

·光电系统·

高精度陀螺稳定平台稳定回路设计

王 巾, 王 凯

(东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

摘要:介绍了两轴陀螺稳定平台隔离载体扰动的原理,对陀螺稳定平台的稳定回路进行了数学建模分析和设计。选择了双速度环控制方法,使稳定伺服系统较传统的单速度环方法具有更好的抗干扰性和鲁棒性,并通过样机测试数据表明,该稳定平台具有较高的稳定精度。

关键词:视轴稳定;PID控制;陀螺稳定平台;双内环控制

中图分类号:TJ765.2

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2012)03-0026-04

Design of Stabilized Loop for High Precision Gyro-stabilized Platform

WANG Jin, WANG Kai

(Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract: The working principle of the two-axis gyro-stabilized platform for isolating the carrier disturbance is introduced. The mathematical model is analyzed and designed for the stabilized loop of the gyro-stabilized platform. A dual rate-loop control structure is chosen, so the servo system has the better anti-jamming ability and robustness than the single rate-loop control structure. The experimental data from the prototype show that this gyro-stabilized platform has a better stabilized precision.

Key words: line of sight (LOS) stabilization; PID control; gyro-stabilized platform; dual rate-loop control

在光电系统中,光电探测器作为空间位置误差传感器,必须在惯性空间内保持稳定。光电系统安装于运动载体上时,载体姿态的变化和载体振动都会对探测器视轴的指向产生影响。因此,通常将运动载体上的光电系统安装在多框架陀螺稳定平台上^[1],采用整体稳定的方式隔离载体的扰动。陀螺稳定平台是否能够很好的隔离载体扰动,其中稳定回路的设计是非常重要的。以两轴陀螺稳定平台为例,对稳定回路的工作原理和数字化设计实现展开研究。

1 稳定回路原理分析

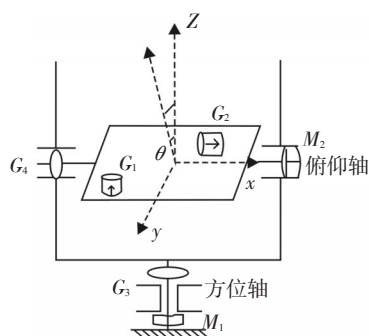
两轴陀螺稳定平台由两个轴系构成:方位轴和俯仰轴,为光电探测设备提供2个自由度的角运动。方位框架通过轴承与基座相连,俯仰框架安装在方

位框架上,随方位框架一起转动。当载体产生扰动角速度时,首先通过平台环架轴间几何约束和摩擦约束耦合到方位框架,再由方位框架耦合到俯仰框架,俯仰框架与负载刚性连接,直接导致探测器视轴指向发生偏移^[2-4]。系统为抵消视轴的偏移,采用整体稳定方式,结构形式及原理见图1。

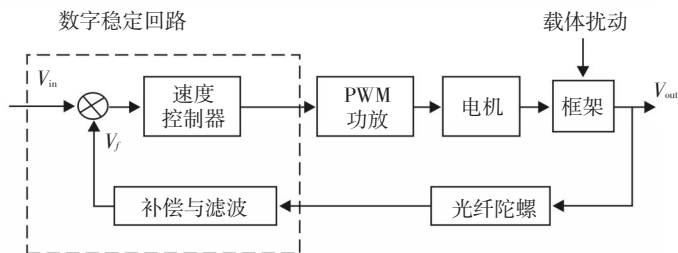
图1a为两轴稳定平台结构示意图。 G_1 为方位陀螺, G_2 为俯仰陀螺, G_3 为方位光栅, G_4 为俯仰光栅。 M_1 为方位轴力矩电机, M_2 为俯仰轴力矩电机。探测器视轴与 y 轴平行。图1b为稳定回路闭环控制原理图。在视轴稳定过程中,速率陀螺作为惯性空间速率测量元件,敏感平台在惯性空间内的角运动速率,作为速度负反馈进入稳定回路中,构成稳定回路闭环控制。在稳定回路的设计中,陀螺的补偿、滤波运算,伺服控制方法及各环节的设计校正均在速度控

制器中以数字化形式实现,因此也可称作“数字稳定回路”。当稳定平台产生的补偿角速度与惯性空间

内扰动角速度大小相等、方向相反时,即实现了视轴的空间指向稳定^[5]。



(a) 稳定平台结构图



(b) 稳定平台原理框图

图1 两轴陀螺稳定平台结构及原理图

需要注意的是,俯仰框架与方位框架垂直(俯仰轴零位)时,两个陀螺的敏感轴分别与稳定平台的方位轴和俯仰轴平行。当俯仰框架转动一个角度 θ 后,方位陀螺 G_1 的敏感轴指向也随俯仰框架转动了 θ 角,即方位陀螺敏感轴与平台方位轴夹角为 θ 。此时方位陀螺 G_1 的输出量将不再是平台方位轴角速度,需要进行正割补偿^[6]:即平台方位轴角速度 $\omega_{izb} = \frac{\omega_{izf}}{\cos \theta} = \omega_{izf} \cdot \sec \theta$ 。俯仰陀螺 G_2 的敏感轴与俯仰轴始终为平行,因此 G_2 输出值始终等于平台俯仰角速度。

当载体姿态变化引起平台产生绕 Y 轴的角速度时,会导致光电探测系统视轴发生旋转,但二轴稳定平台的局限性导致此方向扰动无法被隔离,需要三轴或三轴以上的稳定平台来完成^[7]。

2 数字稳定回路建模及设计

2.1 设计中需要解决的问题

经分析,陀螺稳定平台伺服系统的稳定回路设计需要着重解决以下问题^[8]:(1)机械摩擦、轴间力矩耦合等固有扰动的存在;(2)干扰速率来自载体运动的随机耦合,具有很强的随机性;(3)速率陀螺传感器内部的漂移和噪声;(4)外部扰动换向时的“平顶”现象;(5)速率偏差较大时,系统电器元件的饱和,导致系统产生畸变现象。

以上问题使稳定回路具有很大的非线性和随机性,难以进行精确的建模分析。因此要求稳定回路

具有快速动态响应特性和较高的稳定精度,同时对模型参数的变化具有一定的鲁棒性和自适应性。

2.2 稳定回路控制方法的选择

针对稳定回路存在的几个主要问题,为了增强控制系统的抗干扰性和鲁棒性,在设计中摒弃了传统的单速度环控制方法,采用双速度环控制。所谓双速度环就是用速率陀螺测量平台惯性空间内扰动速率,作为速率反馈构成稳定环(速度外环);用测速机或光栅、角编码器等同轴测量装置测量轴系转动速率作为速率反馈构成速度环(速度内环)。内外环均有自己的校正函数,内环主要用于抑制摩擦力矩的影响,外环主要用于克服平台的惯性空间扰动。系统采用的是串级校正方法^[9],因此也叫做双内环串级控制法,数学模型如图2所示。

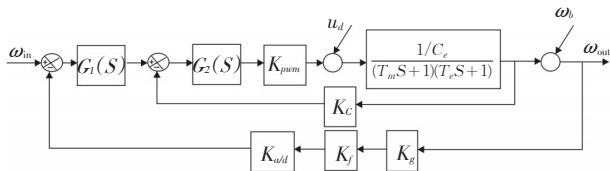


图2 双内环稳定伺服回路原理图

将图2中电机和负载的等效传递函数 $\frac{1/C_e}{(T_m S + 1)(T_e S + 1)}$ 用 $G_b(S)$ 表示。 ω_b 为载体运动给稳定平台带来的扰动角速度,将轴系摩擦力矩给电机转速带来的影响等效为一种扰动力矩 u_d ^[10]。 ω_{in} 为稳定回路的输入指令角速度; ω_{out} 为平台框架

角速度； $K_{a/d}$ 为陀螺信号 A/D 转换环节等效增益； K_f 为滤波环节等效增益； K_g 为陀螺自身比例因子的等效增益； K_c 为光栅角度差分环节等效增益； K_{pwm} 为 PWM 功放电路等效增益。由此， ω_{out} 的变化取决于 ω_{in} 和 ω_b 、 u_d 以及伺服回路传递函数，稳定环等效传递函数如下

$$\omega_{out} = \frac{G_1(S)}{K_c + K_g K_f K_{a/d} G_1(S)} \omega_i + \frac{1}{K_{pwm} G_2(S) [K_c + K_g K_f K_{a/d} G_1(S)]} u_d + \frac{K_c}{K_c + K_g K_f K_{a/d} G_1(S)} \omega_b \quad (1)$$

从式(1)可以看出， ω_b 的抑制只由稳定环的校正函数 $G_1(S)$ 完成，不受 $G_p(S)$ 以及 $G_2(S)$ 的影响。稳定平台特性参数变化对稳定精度不产生影响，使系统的鲁棒性较传统的单速度环系统有所增强。同时，轴系摩擦力矩的克服和对载体扰动的隔离可以实现分层设计，分别由内环校正环节 $G_2(S)$ 和外环校正环节 $G_1(S)$ 进行调节，两者不存在互相牵制，系统的抗干扰性能更强，可以更好地提高稳定精度。

2.3 双速度环伺服控制器设计

双速度环伺服控制器分为速度内环和速度外环两部分，全部采用数字化设计，运算校正环节和反馈回路均在主控制单元(PC104)内由软件完成。数字系统采样频率为 1 kHz，远高于稳定回路系统带宽，因此可以将数字离散化系统近似为连续系统，采用连续系统的方法进行分析。

2.3.1 速度内环设计^[11]

速度内环主要作用是抑制平台轴系间的摩擦力

矩，因此要保证系统刚度以及快速的动态响应和频带宽度。以陀螺稳定平台的方位轴系为例，电机与负载的传递函数可以等效为

$$G_p(S) = \frac{1/C_e}{(T_m + 1)(T_s + 1)} \quad (2)$$

其中， $T_m = \frac{J R_a}{C_e C_m}$ 为机电时间常数； $T_e = \frac{L}{R_a}$ 为电气时间常数。

通过 UG 软件对方位俯仰轴系建立三维模型，估算出方位轴系的转动惯量为： $J = 1.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。根据所选电机的各项参数，不难得出方位轴系的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K}{(0.605S + 1)(0.0022S + 1)} \quad (3)$$

利用波德(bode)图对方位轴速度内环开环传递函数进行频域分析，为保证系统稳定性以及速度环带宽，并在希望的带宽范围内通过校正环节尽量提高系统增益。通过频域设计，加入了一阶滞后校正环节。校正后增加了速度内环闭环带宽，使系统符合稳定性判据。

2.3.2 速度外环设计

速度外环主要作用是抑制外部扰动角速度。在充分考虑到速度外环路的非线性和不确定性后，采用了分段式 PID 控制。在速率误差的绝对值大于某一设定好的阈值 ϵ_m 时，速度外环输出给定值 V_m 或 $-V_m$ ，使速率误差在控制范围内迅速减小。当速率误差降到阈值以下，进入线性段区域，采用经典 PID 控制方法，提高系统精度、稳定性和快速性。分段式 PID 控制原理如图 3， ω_{in} 为速度外环的输入角速度， ω_o 为速度外环输出给速度内环的角速度值。

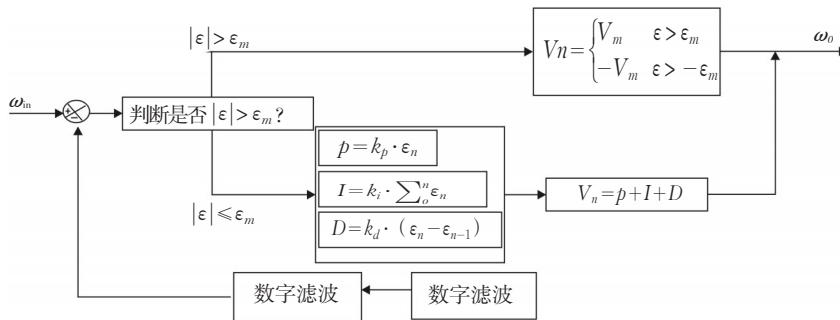


图3 速度外环分段式PID控制原理

3 陀螺稳定平台性能测试

在实验室内对两轴陀螺稳定平台样机进行了稳定性指标测试,测试系统如图4所示,主要由两轴陀螺稳定平台、光电探测器,跟踪器、平行光管、两自由度摇摆台组成。

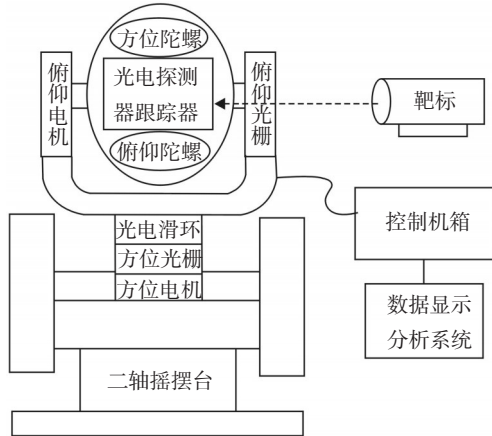


图4 稳定平台测试系统组成

测试方法是利用一台两自由度摇摆台,将稳定平台固定在摇摆台工作平面上,放置平行光管作为

模拟靶标。稳定平台在初始位置时,探测器视轴对准靶标,开启跟踪器实时计算目标脱靶量。调转稳定平台方位俯仰角度,使靶标位于图像中心,二轴脱靶量均为零,将此时视轴在惯性空间内的指向作为稳定基准。平台进入稳定工作状态,设定二轴摇摆台方位、俯仰轴系运动参数幅度均为 5° ,周期为 2 s 。摇摆台带动稳定平台基座进行周期性运动,观测并记录探测器上靶标的方位和俯仰脱靶量数值,并通过计算得出平台视轴稳定精度。

数据处理方法如下:方位脱靶量为 ΔX 、俯仰脱靶量为 ΔY ,通过公式 $\Delta\sigma = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$ 计算稳定误差,即为平台视轴稳定精度。随机抽取 n 组数据,计算稳定误差的均方根值。在2个测试周期内,分别测试了使用传统的单速度环方法和双速度环方法的稳定精度。测试数据如表1所示。

以上试验数据表明,该两轴陀螺稳定平台极大地减小了载体角运动对探测器视轴的影响,可以使视轴在惯性空间内基本保持稳定。并且通过使用双速度环控制,使系统稳定精度较单速度环控制有了大幅提高。

表1 稳定性测试数据

单速度环稳定			双速度环稳定		
$\Delta X / (^\circ)$	$\Delta Y / (^\circ)$	$\Delta\sigma = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} / (^\circ)$	$\Delta X / (^\circ)$	$\Delta Y / (^\circ)$	$\Delta\sigma = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} / (^\circ)$
0.057 9	0.032 3	0.066 3	0.014 6	0.017 5	0.022 8
0.044 3	0.044 1	0.062 5	0.012 1	0.011 8	0.016 9
0.029 5	0.050 1	0.058 1	0.007	0.018 7	0.020 0
0.037 3	0.038 4	0.053 5	0.014 9	0.018 8	0.024 0
0.024 1	0.029 3	0.037 9	0.017 2	0.014 4	0.022 4
0.027 3	0.041 7	0.049 8	0.012 3	0.016 1	0.020 3
0.029 2	0.049 2	0.057 2	0.011 9	0.012 5	0.017 3
0.037 9	0.033 8	0.050 8	0.012 9	0.010 7	0.016 8
0.044 3	0.043 2	0.061 9	0.013 0	0.014 7	0.019 6
RMS		0.055 9	RMS		0.020 2

4 结束语

在高精度陀螺稳定平台数字稳定回路的设计中,通过对陀螺稳定平台伺服系统的机理分析和数学建模,将设计的重点放在解决平台伺服系统的高

随机性和非线性问题上,选择了抗干扰性和鲁棒性较好的双速度环控制方法。该方法将轴系摩擦干扰和载体角运动干扰通过内外两层环路分别予以抑制,使稳定精度较传统单速度环控制有了很大提高,并且易于实现,值得在工程中广泛应用。

(下转第73页)

(3) 用式(7)更新聚类原型模式矩阵 $p^{(b+1)}$

$$p_i^{(b+1)} = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^{(b+1)} * x_k}{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^{(b+1)}}, \quad i=1,2,\dots,c \quad (7)$$

(4) 如果 $\|p^{(b)} - p^{(b+1)}\| < \epsilon$, 则算法停止并输出划分矩阵 μ 和聚类原型 p , 否则令 $b=b+1$, 转向步骤(2)。

从图4和表1可以看出,伸长度、矩形度、细长度、分散度更具统计意义,故在进行斑点特征聚类时,定义斑点特征向量 $x_k = [L_k, J_k, X_k, D_k]$ 。理论研究表明,在聚类分析中,最大聚类类别数与样本数满足关系式 $c_{\max} \leq \sqrt{n}$ [9,10],因此,典型斑点个数取决于斑点数据库中的斑点样本数。限于篇幅,只列出当聚类类别数 c 为20时的典型斑点特征参数,如表2所示。

5 结 论

通过对背景斑点的自动提取和统计分析,定义了描述斑点形状的特征向量,并运用HCM算法得到了背景典型斑点的形状特征参数,这对于迷彩图案的自动、定量设计以及效果评价具有一定意义。

(上接第29页)

参考文献

- [1] 毕永利,刘洵,葛文奇,等.机载多框架陀螺稳定平台速度稳定环设计[J].光电工程,2004,31(2):16-18.
- [2] 王连明.机载光电平台的稳定与跟踪伺服控制技术研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2002:43-47.
- [3] 马佳光.捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J].光学工程,1989,81(3):21-24.
- [4] 杨海峰,李奇,姬伟.高精度伺服稳定跟踪平台数字控制器研制[J].东南大学学报(自然科学版),2004,34(增刊):96-100.
- [5] 李大成,赵宏斌.基于坐标变换的视轴稳瞄算法[J].光电技术应用,2011,26(2):5-8.

参考文献

- [1] 王文中.二维形状分析及其在图像检索中的应用[D].北京:首都师范大学,2005:1-2.
- [2] 梁洪钧,芮福盛,秦建飞.伪装原理[M].南京:解放军理工大学出版社,1995.
- [3] 王博,孙晓泉,王自荣.迷彩涂层斑块形状研究[J].光电技术应用,2003,18(3):22-24.
- [4] 贾其,吕绪良,李磊,等.迷彩斑点单元形状和尺寸研究[J].光电技术应用,2008,23(2):21-23.
- [5] 蔡云骧,秦建飞,吕振坚.基于视觉注意力模型的背景斑点提取方法[J].光学技术,2010,36(2):302-306.
- [6] 梁光明,孙即祥,唐玉鹏,等.一种区域弦分布形状描述子及其在形状特征识别中的应用[J].中国图像图形学报,2008(8):1470-1475.
- [7] WISHART D. K-means clustering with outlier detection: the 25th Annual Conference of the German Classification Society[C]//Munich:University of Munich,2001:14-16.
- [8] 蔡云骧,秦建飞,孟宪浩,等.一种改进的快速HCM颜色聚类算法[J].光电技术应用,2009,24(1):73-77.
- [9] 于剑,程乾生.模糊聚类方法中的最佳聚类数的搜索范围[J].中国科学,2002(4):274-280.
- [10] 彭晋.基于模范用户的协同过滤算法研究[M].重庆:重庆大学出版社,2010:73-77.

- [6] 罗护,范大鹏,张智勇,等.两轴陀螺稳定系统中陀螺安装的几种方法[J].兵工学报,2005,26(3):426-428.
- [7] 鲍文亮,黄显林,卢鸿谦.多框架光电平台动力学建模及耦合分析[J].哈尔滨工程大学学报,2009,30(8):893-897.
- [8] 姬伟,李奇,杨浦.陀螺惯性平台视轴稳定双速度环串级控制的研究[J].仪器仪表学报,2007,28(1):114-119.
- [9] 刘金琨.先进PID控制及MATLAB仿真[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [10] 胡浩军,毛耀,马佳光,等.稳定转台摩擦参数的测量及其对稳定精度的影响[J].光电工程,2007,34(5):5-9.
- [11] [美]Katsuhiko Ogata.现代控制工程[M].4版.卢伯英,于海勋.北京:电子工业出版社,2007:458-475.