

陀螺稳定平台系统

陀螺稳定平台是利用陀螺仪特性保持平台台体方位稳定的装置,简称陀螺平台、惯性平台,用来测量运动载体姿态,并为测量载体线加速度建立参考坐标系,或用于稳定载体上的某些设备。它是导弹、航天器、飞机和舰船等的惯性制导系统和惯性导航系统的主要装置。

陀螺稳定平台通常采用两种结构通过控制系统实现姿态的稳定。一种结构是在稳定平台的框架上安装陀螺和加速度计构成稳定回路,实现姿态的稳定,称为陀螺式稳定平台。陀螺式稳定平台是在稳定平台上安装三个敏感轴相互垂直的单自由度陀螺或两个双自由度陀螺,以敏感稳定平台在方位轴、横滚轴和俯仰轴上的运动,并将此信号作为稳定回路的输入,实现平台的稳定。陀螺稳定平台的稳定精度与陀螺精度密切相关。另一种结构是根据船上导航设备提供的船舶姿态基准信号,建造一个大功率复示平台,用来隔离载体的摇摆,姿态相对地面是稳定的。该平台通过数学方法实现被稳定设备姿态稳定,有时又称数学平台或捷联平台。一般来说,捷联式稳定平台比陀螺稳定平台结构简单、成本低。

3.1 光电吊舱陀螺稳定系统

现代战斗机、武装直升机、无人机等空中作战平台上,普遍安装有电视、红外、激光等跟踪和瞄准目标的光电设备,用来提高机载武器的瞄准精度和作用距离。这种光电设备常放置在一个称为吊舱的机外容器中,光电设备在吊舱中用两轴常平架支撑,使光电设备可以作方位和俯仰转动,并通过陀螺仪来隔离载体带来的干扰稳定光电仪器的姿态,实现仪器对目标的快速捕获、瞄准,并准确跟踪。由于这种稳定作用主要是通过陀螺仪实现的,所以有时又称实现这种瞄准跟踪目标的稳定设备为“陀螺稳像系统”。

3.1.1 系统组成

光电吊舱稳定系统用于对地面或空中目标进行搜索、跟踪和定位,飞机本身的运动造成它上面安装的光电传感器平台的振动,从而引起光电成像传感器视轴的抖动。这种抖动如果不能控制在允许的范围内,将影响成像的质量,从而影响系统的跟踪性能。因此,机载光电成像跟踪系统除了具有以光电成像传感器为核心的位置跟踪回路之外,还必须具有视轴稳定回路(速度回路),一般采用惯性陀螺仪作为视轴稳定回路的角振动传感器,所以称为光电吊舱陀螺稳定系统。

光电吊舱陀螺稳定系统如图 3.1 所示,主要包括三大部分:

- 主体仪器: 稳像系统的主体仪器是两轴支撑的常平架结构,内环(水平环)用于安装光电测量仪器,外环(方位环)垂直安装在基座上。两环的转动轴正交,外环可作 360° 连续转动。两环上分别安装一只双自由度挠性陀螺仪,通过锁定回路构成速率陀螺,用以测量两轴的转动角速度。
- 控制放大器: 控制放大器根据操作指令和跟踪目标的脱靶量控制两环上的驱动电机转动,使测量仪器的光轴始终对准目标。
- 脱靶量计算单元: 脱靶量计算单元根据光电跟踪仪器测量的图像计算目标的脱靶量,输入控制器作为系统位置环的输入量。

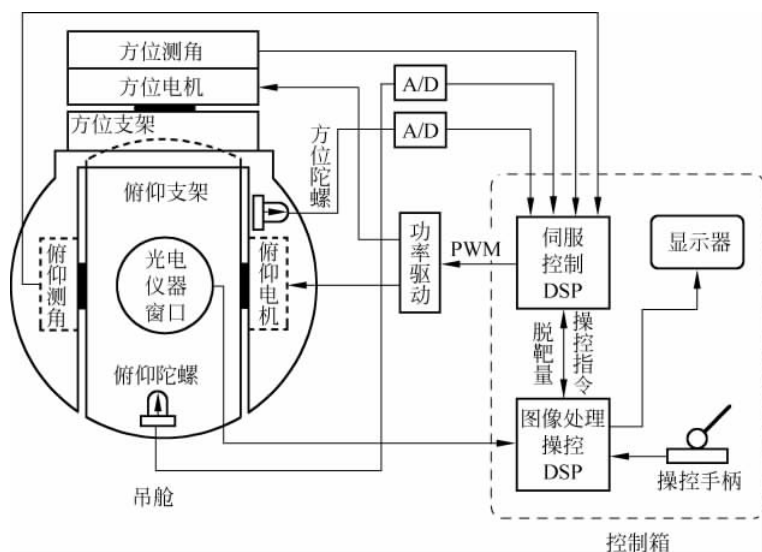


图 3.1 光电吊舱陀螺稳定系统的组成

3.1.2 系统模型建立

光电吊舱陀螺稳定系统为机电框架结构,是由电机驱动的两轴框架。每个轴的控制系统模型由内回路速度环和外回路位置环构成,是一个典型的二环伺服系统。

图 3.2 为光电吊舱陀螺稳定系统框图。图中 θ_i 为视轴空间角度, M_f 为系统扰动力矩, θ_o 为光轴空间角度。由图 3.2 可以看出,除补偿环节以外,力矩电机一般为脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 控制, PWM 一般认为是比例控制环节,只有驱动电机和陀螺是两个需要分析传递函数的环节。

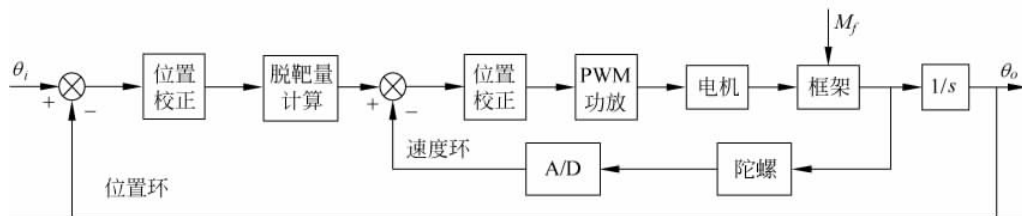


图 3.2 光电吊舱陀螺稳定系统框图

1. 力矩电机动态模型

本系统采用直流力矩电机,直流力矩电机的输出经减速比为 i 的减速器减速后驱动平台。其电枢电流在一个状态角内是波动的,与此同时电机在过渡过程中,由于电枢电感的作用和转速变化的影响,电枢绕组中的电流变化是比较复杂的,因此列写和求解它的微分方程是比较麻烦的。从工程角度看,根据它的工作原理可用图 3.3 所示的等效电路来表示。

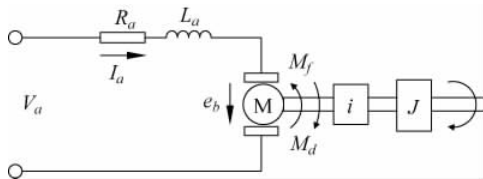


图 3.3 直流力矩电机等效电路

直流力矩电机采用 PWM 驱动方式。由于脉冲调宽电流频率 (8000Hz) 较高,因此可以忽略电枢中电流的波动性,把电流看作直流,这时直流力矩电机近似为线性元件。图 3.3 中 R_a 、 L_a 、 e_b 分别为电枢回路的电阻、电感和等效反电势,因此,可以得出回路的微分方程如下:

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_b \quad (3-1)$$

$$M_d - M_f = J' \ddot{\theta}' \quad (3-2)$$

$$M_d = C_m i_a \quad (3-3)$$

$$e_b = C_e \dot{\theta}' \quad (3-4)$$

式中其他参数的含义为： V_a 为电机电枢两端平均电压，单位为 V； θ' 为折算到电机轴上转角，单位为 rad； M_d 为电机输出转矩，单位为 N·m； M_f 为折算到电机轴上的摩擦转矩，单位为 N·m； J' 为折算到电机轴上的等效转动惯量，单位为 kg·m²； C_m 为电机的转矩系数，单位为 N·m/A； C_e 为电机的反电势系数，单位为 V/(rad/s)。

对上述微分方程进行零初始条件下的 Laplace 变换得

$$V_a(s) = R_a I_a(s) + L_a I_a(s)s + E_b(s) \quad (3-5)$$

$$M_d(s) - M_f(s) = J' s^2 \theta'(s) \quad (3-6)$$

$$M_d(s) = C_m I_a(s) \quad (3-7)$$

$$E_b(s) = C_e s \theta'(s) \quad (3-8)$$

由式(3-5)~式(3-8)可以画出直流力矩电机传递函数的方框图，如图 3.4 所示。

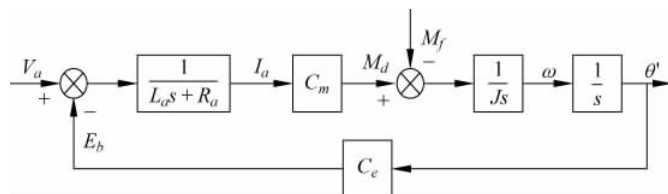


图 3.4 直流力矩电机传递函数方框图

根据图 3.4，应用线性系统的叠加原理，可求转角与电压之间的传递函数。令 $M_f(s)=0$ ，将式(3-6)~式(3-8)代入式(3-5)可得

$$V_a(s) = (R_a + L_a s) \frac{J' s^2 \theta'(s)}{C_m} + C_e s \theta'(s) \quad (3-9)$$

经整理得

$$\frac{\theta'(s)}{V_a(s)} = \frac{1}{\frac{L_a J'}{C_m} s^3 + \frac{R_a J'}{C_m} s^2 + C_e s} \quad (3-10)$$

令 $V_a(s)=0$ ，求转角与干扰力矩之间的传递函数为

$$\frac{\theta'(s)}{M_f(s)} = \frac{\frac{L_a s + R_a}{C_m}}{\frac{L_a J'}{C_m} s^3 + \frac{R_a J'}{C_m} s^2 + C_e s} \quad (3-11)$$

如果定义两个时间常数:

$$T_e = \frac{L_a}{R_a} \text{—— 电枢回路电磁时间常数}$$

$$T_m = \frac{J'R_a}{C_e C_m} \text{—— 电机的机电时间常数}$$

将 T_e 、 T_m 代入式(3-10)可得

$$\frac{\theta'(s)}{V_a(s)} = \frac{1/C_e}{s(T_e T_m s^2 + T_m s + 1)} \quad (3-12)$$

由于 $T_m \gg T_e$, 而且 T_e 很小可忽略, 因此可以在式(3-12)的分母中添加一项 $T_e s$

$$\frac{\theta'(s)}{V_a(s)} = \frac{1/C_e}{s(T_e T_m s^2 + T_m s + T_e s + 1)} \quad (3-13)$$

即

$$\frac{\theta'(s)}{V_a(s)} = \frac{1/C_e}{s(T_e s + 1)(T_m s + 1)} \quad (3-14)$$

将 T_e 、 T_m 代入式(3-11)可得

$$\frac{\theta'(s)}{M_f(s)} = -\frac{R_a}{C_e C_m} \frac{T_e s + 1}{s(T_e T_m s^2 + T_m s + 1)} \quad (3-15)$$

由于 $T_m \gg T_e$, 而且 T_e 很小可忽略, 因此可以在式(3-15)中忽略分子中的 $T_e s$ 项和分母中的 $T_e T_m s^2$ 项, 可得

$$\frac{\theta'(s)}{M_f(s)} = -\frac{R_a}{C_e C_m} \frac{1}{s(T_m s + 1)} \quad (3-16)$$

再令 $K_1 = \frac{C_m}{R_a}$ 、 $K_2 = \frac{R_a}{C_e C_m}$, 可得直流力矩电机化简后的传递函数对应的框图, 如图 3.5 所示。

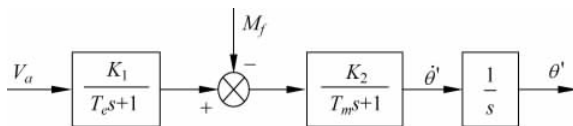


图 3.5 直流力矩电机简化后的传递函数对应的框图

2. 陀螺仪动态模型

系统中的陀螺用来测量负载轴的转动角速度, 根据测试给出的陀螺的传递函数为

$$\frac{V(s)}{\omega(s)} = \frac{K_G \omega_G^2}{s^2 + 2\xi \omega_G s + \omega_G^2} \quad (3-17)$$

其中, s 为 Laplace 算子; K_G 为比例系数; ξ 为阻尼比; ω_G 为截止频率。

3. 其他环节的传递函数

A/D 转换：由于速度环的采样频率较高，通常不小于 1kHz，所以它是一个比例环节，系数记为 K_A 。

功率放大器：功率放大器采用 PWM 方式功率放大，正常工作情况下，也可以视为比例环节，系数为 K_M 。

3.1.3 系统参数

1. 结构参数

根据实际测量结果，输出轴上的转动惯量、摩擦力矩及减速比如表 3.1 所示。

表 3.1 转动惯量、摩擦力矩及减速比

	转动惯量/(N·m)	摩擦力矩/(N·m)	减速比
方位轴	0.0273	0.0340	75/19
俯仰轴	0.012	0.0196	61/33

2. 陀螺仪参数

陀螺仪在系统中用于测速，其参数如下：

- 比例系数：100mV/(°/s)。
- 线性范围：±80°/s。
- 带宽：55Hz。
- 截止频率： $\omega_G=346\text{rad/s}$ 。
- 阻尼系数： $\xi=0.7$ 。

3. 直流力矩电机参数

直流力矩电机的参数如下：

- 峰值堵转电压：27V。
- 峰值堵转电流：4.3A。
- 峰值堵转力矩：0.85N·m。
- 连续堵转电压：9.5V。
- 连续堵转电流：1.5A。
- 连续堵转力矩：0.3N·m。

- 最大空载转速：1000r/min。
- 转矩波动系数： $\leq 10\%$ 。
- 电枢转动惯量： $6.8 \times 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。
- 电器时间常数：1.5ms。

4. 其他参数估算

假设 PWM 功放在调宽输入 5V 时,相当于输入数字量 3750,调宽到头,电机电源 27V。因此,PWM 功放参数为

$$K_M = \frac{27}{3750} = 0.0072$$

指标要求运动角速度不低于 $30^\circ/\text{s}$,陀螺的线性测量范围定为 $\pm 50^\circ/\text{s}$,陀螺的输出比例系数是 $100\text{mV}/(^\circ/\text{s})$,对应 A/D 转换的输入为 $\pm 10\text{V}$ 。假设此时 16 位 A/D 转换为正负全量程(8000~7FFF),这时有

$$K_A = 3276.8/\text{V}$$

实际上,这意味着速度环输入端相加点处的数字量纲为

$$3750 \sim 32768 \sim 10\text{V} \sim 100^\circ/\text{s} \left(\text{或} \frac{100}{57.3} \text{rad/s} \right)$$

3.1.4 力矩电机参数核算

1. 最大驱动力矩核算

根据技术要求提出的载体运动条件及估算的摩擦力矩,可以计算轴上要求的最大力矩。要求角运动的频率为 3Hz,幅度为 2° ,所以其最大角速度和最大角加速度分别为

$$\dot{\theta}_{\max} = 2 \times 2 \times 3 \times \pi = 37.7^\circ/\text{s} (0.658 \text{rad/s}) \quad (3-18)$$

$$\ddot{\theta}_{\max} = 2 \times (2 \times 3 \times \pi)^2 = 710.6^\circ/\text{s}^2 (12.4 \text{rad/s}^2) \quad (3-19)$$

由此可以确定力矩电机所需的最大转矩。驱动电机产生的力矩用来克服摩擦力矩和实现角加速度所需的惯性力矩,再考虑到方位轴减速比为 75/19,因此方位轴要求的最大驱动力矩为

$$M_{\max}^1 = (0.034 + 0.0273 \times 12.4) \times 19/75 = 0.099 \text{N} \cdot \text{m} \quad (3-20)$$

同样,俯仰轴要求的最大驱动力矩为

$$M_{\max}^2 = (0.0196 + 0.012 \times 12.4) \times 33/61 = 0.082 \text{N} \cdot \text{m} \quad (3-21)$$

从上面的计算可以看出,两环的驱动力矩大致相当,都小于所选电机的连续堵转力矩 ($0.3 \text{N} \cdot \text{m}$) 的一半,电机满足驱动力矩的要求。

2. 最大驱动角速度核算

根据前面计算的最大角速度 $\dot{\theta}_{\max} = 37.7^\circ/\text{s}$, 可以求出方位轴最大输出角速度要求

$$\dot{\theta}'_{\max} = 37.7 \times 60/360 \times 75/19 = 24.8(\text{r/m}) \quad (3-22)$$

同理可得俯仰轴最大输出角速度要求

$$\dot{\theta}'_{\max} = 37.7 \times 60/360 \times 61/33 = 11.6(\text{r/m}) \quad (3-23)$$

此值远远小于电机的最高转速(1000r/min), 电机满足速度要求。

3. 力矩电机动态模型的参数

根据前面的电机模型和电机参数, 可以计算直流力矩电机动态模型中的 K_1 、 K_2 、 T_e 、 T_m 等 4 个参数。在计算这 4 个参数前, 尚需先计算电机的 C_e 、 C_m 、 R_a 及两轴上的等效转动惯量

$$C_e = \frac{27 \times 57.3 \times 60}{1000 \times 360} = 0.25785(\text{V}/(\text{rad/s})) \quad (3-24)$$

$$C_m = \frac{0.3}{1.5} = 0.2(\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}) \quad (3-25)$$

$$R_a = \frac{27}{4.3} = 6.28(\Omega) \quad (3-26)$$

$$J'_1 = 0.0273 \times \left(\frac{19}{75}\right)^2 + 6.8 \times 10^{-5} = 0.00182\text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3-27)$$

$$J'_2 = 0.012 \times \left(\frac{33}{61}\right)^2 + 6.8 \times 10^{-5} = 0.00358\text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3-28)$$

厂家已经给出电机的电气时间常数为

$$T_e = 1.5\text{ms} \quad (3-29)$$

其余参数为

$$T_{m1} = \frac{J'_2 R_a}{C_e C_m} = \frac{0.00358 \times 6.28}{0.25785 \times 0.2} = 0.222\text{s} \quad (3-30)$$

$$T_{m2} = \frac{J'_1 R_a}{C_e C_m} = \frac{0.00182 \times 6.28}{0.25785 \times 0.2} = 0.436\text{s} \quad (3-31)$$

$$K_1 = \frac{C_m}{R_a} = \frac{0.2}{6.28} = 0.03185 \quad (3-32)$$

$$K_2 = \frac{R_a}{C_e C_m} = \frac{6.28}{0.25785 \times 0.2} = 121.78 \quad (3-33)$$

3.1.5 系统模型

我们将电机模型和陀螺模型代入图 3.2 中,可得系统模型如图 3.6 所示。该图表示的就是吊舱陀螺稳定系统一个轴的模型,其中 θ_i 为光轴空间角度, θ_o 为视轴空间角度, K_M 为 PWM 电源功放工作在线形区时的比例系数, K_A 为 A/D 环节比例系数, K_W 是折算比例环节, i 为减速器的减速比。

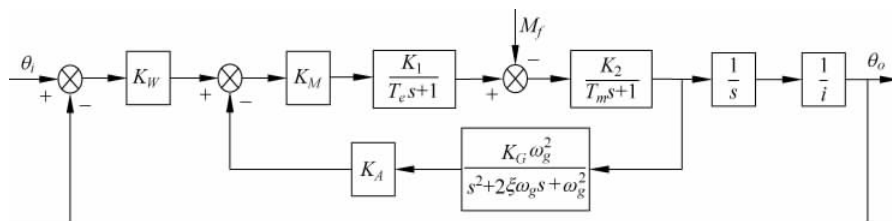


图 3.6 系统模型

代入电机参数、吊舱负载参数和陀螺参数后,在不考虑脱靶量时,可得到系统方位轴传递函数框图如图 3.7 所示。俯仰轴传递函数框图如图 3.8 所示。

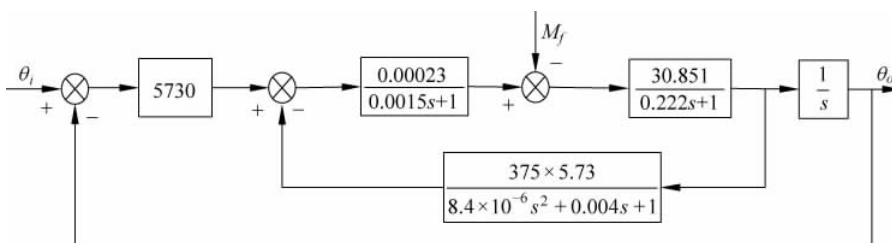


图 3.7 方位轴传递函数框图

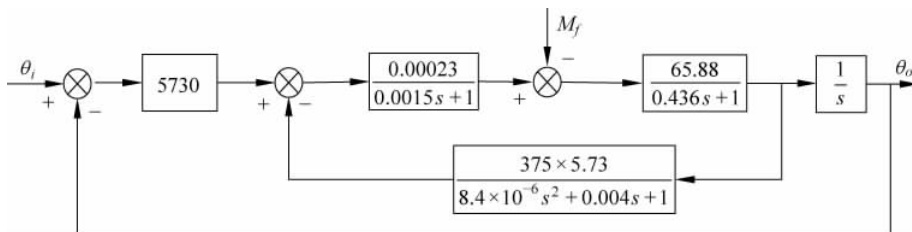


图 3.8 俯仰轴传递函数框图

3.1.6 吊舱陀螺稳定系统期望动态特性

光电吊舱稳定系统使用环境较为复杂,受到的干扰也较为复杂,仿真中采用的干扰力矩模型为方波,其频率为 3Hz,幅度为 $0.034\text{N} \cdot \text{m}$ 。在加入扰动情况下,实验要求实际位置误差有效值应小于 1mrad(RMS) 。而且系统速度环超调量 $\sigma \leq 15\%$,调节时间 $t_{s1} \leq 0.1\text{s}$ 。位置环调整时间 $t_{s2} \leq 0.2\text{s}$ 。

3.1.7 方位轴 PID 校正与分析

下面以方位轴为例,进行控制器设计。

1. 方位轴速度环 PI 校正

方位轴速度环方框图如图 3.9 所示。

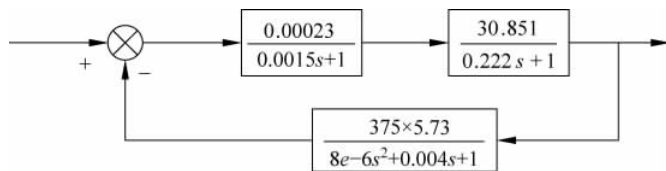


图 3.9 方位轴速度环方框图

由图 3.9 可以近似计算出方位轴速度环开环传递函数

$$G(s) = \frac{15.2469}{0.0012s^2 + 0.2275s + 1} \quad (3-34)$$

根据方位轴速度环开环传递函数,利用 MATLAB 画出系统开环 bode 图如图 3.10 所示。由图 3.10 可以得出在不加校正环节的情况下,系统的相位裕度为 72.1° ,幅值裕度为 13.8dB,截止频率为 60.1rad/s 。

在不加入速度环校正环节时,对方位轴速度环加入 $10^\circ/\text{s}$ 的阶跃信号,由于速度环的输入是数字量,所以输入是 $10^\circ/\text{s}$ 的阶跃信号的数字量 375。方位轴速度环仿真方框图如图 3.11 所示,速度环响应输出曲线如图 3.12 所示。由图 3.12 可知,阶跃响应过渡过程中,没有超调,调节时间也较短,但是存在较大的稳态误差。在不考虑脱靶量,不加位置环校正时,加入 1rad 位置阶跃信号,方位轴位置环仿真方框图如图 3.13 所示,位置环输出响应曲线如图 3.14 所示。

由于系统方位轴速度环输出响应存在较大稳态误差,系统需要加以校正,首先用传统 PI 控制方法对方位轴速度环加以补偿,消除速度环的稳态误差。其次,还应对位置环引

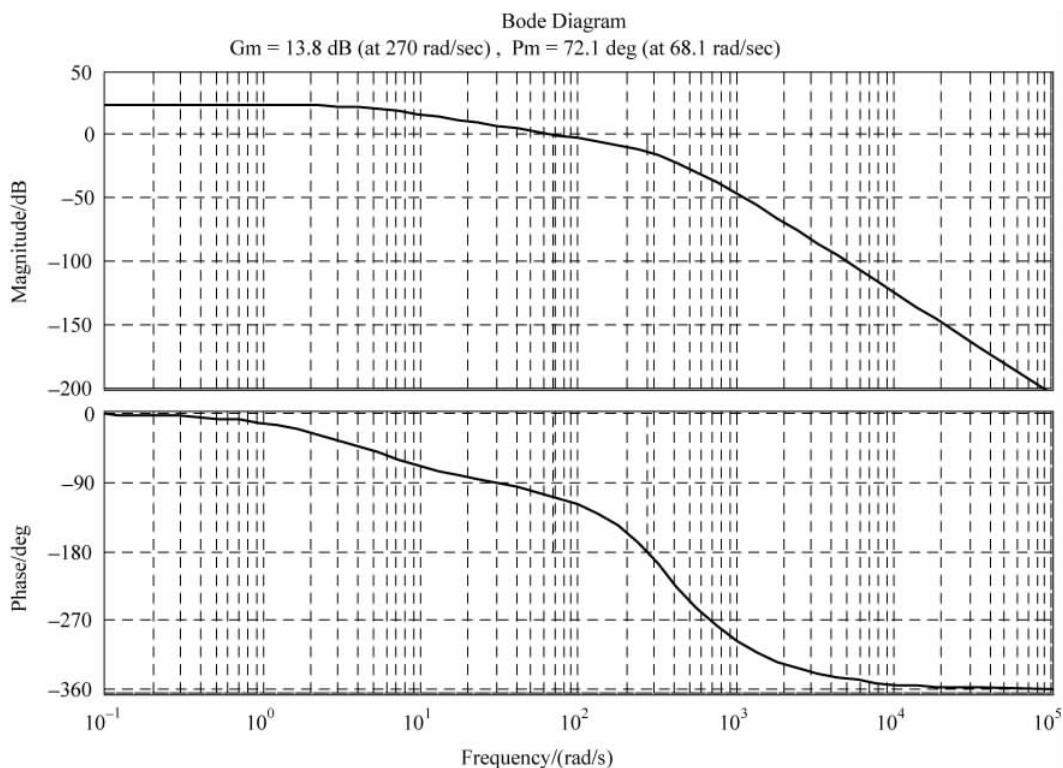


图 3.10 方位轴速度环开环 bode 图

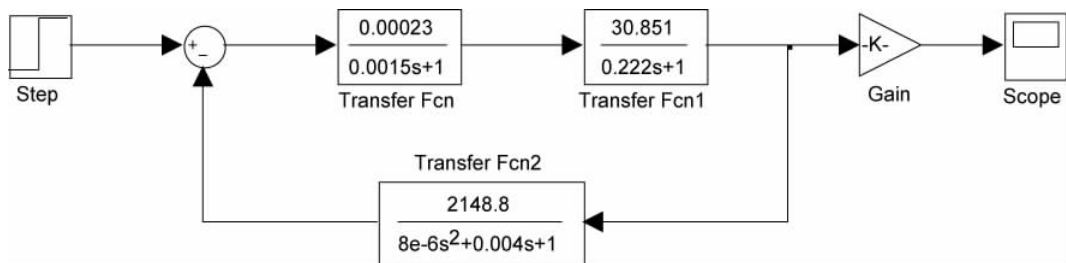


图 3.11 方位轴速度环仿真方框图(未加入扰动)

入适当的 PD 控制,提高系统的响应速度。

经过多次仿真,对其速度环采用 PI 控制器校正,取 $K_p=1.5$, $K_i=8.8$ 。方位轴 PID 校正仿真方框图如图 3.15 所示。由图 3.15 可以根据 PI 控制的传递函数近似计算出方位轴速度环开环传递函数为

$$G(s) = \frac{214.6771s + 24.3951}{s(0.0109s^2 + 2.0020s + 8.8)} \quad (3-35)$$

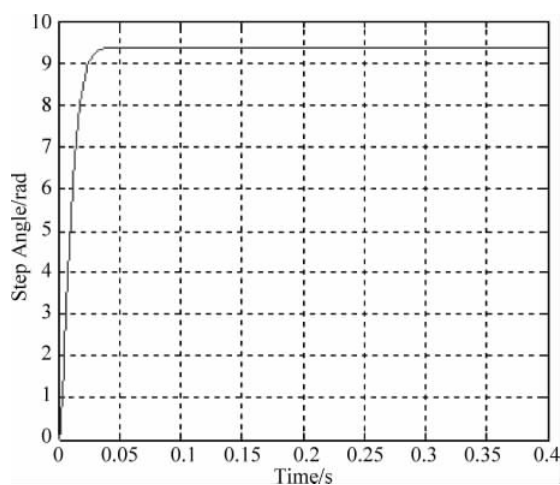


图 3.12 方位轴速度环阶跃输入响应过程(未加入扰动)

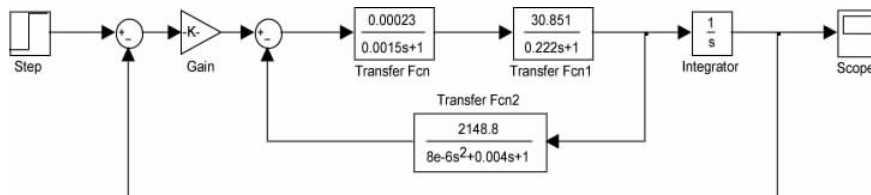


图 3.13 方位轴位置环仿真方框图(未加入扰动)

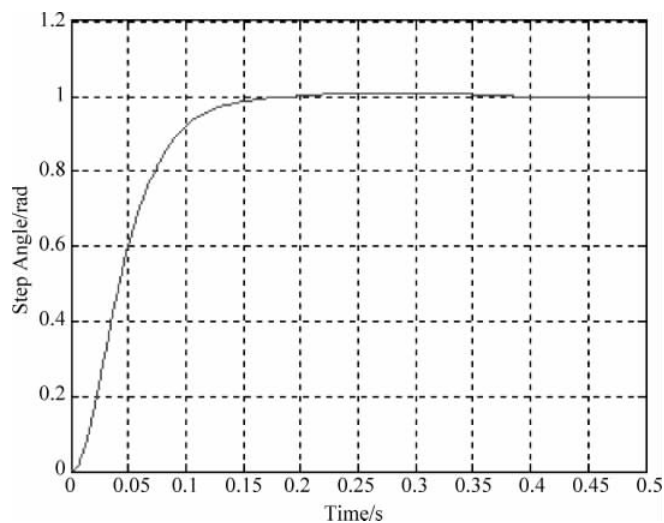


图 3.14 方位轴位置环阶跃输入过渡过程(未加入扰动)

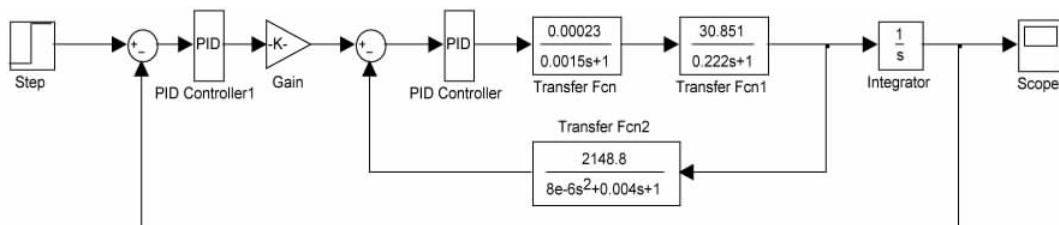


图 3.15 方位轴位置环 PID 校正仿真框图

根据方位轴速度环开环传递函数可以画出校正后方位轴速度环开环 bode 图,如图 3.16 所示。

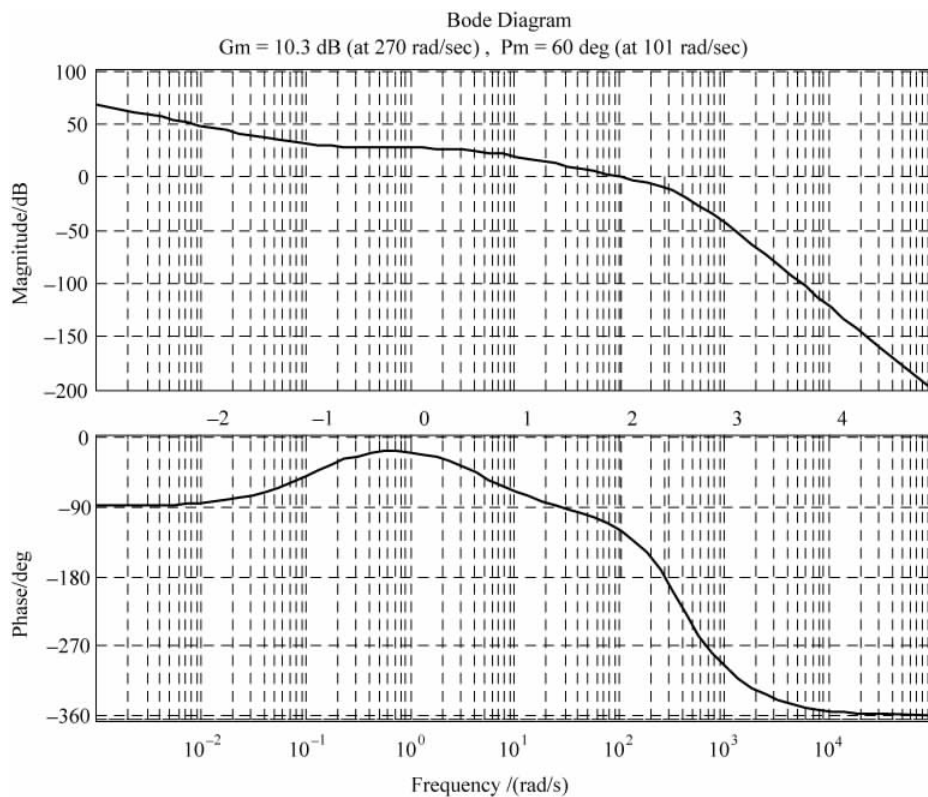


图 3.16 校正后方位轴速度环开环 bode 图

从图 3.16 中可以得到幅值裕度为 10.3dB,相角裕度为 60° ,截止频率 $\omega_c = 101\text{rad/s}$ 。为了消除系统的稳态误差,我们加入了较大的积分环节,校正后速度环的阶跃输出响应如

图 3.17 所示。从图中可以看出响应速度加快了,虽然有将近 10% 的超调量,但克服了速度环较大的稳态误差,此时速度环稳态误差基本满足系统要求,与未加校正时相比有所改善。

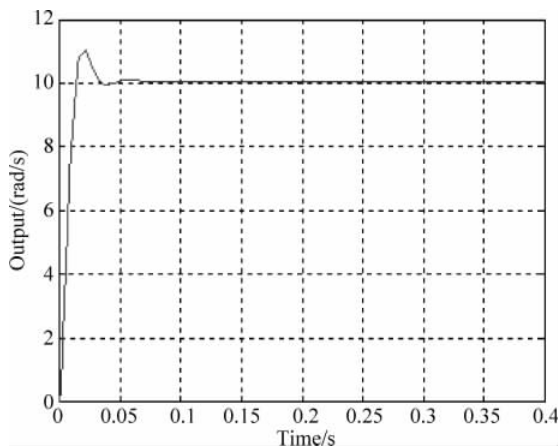


图 3.17 方位轴速度环校正后阶跃输出响应

2. 位置环 PD 校正

当吊舱中的光电仪器需要瞄准并跟踪目标时,位置环闭环工作。位置环是通过将计算的脱靶量作为误差反馈实现闭环的。

由于光电仪器成像的机理决定了图像的采样和脱靶量的计算周期较长,不少于 $T_1 = 20\text{ms}$,而伺服控制系统的运算周期 $T_2 = 1\text{ms}$,所以在两次脱靶量输出之间必须采用预测算法为控制系统提供输入。

最简单的预测算法为抛物线拟合法。抛物线预测法的原理如图 3.18 所示,其中 t 是采样时间, x 是脱靶量。

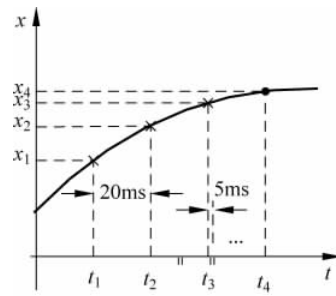


图 3.18 脱靶量预测算法原理图

所谓抛物线拟合,是指对三个已知点 (x_1, t_1) 、 (x_2, t_2) 、 (x_3, t_3) 求出一个二次多项式(抛物线) $P(t) = a + bt + ct^2$,使 $X = P(t)$ 。 a 、 b 、 c 可由下列方程组求解

$$x_1 = a + bt_1 + ct_1^2 \quad (3-36)$$

$$x_2 = a + bt_2 + ct_2^2 \quad (3-37)$$

$$x_3 = a + bt_3 + ct_3^2 \quad (3-38)$$

解出 a 、 b 、 c 后,可根据 $x = a + bt + ct^2$ 求出 t_3 至 $t_3 + T_1$ 之间每隔 $T_2 (1\text{ms})$ 的各点 $x(t)$ 。有了脱靶量预测后,位置环可以按连续线性系统进行设计。

在仿真时,不考虑脱靶量延时,在方位轴位置环采用 PD 控制,选取 $k_p = 21$ 、 $k_d = 0.001$,位置环响应速度更快。利用 MATLAB 对系统方位轴进行仿真,这时并未加入扰动,即 $M_f = 0$,方位轴位置环阶跃响应曲线如图 3.19 所示。

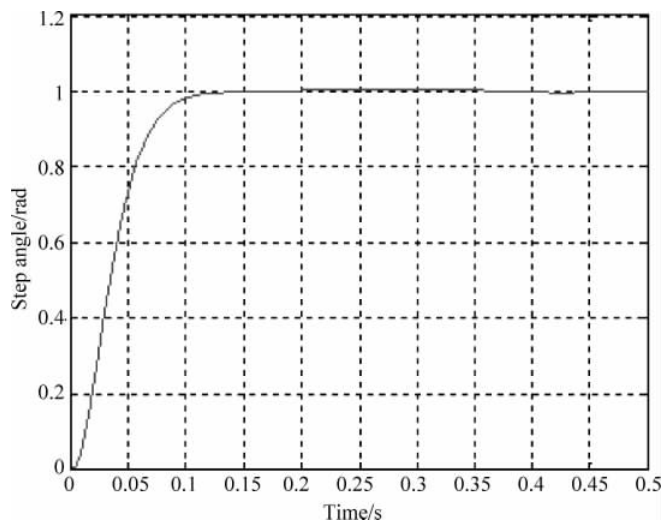


图 3.19 方位轴位置环校正后阶跃响应

3. 方位轴校正前后对扰动的抑制作用分析

上一小节的仿真与分析都是在未引入扰动 M_f 的情况下进行的,对方位轴速度环和位置环的阶跃响应进行了讨论,经过 PID 校正后,系统性能得到了很大提高,可是,系统实际工作环境非常复杂,扰动力矩 M_f 对系统的影响必须加以考虑。在扰动力矩作用下,系统的精度是衡量系统好坏的重要指标,更具实际意义。下面对引入扰动力矩 M_f 时,方位轴的速度环和位置环响应和精度等情况加以说明。

扰动力矩 M_f 是根据摩擦力矩分析和实测参数分析得到的,这里将扰动力矩 M_f 的模型近似简化为幅度 $0.034\text{N} \cdot \text{m}$ 、频率 3Hz 的方波。 M_f 模型如图 3.20 所示,这个扰动力矩直接作用于速度环。

对于方位轴位置环,系统在不加入阶跃的位置指令时,只有干扰力矩的作用下,位置环仿真方框图如图 3.21 所示。PID 校正前后系统位置误差比较图 3.22 所示,系统位置误差从校正前的大于 2mrad 降低到了校正后的 0.8mrad 以下。在方位轴系统中加入经典 PID 控制器后,精度有明显的提高,系统响应精度达到实验要求。

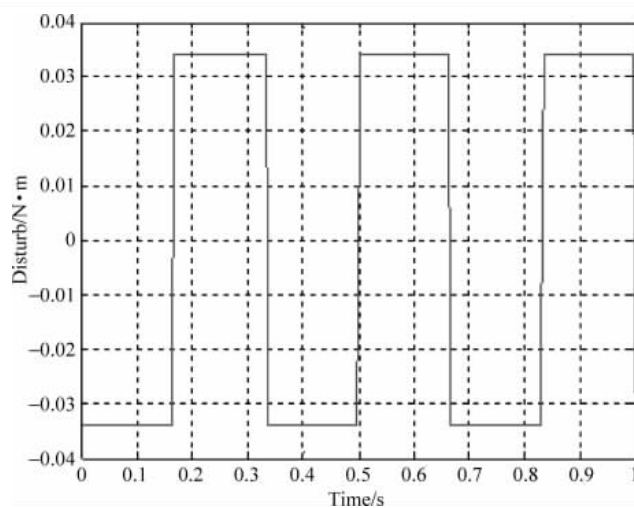
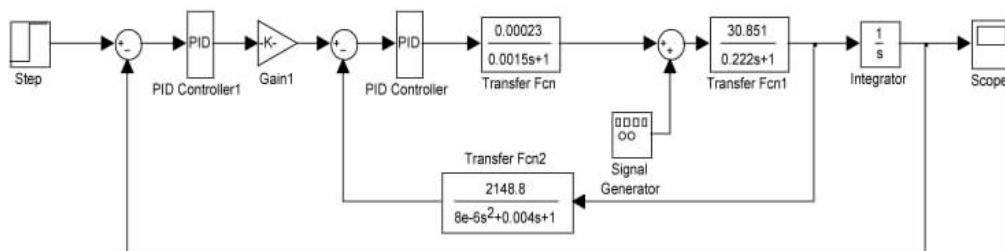
图 3.20 扰动力矩 M_f 模型图

图 3.21 方位轴位置环加入干扰后仿真方框图

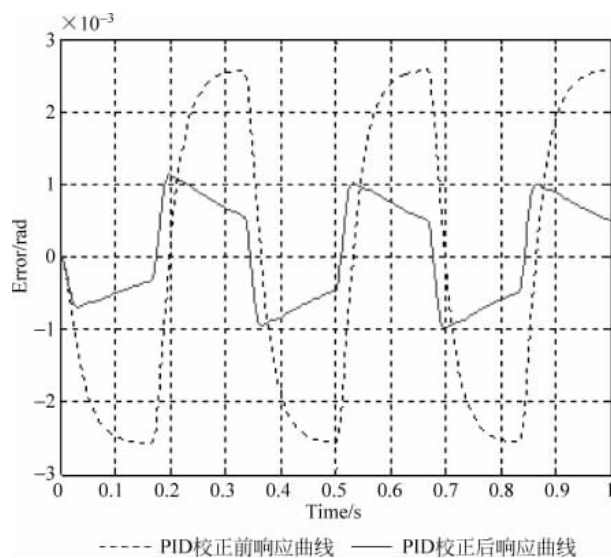


图 3.22 方位轴速度环加入干扰后 PID 校正前后位置误差曲线

3.2 船用三轴稳定平台

捷联式稳定平台利用舰船导航系统提供的横摇角、纵摇角和航向角等姿态信息,通过计算机实时进行解算,将舰船的姿态信息转换为平台在方位轴、横滚轴和俯仰轴上的运动,然后利用稳定平台的稳定控制系统控制平台朝相反的方向转动,实现三轴平台相对地理坐标系的稳定。捷联式稳定平台的稳定精度与导航系统提供的姿态信息精度及坐标变换精度密切相关。

3.2.1 三轴稳定平台的结构

如图 3.23 所示,舰载激光武器的三轴稳定平台是一个三轴的常平架结构,由外到内依次是方位环、倾斜环和俯仰环。外环可以实现相对基座的 360° 连续转动,中环可以相对外环转动,内环可以相对中环转动,三个轴系互相垂直。安装时,方位轴的零位与舰船艏艉线平行,中环和内环的零位处于水平面,三个轴上分别装有动力矩电机、测速机、角度传感器和导电滑环。稳定平台控制器根据舰船导航设备提供的舰船姿态角进行坐标变换,把舰船的摇摆运动分解到稳定平台的三个轴上,控制力矩电机以相反的方向转动,来使平台隔离舰船的摇摆运动,跟踪地理坐标系。其中 M_x 、 M_y 和 M_z 为力矩电机—测速电机组, T_x 、 T_y 和 T_z 为旋转变压器。

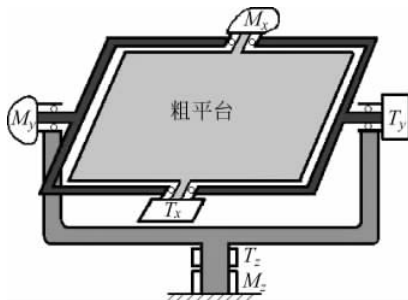


图 3.23 三轴稳定平台结构示意图

3.2.2 三轴稳定平台控制系统组成

三轴稳定平台为机电框架结构,其每个轴的控制系统模型由电流环、速度环和位置环构成。由于三轴稳定平台的负载很大,所以本系统采用无刷直流力矩电机作为驱动元件,无刷直流力矩电机的输出经减速比为 i 的谐波减速器减速后驱动三轴稳定平台的各框架。三轴稳定平台的三个转动轴在控制上是相互独立的,放大和控制原理是一样的,只是控制参数和系统参数不同而已,在这里仅以方位轴为例介绍三轴稳定平台稳定控制系统的组成。方位轴控制系统框图如图 3.24 所示,图中 ψ 、 φ 、 θ 分别为舰船的航向角、横摇角和纵摇角, α' 为方位轴实际转动角度。

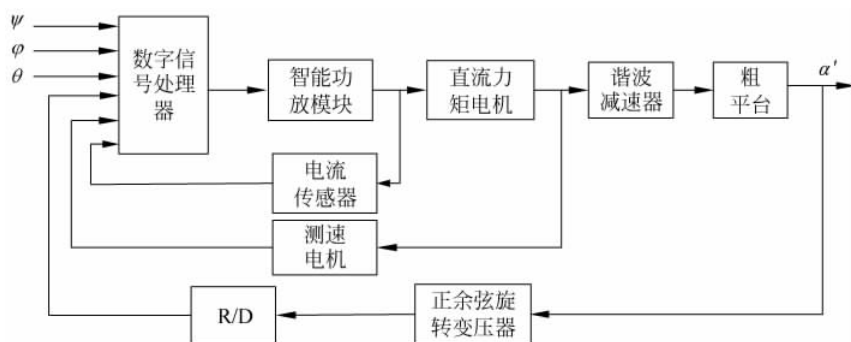


图 3.24 方位轴控制系统框图

由图 3.24 可知,三轴稳定平台稳定控制系统主要包括直流力矩电机—测速机组、谐波减速器、智能功放模块、正余弦旋转变压器及 R/D、电流传感器以及数字信号处理器。

(1) 直流力矩电机—测速机组

直流力矩电机—测速机组是三轴稳定平台稳定系统的驱动元件,直流力矩电机的选择直接关系着系统的性能,而无刷式直流力矩电机体积小、效率高、寿命长,无须进行电刷维护,是很好的选择。无刷直流力矩电机的选择主要是根据连续堵转力矩和空载转速两项参数来确定,这两项参数和三轴稳定平台的运动特性、技术要求及摩擦干扰力矩的特性有关。首先根据技术要求提出的舰船运动条件和摩擦力矩,计算出稳定平台轴上所需的最大驱动力矩,一般所选无刷直流力矩电机的连续堵转力矩是最大驱动力矩的两倍以上。再根据技术要求提出的舰船运动条件计算出三轴稳定平台的最大角速度要求,无刷直流力矩电机的空载转速要远大于稳定平台的最大角速度。测速机的选择主要依据测速机的最大线性范围和输出斜率。

(2) 谐波减速器

谐波减速器的作用是将电机轴输出的高速转动减速为平台轴的低速转动,同时将电机轴输出的小力矩转变为大力矩。谐波减速器的重要指标有回差、承载力矩和减速比。回差的大小对跟踪精度影响很大,应着重考虑;承载力矩和减速比应根据平台的转动惯量、最大转动角加速度和电机的堵转力矩进行选择。

(3) 智能功放模块

无刷直流力矩电机采用脉冲调宽(PWM)方式进行驱动,三相 PWM 波形必须按照电机不同时刻的轴角位置正确地加到无刷直流力矩电机三相当中的某两相上,才能使无刷直流力矩电机正常工作。PWM 功率放大器的设计比较复杂,而智能功放模块(IPM)可以大大降低设计的复杂性,同时 IPM 的瞬间工作电流很高,还具有过热、过流、过压、欠压保护,使系统的可靠性大大提高。

(4) 正余弦旋转变压器及 R/D

正余弦旋转变压器用于检测三轴稳定平台两个轴的转动轴角,以实现角度闭环。正余弦旋转变压器选用粗精组合式旋转变压器,粗精比为 1:64。旋转变压器的输出经轴角数字转换模块(R/D)进行粗精组合,组合后的精度为 20 位,则对应的轴角测量精度为 $1.23''$ 。

(5) 电流传感器

电流传感器用于测量直流力矩电机电枢回路的电流,以实现电流反馈。选择电流传感器主要考虑的因素有测量范围、测量线性度以及准确度。

(6) 数字信号处理器

数字信号处理器的作用是对舰船导航系统提供的航向角、横摇角和纵摇角进行实时的解算,将舰船的姿态角转换为三轴稳定平台两个轴上的等效转动角度、角速度和角加速度,同时对旋转变压器经 R/D 变换后的轴角信号、测速电机信号和电流传感器信号进行采样,经过相应的控制算法输出控制量,从而控制两轴稳定平台相应轴上的无刷直流力矩电机来驱动稳定平台转动,隔离舰船的摇摆,跟踪当地地理坐标系。

3.2.3 三轴稳定平台稳定控制系统动态模型

这里仅以方位轴为例,建立三轴稳定平台稳定系统的模型,主要包括建立无刷直流力矩电机及负载的模型、测速电机模型、谐波减速器模型、IPM 模型、旋转变压器及 R/D 模型和电流传感器模型。

1. 无刷直流力矩电机及负载的模型

从工程角度看,无刷直流力矩电机的工作原理可用图 3.25 所示的等效电路来表示。

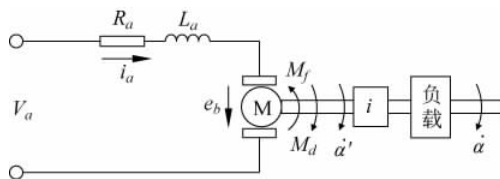


图 3.25 无刷直流力矩电机等效电路

无刷直流力矩电机采用 PWM 方式驱动,由于脉冲调宽电流频率比较高,因此可以忽略电枢中电流的波动性,把电流看作直流,这时无刷直流力矩电机近似为线性元件。参考 3.1 节可以得出无刷直流力矩电机及负载传递函数方框图,如图 3.26 所示。

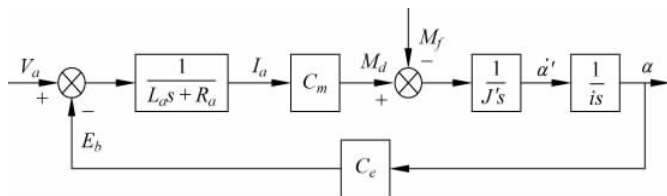


图 3.26 无刷直流力矩电机及负载传递函数方框图

2. 测速发电机模型

测速发电机的响应速度非常快,一般认为是瞬时的,它的输入为电机的转速 n ,单位为 rad/s ,输出为电压 u_n ,单位为 V ,在其线性区间内一般认为传递函数为比例环节,且比例系数为

$$k_v = \frac{u_n}{n} \quad (3-39)$$

3. 谐波减速器模型

谐波减速器的输入为力矩电机的转速 n ,其单位为 rad/s ,输出量为减速后的转速 n' ,其单位为 rad/s ,则其传递函数为

$$\frac{n'(s)}{n(s)} = \frac{1}{i} \quad (3-40)$$

其中 i 为谐波减速器的减速比。

4. IPM 模型

IPM 采用 PWM 方式,其输入是控制器输出电压 u_c ,输出是理想空载调制电压 u_a 。工程上,可将 PWM 功放元件看作一阶惯性环节,但是时间常数一般为 10^{-4}s ,所以可将其看作比例环节,其比例系数为

$$K_g = \frac{u_a}{u_c} \quad (3-41)$$

5. 旋转变压器及 R/D 模型

旋转变压器输出的轴角信号经 R/D 模块后的输出为轴角的数字量,并且转换的速度非常快,一般为微秒级,因而其传递函数可认为是比例环节,其比例系数为 1。

6. 电流传感器模型

电流传感器的输出经过适当的软件处理,可以认为在测量范围内是线性的,其传递函

数可以认为是比例环节,其比例系数为 1。

3.2.4 系统模型参数

为了分析和仿真闭环系统的动态特性,并验证控制方法的有效性,需要知道系统中各环节的参数,主要包括无刷直流力矩电机、测速发电机、旋转变压器及 R/D 转换器、IPM、谐波减速器等器件的参数。由于三轴稳定平台的三个轴在结构上是相同的,只是结构参数不同而已,所以下面仅以方位轴为例加以说明,其系统参数见表 3.2。

表 3.2 系统参数

	数 值	单 位
等效转动惯量 J'	0.465	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
力矩电机电枢电阻 R_a	3	Ω
力矩电机电枢电感 L_a	3	mH
电机的转矩系数 C_m	1.425	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$
电机的反电势系数 C_e	1.314	$\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$
测速机电比例系数 K_v	0.127	$\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$
功放系数 K_g	12.5	—
减速比 i	160	—

3.2.5 三轴稳定平台的解算模型

数字式三轴捷联式稳定平台由三个常平架支撑,在结构上由外到内依次是方位环、横滚环和俯仰环。惯导系统的结构由外到内依次是横摇环、纵摇环和方位环,由于该稳定平台和惯导系统的结构不同,导航设备输出的舰船姿态角(航向角 ψ 、横摇角 φ 、纵摇角 θ)需要经过坐标变换分解为三轴稳定平台三维运动的角度,即稳定平台三个轴的转动角度(方位角 α 、俯仰角 β 、横滚角 γ),然后由三轴稳定平台稳定回路带动稳定平台相应的轴反向转动 α 、 β 、 γ 角,从而抵消舰艇的摇摆运动,实现三轴稳定平台姿态的稳定和控制。坐标变换的同时对舰船摇摆角速度 $\dot{\psi}$ 、 $\dot{\varphi}$ 、 $\dot{\theta}$ 进行解算得到 $\dot{\alpha}$ 、 $\dot{\beta}$ 、 $\dot{\gamma}$,角加速度 $\ddot{\alpha}$ 、 $\ddot{\beta}$ 、 $\ddot{\gamma}$ 可以通过角速度 $\dot{\alpha}$ 、 $\dot{\beta}$ 、 $\dot{\gamma}$ 差分得到,角速度和角加速度分别用做三条稳定回路的前馈控制量,从而提高三轴稳定平台控制系统的动态跟踪精度。三轴稳定平台控制系统结构如图 3.27 所示。

1. 系统坐标系的定义

舰船主惯导系统给出的舰船姿态角与三轴稳定平台的姿态角不在一个坐标系,它们

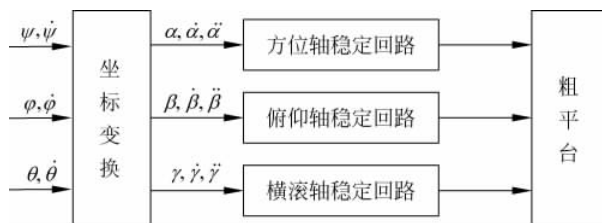


图 3.27 三轴稳定平台控制系统结构图

之间存在转动关系,为了把它们分解到稳定平台的方位轴、横滚轴和俯仰轴三个转动轴上,需要进行坐标变换,为此建立以下三个坐标系。下面仅讨论舰船及三轴稳定平台的转动关系,即角运动之间的关系,假设稳定平台的转动中心与舰船重心是重合的。

(1) 地理坐标系 $X_h Y_h Z_h$

地理坐标系 $X_h Y_h Z_h$ 是舰船所在位置的当地水平坐标系,如图 3.28 所示。该坐标系原点与舰船重心重合,原点随舰船一起运动。 X_h 轴水平指东, Y_h 轴水平指北, Z_h 指向天, X_h 、 Y_h 、 Z_h 呈右手坐标系。

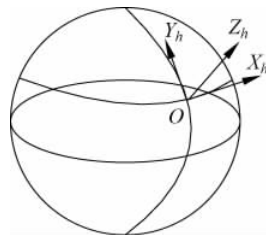


图 3.28 地理坐标系

(2) 船体坐标系 $X_s Y_s Z_s$

船体坐标系 $X_s Y_s Z_s$ 是与舰船固连的右手坐标系,如图 3.29 所示。该坐标系原点与舰船重心重合。 X_s 轴在舰船肋骨面内指向舰船的右舷, Y_s 轴与舰船的艏艉线平行指向船艏, Z_s 轴指天, X_s 、 Y_s 、 Z_s 呈右手坐标系。当舰船在水面上处于无摇摆且航向角为零的平衡状态时,地理坐标系 $X_h Y_h Z_h$ 与船体坐标系 $X_s Y_s Z_s$ 是重合的,该坐标系随舰船一起运动。

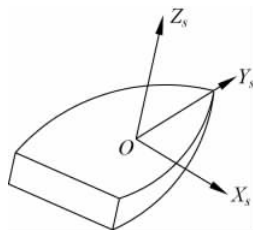


图 3.29 船体坐标系

(3) 平台坐标系 $X_p Y_p Z_p$

平台坐标系 $X_p Y_p Z_p$ 与平台固连,如图 3.30 所示。该坐标系原点在稳定平台台面的中心, X_p 轴与内环轴重合指向右侧, Y_p 轴与中环轴重合指向船艏, Z_p 轴指向天, X_p 、 Y_p 、 Z_p 呈右手坐标系,该坐标系随平台一起转动。

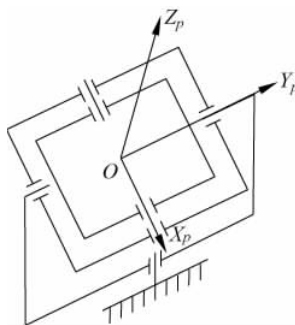


图 3.30 平台坐标系

2. 系统的坐标变换

关于上面定义的 3 个坐标系,平台坐标系与地理坐标系之间的关系是“间接”的,它们是通过船体坐标系联系在一起的,因此要研究平台坐标系与地理坐标系之间的关系,就要分别研究平台坐标系与船体坐标系,以及船体坐标系与地理坐标系之间的关系,再通过旋转矩阵计算出平台坐标系与地理坐标系之间的关系。

1) 平台坐标系与船体坐标系之间的关系

平台坐标系与船体坐标系之间的关系取决于平台在稳定系统的控制作用下产生的三个转动角 α 、 β 、 γ 。根据两轴稳定平台系统的机械结构,平台坐标系按方位角 $\alpha \rightarrow$ 横滚角 $\gamma \rightarrow$ 俯仰角 β 的顺序三次转动偏开了船体坐标系,根据这一顺序,可以得出坐标旋转关系为

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} = \mathbf{R}_x(\beta)\mathbf{R}_y(\gamma)\mathbf{R}_z(\alpha) \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad (3-42)$$

式(3-42)中, $\mathbf{R}_x(\beta)$ 、 $\mathbf{R}_y(\gamma)$ 、 $\mathbf{R}_z(\alpha)$ 分别为坐标系统 X、Y、Z 轴转动时的旋转变换矩阵。

令 $\mathbf{R}_{ps} = \mathbf{R}_x(\beta)\mathbf{R}_y(\gamma)\mathbf{R}_z(\alpha)$, 根据矢量坐标旋转原理有

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{ps} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\gamma\cos\alpha & \cos\gamma\sin\alpha & -\sin\gamma \\ \sin\beta\sin\gamma\cos\alpha - \cos\beta\sin\alpha & \sin\beta\sin\gamma\sin\alpha + \cos\beta\cos\alpha & \sin\beta\cos\gamma \\ \cos\beta\sin\gamma\cos\alpha + \sin\beta\sin\alpha & \cos\beta\sin\gamma\sin\alpha - \sin\beta\cos\alpha & \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix} \quad (3-43) \end{aligned}$$

2) 船体坐标系与地理坐标系之间的关系

舰船的姿态角是由舰船上的主惯导系统测量的,考虑到主惯导系统的常平架结构及其测角机理,船体坐标系 $X_s Y_s Z_s$ 按航向角 $\psi \rightarrow$ 纵摇角 $\theta \rightarrow$ 横摇角 ϕ 的顺序三次转动偏开了地理坐标系 $X_h Y_h Z_h$ 。根据这一顺序,可以得出坐标旋转关系为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \mathbf{R}_y(\phi)\mathbf{R}_x(\theta)\mathbf{R}_z(\psi) \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \end{bmatrix} \quad (3-44)$$

式(3-44)中, $\mathbf{R}_y(\phi)$ 、 $\mathbf{R}_x(\theta)$ 、 $\mathbf{R}_z(\psi)$ 分别为坐标系统 Y、X、Z 轴转动时的旋转变换矩阵。

令 $\mathbf{R}_{sh} = \mathbf{R}_y(\phi)\mathbf{R}_x(\theta)\mathbf{R}_z(\psi)$, 根据矢量坐标旋转原理有

$$\mathbf{R}_{sh} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\psi - \sin\varphi \sin\theta \sin\psi & \cos\varphi \sin\psi + \sin\varphi \sin\theta \cos\psi & -\sin\varphi \cos\theta \\ -\cos\theta \sin\psi & \cos\theta \cos\psi & \sin\theta \\ \sin\varphi \cos\psi + \cos\varphi \sin\theta \sin\psi & \sin\varphi \sin\psi - \cos\varphi \sin\theta \cos\psi & \cos\varphi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3-45)$$

3) 平台坐标系与地理坐标系之间的关系

平台稳定系统的作用就是始终使平台坐标系跟踪地理坐标系,即三轴稳定平台上任一点的坐标在平台坐标系和地理坐标系中应该是一样的,即

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \end{bmatrix} \quad (3-46)$$

由式(3-42)和式(3-44)可得

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{ps} \mathbf{R}_{sh} \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \end{bmatrix} \quad (3-47)$$

则

$$\mathbf{R}_{ps} = \mathbf{R}_{sh}^{-1} \quad (3-48)$$

为了求取 α, β, γ 与 φ, θ, ψ 的关系,选取如下方程

$$\begin{cases} \cos\gamma \sin\alpha = -\cos\theta \sin\psi \\ \cos\gamma \cos\alpha = \cos\varphi \cos\psi - \sin\varphi \sin\theta \sin\psi \\ \cos\beta \cos\gamma = \cos\theta \cos\psi \\ \sin\beta \cos\gamma = \sin\varphi \sin\psi - \cos\varphi \sin\theta \cos\psi \\ -\sin\gamma = \sin\varphi \cos\psi + \cos\varphi \sin\theta \sin\psi \end{cases} \quad (3-49)$$

从而可以得出舰载激光武器三轴稳定平台系统的数学平台解算模型为

$$\alpha = \operatorname{arccot} \left(\tan\theta \sin\varphi - \cot\psi \frac{\cos\varphi}{\cos\theta} \right) \quad (3-50)$$

$$\beta = \arctan \left(\tan\varphi \frac{\sin\varphi}{\cos\theta} - \tan\theta \cos\psi \right) \quad (3-51)$$

$$\gamma = -\arcsin(\sin\varphi \cos\psi + \cos\varphi \sin\theta \sin\psi) \quad (3-52)$$

式(3-50)~式(3-52)就是实现从舰船惯导系统测量的舰船姿态角 ψ, θ, φ 到三轴稳定平台转动角 α, β, γ 的坐标变换关系。如果在任意瞬间能使三轴稳定平台反向转动 α, β, γ 角,则稳定平台相对地理坐标系是不变的,这样就实现了稳定平台的姿态稳定。

同样,用欧拉法可以推导速度坐标变换公式

$$\mathbf{R}_z^T(\alpha) \mathbf{R}_y^T(\gamma) \begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_z^T(\alpha) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\gamma} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = - \left(\mathbf{R}_y(\varphi) \mathbf{R}_x(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_y(\varphi) \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\varphi} \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (3-53)$$

则角速度解算模型为

$$\dot{\alpha} = \dot{\beta} \sin \gamma - \dot{\theta} \sin \varphi - \dot{\psi} \cos \varphi \cos \theta \quad (3-54)$$

$$\dot{\beta} = \sin \gamma (-\dot{\theta} \sin \varphi \cos \alpha + \dot{\psi} \sin \varphi \cos \theta \cos \alpha - \dot{\psi} \sin \theta \sin \alpha - \dot{\varphi} \sin \alpha) \quad (3-55)$$

$$\dot{\gamma} = \dot{\theta} \sin \varphi \sin \alpha - \dot{\psi} \sin \varphi \cos \theta \sin \alpha - \dot{\psi} \sin \theta \cos \alpha - \dot{\varphi} \cos \alpha \quad (3-56)$$

角加速度信号由欧拉法推导比较麻烦,计算复杂,这里直接由角速度信号的差分得到。