

惯性稳定平台中的加速度反馈控制技术

唐涛^{1,2}, 张桐^{1,2}, 黄永梅^{1,2}, 付承毓^{1,2}

- (1. 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;
2. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要: 陀螺稳定是惯性稳定中的常见装置, 由它仅仅构成一个简单的单速度稳定环。控制带宽是影响陀螺稳定的惯性控制系统的一个重要因素。高的控制带宽很难获取, 主要是因为系统的非线性影响, 比如机械谐振。将一种基于加速度反馈的多环控制结构引入速度控制系统中, 提高稳定性能。采用两只线性加速度计测量角速度信号, 而不是利用位置和速度信号计算得到。利用 Lyapunov 函数分析了多级稳定回路稳定, 以及对摩擦、扰动抑制能力的效果。多级稳定控制环路的误差抑制能力是陀螺反馈系统的能力以及加速度反馈之积。实验验证了理论分析的正确性: 相比经典的陀螺稳定系统, 扰动抑制能力有较大的改善。

关键词: 加速度反馈; 稳定平台; 陀螺; 摩擦; 扰动抑制

中图分类号: TP273.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3462-05

Acceleration feedback control in inertial stabilization system

Tang Tao^{1,2}, Zhang Tong^{1,2}, Huang Yongmei^{1,2}, Fu Chengyu^{1,2}

- (1. The Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: Gyro is popular equipment in the inertial stabilization control system. There is one velocity stabilization control loops with gyro in classic control system, one of the main limitations to inertial stabilization system is control bandwidth for gyro-based inertial control system. High control bandwidth is too difficult to gain because of nonlinearities, such as mechanical resonances. A new control structure of multi-stabilization control loop was introduced where an acceleration feedback loop is added into the velocity control loop. The angular acceleration signal was from two accelerometers, and not was calculated with velocity and position signal. Using Lyapunov theorem, the stability of the multi-stabilization control loops were verified, and the friction of inertial stabilization system could be reduced with acceleration feedback. The torque attenuation with multi-stabilization control loops was equal to acceleration feedback loop's attenuation multiplied by gyro feedback loop's attenuation. The experiments show the multi-stabilization control loops improve the performance of inertial control system.

Key words: acceleration feedback; inertial stabilization; gyro; friction; torque attenuation

收稿日期: 2014-02-16; 修订日期: 2014-03-18

基金项目: 国家 863 计划

作者简介: 唐涛(1980-), 男, 副研究员, 主要从事光电跟踪控制技术方面的研究。Email: tangtao24@163.com

0 引言

稳定技术^[1]是一项非常重要的关键技术,其主要基本思想就是利用惯性器件测量平台的运动并进行稳定控制,广泛用于雷达、光电等精密测量以及高清晰观测领域。惯性平台的稳定技术主要以陀螺为关键器件。但是由于机械结构、传感器带宽等条件的限制,很难提高闭环带宽。在很多恶劣的环境中,比如剧烈的风力矩、平台扰动力矩等,基于陀螺稳定的系统不能很好地满足工程要求。速率反馈稳定的能力^[2]同速率控制带宽密切相关,但是要获取高的控制带宽是非常困难的。速率前馈稳定不需要高的控制带宽,具有很好的性能,但是需要控制对象具有良好的线性特点,同时需要克服陀螺的漂移。

已有很多参考文献^[3-4]指出,高增益的加速度反馈对干扰力矩的消除是非常有效的。Wu 和 Han^[5]利用加速度反馈在机器人动力学解耦、抑制干扰、提高跟踪性能方面取得了很好的效果。利用加速度反馈^[6-7]抑制系统的谐振,并证实加速度反馈是目前增加控制系统带宽最有效的方法。因此,在陀螺构成的反馈稳定控制系统中,引入加速度反馈提高惯性稳定能力将是一项非常有意义的工作,这主要是因为加速度传感器也是一种惯性传感器,具有陀螺对惯性空间运动测量的特性。尽管已经有相关的工作开展,但是采用哪种合适的控制策略,以及从频率上直观地分析加速度反馈的作用还需要进一步展开。此外,稳定平台面临的另外一个问题就是摩擦^[8-9],这主要是因为基座常常工作在零速度附近,频繁来回地换向,非常容易造成“误差尖峰”。克服摩擦也是稳定控制中的一项非常重要的任务。

如何建立以惯性测量为基础的加速度反馈多级稳定控制结构,采用怎样的一种控制策略实现高性能的稳定控制是文中的研究重点。

1 多级稳定控制回路

具有加速度、陀螺反馈的多级稳定控制结构如图 1 所示。其中, $P(s)$ 表示控制对象, $C_a(s)$ 表示加速度控制器, $C_v(s)$ 表示速度控制器, $d(s)$ 扰动输入, $v(s)$ 速度输出。对于稳定平台来说,就是期望基座扰动 $d(s)/v(s) \rightarrow 0$ 。

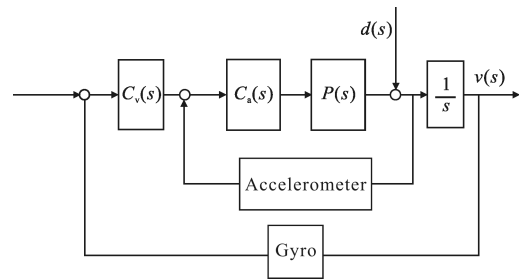


图 1 多级稳定控制结构

Fig.1 Control structure of multi-loop stabilization

只有陀螺闭环时,扰动抑制能力为:

$$e_d(s) = \frac{v(s)}{d(s)} = \frac{1/s}{1 + \frac{1}{s} G_v G_p} \quad (1)$$

具有加速度闭环的扰动抑制响应为:

$$e_d(s) = \frac{1}{1 + G_a G_p} \times \frac{1/s}{1 + \frac{1}{s} G_v \frac{G_a G_p}{1 + G_a G_p}} \quad (2)$$

比较公式(1)、(2)可以得到,具有加速度反馈的陀螺稳定系统对扰动抑制能力是加速度反馈、陀螺反馈抑制能力乘积。显然,采用具有惯性测量能力的加速度传感器形成的闭环系统与单纯的陀螺构成的速度环路相比,在惯性空间的稳定能力有很大的提高。

要使加速度反馈发挥效果,加速度闭环特性不能对速度闭环带来影响。同时,加速度控制器中必须含有积分器,这样才能获取良好的低频性能。但是积分器的引入也会放大高频的谐振,这将在后面的实验中看到。

摩擦由于具有很强的非线性特点,很难在频率域描述。下面考虑采用时域的方法分析。

稳态的 Gaussian 摩擦模型如下:

$$\tau_f(\dot{\theta}) = g(\dot{\theta}) \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + \sigma_2 \dot{\theta} \quad (3)$$

速度控制器为 PI 算法:

$$u = K_I \int_{t=0}^{t=t} (u_{\text{pout}} - \dot{\theta}) dt + K_P (u_{\text{pout}} - \dot{\theta}) \quad (4)$$

式中: u_{pout} 可以看作外环(位置环)的输出,也可以看作速度的跟踪信号。闭环系统描述如下:

$$J \ddot{\theta} = K_I \int_{t=0}^{t=t} (u_{\text{pout}} - \dot{\theta}) dt + K_P (u_{\text{pout}} - \dot{\theta}) + \tau_f \quad (5)$$

不失一般性,即 $u_{\text{pout}} = 0$ 。令 $x_1 = -\int_{t=0}^{t=t} (0 - \dot{\theta}) dt, x_2 = \dot{x}_1 = -(0 - \dot{\theta})$,

$X=[x_1 \ x_2]$, 选取 Lyapunov 函数为 $V[x]=\frac{1}{2}X^T \begin{bmatrix} K_f & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} X$, 则有:

$$\begin{aligned} \dot{V}[x] &\leq -K_p x_2^2 + x_2 [F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{x_2}{\theta_s}\right)^2}] \operatorname{sgn}(x_2) + \sigma_2 x_2^2 = \\ &(\sigma_2 - K_p) |x_2|^2 + |x_2| [F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{x_2}{\theta_s}\right)^2}] \end{aligned} \quad (6)$$

一般来说, $\sigma_2 - K_p < 0$, 则有不稳定区域:

$$|\dot{\theta}|_0 \leq \frac{F_s}{(K_p - \sigma_2)} \quad (7)$$

速度闭环不稳定区域主要取决于静摩擦力矩 F_s 、速度闭环增益 K_p 。一旦速度在零点附近变化, 也就是稳定平台不停地来回换向, 系统表现不稳定, 就会出现一个很大的尖峰误差。

加速度控制器为 $u_a = K_a$, 这样可以得到加速度、速度闭环控制规律如下:

$$u = K_a \left[K_f \int_{t=0}^{t=t} (0 - \dot{\theta}) dt + K_p (0 - \dot{\theta}) - \ddot{\theta} \right] \quad (8)$$

同理, 可以得到不稳定区域为:

$$|\dot{\theta}|_0 \leq \frac{F_s}{\left(K_p - \frac{\sigma_2}{K_a} \right) K_a} \quad (9)$$

比较公式(7)、(9)可知, 高增益的加速度反馈让不稳定的区域大大减小, 但不能消除。在足够高增益的加速度、速度闭环前提下, 只要速度信号的分辨率不超过公式(9)的水平, 可以认为摩擦完全被抑制, “尖峰”完全被消除。

前文从理论上分析了加速度控制器必须具有高增益的特点, 否则无法产生良好的闭环性能。下面从传递函数的特性分析加速度开环特性以及加速度控制器的设计策略。直接驱动模型最简单就是电机-负载驱动的二阶系统, 加速度传递函数可以描述如下:

$$G_a = \frac{1}{(J_m + J_L)} \frac{K}{J_m J_L / (J_m + J_L) s^2 + d_s s + K} \quad (10)$$

式中: J_L 、 J_m 分别为负载和电机转动惯量; θ_L 、 θ_m 分别为负载、电机转角; K 为负载和电机连接轴刚度; τ_m 为电机提供的力矩; d_s 为阻尼系数。

加速度开环特性含有谐振环节, 尽管公式(10)只描述了一个, 但是由于非刚性的连接可能出现很多谐振对, 加速度控制器中必须具有减小谐振的低通滤波器。加速度控制器的设计须考虑: 以牺牲加速度带宽为代价来换取高的系统增益, 并对谐振以后的频

率具有低通特性。加速度闭环具有很强的低通特性, 能够对高频信息进行很大程度的衰减。闭环谐振要尽量小才不会产生振荡。通常在设计时, 还要在加速度闭环带宽和增益之间协调。带宽越窄, 增益就越高, 但这样相位损失太大, 对外环控制来说是很不利的。

2 实验验证

实验装置如图 2 所示, 由一维扰动平台、一维稳定平台组成。扰动平台模拟载体的扰动是由力矩电机驱动的控制平台, 上面安装有测速机。稳定平台同样是由力矩电机驱动的平台, 上面安装有加速度计和陀螺。对稳定平台进行速度闭环带宽扫频时, 扰动平台锁定不动。稳定能力测试是稳定平台闭环, 给扰动平台扫频信号, 将稳定平台的陀螺输出信号以及扰动平台测速机信号相比较。

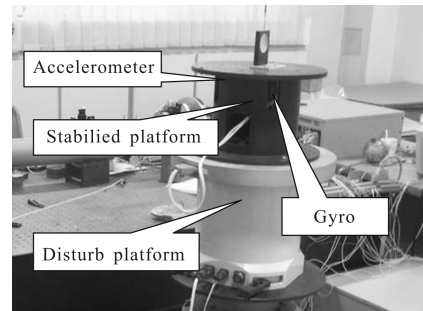


图 2 实验装置

Fig.2 Experimental setup

加速度计测量角速度信号的方法已经由参考文献[5]给出, 利用信号发生器可以得到稳定平台的加速度开环特性, 如图 3 所示。

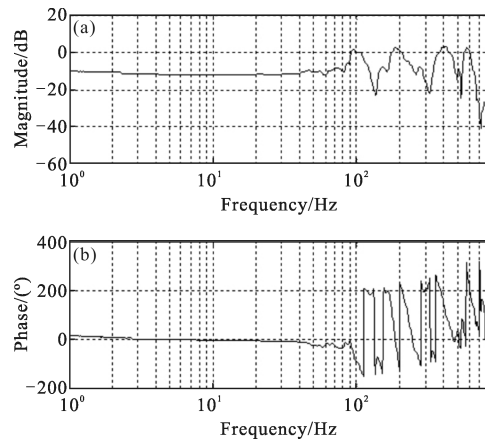


图 3 加速度开环响应

Fig.3 Acceleration opened loop response

从图中可以看出,不仅在 90 Hz 和 190 Hz 左右存在谐振峰,在更高的频率也有谐振峰出现,这与转台的非刚性连接有关,而且与加速度计的安装也有很大的关系。

图 4 表明两种控制策略对速度闭环带宽的影响不大。采用加速度闭环后,速度闭环带宽并没有很大提高,而且从相位上可以看到,加速度闭环带来了较小的相位滞后。也就是说加速度反馈对速度闭环的影响很小。

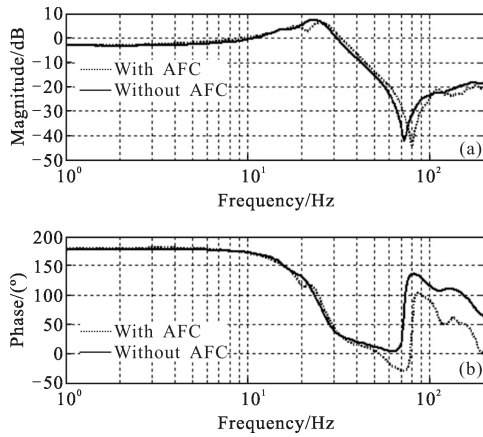


图 4 速度闭环响应

Fig.4 Velocity closed loop response

扰动抑制能力是稳定平台和扰动平台速度的比较。值得注意的是,图 5 给出的频率分析特性包含了

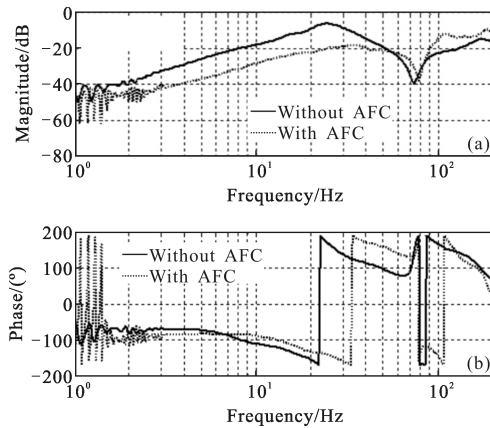


图 5 扰动抑制响应

Fig.5 Disturb attenuation response

稳定平台和扰动平台固有的低通特性,因此扰动抑制能力始终在 0 dB 以下。加速度反馈对扰动抑制能力带来的优势明显。从相位反向可以看到,加速度反馈的抑制带宽为 32 Hz,明显高于陀螺抑制带宽 22 Hz。

1 Hz 左右的低频段,加速度反馈构成的多级稳定控制系统比以前的稳定系统提高了近 10 dB。在 150 Hz 的高频,加速度反馈系统放大了谐振,性能稍差。这主要有两个原因:(1) 加速度计安装件的刚度不够,引起了高频振动;(2) 从闭环传递函数上看,加速度控制器中的积分器会变为微分器,对高频信号有一定的放大。

图 6 为扰动平台施加正弦速度信号 $\dot{\theta}=40\sin(2t)$ 稳定平台的跟踪误差。可以看到具有加速度反馈的控制系统稳定误差很平稳,最大误差在 0.1°左右,且没有尖峰误差。只有陀螺闭环的系统,尖峰误差最大为 0.3°,正好是在速度很小(零速度)区域。结合公式(9)可知,加速度闭环系统的总增益提高了 3 倍左右。

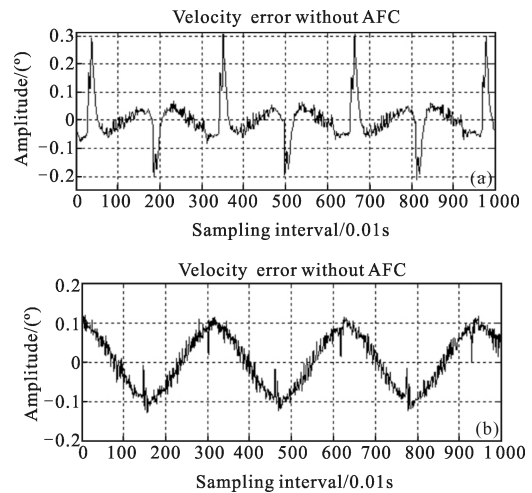


图 6 速度跟踪误差

Fig.6 Velocity tracking error

3 结 论

在陀螺闭环的基础上以惯性线加速度计测量角速度信号为基础引入加速度反馈稳定回路,是对现有稳定控制方法的改进。理论和实验表明了高增益的加速度反馈设计方法简单,效果明显。相比现有的陀螺稳定控制,尽管速度闭环带宽没有太大的改善,但由于存在高带宽的加速度闭环,稳定抑制能力提高了 3 倍左右。同时,减小了速度在零区间变化造成的误差尖峰,克服了摩擦对稳定平台性能的影响。

参 考 文 献:

[1] Hilkert J M. Inertially stabilized platform technology [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, 28(1): 26-46.

- [2] Kenny P J, Kennedy R L. Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11(1): 3–15.
- [3] Bram de Jager. Acceleration assisted tracking control [J]. *IEEE Control Systems*, 1994, 14(5): 20–27.
- [4] Zhu Wenhong, Bijarni Tryggvason. On active acceleration control of vibration isolation systems [C]//IEEE Conference on Decision and Control, Atalantis, Paradise Island, Bahamas, 2004, 4: 14–17, 4363–4368.
- [5] Xu W L, Han J D, Tso S K, et al. Contact transition control via joint acceleration feedback [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 47(1): 150–158.
- [6] Tang Tao, Huang Yongmei, Zhang Tong, et al. Reduction of mechanical resonance based on load acceleration feedback for servo system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(7): 14–17. (in Chinese)
- 唐涛, 黄永梅, 张桐, 等. 负载加速度反馈的伺服系统谐振抑制[J]. *光电工程*, 2007, 34(7): 14–17.
- [7] George Ellis, Lorenz R D. Resonant load control methods for industrial servo drives [C]//IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2000, 3: 1483–1455.
- [8] Lörinc Márton, Béla Lantos. Modeling, identification, and compensation of stick-Slip friction[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(1): 511–521.
- [9] Vincent Lampaert, Jan Swevers, Farid Al-Bender. Modification of the leuven integrated friction model structure [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(4): 683–687.