

基于光纤稳定平台稳定回路的性能分析

李光春, 陈亚铭, 杜旭林

(哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 光纤陀螺具有结构简单、精度覆盖面广、可靠性高和使用寿命长等优势,已在众多国内外武器系统中得到应用。稳定回路在惯性平台工作过程中起着重要的作用,其性能直接影响惯性器件在惯性平台系统中发挥的精度水平。然而,现有的平台稳定回路设计方法多基于经验调节控制参数,存在运算量大且对动态指标考虑不全面等问题,通过分析光纤陀螺仪相关组件及其参数在稳定回路中的作用,对系统性能进行探讨。首先分析稳定回路的工作原理,并以内环轴为例展示其在系统中的应用。接着采用力矩平衡法建立平台绕内环轴的运动方程,逐步推导包括光纤陀螺传递函数、耦合放大器和前置放大器、校正网络及力矩电机电枢绕组等各组件。实验仿真部分基于光纤陀螺稳定回路模型,对不同参数下稳定回路的系统性能进行分析。研究结果表明改善稳定回路放大倍数,优化校正网络参数,增大力矩刚度,可以优化光纤稳定平台的动态性能。

关键词: 光纤陀螺仪;稳定回路模型;运动方程;干扰力矩;系统性能

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)10-0007-06

Performance analysis of stable loop based on fiber optic stable platform

LI Guangchun, CHEN Yaming, DU Xulin

(College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Fiber optic gyroscope has the advantages of simple structure, wide precision coverage, high reliability, and long service life, and is applied in many domestic and foreign weapon systems. The stabilizing loop plays an important role in the operation of the inertial platform, and its performance directly affects the accuracy level of the inertial device in the inertial platform system. However, existing platform stability loop design methods are mostly based on empirical adjustment of control parameters, which have problems such as large computational complexity and incomplete consideration of dynamic indicators. By analyzing the role of fiber optic gyroscope related components and their parameters in the stability loop, the system performance is explored. In this paper, the working principle of the stabilization loop is analyzed first, and its application in the system is demonstrated by taking the inner ring axis as an example. Then the motion equation of the platform around the inner ring axis is established by using the torque balance method, and the components including the transfer function of the fiber gyro, the coupling amplifier and the preamplifier, the correction network and the armature winding of the torque motor are derived step by step. The experimental simulation part is based on the stability loop model of fiber optic gyro, and the system performance of the stability loop under different parameters is analyzed. The results show that the dynamic performance of the optical fiber stabilization platform can be optimized by improving the magnification of the stability loop, optimizing the network parameters and increasing the torque stiffness.

Keywords: fiber-optic gyroscope; stability loop model; motion equation; disturbance torque; system performance

0 引言

平台惯导应用广泛,诸如航空、航天及导航等领域。相较于捷联惯导系统,平台惯导系统能更有效地隔绝角振动,进而降低动态误差,因此在诸多应用场景中具有较高的适用性^[1]。目前,为了提高精度和可靠性,一些新型敏感元件如光纤陀螺正在取代传统的气浮陀螺、液浮陀螺和挠性陀螺,成为稳定回路的主流敏感元件。光纤陀螺具有结构简单、精度覆盖面广、可靠性高和使用寿命长等优势,已在众多国内外武器系统中得到应用。然而,现有的平台稳定回路设计方法多基于经验调节控制参数,存在运算量

大且对动态指标考虑不全面等问题,因此,研究光纤陀螺惯性稳定平台系统的稳定性和精度问题,对分析稳定回路在不同参数下的性能具有重要意义。通过这一研究,将为进一步提高光纤陀螺稳定平台的精度与稳定性提供理论依据和参考。

1 稳定回路模型

1.1 稳定回路工作原理

现以内环轴(OZ)稳定回路为例,说明平台系统稳定回路的工作原理。当有一外干扰力矩 M_{d} 作用于内环轴时,平台台体绕内环轴将产生角速度 α ,同时也产生一个角度 α ,装在平台台体上作为敏感元件的陀螺将感受到这一角速度 α 。使Z陀螺仪的输出轴上产生转角 β 。于是

* 基金项目:军委装备发展部基础研究项目(51401027-302)

收稿日期:2023-11-27

装在 Z 陀螺仪输出轴上的角度传感器敏感到这个角度 β , 立即将角度 β 转换成一个与转角 β 成正比的电压信号, 这个电压信号输出给平台 OZ 轴稳定回路的耦合放大器、稳定分解器、前置放大变成直流信号, 再经稳定功率放大器变成功率电流, 这个功率电流输入到 OZ 轴力矩电机, 产生一个与外界干扰力矩相平衡的反馈力矩 $M_g^{[2]}$ 。这个反馈力矩 M_g 与干扰力矩 M_{of} 方向相反、大小相等, 使平台 OZ 轴产生一个 $-\alpha$ 角度, 抵消了由于干扰力矩 M_{of} 在平台 OZ 轴上产生的 α , 从而保证了在外加干扰力矩的作用下, 平台台体绕 OZ 轴的角度位置始终不变^[3]。因此, 平台的 3 个轴可以在干扰力矩的影响下, 相对惯性空间保持稳定。



图 1 稳定回路工作原理图

1.2 平台绕内环轴 OZ 的运动方程

考虑到扭矩电机运行在低转速状态且传动比为 1, 同时假设转角 α 和 β 为小量, 使用扭矩平衡方法并忽略作用在内环轴的阻尼力矩及二阶以上小量, 其平衡方程可以表示为

$$J_1 \ddot{\alpha} + H(\dot{\beta} + W_y) = M_{of} - M_g \quad (1)$$

可得

$$\ddot{\alpha} = \frac{M_{of}}{J_1} - \frac{M_g}{J_1} - \frac{(H\dot{\beta})}{J_1} - \frac{(HW_y)}{J_1} \quad (2)$$

式中, J_1 表示内环组合件绕平台内环轴 OZ 的转动惯量, H 表示 Z 陀螺仪的角动量, M_{of} 表示作用在内环轴 OZ 上的外干扰力矩, M_g 表示 OZ 轴稳定回路反馈力矩, W_y 表示平台台体相对于惯性空间绕台体轴 OY 的角速度。

1.3 光纤陀螺传递函数

在光纤稳定平台中陀螺在电机平衡干扰力矩这个过程中只起到角速度测量敏感元件的作用。其输出的电压信号是与陀螺敏感的角速度大小成正比的^[4]。因此, 光纤陀螺可以看成是一个比例环节, 为

$$G_{fog} = K_0 \quad (3)$$

式中, K_0 为比例系数。

1.4 耦合放大器和前置放大器

由于平台工作时陀螺仪输出的信号受传输距离以及导电滑环的电阻影响, 需要设置前置放大器对陀螺仪输出信号进行放大^[5]。

将耦合放大器与前置放大器部分作为一个整体来考虑, 其输入 V_β 和输出 V_1 的关系为

$$V_1 = K_1 K_f V_\beta + V_{10} \quad (4)$$

式中, K_1 表示耦合放大器和前置放大器总放大倍数, K_f 表示伺服分解器放大倍数, V_{10} 表示陀螺传感器输出零位电压。

1.5 校正网络

输入 V_1 和输出 V_a 的关系为

$$V_a = K_a W_a(s) V_1 + V_{a0} \quad (5)$$

式中, K_a 表示校正网络静态放大倍数, $W_a(s)$ 表示校正网络传递函数, 其分子分母最低阶次为零次, V_{a0} 表示校正网络输出零位。

1.6 功率放大器及力矩电机绕组

功率放大器的输出以力矩电机绕组为负载, 输入到这些绕组的电流的动态过程与绕组参数直接相关。考虑到作为扭矩电机的直流马达在低速运转状态下, 传动比为 1, 因此在电机运行过程中, 电枢产生的反向电动势可以忽略^[6-7]。

$$T_g \dot{I} + I = K_f V_a + I_0 \quad (6)$$

可得:

$$I = \frac{K_f V_a}{T_g} + \frac{I_0}{T_g} - \frac{\dot{I}}{T_g} \quad (7)$$

式中, T_g 表示力矩电机绕组电磁时间常数, K_f 表示功率放大器放大倍数, I_0 表示功率放大器输出零位。

力矩电机输入电流 I 与输出反馈力矩 M_g 之间的关系表达式为

$$M_g = K_g I \quad (8)$$

式中, K_g 为力矩电机放大倍数。

1.7 基于光纤陀螺稳定回路的仿真模型

将稳定回路各部分各微分方程相对其输出变量进行拉氏变换可以得到

$$W_c(S) = \frac{\frac{1}{H^2}(J_2 S + C_2)}{S(\frac{J_1 J_2}{H^2} S^2 + \frac{J_1 C_2}{H^2} S + 1)} \quad (9)$$

$$W_d(S) = \frac{\frac{H}{C_2} K W_a(S) W_g(S)}{\frac{J_2}{C_2} S + 1} \quad (10)$$

$$W_1(S) = \frac{\frac{1}{H}}{S(\frac{J_1 J_2}{H^2} S^2 + \frac{J_1 C_2}{H^2} S + 1)} \quad (11)$$

$W_2(S) = K' W_a(S) W_g(S)$, $W_a(S)$ 为校正网络, 其中,
 $W_g(S) = \frac{1}{T_g S + 1}$, $K' = K_\beta K_1 K_f K_a K_i K_g$ 。

进而平台系统稳定回路可等效如图2所示。

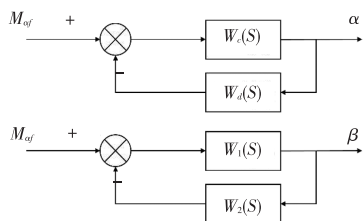


图2 平台稳定回路等效转换图

根据开环传递函数 $W(S)$ 和闭环传递函数 $\varphi_\alpha(S)$, $\varphi_\beta(S)$ 的关系表达式为

$$W(S) = W_c(S) W_d(S) = W_1(S) W_2(S) \quad (12)$$

$$\varphi_\alpha(S) = \frac{\alpha}{M_{\alpha f}} = \frac{W_c(S)}{1 + W_c(S) W_d(S)} \quad (13)$$

$$\varphi_\beta(S) = \frac{\beta}{M_{\beta f}} = \frac{W_1(S)}{1 + W_1(S) W_2(S)} \quad (14)$$

可得出平台系统稳定回路的开环传递函数 $W(S)$ 的表达式为

$$W(S) = \frac{\frac{1}{H} K' W_a(S) W_g(S)}{S \left(\frac{J_1 J_2}{H^2} S^2 + \frac{J_1 C_2}{H^2} S + 1 \right)} \quad (15)$$

平台系统稳定回路输入 $M_{\alpha f}$ 与台体 Z 陀螺输出轴转角 α 的误差传递函数 $\varphi_\alpha(S)$ 为

$$\varphi_\alpha(S) = \frac{1}{H} \left[S \left(\frac{J_1 J_2}{H^2} S^2 + \frac{J_1 C_2}{H^2} S + 1 \right) + \frac{1}{H} K' W_a(S) W_g(S) \right]^{-1} \quad (16)$$

进而可得平台系统稳定回路输入 $M_{\alpha f}$ 与平台内环轴输出转角 (偏差角) α 的误差传递函数 $\varphi_\alpha(S)$ 为

$$\varphi_\alpha(S) = \frac{1}{H^2} (J_2 S + C_2) \left[S \left(\frac{J_1 J_2}{H^2} S^2 + \frac{J_1 C_2}{H^2} S + 1 \right) + \frac{1}{H} K' W_a(S) W_g(S) \right]^{-1} \quad (17)$$

2 稳定回路力矩刚度

基于光纤陀螺稳定回路的其力矩刚度的传递函数 $K_c(S)$ 计算公式为

$$K_c(S) = \frac{M_{\alpha f}}{\alpha} = \varphi_\alpha^{-1}(S) = \frac{J_1 S^2 (T_g S + 1) + K' S W_a(S)}{T_g S + 1} \quad (18)$$

由于实践证明平台力矩电机的时间常数 T_g 很小, 故在此后将其省略。

当 $S \rightarrow 0$ 时, 静态刚度为

$$K_c(S) = J_1 S^2 + K' S W_a(S) \quad (19)$$

式中, K' 为回路中所有电气部分总的放大系数, 它包括耦合放大器、前置放大器、校正网络、功率放大器和直流力矩电机的放大倍数。 $W_a(S)$ 为平台系统稳定回路的校正网络的传递函数。由以上分析计算可知, 如果想达到消除系统稳态误差的目的, 由光纤陀螺作为敏感元件构成稳定回路时, 为了确保系统在受到恒定干扰力矩作用下, 平台不产生偏差角并实现相对惯性空间的稳定性, 需要在回路中引入积分环节。

设

$$W_a(S) = W'_a(S) / S \quad (20)$$

当 $S \rightarrow 0$ 时, $W'_a(S) = 1$, 则静态刚度为

$$K_c(0) = K' \quad (21)$$

动态力矩刚度就是平台系统在动态干扰力矩的作用下, 平台系统稳定回路保持小偏差角的能力^[8]。由于动态力矩刚度与干扰力矩的频率大小有关, 因此动态力矩刚度分为低频、中频和高频几种情形来讨论。

1) 低频干扰力矩的动态力矩刚度

此时动态力矩刚度可以简化为

$$K_c(S) = J_1 S^2 + K' S W_a(S) \quad (22)$$

比较静态力矩刚度的公式, 当 $S \rightarrow 0$ 时, 两式接近。

即: 当平台系统受到低频干扰力矩的影响时, 系统稳定回路的动态扭矩刚度与静态扭矩刚度相近。平台系统稳定回路此时的抗干扰能力, 主要由电路部分和校正网络部分来承担。因此式(22)也成了平台系统稳定回路精度设计的依据。

2) 中频干扰力矩时的动态力矩刚度

中频干扰力矩处于系统的通频带内, 此时平台系统稳定回路具有很好的控制和调整能力, 可以提供准确的控制力矩, 快速抵消干扰力矩的作用。因此, 此时 $M_{\alpha f} = M_g$, 此时动态力矩刚度可写为

$$K_c(S) = \frac{M_{\alpha f}}{\alpha} = \frac{M_g}{\alpha} \quad (23)$$

3) 高频干扰力矩时的动态力矩刚度

此时 S 较大, $J_1 S^2 \gg K' S W_a(S)$, 则动态力矩刚度可写为

$$K_c(S) = \frac{M_{\alpha f}}{\alpha} = J_1 S^2 \quad (24)$$

观察上式的右边, 在高频时其值很大。即在高频干扰时, 平台系统稳定回路的动态力矩刚度很大。这说明在高频干扰时, 平台系统稳定回路有抗干扰能力。这个能力来源于平台结构参数 J_1 。

3 稳定平台误差分析

3.1 考虑校正网络参数

系统开环传递函数如下:

$$W(S) = \frac{K'}{J_1 S (T_g S + 1)} \quad (25)$$

式中, $K' = 1\ 000$, $T_g = 5.7e^{-4}$, $J_1 = 0.03$ 。

根据系统稳态误差指标要求,依据式(25)可知, $K' = 1\ 000$ 。将各项参数代入开环传递函数,可以得出如图3所示的稳定回路固有部分的开环伯德图,此部分所形成的系统的相位裕度为 13.1° 。因此无校正网络的稳定回路是不满足设计要求的。

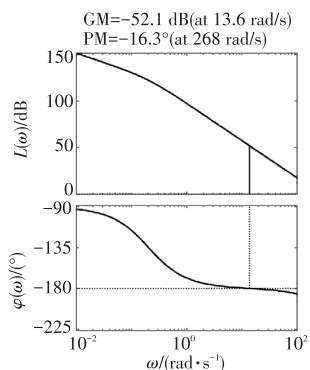


图3 未加校正网络的开环传递函数伯德图

将各参数代入开环传递函数

$$G(S) = \frac{49\ 366.66}{5.7 \times 10^{-4} S^2 + S} \quad (26)$$

对稳定回路进行串联超前校正,其传递函数为

$$G_c(S) = \frac{1 + aTS}{1 + TS} \quad (27)$$

式中, T 和 a 分别是时间常数和分度系数。

利用超前校正网络的相位超前可以增加系统的相位裕度,进而优化系统的瞬态响应。相角裕度越大调节时间越长,用滞后校正会减小剪切频率,最终会导致调节时间变大,不满足指标要求,故没有选择使用。

继而可以推导超前网络的相位表达式为

$$\varphi_{cq}(S) = \arctg \frac{(a-1)T\omega}{aT^2\omega^2 + 1} \quad (28)$$

令 $d\varphi_{cq}/d\omega = 0$, 则 $\omega_{max} = \frac{1}{T\sqrt{a}}$ 。所以最大超前相角为

$\varphi_{max} = \arcsin \frac{a-1}{a+1}$, 由此可以看出最大超前角随着 a 增大而增大。

一般取最大超前角频率 ω_{max} 等于截止频率 W_c , 实际中 a 一般不能超过 20。则由时间常数与最大超前角频率关系为

$$T = \frac{1}{W_{max}\sqrt{a}} \quad (29)$$

可计算得 $T = 0.004\ 3$, 进而得超前校正网络为

$$G_c(S) = \frac{0.029\ 4S + 1}{0.004\ 3S + 1} \quad (30)$$

对添加超前校正网络的稳定回路进行仿真得其开环伯德图如图4所示。

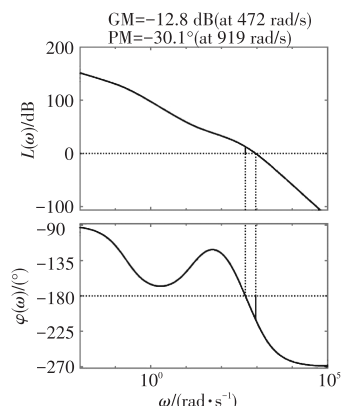


图4 添加校正网络的开环传递函数伯德图

通过仿真可以看出加入超前校正后的系统开环相角裕度无法达到系统指标要求。

为了进一步提高系统的稳态性能,对稳定回路采用滞后校正,其结构为

$$G_{c2}(S) = \frac{1 + TS}{1 + aTS}$$

为了提高开环截止频率,设定 $T = 0.011$, 进而确定了超前滞后校正网络的传递函数为

$$G_c(S) = \frac{(0.03S + 1)(0.011S + 1)}{(0.004S + 1)(10S + 1)} \quad (31)$$

对于加入超前滞后校正网络的稳定回路,仿真结果表明其开环伯德图如图5所示。

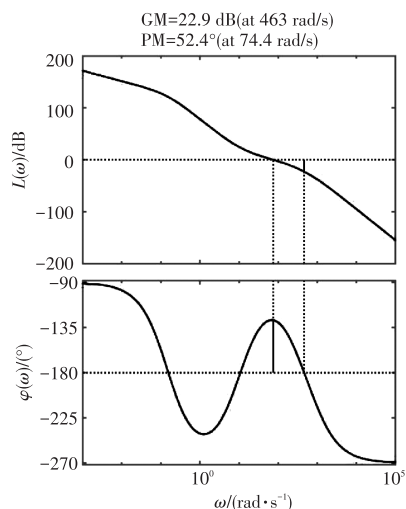


图5 添加超前滞后校正网络的开环传递函数伯德图

通过仿真可以看出加入超前滞后校正后的系统满足要求。

3.2 考虑回路放大倍数

当回路放大倍数为 $K' = 1\ 000$, 外干扰力矩 M_{ef} 为 $0.1\ N \cdot m$, 校正网络参数不变。反馈力矩平衡外干扰力矩状态如图6所示。

当回路放大倍数为 $K' = 1\ 000$, 外干扰力矩 M_{ef} 为 $0.1\ N \cdot m$, 校正网络参数不变。平台误差如图7所示。

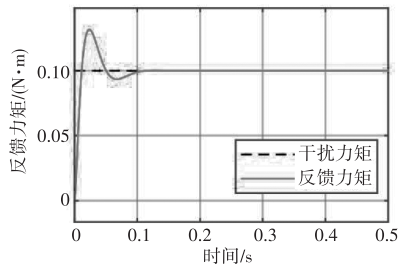


图6 反馈力矩平衡外干扰力矩

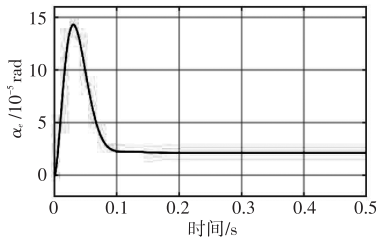


图7 平台角响应曲线

当回路放大倍数为 $K' = 1\ 500$, 外干扰力矩 M_{of} 为 $0.1\ \text{N} \cdot \text{m}$, 校正网络参数不变。反馈力矩平衡外干扰力矩状态如图8所示。

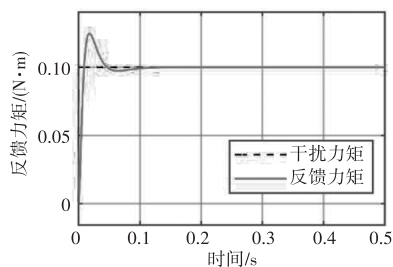


图8 反馈力矩平衡外干扰力矩

当回路放大倍数为 $K' = 1\ 500$, 外干扰力矩 M_{of} 为 $0.1\ \text{N} \cdot \text{m}$, 校正网络参数不变。平台框架角误差曲线如图9所示。

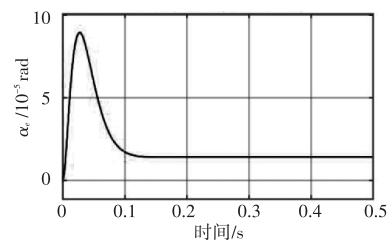


图9 平台角响应曲线

当回路放大倍数为 $K' = 1\ 000$, 外干扰力矩 M_{of} 幅值为 $0.1\ \text{N} \cdot \text{m}$, 频率为 $2.5\ \text{Hz}$ 的正弦信号, 反馈力矩平衡外干扰力矩状态如图10所示。

当回路放大倍数为 $K' = 1\ 000$, 外干扰力矩 M_{of} 幅值为 $0.1\ \text{N} \cdot \text{m}$, 频率为 $2.5\ \text{Hz}$ 的正弦信号, 平台误差如图11所示。

当回路放大倍数为 $K' = 1\ 500$, 外干扰力矩 M_{of} 幅值为 $0.1\ \text{N} \cdot \text{m}$, 频率为 $2.5\ \text{Hz}$ 的正弦信号, 反馈力矩平衡

外干扰力矩状态如图12所示。

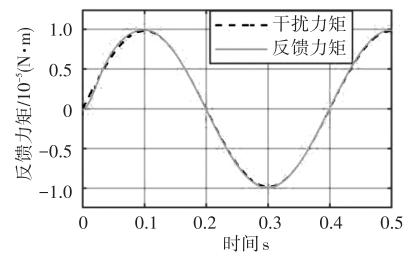


图10 反馈力矩平衡外干扰力矩

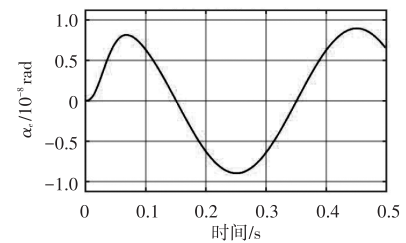


图11 平台角响应曲线

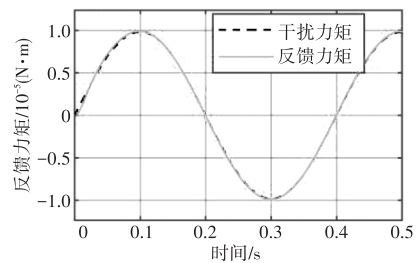


图12 反馈力矩平衡外干扰力矩

当回路放大倍数为 $K' = 1\ 500$, 外干扰力矩 M_{of} 幅值为 $0.1\ \text{N} \cdot \text{m}$, 频率为 $2.5\ \text{Hz}$ 的正弦信号, 平台框架角误差曲线如图13所示。

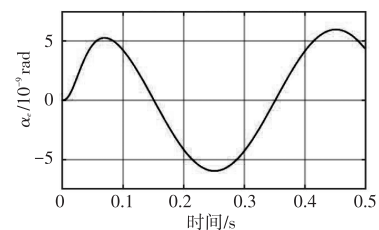


图13 平台角响应曲线

由仿真图可知, 当施加不同常值及正弦变化的外干扰力矩时, 当回路放大倍数(力矩刚度)越大, 平台稳态误差越小, 并且反馈力矩能够有效平衡外干扰力矩, 系统调节时间满足指标要求。

3.3 光纤陀螺稳定回路特性分析

在惯性稳定平台中, 光纤陀螺仪作为速率环的反馈器件, 其反馈信号可能受到随机误差的影响, 从而可能降低系统的稳定性能。通过低频增益抑制光纤陀螺仪随机误

(下转第114页)