

基于 MEMS 陀螺辅助增大闭环光纤陀螺动态范围的方法

张勇刚, 孙娜, 李宁, 梁宏

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 闭环光纤陀螺的动态范围随着精度的提高而下降, 为了增大闭环光纤陀螺动态范围, 提出了一种基于 MEMS 陀螺辅助的增大闭环光纤陀螺动态范围的方法, 利用 MEMS 陀螺量程大的特点, 将 MEMS 陀螺与光纤陀螺测得的角速率作差, 依据该差值判断光纤陀螺工作的干涉级数, 从而对光纤陀螺输出加以修正, 使光纤陀螺准确工作在多级干涉条纹。仿真表明, 提出的方法能够有效的增大闭环光纤陀螺动态范围, 提高闭环光纤陀螺的量程。

关键词: 光纤陀螺; 动态范围; MEMS 陀螺

中图分类号: V245.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)09-3070-05

Method of increasing the dynamic range of closed-loop fiber optic gyroscope based on aided MEMS gyroscope

Zhang Yonggang, Sun Na, Li Ning, Liang Hong

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The dynamic range of closed-loop fiber optic gyroscope (FOG) decreases with the accuracy improvent of FOG improving. Based on aided MEMS gyroscope, a method of increasing the dynamic range of closed-loop FOG was present in this paper. This method makes full use of the large-scale characteristics of MEMS gyroscope. According to the difference of detected angular velocity between MEMS gyroscope and FOG, the interference of series can be judged, which makes FOG work in multistage interference fringe through correcting the output by judging interference of series. The simulation results show that the proposed method can increase the dynamic range of closed-loop FOG effectively.

Key words: FOG; dynamic range; MEMS gyroscope

收稿日期: 2014-01-05; 修订日期: 2014-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(61001154, 61201409, 61371173); 中国博士后科学基金(2013M530147);

黑龙江省博士后基金(LBH-Z13052); 哈尔滨工程大学中央高校基本科研业务费专项基金(HEUCFX41307)

作者简介: 张勇刚(1981-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事高精度光纤陀螺、惯性导航、组合导航等方面的研究。

Email: zhangyg@hrbeu.edu.cn

0 引言

光纤陀螺是基于 Sagnac 效应的角速率传感器,具有全固态结构、抗冲击振动、动态范围大、频带宽、易于数字化实现等优点^[1]。但是随着光纤陀螺精度的提高,动态范围将下降,影响了在某些对陀螺动态范围要求较高领域的应用,如航空等大角速率应用环境^[2]。因此,扩大光纤陀螺动态范围对于提高其在高精度、大角速率条件下的应用尤为重要。

目前提出的扩大光纤陀螺动态范围的方法有两种。第一种是双敏感环法,通过外加一个高量程、低灵敏度的从光纤陀螺来提高主光纤陀螺的量程,但这种方法理论上可行,实际操作比较困难,不易实现,没有得到普遍应用^[2]。第二种方法是利用数字锁相环技术来扩大开环光纤陀螺动态范围。但该方法只适用于开环陀螺,扩大动态范围意味着标度因数精度下降,实际中并不没有得到应用^[3]。目前为避免大角速率条件下所造成的误差影响,在实际操作中要求陀螺启动时在第一级干涉条纹中,同时,闭环工作中,最大输入角加速度不能超出一定值,这样的约束条件限制了其实际应用^[4]。

为了增大高精度闭环光纤陀螺的动态范围,提高其在大角加速度输入信号环境下的实用性,文中提出了一种基于 MEMS 陀螺辅助的增大闭环光纤陀螺动态范围的方法,利用 MEMS 陀螺输出信息,判断闭环光纤陀螺输出对应的干涉条纹级数,修正闭环光纤陀螺输出,从而提高其动态范围。仿真表明,在保持闭环光纤陀螺精度的前提下,文中所提出的方法能够使得闭环光纤陀螺的动态范围扩展到 MEMS 陀螺的测量范围,且能够应用于存在大角加速度输入的环境中。

1 闭环光纤陀螺控制系统模型及仿真

1.1 数字闭环光纤陀螺系统模型

陀螺最小系统由光路和电路组成。光路包括 ASE 光源、耦合器、Y 波导、光纤环、光电探测器,电路包括前置放大电路、A/D 转换、D/A 转换和以 FPGA 芯片为核心的数字处理电路^[5]。

数字闭环光纤陀螺的模型如图 1 所示。光纤陀螺的工作原理基于 Sagnac 效应,即当光纤环转动

时,输入角速率 Ω ,在两束反向传播的光束中会产生一个相位差 $\Phi_s = \frac{4\pi lr}{\lambda c_0} \Omega$,即 Sagnac 相移。其中, l 为光纤环的长度; r 为光纤环半径; λ 为光源波长; c_0 为光传播速度。为了增大陀螺的检测灵敏度,通常对陀螺施加幅值为 $\frac{\pi}{2}$ 的方波进行调制,这样检测光强与相位差的关系为 $I = I_0 (1 + \cos\Delta\Phi)$,其中, I_0 为光源光强; $\Delta\Phi = \Phi_s - \Phi_f \pm \frac{\pi}{2}$, Φ_s 为 Sagnac 相移, Φ_f 为反馈相位。光电探测器通过跨阻抗放大器将光信号转化为电信号,光电探测器比例系数为 K_2 ,电信号经过进一步的信号处理包括放大、隔直、滤波等环节,前置放大系数为 K_3 ,然后经过 A/D 转换在 FPGA 中进行数字解调、数字积分后形成相位台阶信号作为陀螺的输出 $C(z)$,同时对台阶信号再进行一次数字积分形成相位阶梯波,然后通过 D/A 转换后和方波调制信号一起施加到后置放大驱动器上,后置放大驱动的比例系数为 K_4 。驱动器将电压信号施加到 LiNiO₃ 晶体(Y 波导)上进行相位调制,使光纤陀螺工作在灵敏度最高的零相位状态下,这样就构成了全数字闭环结构^[6]。

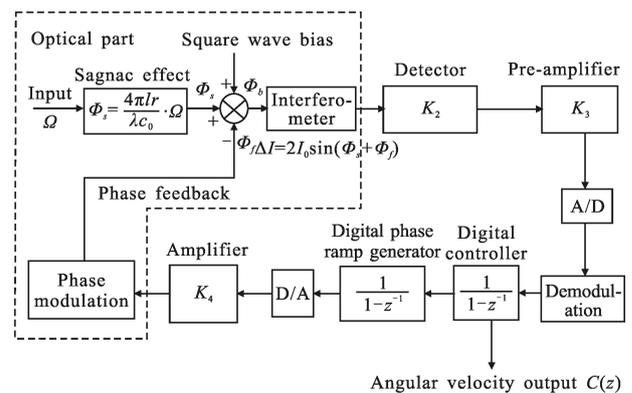


图 1 数字闭环光纤陀螺的系统模型

Fig.1 System model of digital closed-loop FOG

为了分析闭环光纤陀螺系统对不同输入角速率的响应,将模型简化为结构图的形式,如图 2 所示。

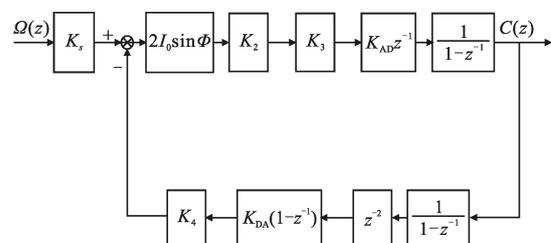


图 2 数字闭环光纤陀螺的结构框图

Fig.2 Structure chart of closed-loop FOG

图 2 中, $K_s = \frac{4\pi lr}{\lambda c_0}$ 为 Sagnac 效应比例系数; K_{AD} 和 K_{DA} 分别为 A/D 转换和 D/A 转换的比例系数; z^{-1} 和 z^{-2} 分别为 A/D 转换和系统电路延迟量, 后置放大驱动及铌酸锂相位调制过程可以表示为一个比例微分过程, 即 $K_4(1-z^{-1})$ 。

由光纤陀螺原理可知^[7], 光纤陀螺测量角速率的本质是测量光相位, 通过对干涉光强的测量获得 Sagnac 相移, 并由 $\Phi_s = \frac{4\pi lr}{\lambda c_0} \Omega$ 推算出角速率 Ω 。然而相邻两个半周期的干涉信号的差值 $\Delta I = 2I_0 \sin \Phi_s$, 与 Sagnac 相移呈正弦函数的关系, 为周期函数, 如下所示

$$\Delta I = 2I_0 \sin \Phi_s = 2I_0 \sin(\Phi_s' + 2m\pi) = 2I_0 \sin \Phi_s' \quad (1)$$

式中: Φ_s' 在 $-\pi \sim \pi$ 内。当转速对应的 Sagnac 相移在 $-\pi \sim \pi$ 以内时, 闭环光纤陀螺输出正确。然而当转速超出了 $\pm\pi$ 对应的 $\pm\Omega_\pi$ 范围, 光纤陀螺工作在第 m 级干涉条纹处 ($m = \pm 1, \pm 2, \dots$), 即真实 Sagnac 相移 Φ_s 与测量的 Sagnac 相移 Φ_s' 关系为 $\Phi_s = \Phi_s' + 2m\pi$, 由此测得的 Φ_s' 在 $-\pi \sim \pi$ 内, 即 $\Phi_s' = \Phi_s - 2m\pi$, 与此相对应, 测得的转速 $\Omega_{测}$ 与真实的转速 $\Omega_{真实}$ 关系为 $\Omega_{测} = \Omega_{真实} - 2m\Omega_\pi$, 产生较大的误差, 因此一般闭环光纤陀螺的动态范围为 $\pm\Omega_\pi$ 。随着闭环光纤陀螺精度的提高, 其对应的最大测量角速率 $\pm\Omega_\pi$ 减小, 量程减小。下面分别以阶跃输入响应和斜坡输入响应仿真来说明光纤陀螺超出量程时的输出误差。

1.2 光纤陀螺阶跃输入响应仿真

取目前高精度光纤陀螺典型参数: 光源波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 光纤环的长度 $l = 3000 \text{ m}$, 光纤环半径 $r = 0.1 \text{ m}$, 光速 $c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。则

$$\Omega_\pi = \frac{\lambda c_0}{4\pi lr} \cdot \pi \cdot \frac{180}{\pi} = 22.21(^\circ)/s \quad (2)$$

则该光纤陀螺测量范围为 $-22.21 \sim 22.21(^\circ)/s$ 。光功率 $I_0 = 10 \mu\text{W}$; $T = \tau/2$, 其中 τ 为渡越时间; 采样时间为 $T_0 = 10^{-5} \text{ s}$; 保偏光纤折射率 $n = 1.5$; 光电探测器的跨阻抗 $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$; 光电探测器的响应度 $a = 0.85 \text{ A/W}$; Y 波导半波电压 $V_\pi = 4.1 \text{ V}$; A/D 为 12 位; D/A 是 16 位, 16 位数字量转换的模拟电压对应的相位差为 2π 。

若输入阶跃信号, 稳定角速率为 $50(^\circ)/s > \Omega_\pi$, 其输出响应如图 3 所示, 系统输出稳态值与真实值相差 $-2\Omega_\pi$ 。

实际应用中, 一般不会出现阶跃输入的情况, 下

面分析斜坡输入条件下光纤陀螺的输出。

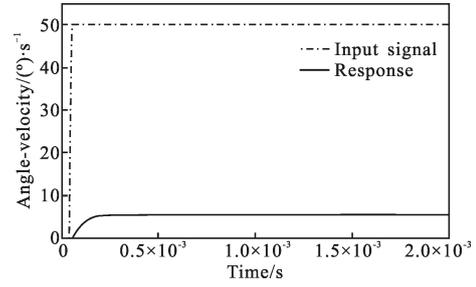


图 3 光纤陀螺阶跃输入响应

Fig.3 Step response of fiber optic gyroscope

1.3 光纤陀螺斜坡输入响应仿真

为了便于分析, 笔者将 $I = 2I_0 \sin(\Phi_s - \Phi_f)$ 近似看成线性环节, 由光纤陀螺系统的结构图 2 可知, 系统的传递函数为:

$$\Phi(z) = \frac{C(z)}{\Omega(z)} = \frac{K_s K_M}{z - 1 + K_s K_M z^{-2}} \quad (3)$$

其中, $K_M = 2I_0 K_2 K_3 K_{AD}$ 。

其误差传递函数表示为:

$$E(z) = \frac{z - 1 + K_s K_M z^{-2} - K_s K_M}{z - 1 + K_s K_M z^{-2}} \quad (4)$$

当输入角加速度为 ω' 的斜坡信号时, 则其相位误差最终稳态值为:

$$\begin{aligned} \varphi_e(z) &= \lim_{z \rightarrow 1} E(z) \cdot K_s \cdot \frac{\omega' T_0 z}{(z-1)^2} \cdot (1-z^{-1}) = \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z - 1 + K_s K_M z^{-2} - K_s K_M}{z - 1 + K_s K_M z^{-2}} \cdot \frac{K_s \omega' T_0 z}{(z-1)^2} \cdot (1-z^{-1}) = \\ &= \frac{1 - 2K_s K_M}{K_M} \cdot T_0 \omega' \end{aligned} \quad (5)$$

由上节分析可知, 当相位误差 $\varphi_e = \Phi_s - \Phi_f$ 超出了 $-\pi \sim \pi$ 时, 测得的 I 将不能正确反映 $\Phi_s - \Phi_f$ 的大小, 系统不能准确反映输入信号, 测得的 Φ_s' 与真实 Φ_s 相差 $\pm 2m\Omega_\pi$ ($m = 1, 2, \dots$); 当相位误差 φ_e 在 $-\pi \sim \pi$ 范围内时, 系统最终可以跟踪上系统输入角速率。因此, 系统可以准确响应输入信号的最大角加速度 ω_{\max}' 为 $\varphi_e = \pm\pi$ 时对应的角加速度值。将 $\varphi_e = \pm\pi$ 代入公式(5)可得

$$\omega_{\max}' = \pm \frac{K_M}{T_0(1 - 2K_s K_M)} \cdot \pi \quad (6)$$

取上小节仿真所用参数, 得 $\omega_{\max}' = \pm 3492 \text{ rad/s}^2$ 。实际应用中, 最大角加速度 ω_{\max}' 还受到输入角速率稳态值影响。下面分别以不同角加速度的斜坡输入响应仿真来说明光纤陀螺的动态范围和动态误差。

仿真一: 输入信号为角加速度为 $1\ 000\ \text{rad/s}^2 < \omega_{\text{max}}$ 的斜坡输入, 且其最终稳态值为 $50\ (\text{^\circ})/\text{s}$, 其输出响应曲线如图 4(a) 所示。由仿真图可以看出, 系统最终可以跟踪上系统输入角速率。

仿真二: 输入信号为角加速度为 $4\ 000\ \text{rad/s}^2 > \omega_{\text{max}}$ 的斜坡输入, 且其最终稳态值为 $50\ (\text{^\circ})/\text{s}$, 其输出响应曲线如图 4(b) 所示。由仿真图可以看出, 系统输出最终无法跟踪上输入角速率, 且稳态时其输出角速率与实际角速率差值为 $-2\Omega_\pi$ 。

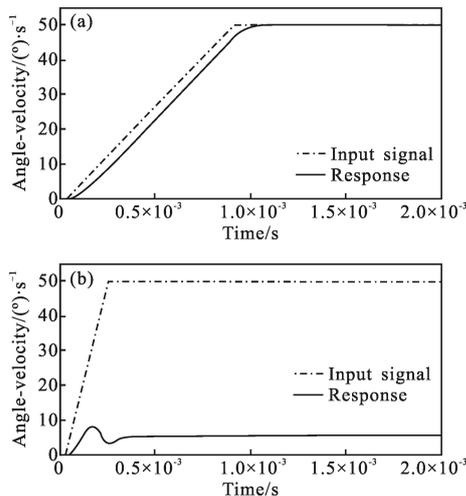


图 4 光纤陀螺斜坡输入响应

Fig.4 Ramp response of fiber optic gyroscope

在实际应用中, 当系统输入角速率大于其动态范围 $\pm\Omega_\pi$ 时, 如果存在较大的角加速度, 光纤陀螺将不能跟踪上真实角速率, 最终导致不可忽略的误差。光纤陀螺的动态范围 $\pm\Omega_\pi$ 随着精度的提高而减小, 因此增大光纤陀螺的动态范围对于高精度闭环光纤陀螺应用十分重要。下面文中将介绍一种基于 MEMS 陀螺辅助的增大闭环光纤陀螺动态范围的方法。

2 MEMS 陀螺辅助校正方案

近几年, 微机械技术迅速发展, MEMS 陀螺也随之发展起来, MEMS 陀螺拥有功耗低、体积小、成本低、测量范围大、抗冲击振动能力强等优点, 它可以应用在车载与手机这些高转速设备中。ADI 商用 MEMS 陀螺 ADIS16136 的量程可以达到 $\pm 450\ (\text{^\circ})/\text{s}$ ^[8], 远远高于高精度闭环光纤陀螺量程 (文中仿真的典型高精度光纤陀螺量程仅为 $\pm 22.21\ (\text{^\circ})/\text{s}$)。故可以利用 MEMS 陀螺体积小和大量程的特点来校正高精

度光纤陀螺超出量程后的误差。

由 1.1 节分析知, 当光纤陀螺超出规定范围时, 其稳定时输出角速率将与实际角速率相差 $\pm 2m\Omega_\pi$ ($m=0, 1, 2, \dots$), 故笔者利用 MEMS 陀螺输出 Ω_{MEMS} 与光纤陀螺输出 Ω_f 作比较, 利用其差值分析出光纤陀螺所工作的干涉级数, 并对结果加以修正, 利用该方法可将高精度光纤陀螺动态范围扩展至 MEMS 陀螺动态范围, 具体方案如图 5 所示。

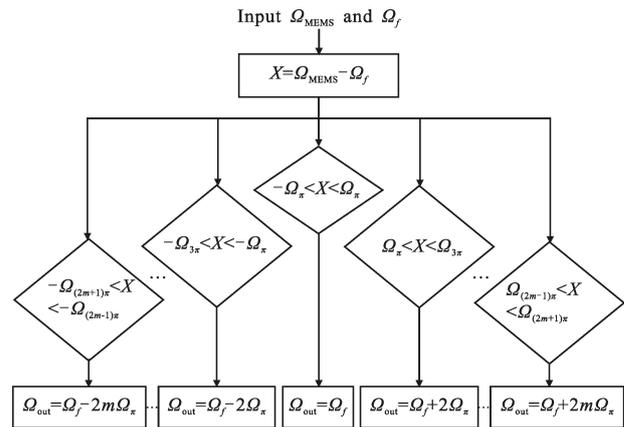


图 5 MEMS 陀螺校正方案流程图

Fig.5 Flow diagram of MEMS gyroscope correction scheme

$\Omega_{k\pi}$ 为 Sagnac 相移为 $k\pi$ 时所对应的角速率, $\pm 2m\Omega_\pi$ 为光纤陀螺的量测误差 ($m=1, 2, \dots$)。做如此的修正, 便可使光纤陀螺可以稳定跟踪上输入角速率, 减少系统误差。

3 仿真分析与讨论

为了验证文中提出方法的正确性和有效性, 笔者进行了仿真分析和讨论。高精度闭环光纤陀螺参数设置与 1.3 小节相同, 输入信号为角加速度为 $4\ 000\ \text{rad/s}^2 > \omega_{\text{max}}$ 的斜坡输入, 且其最终稳态值为 $50\ (\text{^\circ})/\text{s}$ 。MEMS 陀螺仿真模型参照参考文献 [9], MEMS 陀螺闭环检测是通过反馈静电力的作用使活动质量块在平衡位置附近振动, 从而使弹性梁形变量很小。加入校正环节后的 MEMS 陀螺闭环传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)G_f(s)} \quad (7)$$

其中,

$$G(s) = \frac{k}{ms^2 + d_y s + k_y};$$

$$G_f(s) = \frac{0.186(2.14 \times 10^{-4} s + 1)}{(2.3 \times 10^{-5} s + 1)(2.9 \times 10^{-6} s + 1)};$$

$$m=10^{-6}, d_y=10^{-3}, k_y=4, k=10^2。$$

依据上述参数设置,对基于 MEMS 陀螺辅助的增大闭环光纤陀螺动态范围的方法进行仿真,仿真结果如图 6 所示。

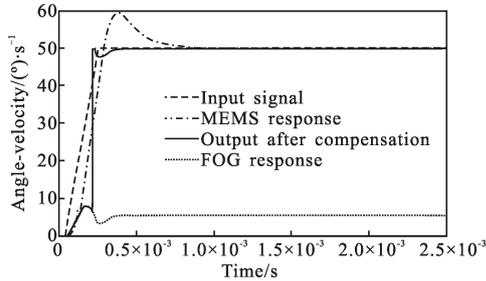


图 6 系统输出仿真曲线

Fig.6 Simulation curves of the system output

从图 6 中可以看出,通过校正之后,光纤陀螺输出响应最终可以稳定准确跟踪上输入信号。这种 MEMS 陀螺校正方法结构简单,且不改变原有的光纤陀螺的闭环系统,亦不改变原有陀螺的精度及其他指标。

在实际应用中,虽然 MEMS 陀螺的偏差漂移相对于光纤陀螺大的多,但相对闭环光纤陀螺的动态范围 $\pm\Omega_m$ 来讲较小^[10],其输出精度可以满足判断高精度光纤陀螺的干涉条纹级数的需求。且 MEMS 陀螺体积较小,安装简便,对原有高精度光纤陀螺的结构影响小。

4 结论

文中提出了一种利用 MEMS 陀螺输出信息,通过判断闭环光纤陀螺输出对应的干涉条纹级数来修正其输出,从而提高光纤陀螺动态范围的方法,并进行了仿真分析。仿真结果表明在保持闭环光纤陀螺精度的前提下,文中所提出的方法能够使得闭环光纤陀螺的动态范围扩展到 MEMS 陀螺的测量范围,合理地结合 MEMS 陀螺能进行大角速率测量的优点和闭环光纤陀螺的高精度性能,实现了在保持精度基础上扩展角速率量程的目标,可以满足高机动载体导航制

导的要求,并且成本低效益高,具有推广应用的价值。

参考文献:

- [1] Zhang Guicai. The Principles and Technologies of Fiber-Optic Gyroscope [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 2–3. (in Chinese)
- [2] Gao Feng, Wang Wei, Wang Xuefeng, et al. One kind method of increasing the range of fiber optic gyroscope: China, 101408426A [P]. Beijing Aerospace Era Electronic Corporation, 2009. (in Chinese)
- [3] Yang Chuanchuan, Wang Ziyu. Digital signal processing method and device of fiber-optic gyroscope and fiber-optic gyroscope: China, 102435186A[P]. Beijing University, 2011. (in Chinese)
- [4] Wang Wei. Interferometric Fiber Optic Gyroscope Technology [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2010: 352–363. (in Chinese)
- [5] Li Min, Song Ningfang, Zhang Chunxi, et al. Dynamic characteristic test of fiber optic gyroscope based on cross-correlation identification [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 723–727. (in Chinese)
- [6] Wang Weiqiang, Liu Jun, Lu Jun. Technology of time division multiplexing closed-loop control for three-axis fiber optic gyroscopes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 40(11): 2195–2200. (in Chinese)
- [7] Han Junliang, Ge Shengmin, Shen Yi. Research on modeling and simulation of digital closed-loop FOG [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(4): 833–836, 881. (in Chinese)
- [8] Jia Fangxiu, Qiu Anping, Shi Qin, et al. Design and experiment of micro machined vibratory gyroscope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1278. (in Chinese)
- [9] Wen Baiqian. Research on error characteristic of microminiature MEMS gyroscope [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008: 51–55. (in Chinese)
- [10] Lv Yinxi, Xiao Qianqing, Yang Liuqing. Random error modeling and compensation for MEMS gyroscope [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2012, 35(12): 42. (in Chinese)