

文章编号: 1672-8785(2012)03-0034-05

光电系统中挠性陀螺闭环和开环应用效果的对比分析

王正林

(91404 部队, 河北 秦皇岛 066001)

摘 要: 阐述了挠性陀螺的闭环和开环两种应用方式, 并从力矩刚度的角度分析了系统在两种模式下的稳定性。理论分析表明, 在陀螺闭环应用时, 系统的力矩刚度会受到陀螺带宽的限制; 在陀螺开环应用时, 系统的力矩刚度不受陀螺带宽的限制而会大大增加。仿真与试验结果表明, 陀螺开环应用效果要好于陀螺闭环应用效果, 提高了系统的力矩刚度, 改善了系统的稳定性。该结果证明了理论分析的正确性, 对工程应用具有一定的指导作用。

关键词: 挠性陀螺; 开环; 闭环; 力矩刚度

中图分类号: E920 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.03.007

Effectiveness Comparison between Close Loop Mode and Open Loop Mode for Flexible Gyroscope of Electro-optical System

WANG Zheng-lin

(Unit 91404 of PLA, Qinghuangdao 066001, China)

Abstract: Two different application modes of flexible gyroscopes, i.e. open loop and close loop, are presented. The stability of a system in both application modes is analyzed in terms of torque rigidity. In theory, the torque rigidity of a system is limited by the bandwidth of the gyroscope when it operates in the close loop mode. In the open loop mode, the torque rigidity of the system is not limited by the bandwidth of the gyroscope and can be increased greatly. The simulation and test result shows that the open loop mode is more effective than the close loop mode for a gyroscope. It can improve the torque rigidity and stability of the system. This result validates the correctness of the theoretical analysis.

Key words: flexure gyroscope; open loop; close loop; torque rigidity

0 引言

挠性陀螺由于具有体积小、重量轻、可靠性高和成本低等优点而被广泛应用于各类光电稳定系统中。通过用挠性陀螺隔离摇摆、颠簸和振动等因素造成的影响, 可以使光电系统的瞄准线保持稳定。挠性陀螺由陀螺转子、挠性接头、驱动电机、信号传感器和力矩器等部件组成。通

过对信号传感器的输出信号进行不同的处理, 可以相对地产生闭环和开环两种使用方法。本文从力矩刚度的角度出发, 分析了系统在两种应用方式下的稳定性能, 并进行了相应的仿真和试验验证。

1 挠性陀螺的开闭环应用

1.1 闭环应用

收稿日期: 2012-01-14

作者简介: 王正林 (1970-), 男, 四川安岳人, 高级工程师, 主要从事光电对抗试验工作。E-mail: qawsett@21cn.com

当平台或载体转动时, 陀螺信号器测出其转角并输出电信号。电信号经过选频放大、解调滤波、陷波和功率放大等环节后被转换成电流信号, 并被加给力矩器。然后力矩器使陀螺转子轴进动, 其进动方向与平台或载体的转动方向一致, 直至两者之间的偏差角为零。作用到力矩器上的电流通过采样电路后被转换成电压信号输出, 其大小与平台或载体转动的角速率成正比, 这就是挠性陀螺测速的原理^[1], 如图1所示。

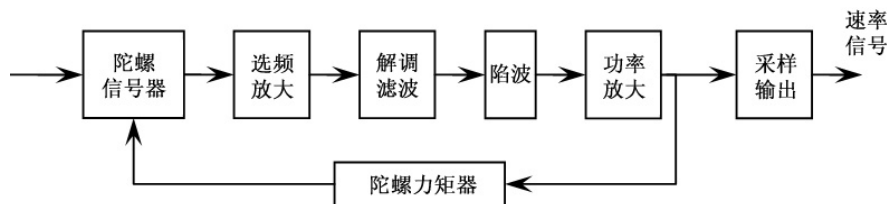


图1 陀螺的闭环工作模式

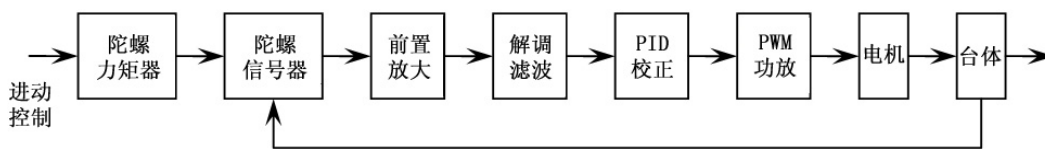


图2 陀螺的开环工作模式

2 理论分析

2.1 陀螺闭环的稳定性分析

在光电系统中, 稳定控制回路经常采用在

陀螺速度环内增加电流环的设计方法, 如图3所示。其中, 电流环的作用是提高系统的响应速度和稳定性。

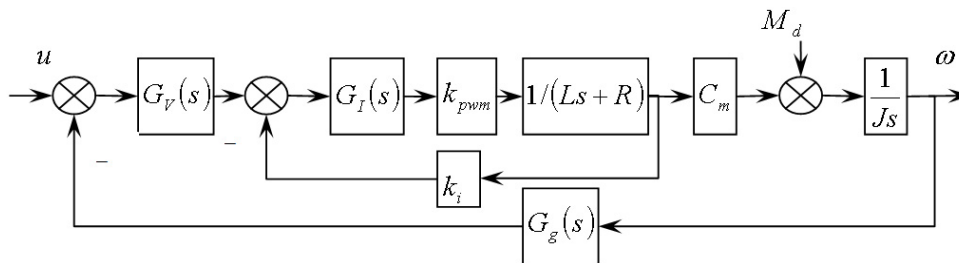


图3 带电流环的稳定环控制结构

图3中, $G_v(s)$ 为速度校正, k_{pwm} 为PWM功率放大倍数, L 为电机的电容, R 为电机的电阻, C_m 为电机的转矩系数, J 为电机和负载的转动惯量, k_i 为电流反馈系数, M_d 为扰动力矩, $G_g(s)$ 为陀螺输出模型, ω 为平台输出角

速度。在系统设计中, 电流环具有很大的带宽, 使得电流环闭环传递函数可以等效于比例环节 $1/k_i$ 。挠性陀螺闭环时可等效于二阶振荡模型^[2], 即

$$G_g(s) = \frac{k_g \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

式中, k_g 为陀螺的传递系数, ω_n 为陀螺的带宽, ξ 为阻尼系数。图 4 所示为经过简化的陀螺闭环时的稳定环控制模型。

我们可以求出系统的力矩刚度^[3] 为

$$\begin{aligned} S(s) &= \frac{M_d}{\theta(s)} = \frac{M_d}{\omega(s)/s} \\ &= Js^2 + G_V(s) \frac{C_m}{k_i} \frac{k_g \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} s \end{aligned} \quad (2)$$

为了使系统的静态力矩刚度 $S(0)$ 大于 0, 速度校正 $G_V(s)$ 中必须包含一个积分环节, 所以速度环一般采取 PI 校正, 即 $G_V(s) = k_p + \frac{k_I}{s}$ 。此时, 系统的静态力矩刚度为

$$S(0) = \frac{C_m k_I k_g}{k_i} \quad (3)$$

式 (3) 表明, 在陀螺闭环应用时, 系统的静态力矩刚度不仅与电机和陀螺等的系统参数有关, 而且还与系统校正时的积分项系数 k_I 和电流反馈系数 k_i 有关。通过增大积分项系数 k_I 或减小电流反馈系数 k_i , 可以提高系统的静态力矩刚度。但由于受稳定性条件的约束, 系统力矩刚度

的提高受到限制。稳定控制系统的闭环传递函数为

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{\omega}{u} \\ &= \frac{k_1 (k_p s + k_I) (s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)}{s^4 + 2\xi\omega_n s^3 + \omega_n^2 s^2 + k_1 k_g k_p \omega_n^2 s + k_1 k_g k_I \omega_n^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $k_1 = \frac{C_m}{Jk_i}$ 。根据劳斯稳定性判据, 可以得到系统的稳定性条件为

$$\begin{cases} 2\xi\omega_n - k_1 k_g k_p > 0 \\ (2\xi\omega_n - k_1 k_g k_p) k_p - 4\xi^2 k_I > 0 \end{cases} \quad (5)$$

由式 (5) 可得:

$$\omega_n^2 > k_I k_1 k_g = \frac{S(0)}{J} \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 系统力矩刚度的上限受到陀螺带宽的限制, 这是在系统机械谐振频率之外所增加的又一限制因素。它在一定程度上降低了对高频扰动的抑制作用。但在陀螺闭环应用时, 系统的设计和调试比较容易进行。

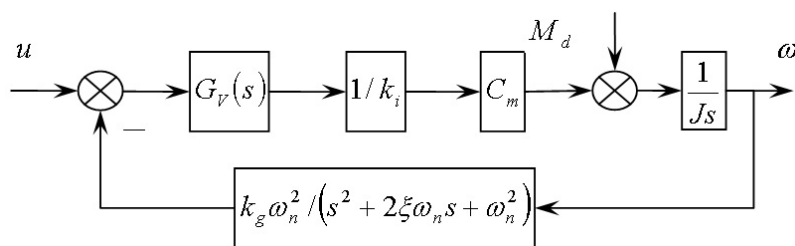


图 4 陀螺闭环时的稳定环控制模型

2.2 陀螺开环的稳定性分析

在挠性陀螺的开环应用中, 陀螺的模型为

[4]

$$G_g(s) = \frac{k_g}{s(\tau_g s + 1)} \quad (7)$$

式中, τ_g 为陀螺的时间常数。此时, 陀螺电路串接在系统主回路中, 成为主回路的一部分, 并靠陀螺角动量矩的空间反馈组成陀螺稳定回路^[5], 如图 5 所示。

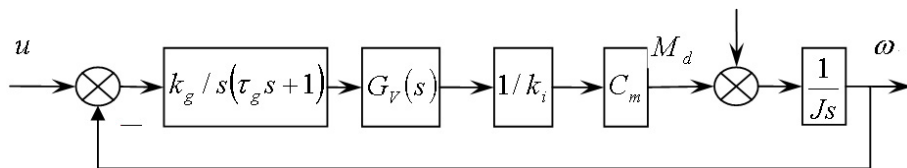


图 5 陀螺开环时的稳定环控制模型

我们可以求出系统的力矩刚度为

$$S(s) = Js^2 + G_V(s) \frac{C_m}{k_i} \frac{k_g}{\tau_g s + 1} \quad (8)$$

由式 (8) 可知, 在陀螺开环应用时, 不论采取何种校正方式, 系统的静态力矩刚度 $S(0)$ 始终大于 0, 说明陀螺开环应用时系统的力矩刚度要好于闭环时的情况。若系统采取 PD 校正, 即 $G_V(s) = k_P + k_D s$, 此时静态力矩刚度为

$$S(0) = \frac{k_P C_m k_g}{k_i} \quad (9)$$

此时, 稳定控制系统的闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{\omega}{u} = \frac{k_1(k_P + k_D s)/\tau_g}{s^3 + s^2/\tau_g + k_1 k_g k_D s/\tau_g + k_1 k_g k_P/\tau_g} \quad (10)$$

根据劳斯稳定性判据, 可以得到系统的稳定性条件为

$$k_D > k_P \tau_g \quad (11)$$

由式 (11) 可知, 在陀螺开环应用时, 系统的稳定性直接决定于系统校正系数 k_P 、 k_D 和陀螺的时间常数 τ_g 。与式 (6) 相比, 式 (11) 缺少了陀螺谐振环节, 使稳定回路频带可以做得很高, 增强了对高频扰动的抑制。根据式 (11) 可以得到静态力矩刚度的上限值为

$$S(0) < \frac{k_D C_m k_g}{\tau_g k_i} \quad (12)$$

在一般情况下, τ_g 比较小, 陀螺开环应用时静态力矩刚度的上限值会增大, 可加强对扰动的隔离作用。

3 试验验证

以某光电稳定平台为对象进行 MATLAB 仿真验证, 并通过对比分析陀螺开闭环两种情况下系统的稳定情况。为了便于简化, 仅以方位轴为例, 并假定位置量为 0。方位电机模型的参数为: $C_e = 26.26 \text{ V/rad}$, $C_m = 21.15 \text{ Nm/A}$, $L = 50 \text{ mH}$, $R = 4.2 \Omega$, $J = 96.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $k_{pwm} = 11$ 。在陀螺闭环时, $\omega_n = 440 \text{ rad/s}$, $\xi = 0.7$, $k_g = 5.73$

V/(rad/s) ; 在陀螺开环时, $\tau_g = 0.0012 \text{ s}$ 。在两种应用方式下均输入幅值为 1 Nm 的扰动力矩 (对应的系统响应分别见图 6 和图 7)。

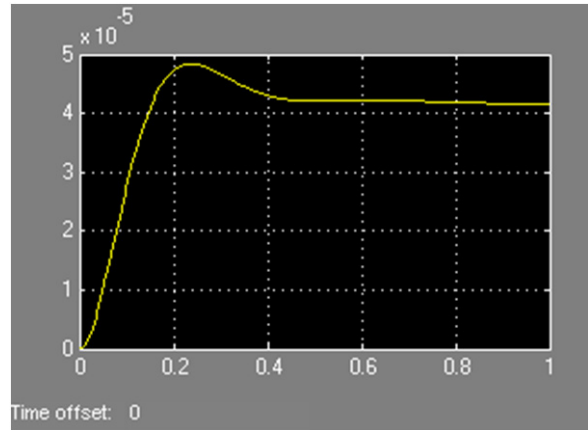


图 6 陀螺闭环时对常值扰动力矩的抑制

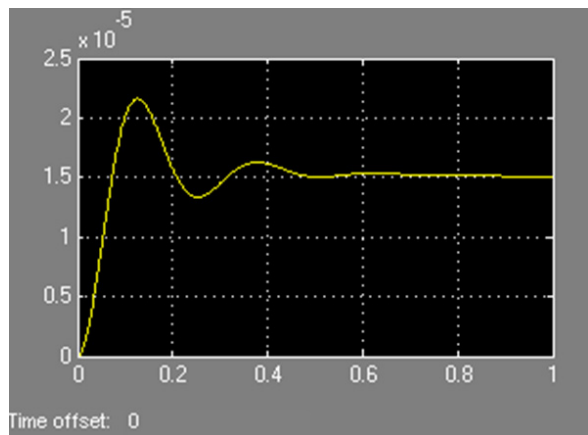


图 7 陀螺开环时对常值扰动力矩的抑制

从图 6 中可以看出, 陀螺闭环时, 在 1 Nm 的常值扰动力矩作用下, 系统的稳定精度为 $4.2 \times 10^{-5} \text{ rad}$, 系统的力矩刚度约为 $2.4 \times 10^4 \text{ Nm/rad}$; 从图 7 中可以看出, 陀螺开环时, 系统在常值干扰力矩作用下的稳定精度为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ rad}$, 系统的力矩刚度约为 $6.7 \times 10^4 \text{ Nm/rad}$ 。通过对比可知, 陀螺开环应用时系统的力矩刚度要大于陀螺闭环应用时的情况。同时我们还可以发现, 陀螺开环应用时的响应速度 (上升时间) 比闭环时的快, 但其超调量和振荡次数都比闭环时的大。

最后, 通过摇摆试验验证了光电稳定平台系统在闭环和开环两种工作模式下对船摇扰动

的隔离情况。摇摆特性包括:纵横摇幅度为 8° , 周期为 12 s, 采样点为 1000 个 (并进行统计)。然后将结果绘制成表 1。

表 1 两种模式下对船摇的隔离情况

	陀螺闭环模式		陀螺开环模式	
	方位	俯仰	方位	俯仰
标准偏差 (像素)	1.441	2.344	1.232	1.188
稳定精度 (像素)	2.752		1.711	
稳定精度 (μrad)	143.93		89.48	

从表 1 中可以看出,陀螺开环应用时对船摇扰动的隔离效果要好于陀螺闭环应用时的情况,证明陀螺开环时能够增加系统的力矩刚度。

4 结论

在挠性陀螺闭环应用时,系统带宽会受到

陀螺带宽的限制,对高频扰动的抑制作用也会降低,但其设计与调试比较容易。在陀螺开环应用时,系统的力矩刚度要大于闭环应用时的情况,能够对抗动力矩起到很好的隔离效果,但其设计与调试的技术难度较大。

参考文献

- [1] 冯应峰. 挠性陀螺在光电稳定系统的不同应用 [J]. 舰船光学, 2003, 39(3): 12-14.
- [2] 洪华杰, 赵创社, 雷金利, 等. 提高光电稳定平台伺服控制刚度的方法 [J]. 光电工程, 2009, 36(8): 5-9.
- [3] 任远航. 陀螺稳定伺服平台设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [4] 黎志强, 许兆林, 徐景硕. 光电平台速率稳定回路的仿真设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2008, 30(6): 17-20.
- [5] 王齐祥. 船用跟踪雷达的两轴稳定问题讨论 [J]. 现代雷达, 1996, 18(2): 77-83.

新闻动态 News

以色列发展新一代空间光学眼

据 www.flightglobal.com 网站报道, 以色列正在通过发展新型光学和雷达眼的方式来提高其空间眼的观察性能。其目标是要使其空间眼无论在白天还是在夜晚或者在冬天还是在夏天, 都能看到“有关区域”的每一个小细节。

这些能力远比官方出版物中所反映的能力强, 而且这些能力一直在提高。

以色列 Elbit 系统公司的 ELOP 分部是这些光学眼的研制者。该分部最近透露了有关“朱庇特”高性能空间相机的一些细节。

该系统将使得以色列能够发射具有极佳分辨率的小型情报卫星。

ELOP 分部为迄今已发射的所有以色列情报卫星制作了光学有效载荷。

据 ELOP 分部总经理 Adi Dar 说, “朱庇特”高性能空间相机是准备安装在微小型平台上的。这种新型空间相机有效载荷经过优化以

后可以获得高分辨率图像, 因而可用于高价值目标的调查, 小型独立车辆、物体与结构的确定, 明确的意图与告警 (I&W) 以及态势感知等。其中明确的意图与告警是对指示器进行分析并产生告警的一个战略监视过程。

该先进相机具有全色成像和多光谱成像两种能力。它能够通过一个共用光学组件同时进行两种成像并产生清晰的全色和多光谱图像。

据说, “朱庇特”高性能空间相机在 600 km 高度的成像幅宽为 15 km, 可提供 0.5 m (全色) 和 2 m 的甚高空间分辨率。

正如 ELOP 分部的有关人员说, 这些能力是在不断提高的, 该光学仪器将可以与以色列航空航天工业公司 Elta 分部提供的合成孔径雷达互为补充。

由于有一系列情报卫星正在研制之中, 而且具有非常先进的新型有效载荷, 以色列希望能够看到至关重要的内容, 以应对任何威胁。

□ 高国龙