的高次谐波，对开关电源 EMI 噪声的抑制效果明显，广泛应用于电源、驱动器、逻辑开关等电路中^[17-18]。

开关电源是一种常见的光纤陀螺系统电源，为保证高精度光纤陀螺的性能，其供电二次电源需要具备小型化、低噪声、输入电压范围大、性能稳定等特点，目前国内针对高精度光纤陀螺系统专用电源的研究与开发尚不完善。本文结合高精度光纤陀螺的电路特点，分析了开关电源噪声对光纤陀螺信号采集电路的影响机理，并在此基础上应用摆率控制技术完成了光纤陀螺专用开关电源模块的研发。实验证明，该款低噪声开关电源可以有效避免高精度光纤陀螺性能劣化，保证陀螺精度。

2 光纤陀螺系统的电路构成

光纤陀螺的电路系统构成如图 1 所示，光纤陀螺电路模拟部分主要包括 ADC、DAC 模块及其相关放大电路，数字部分主要包括数字信号处理单元的数字通道及通讯模块。

光纤陀螺电源给陀螺系统的各个电路模块供电，电源噪声会串扰进电路模块，成为电路模块噪声的重要组成部分。数字闭环光纤陀螺系统是一个微弱信号高速处理系统，如果采样信号通道的噪声较大，噪声

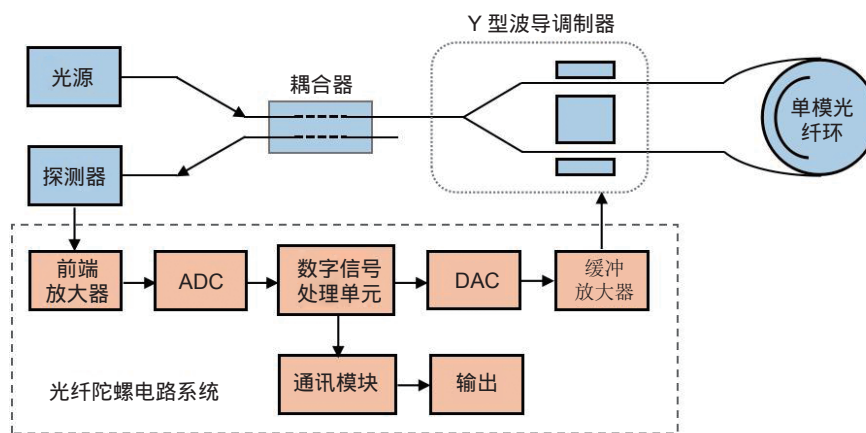


图 1 光纤陀螺系统电路结构示意图
Fig. 1 The structure of FOG circuit system

会混叠在干涉信号中被系统采样, 从而影响陀螺输出性能, 降低陀螺精度。

3 开关电源噪声的常见表现形式

光纤陀螺系统中使用的电源一般为开关电源, 开关电源噪声主要有两种表现形式: 电源纹波和 spike 尖峰毛刺噪声。图 2 为典型的开关电源噪声测试结果图, 该被测电源具有峰峰值 366 mV 的 spike 毛刺噪声, 开关频率为 232 kHz。

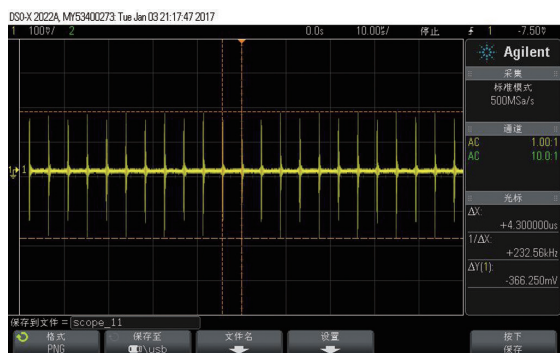


图 2 典型开关电源噪声测试结果
Fig. 2 The test result of typical DC-DC noise

两种开关电源噪声有着不同的成因。开关电源纹波主要来自于开关电源中储能器件的能量积累和释放, 以及纹波电流在电容器件的 ESR 上造成的纹波电压。纹波噪声具有幅值低、频谱单一的特点。在光纤陀螺系统中, 开关电源纹波噪声很容易抑制, 造成的影响很小。

相比于纹波噪声, 开关电源的 spike 尖峰毛刺噪声具有幅值高、频率高且频谱复杂的特点, 是一种难以抑制的噪声, 下面首先分析 spike 尖峰毛刺噪声的成因。

在开关电源中, 开关器件是周期性导通和截止的, 从而将输入电压斩波成为方波电压, 该周期性方波电压可以看做一种非理想方波, 方波的带宽和开关器件的频率响应带宽相关。对于一个幅值为 A 、周期为 T 、脉宽为 τ 、带宽为 ω_m 的方波信号 $\varepsilon_m(t)$, 通过傅里叶级数展开, 可以将其看做是一系列频率小于 ω_m 且具有不同相位 ϕ_n 的倍频正弦信号的叠加, 如式 (1) 所示:

$$\varepsilon_m(t) = \frac{2A\tau}{T} + \sum_{n=1}^h \frac{2A\tau}{T} \text{Sa}\left(\frac{n\pi\tau}{T}\right) \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t + \phi_n\right),$$

$$h = \left\lfloor \frac{\omega_m T}{2\pi} \right\rfloor, \quad (1)$$

在光纤陀螺系统中, 实际使用的电容、电感都有其工作特性的截止频率, 高于此频率, 电容器件将表现出感性, 电感器件将表现出容性, 从而使滤波器的高频性能劣化, 失去对高频噪声信号的抑制能力。对于常用的容值 0.1 μF 到 100 μF 的陶瓷电容, 此截止频率对应着电容器的自谐振频率, 一般为几十兆赫兹。

因此在实际工程中, 开关器件后端的储能器件、低通滤波器件可以综合地看做一个带阻滤波器, 其低通特性为低通滤波器所达到的截止频率, 一般为百赫兹量级; 高通特性为滤波器件高频滤波性能劣化所带来的截止频率, 一般为 100 MHz 左右。

开关电源经斩波形成的非理想方波信号经过此带阻滤波器之后, 其高频分量被保留, 低频分量被有效抑制, 最终形成类似于尖峰毛刺的波形, 即为开关电源的尖峰毛刺噪声。图 3 所示为 spike 尖峰噪声成因的仿真结果, 图 3(a) 所示带宽达到 500 MHz 的方波信号, 在经过一截止频率为 100 MHz 的二阶巴特沃兹高通滤波器之后, 得到的滤波结果如图 3(b) 所示,

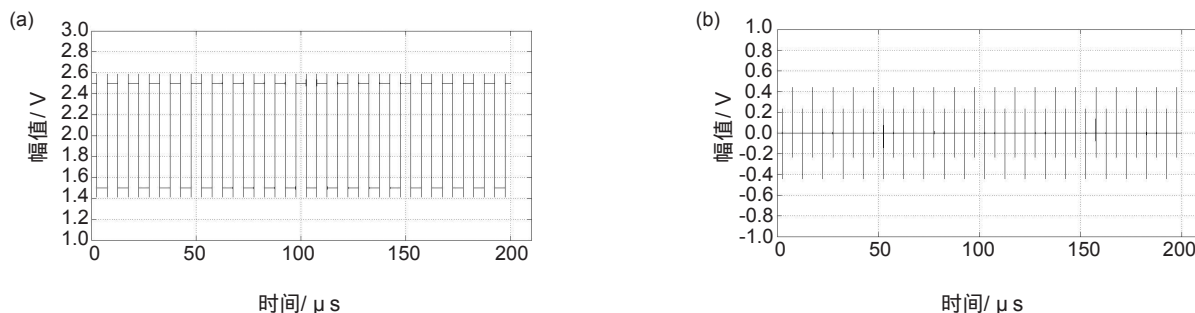


图 3 开关电源 spike 尖峰噪声成因的仿真结果图。(a) 带宽 500 MHz 的非理想方波信号; (b) 为方波信号通过 100 MHz 二阶巴特沃兹高通滤波器后的信号

Fig. 3 Simulation result of the cause of DC-DC spike noise. (a) The non-ideal square wave with bandwidth of 500 MHz; (b) The consequence signal after going through a 100 MHz second order Butterworth high-pass filter

该仿真结果与实际测试到的尖峰毛刺噪声波形一致。可见，开关电源开关管在导通和截止时产生的高次谐波分量，经过滤波器后泄露出来，是开关电源 spike 毛刺噪声的主要来源。

综上所述，spike 毛刺噪声信号的频谱为式 (1) 所述的非理想方波经过高通滤波器后的结果，可以表述为一系列等频率间隔的高频正弦信号的叠加，各信号分量的频率间隔为

$$\Delta\omega = \omega_{i+1} - \omega_i = \frac{2\pi}{T}, i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

在实际工程分析中，为了方便计算可以将幅值小于特定阈值（如峰值频谱分量的千分之一）的频谱分量近似看做零，那么 spike 毛刺噪声信号的频谱将是一个带限信号，即：

$$\omega_L < \omega_i < \omega_H, \quad (3)$$

其中： ω_L 为电路中滤波器的高频性能劣化带来的频谱下线，高于频率 ω_L 的频谱分量开始从滤波器输出端泄露出来； ω_H 为开关器件的频响特性的带宽极限，对应式 (1) 中的 ω_m ，即：

$$\omega_H = \omega_m \quad (4)$$

在开关器件产生的非理想方波中，高于 ω_H 的频谱分量不存在。定义整数 k 和 m ：

$$k = \frac{\omega_L}{\Delta\omega}, \quad (5)$$

$$m = \frac{\omega_H}{\Delta\omega} \quad (6)$$

则 spike 毛刺信号频谱中的各频谱分量 ω_i ($i=0, 1, 2, 3, \dots$) 满足：

$$\omega_i = (i+k) \frac{2\pi}{T}, i \leq m-k \quad (7)$$

那么 spike 噪声信号频谱可以表示为

$$F_{\text{spike}}(\omega) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{m-k} F_p(\omega_i), & \omega_L \leq \omega_i \leq \omega_H, \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $F_p(\omega_i)$ 是频率为 ω_i 的频谱分量，spike 噪声信号是一系列带限等间隔正弦信号的叠加。

4 开关电源 spike 噪声对光纤陀螺电路的影响

通过数字电路和模拟电路两方面，分析开关电源 spike 尖峰毛刺噪声对光纤陀螺电路的影响。

4.1 开关电源 spike 噪声对数字电路的影响

一般来说，数字电路的噪声耐受程度远高于模拟电路，但是 spike 毛刺噪声一般幅值比较大，往往

达到百毫伏量级，这样的噪声串扰进数字通道中形成 EMI 干扰，表现为一个个周期性能量冲激。在恶劣情况下，如果叠加 spike 噪声信号的逻辑电平超出了数字信号阈值，就有可能造成数字信号的误触发和逻辑反转。其表现是光纤陀螺的输出结果中出现了无规则野点，可能会使后端的导航数据解算发生数据错误。

4.2 开关电源 spike 噪声对模拟电路的影响

开关电源的 spike 噪声对模拟电路的影响主要针对光纤陀螺电路的 ADC 模块，具体体现在两方面：首先，spike 噪声会串扰进 ADC 模块的采样信号通道上，从而混叠进 ADC 模块的采样结果中，成为噪声项进入数字信号处理单元；此外，spike 噪声也会串扰进 ADC 模块的参考电平，成为参考电平的噪声项，带来 ADC 转换的增益误差。

4.2.1 串扰进 ADC 采样通道的 spike 噪声

如前文所述，spike 噪声信号是一系列带限等间隔正弦信号的叠加，其频谱往往为从几十兆赫兹到上百兆赫兹。光纤陀螺工作过程中，ADC 模块的以一个固定的采样频率 ω_s 采样，该采样频率一般远小于 spike 噪声信号的各个频谱分量。根据采样定理可知，其采样得到的将是一个频谱混叠后的结果。

理想的采样过程可以这样描述：将被采样信号的频谱以 ω_s 为步长进行周期性频谱搬移并依次叠加，经过一个 $[-\omega_s/2, \omega_s/2]$ 带限的低通滤波器后得到采样结果的频谱，再进行傅里叶反变换即得到采样结果的时域表达。

对式 (8) 中频率为 ω_i 的频谱分量 $F_p(\omega_i)$ ，将其以采样频率 ω_s 进行周期性频谱搬移后，一定存在一个频率为 $\omega_{\text{result}-i}$ ，幅值与 $F_p(\omega_i)$ 相等的信号落在区间内，即

$$F_{\text{result}-i}(\omega_{\text{result}-i}) = F_p(\omega_i), -\frac{\omega_s}{2} < \omega_{\text{result}-i} < \frac{\omega_s}{2}, \quad (9)$$

那么最终采样结果 F_{result} 为所有频谱分量周期性搬移后落在 $[-\omega_s/2, \omega_s/2]$ 区间内的分量的混叠，即：

$$F_{\text{result}} = \sum_{i=1}^{m-k} F_{\text{result}-i}(\omega_{\text{result}-i}) \quad (10)$$

开关电源 spike 噪声经 ADC 采样后会混叠进采样结果中成为噪声项，该噪声的时域表现为式 (10) 所述混叠频谱的傅里叶反变换结果。

$$n_{\text{spike}}(t) = \mathcal{F}^{-1}[F_{\text{result}}(\omega)], \quad (11)$$

4.2.2 串扰进 ADC 参考电平中的 spike 噪声

ADC 系统是将模拟量转化为数字量的转换器，

其转换方程为

$$\text{Code} = V_{\text{IN}} \cdot \frac{2^n}{V_{\text{REF}}}, \quad (12)$$

其中: V_{code} 是 ADC 的十进制输出, V_{IN} 是 ADC 模块的模拟输入, n 是 ADC 的位数, V_{REF} 是 ADC 参考电平的模拟值。由该转换方程可以看出, 叠加在参考电平 V_{REF} 的所有噪声项会转化为 ADC 模块的增益误差, 并且该误差项是模拟输入量 V_{IN} 的函数, V_{IN} 越大, 误差越大。因此, 串扰进 ADC 参考电平中的 spike 噪声最终会以增益误差项的形式影响 ADC 的输出。

开关电源 spike 噪声对模拟电路的影响是以上两种情况综合的结果, 由于 spike 噪声的存在, 光纤陀螺信号检测系统的采样结果中叠加了 spike 毛刺噪声信号所带来的噪声项。采样结果中的噪声项会参与到调制解调中, 成为光纤陀螺输出信号中噪声的一部分, 表现为光纤陀螺输出数据单点 std 值增大, 零偏稳定性劣化, 精度降低。

5 光纤陀螺系统专用低噪声开关电源设计

由第 3、4 节所述可知, 开关电源 spike 尖峰毛刺噪声对光纤陀螺的性能具有重要影响, 并且 spike 噪声一旦产生, 采用滤波器对其抑制将是非常困难的。因此从源头抑制甚至消除 spike 噪声的产出, 是解决 spike 尖峰毛刺噪声问题的关键。一种典型的设计方案为开关电源的软开关技术, 此种方法虽然能降低 spike 噪声, 但是其抑制能力有限, 无法彻底消除 spike 噪声。

相比于其他降噪方法, 摆率控制是一种有效的消除 spike 噪声的技术方案, 采用摆率控制技术设计的

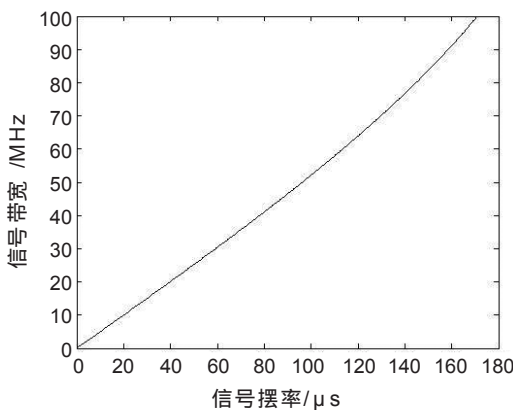


图 4 方波信号上升/下降沿摆率与信号带宽的关系
Fig. 4 The relationship between slew rate and bandwidth of square wave signal

开关电源, 其 spike 毛刺噪声峰峰值可以降至 1 mV 以内, 达到基本消除 spike 噪声的效果, 是一种理想的光纤陀螺系统专用电源。

5.1 通过摆率控制消除开关电源 spike 噪声

由第 4 节可知, 开关电源 spike 噪声信号是一系列高频正弦分量的叠加, 由式 (3)、式 (4) 可知这些正弦分量的带宽是 $[\omega_L, \omega_m]$, 其中 ω_L 是开关电源滤波器的高频极限, ω_m 是开关电路所输出方波信号的带宽极限, 如果降低 ω_m , 直至满足

$$\omega_m < \omega_L, \quad (13)$$

那么, 开关电路所输出方波信号中的所有高频分量都将被开关电源滤波器抑制, 实现 spike 噪声的有效消除。可见, 降低信号带宽是抑制 spike 噪声的有效手段。

对于一个峰峰值 1 V, 频率 100 kHz, 占空比 50% 的方波信号, 其上升/下降沿摆率与信号带宽的仿真结果如图 4 所示。

常用陶瓷电容的自谐振频率一般在几十兆赫兹, 高于此自谐振频率, 电源滤波器将逐渐失效。故一种理想的 spike 噪声解决方案是, 通过摆率控制将信号的带宽限制在 10 MHz 以内。由图 4 所示的仿真结果可知, 对于该方波信号来说, 为将其带宽限制在 10 MHz 以内, 方波上升/下降沿摆率至少应控制在 20 V/μs 以内。

开关电源摆率控制有多种实现方案^[19-21], 图 5 所示是一种可行的摆率控制电路^[22], I_1 、 I_2 是恒流源电路, A 点为信号输出端。

当输出高电平时, 开关 S_2 、 S_3 闭合, 开关 S_1 、 S_4 断开, 信号最高上升速率被限制为

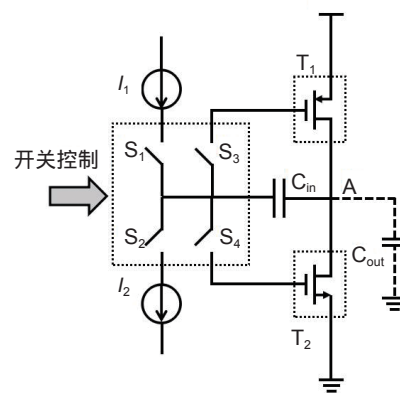


图 5 一种可行的摆率控制电路示意图
Fig. 5 The scheme of a practicable slew control circuit

$$dV_{up}/dt = I_2/C_{in} \quad (14)$$

当输出低电平时, 开关 S_1 、 S_4 闭合, 开关 S_2 、 S_3 断开, 信号最高下降速率被限制为

$$dV_{down}/dt = I_1/C_{in} \quad (15)$$

在开关电源中应用摆率控制技术, 可以有效降低信号带宽, 有效抑制甚至消除电源输出中的 spike 噪声。

5.2 低噪声开关电源的实现

通过应用具有摆率控制功能的开关电源控制器, 一种光纤陀螺系统专用低噪声电源被成功设计并进行了测试。图 6 所示为低噪声开关电源模块的功能结构示意图, 该电源模块由 DC-DC 电路、LDO 电路两个组成部分, 可实现 18 V~36 V 输入, ± 5 V 双路输出, 功率可达 15 W, 满足单支陀螺的供电需求。在开关管控制电路中, 将信号上升和下降的摆率控制在 20 V/ μ s 以内, 以降低信号产生的高次谐波, 达到抑制 spike 噪声的效果。

最终实现后的低噪声开关电源模块及测试结果如图 7(a)、图 7(b) 所示, 图 7(b) 所示是在与图 2 相同的测试条件下, 用示波器测得的开关电源模块的

输出特性。所用示波器模拟带宽为 200 MHz, 底噪为 1 mV, 可以看到 DC-DC 模块的输出噪声几乎被淹没在示波器底噪中。图 2 中, 一般开关电源的 spike 毛刺噪声达到了 366 mV, 相比之下, 图 7(b) 所示低噪声电源中的 spike 噪声被有效地抑制, 达到了 1 mV 量级。

6 低噪声电源在光纤陀螺系统中的应用

使用完成的低噪声开关电源模块, 对同一款光纤陀螺产品在特定测试环境下进行了光纤陀螺静态性能的对比测试。

6.1 实验系统方案

测试系统如图 8 所示, 被测二次电源与光纤陀螺放置在接地良好的屏蔽壳体中, 以屏蔽来自系统外部的 EMI 干扰。通过开关组的断开与闭合, 可以实现不同性能 DC-DC 电源供电情况下光纤陀螺静态性能的测试。

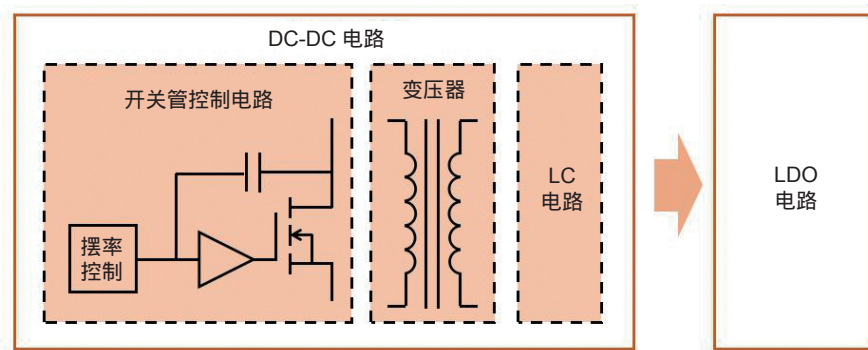


图 6 低噪声开关电源模块功能结构示意图
Fig. 6 The function block diagram of low-noise power module

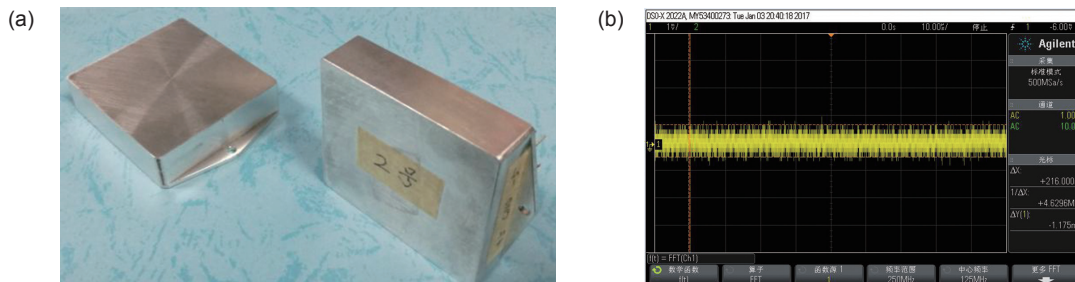


图 7 低噪声开关电源模块成品及测试结果。(a) 低噪声开关电源成品模块; (b) 为该电源模块时域噪声测试结果

Fig. 7 The low-noise power module product and its noise test result. (a) The finished product of low-noise power module; (b) The noise test result of low-noise power module by 200 MHz oscilloscope

当开关 S_3 、 S_4 闭合，开关 S_1 、 S_2 断开时，光纤陀螺系统由噪声特性如图 7(b) 所示的低噪声电源供电，测量此供电条件下的光纤陀螺静态性能，

当开关 S_1 、 S_2 闭合，开关 S_3 、 S_4 断开时，光纤陀螺系统由噪声特性如图 2 所示的噪声较大的普通 DC-DC 电源供电，测量此供电条件下的光纤陀螺静态性能。此测试结果作为参照组，与前一组测试结果对比。

6.2 改进供电电源后光纤陀螺系统静态性能对比

如 4.2 节所述，电源噪声可以影响光纤陀螺信号检测系统，进而成为光纤陀螺输出中的噪声项。实验中以光纤陀螺的单点数据的 std 值（即零偏稳定性）作为评价光纤陀螺静态性能的标准。按照 6.1 节所设计的实验方案，对光纤陀螺 FOG1 在不同供电情况下

的静态性能进行了 5 组测试。为了保证实验结果不失一般性，对另一支光纤陀螺 FOG2 进行了同样的 5 组对比实验。实验测试结果如表 1、表 2 所示。

可以看到，对两款被测光纤陀螺分别进行 5 组对比实验，应用低噪声电源后其单点数据的 std 值分别下降 3.05% 和 4.40%。据此可以得出结论，低噪声电源的应用，对光纤陀螺系统的零偏稳定性具有明显的优化作用。

7 结论

光纤陀螺是一种精密的角速度传感器，其电路具有较低的噪声容限。当采用开关电源作为供电方案时，开关电源噪声将对光纤陀螺的数字和模拟电路产

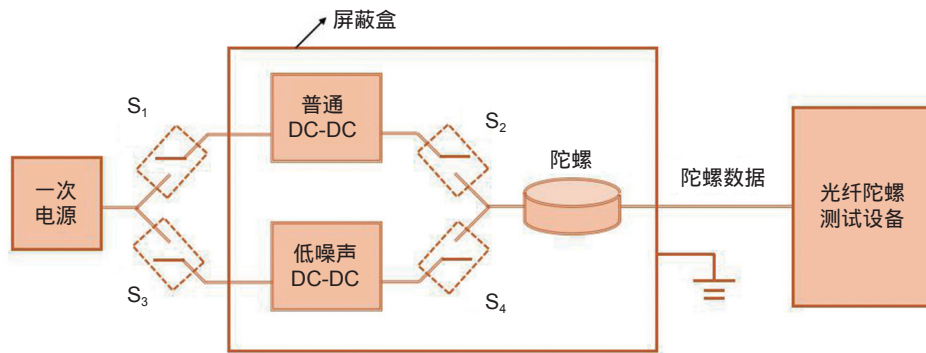


图 8 不同电源供电条件下光纤陀螺系统性能对比测试方案

Fig. 8 Comparison test scheme of the FOG performance under different power noise conditions

表 1 两种供电条件下光纤陀螺 FOG1 的单点零偏稳定性测试结果

Table 1 The test result of single-point bias stability in FOG1 under two different power conditions

	Normal DC-DC	Low-noise DC-DC	Comparison /%
STD value 1	25.148	24.434	2.8
STD value 2	25.378	24.469	3.6
STD value 3	25.091	24.431	2.6
STD value 4	25.038	24.286	3.0
STD value 5	25.252	24.445	3.2
Average of STD	25.182	24.413	3.1

表 2 两种供电条件下光纤陀螺 FOG2 的单点零偏稳定性测试结果

Table 2 The test result of single-point bias stability in FOG2 under two different power conditions

	Normal DC-DC	Low-noise DC-DC	Comparison /%
STD value 1	23.393	22.306	4.6
STD value 2	23.508	22.397	4.7
STD value 3	23.387	22.293	4.7
STD value 4	23.176	22.236	4.1
STD value 5	23.318	22.411	3.9
Average of STD	23.356	22.329	4.4

生串扰, 进而影响光纤陀螺性能。开关电源的 spike 噪声是一种广泛存在于开关电源的噪声, 本文分析了 spike 噪声的成因及特性, 并探讨了其对光纤陀螺电路系统的影响机理。运用摆率控制技术, 可以实现开关电源 spike 噪声的有效抑制。因此, 一种应用摆率控制技术的光纤陀螺专用低噪声电源被开发出来, 该款低噪声开关电源实现了 1 mV 量级的低 spike 噪声性能。最后在不同供电条件下进行了对比实验, 对于两支不同的被测光纤陀螺, 在应用低噪声电源后, 其单点数据的 std 值分别下降了 3.1% 和 4.4%, 光纤陀螺系统的静态性能得到了明显优化。

参考文献

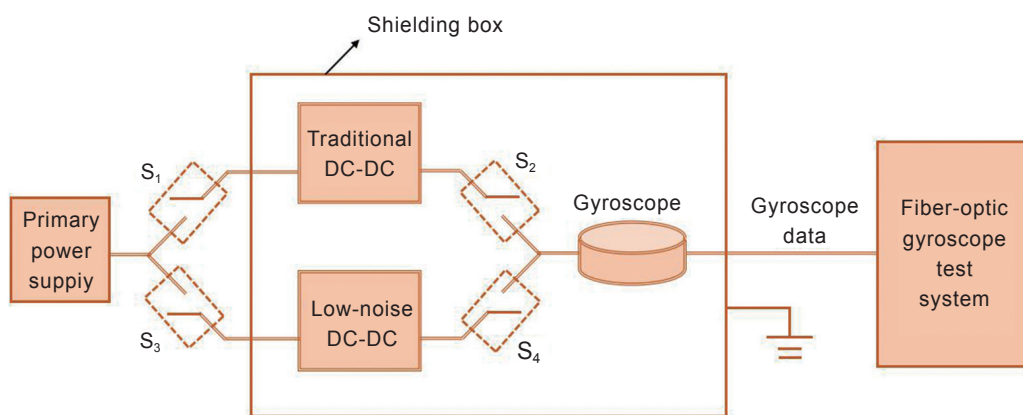
- [1] Zhang G C. The principles and technologies of fiber-optic gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 2-4.
张桂才. 光纤陀螺原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 2-4.
- [2] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope: challenges to become the ultimate rotation-sensing technology[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(6): 828-832.
- [3] Hao C. Applied research of transmission line theory in electromagnetic shielding of fog north seeker[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014: 1-13.
郝翠. 传输线理论在光纤陀螺寻北仪电磁屏蔽中的应用研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014: 1-13.
- [4] Mi Y X, Lin H. Application of fiber optic gyro in the stabilized platform servo system[J]. *Application of Electronic Technique*, 2012, **38**(9): 58-60.
米月星, 林辉. 光纤陀螺在稳定平台伺服系统中的应用 [J]. 电子技术应用, 2012, **38**(9): 58-60.
- [5] Keith G W, Mead D, Smith D E, et al. System to reduce gyroscopic errors with limited power supply quality in a fiber optic gyroscope: US8542364B1[P]. 2013-09-24.
- [6] Keith G W, Schwerman P. System to reduce gyroscopic errors with limited power supply quality in a fiber optic gyroscope: US-8077321B1[P]. 2011-12-13.
- [7] Zhang J P, Zhang C X, Song N F. Influence of the noise of switch mode power supply on the precision of FOG[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2003, **11**(1): 45-48.
张敬佩, 张春熹, 宋凝芳. 开关电源噪声对光纤陀螺精度影响的研究 [J]. 中国惯性技术学报, 2003, **11**(1): 45-48.
- [8] Tao C B. Fog noise analysis and suppression technology research[D]. Harbin Engineering University, 2014: 30-54.
陶晨斌. 光纤陀螺噪声分析及抑制技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014: 30-54.
- [9] Gu Z Q. Applications of harmonic compensation technologies in radar power supply system[J]. *Modern Radar*, 2013, **35**(4): 81-85.
古志强. 谐波补偿技术在雷达电源系统中的应用 [J]. 现代雷达, 2013, **35**(4): 81-85.
- [10] Fu G J, Wang C, Zhang L, et al. Design and implementation for new multi-level switching-less active filter[J]. *Proceedings of the CSU-EPSSA*, 2017, **29**(5): 60-66.
付光杰, 王超, 张雷, 等. 新型少开关多电平有源滤波器设计与实现 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, **29**(5): 60-66.
- [11] Khadem S K, Basu M, Conlon M F. Harmonic power compensation capacity of shunt active power filter and its relationship with design parameters[J]. *IET Power Electronics*, 2014, **7**(2): 418-430.
- [12] Acuna P, Moran L, Rivera M, et al. Improved active power filter performance for renewable power generation systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, **29**(2): 687-694.
- [13] Yuan F F. Research and design of ZCS-PWM flyback switch power supply based on soft switch technology[J]. *Information Technology and Informatization*, 2017(4): 131-134.
袁方方. 基于软开关技术的 ZCS-PWM 反激式开关电源的研究与设计 [J]. 信息技术与信息化, 2017(4): 131-134.
- [14] Wu F. Analysis and design of phase-shift full bridge ZVS DC-DC regulated power supply[J]. *Telecom Power Technology*, 2015, **32**(4): 92-95, 105.
吴帆. 移相全桥 ZVS 软开关 DC-DC 稳压电源的设计与分析 [J]. 通信电源技术, 2015, **32**(4): 92-95, 105.
- [15] Blank M, Gluck T, Kugi A, et al. Digital slew rate and s-shape control for smart power switches to reduce EMI generation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, **30**(9): 5170-5180.
- [16] Li R J. Study on inhibition of DC/DC EMI converter based on FPGA[J]. *Popular Science & Technology*, 2013, **15**(10): 72-74.
李瑞娟. 基于 FPGA 的 DC/DC 变换器 EMI 抑制研究 [J]. 大众科技, 2013, **15**(10): 72-74.
- [17] Cao C C, Zeng Y, Zhao J Z, et al. A kind of MLVDS driver with transition-time controlled in certain range[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2016, **52**(2): 45-49.
曹成成, 曾云, 赵建中, 等. 一种转换时间可范围控制的 MLVDS 驱动器 [J]. 计算机工程与应用, 2016, **52**(2): 45-49.
- [18] Lee S S, Saad A, Lee L, et al. On-chip slew-rate control for low-voltage differential signalling (LVDS) driver[C]//*Proceedings of 2014 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, Kuching, Malaysia, 2014: 99-101.
- [19] Pelley P H. Voltage boosting system with slew rate control and method thereof: US8120412[P]. 2012-02-21.
- [20] Kannan K. Adaptive slew rate control for switching power devices: US9614517B2[P]. 2017-04-04.
- [21] Fan X, Dhanasekaran V. Slew rate control boost circuits and methods: US9467098[P]. 2016-10-11.
- [22] Wu X Y, Wang X Y. Interface circuit and achievement method for limiting output port voltage slew rate: CN103066988B[P]. 2015-07-01.
吴晓勇, 王新亚. 一种限制输出端口电压摆率的接口电路及其实现方法: CN103066988B[P]. 2015-07-01.

The application of low-noise DC-DC power source in fiber-optic gyroscope system

Chen Xian^{1,2}, Yang Jianhua^{1,2*}, Zhou Yilan^{1,2}, Shu Xiaowu^{1,2}

¹College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

²State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation (Zhejiang University), Hangzhou, Zhejiang 310027, China



Comparison test scheme of the FOG performance under different power noise conditions

Overview: The fiber-optic gyroscope (FOG), is a precise angular velocity sensor. In its work, weak electrical signal has been produced and acquired, so noise of power supply may interfere in the circuit of FOG and reduce its performance. DC-DC converter is normal power supply of FOG, and its noise can be divided into two parts, ripple wave and spike noise. The ripple wave is easy to be reduced by power filter, but spike noise is hard to be suppressed because of its high frequency and radiation characteristic. The spike noise can interfere into the signal acquisition circuit and mix into acquisition result due to the spectrum aliasing. Spurious triggering of FOG digit circuit may also come out as a result of serious spike noise. The spike noise comes from high harmonic signals of switch devices. Switch devices generate square wave signal and its spectrum covers from low frequency to high frequency. The signals above the order of 10 MHz always remains after rectification and filtration and spike noise is combination of these high harmonic signals in time domain. So preventing the generation of high harmonic signals is the key to reduce spike noise. Soft-switching technology can be used to reduce spike noise but the result is still unsatisfactory. Slew rate control technology is a good way to reduce and eliminate spike noise. Slew rate determines the bandwidth of signal, and less high harmonic signals will be generated if slew rate has been controlled as expected. So slew rate control is the suitable technical route for low-noise power supply for FOG system. After taking use of slew rate controlled DC-DC Controller, the low noise power module has been designed and developed. The power module consists of DC-DC circuit and LDO circuit, and the slew rate of DC-DC circuit has been controlled so that the spike noise was eliminated successfully. The oscilloscope with analog bandwidth of 200 MHz was used to test the noise characteristic of the developed power module, and the peak-to-peak noise value was tested to be about 1mV in the full bandwidth, which is obviously low compared with the normal DC-DC converter. Experiment has been designed to test the performance of FOG system after using the low noise power module. Two typical FOG products were tested, and the noise performance improvement of FOG output was 3.1% and 4.4%. A conclusion can be drawn that low-noise power module is beneficial for the performance of FOG.

Citation: Chen X, Yang J H, Zhou Y L, *et al.* The application of low-noise DC-DC power source in fiber-optic gyroscope system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(1): 170517

*E-mail : xxianhua@zju.edu.cn