

基于三自由度陀螺仪的导引头天线随动系统

⑩ 39-42, 45

王起飞

TN957.2

(航空工业总公司第〇一四中心 洛阳, 471009)

摘要: 安装在运动载体(导弹、飞机、舰船)上的雷达,其天线系统都要受到载体运动的扰动,因此稳定系统的设计是必不可少的。本文讨论一种基于三自由度陀螺仪的导引头天线随动系统的性质及分析方法。

关键词: 三自由度陀螺仪 天线随动系统 稳定 跟踪

雷达 导引头天线

1 引言

运动载体(导弹、飞机、舰船)上的雷达一般是与载体刚性连接的,因此其天线系统都要受到载体运动的扰动,解决的办法是将天线置于能够在惯性空间保持稳定的平台上。在工程上有两种类型的平台较为常见,即基于三自由度陀螺仪的稳定平台、基于速率陀螺仪的稳定平台。本文拟对一种基于三自由度陀螺仪的导引头天线随动系统的性质及分析方法作较详尽的讨论。

2 系统分析

先看一个简单的控制系统对输入和扰动的响应情况,图1为系统的方框图。在这一系统中将所有的干扰都折算到受控对象的输入端。系统的输入输出传递函数可表示为

$$\Phi(S) = \frac{C(S)}{R(S)} = \frac{G_c(S)G_p(S)}{1 + G_c(S)G_p(S)H(S)} \quad (1)$$

系统的扰动输出传递函数可表示为

$$\Psi(S) = \frac{C_d(S)}{D(S)} =$$

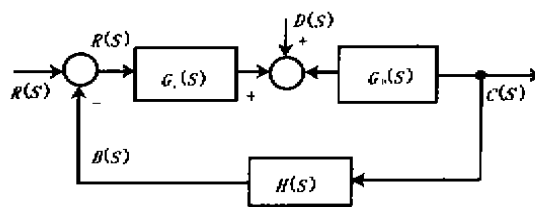


图1 简单控制系统框图

$$\frac{G_p(S)}{1 + G_c(S)G_p(S)H(S)} = \Phi(S) \cdot \frac{1}{G_c(S)} \quad (2)$$

系统的总输出为:

$$C(S) = \Phi(S)R(S) + \Psi(S)D(S) = \frac{G_c(S)G_p(S)R(S) + G_p(S)D(S)}{1 + G_c(S)G_p(S)H(S)} \quad (3)$$

天线随动系统的基本功能是使天线的轴线跟随目标视线,并尽可能地使两者保持重合。一个置于非运动载体上且以直流力矩电机作为动力机构的雷达天线随动系统的简化方框图可以由图2表示。图中, J 为折合到电机轴上的电枢及负载的总转动惯量, C_m 为电动机力矩系数, K_e 为电动机的反电势系数, K_s 为测速发电机的传递系数, R_a 为电动机电枢电阻, L_a 为电动机电枢电感。

当天线受到扰动时(比如阵风),就会在天线的负载轴上产生一个扰动角 θ_d , 同时通

收稿日期:1999-03-17

修改稿收到日期:1999-10-21

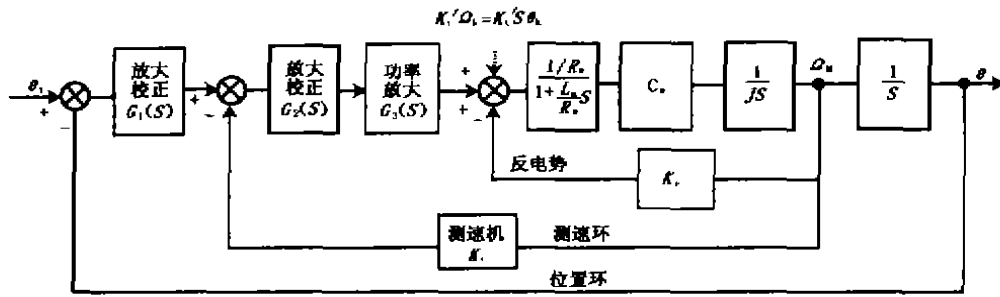


图2 雷达天线随动系统简化方框图

过反电势和测速电机引入干扰 $K_c S \theta_o$ 和 $K_c \theta_o$, 引入位置如图2虚线所示。若将这两个干扰信号移到相应的输入端, 然后再算出系统对阵风干扰的响应应为

$$\frac{\theta(S)}{\theta_o(S)} = \left[\frac{K_c S}{G_1(S)} + \frac{K_c S}{G_1(S)G_2(S)G_3(S)} \right] \cdot \Phi(S) \quad (4)$$

式中, $\Phi(S) = \theta(S)/\theta_i(S)$, 为位置闭环传递函数。

如果上述系统置于运动载体上, 载体的

扰动就会使系统无法工作, 这时就必须引入稳定平台, 作为稳定平台敏感元件的陀螺是不可缺少的。一个典型的基于三自由度陀螺仪的导引头天线随动系统的结构方框图如图3所示。

对基于三自由度陀螺仪的导引头天线随动系统来说, 无论从功能上、性能上、可靠性和使用寿命任一方面三自由度陀螺仪都起着决定性的作用。从功能上讲, 没有三自由度陀螺仪, 系统就不能消除弹体耦合; 从性

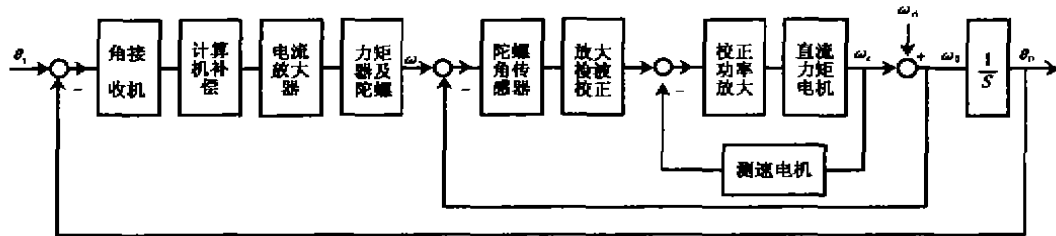


图3 基于三自由度陀螺仪的导引头天线随动系统方框图

能上讲, 三自由度陀螺仪的零漂是影响稳定和跟踪精度的主要因素; 从可靠性的意义上说, 陀螺属于最关键元器件; 而陀螺的使用寿命基本上就决定了导引头的寿命。

3 三自由度陀螺仪

3.1 三自由度陀螺仪的基本特性

三自由度陀螺仪通常是采用内环和外环组成的框架结构, 一个典型的三自由度陀螺仪的原理结构示意图如图4所示。

三自由度陀螺仪的基本特性是定轴性和进动性。所谓定轴性就是具有抵抗干扰力

矩、力图保持其自转轴相对惯性空间方位稳定的特性; 所谓进动性是指陀螺仪在外力矩作用下绕着与外力矩垂直的方向转动的特

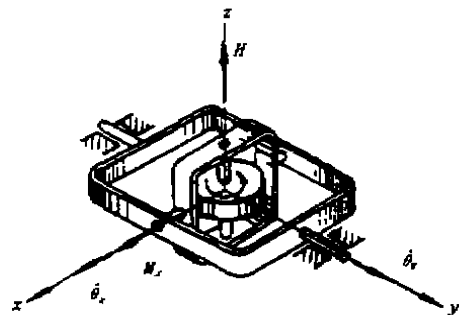


图4 三自由度陀螺仪原理结构示意图

性。陀螺仪进动的控制力矩通常是由陀螺仪中的力矩器产生的，如果力矩器的力矩系数为 k_m ，控制电流为 I_m ，则控制力矩为

$$M = k_m I_m$$

在该控制力矩作用下，陀螺仪的进动角速度为

$$\omega = \frac{k_m I_m}{H}$$

式中， k_m/H 称为指令速率标度因数，它代表了在单位控制电流作用下陀螺仪的进动角速度。为使陀螺仪在控制电流作用下能够精确地跟踪空间某一变动的方位，指令速度标度因数必须保持恒定，即陀螺角动量 H 和力矩器力矩系数 k_m 必须保持恒定。

3.2 三自由度陀螺仪的数学模型

根据陀螺动力学原理，陀螺动力学方程可由下式表示

$$\left. \begin{aligned} I_x \ddot{\theta}_x + H \dot{\theta}_y &= M_x \\ I_y \ddot{\theta}_y - H \dot{\theta}_x &= M_y \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

这里的转动惯量 I_x 是陀螺仪内环组件(包括转子和内环)对内环轴的转动惯量，转动惯量 I_y 是陀螺仪外环组件(包括转子、内环和外环)对外环轴的转动惯量， H 为转子角动量， θ_x 为陀螺仪绕外环轴进动角， θ_y 为陀螺仪绕内环轴进动角。对式(5)进行拉普拉斯变换，得到

$$\left. \begin{aligned} I_x S^2 \theta_x(S) + HS \theta_y(S) &= M_x(S) \\ I_y S^2 \theta_y(S) - HS \theta_x(S) &= M_y(S) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

显然，作用在外环轴上的外力矩，一方面引起陀螺仪绕外环轴转动使之出现转动角，另一方面还引起陀螺仪绕内环轴进动使之出现进动角，就是说，内环轴和外环轴存在着耦合关系，如果忽略陀螺仪章动的影响，则式(6)可以简化为

$$\left. \begin{aligned} HS \theta_y(S) &= M_x(S) \\ -HS \theta_x(S) &= M_y(S) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

从式(7)可以看出，当以外力矩为输入、以进动角为输出时，三自由度陀螺仪就成为积分环节了。这时三自由度陀螺仪的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\theta_x(S)}{M_x(S)} &= -\frac{1}{HS} \\ \frac{\theta_y(S)}{M_y(S)} &= \frac{1}{HS} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

3.3 基于三自由度陀螺仪的典型伺服系统

图5是一种基于三自由度陀螺仪的典型伺服系统，它置于平台之上。当载体摆动时，由于陀螺的定轴性，装在框轴上的角度

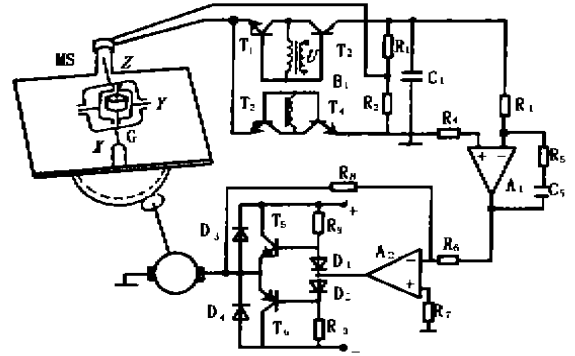


图5 基于三自由度陀螺仪的典型伺服系统工作原理图

传感器 MS(微同步器) 输出一交流电压 $U_c \sin \omega_0 t$ ，它的振幅 U_c 与载体的摆动角度成正比，经三极管 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 组成的模拟开关式相敏解调器转变成直流电压信号，通过 PI 调解器和直流放大器给直流电动机输送驱动电压，电机旋转带动平台消除载体的摆动角，从而保持平台在惯性空间的稳定。

4 惯性空间稳定

根据图3可以得到基于三自由度陀螺仪的导引头天线随动系统在扰动作用下的结构方框图，如图6所示。显然系统输出在扰动输入作用下的闭环传递函数

$$\Psi(S) = \frac{\omega_0(S)}{\omega_d(S)} = \frac{1}{1 + G_2(S)G_3(S)[1 + G_1(S)/S]} \quad (9)$$

式中： $G_1(S)$ 为图3中角接收机、计算机补偿、电流放大器、力矩器及陀螺四个方框的总传递函数，可表示为

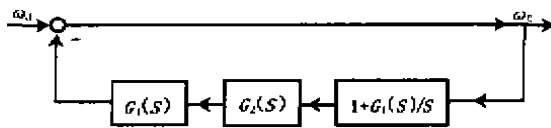


图6 天线随动系统陀螺稳定通道方框图

$$G_1(S) = \frac{K_1 D_1(S)}{H} \quad (10)$$

式中: \$K_1\$ 表示传递系数; \$D_1(S)\$ 为计算机补偿算法; \$H\$ 为角动量。

\$G_2(S)\$ 为图3中陀螺角传感器和放大检波校正两个方框的传递函数, 可表示为

$$G_2(S) = \frac{K_2 D_2(S)}{S} \quad (11)$$

式中: \$K_2\$ 表示传递系数; \$D_2(S)\$ 为校正网络。

\$G_3(S)\$ 为测速电机反馈内环路的闭环传递函数, 可表示为

$$G_3(S) = \frac{K_3 D_3(S) G_p(S)}{1 + K_e S \cdot K_3 D_3(S) G_p(S)} \quad (12)$$

式中: \$K_3\$ 表示放大系数; \$D_3(S)\$ 为校正网络; \$K_e\$ 为测速电机的转换斜率; \$G_p(S)\$ 为直流电动机的传递函数, 可表示为

$$\frac{\omega(S)}{U_a(S)} = \frac{C_m}{L_s J S^2 + J R_s S + K_e C_m} \quad (13)$$

将式(10)、(11)、(12)、(13)代入式(9), 并且暂不考虑各个校正环节对系统的影响, 可得系统输出在扰动输入作用下的开环传递函数

$$G(S) = \frac{K_2 K_3 C_m [1 + G_1(S)]}{H S^2 (L_s J S^2 + J R_s S + K_e K_3 + K_e C_m)} \quad (14)$$

若不设置陀螺反馈, 系统输出在扰动输入作用下的开环传递函数

$$G(S) = \frac{K_2 K_3 C_m G_1(S)}{H S (L_s J S^2 + J R_s S + K_e K_3 + K_e C_m)} \quad (15)$$

比较式(14)和(15)可知, 系统输出在扰动输入作用下的开环传递函数, 不设置陀螺反馈时为一型系统, 有了陀螺反馈则为二型系统。换句话说, 在加速度扰动信号作用下,

前者的稳态误差为 \$\infty\$, 后者的稳态误差为一常值。因此可以说, 在运动载体上的天线伺服系统没有陀螺反馈装置是不能正常工作的。

5 控制与跟踪

从图3不难看出, 导引头天线随动系统在基于三自由度陀螺仪的体制下, 陀螺是一个中心环节, 天线轴不是直接跟随目标视线而是跟随陀螺轴, 陀螺轴则跟随目标视线, 它们之间的关系如图7所示。在跟踪状态

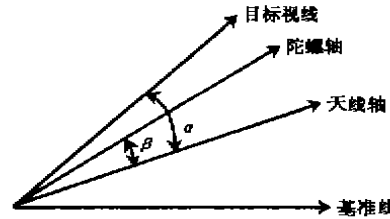


图7 目标视线、陀螺轴、天线轴关系示意图

下, 导引头角接收机的输出电压与失调角 \$\alpha\$ 成正比, 陀螺角传感器的输出电压的幅度与失调角 \$\beta\$ 成正比, 在无误差的理想状态下三条线是重合的。在稳定状态下, 陀螺轴在惯性空间中保持方位不变, 弹体的扰动使天线轴偏离, 产生失调角 \$\beta\$, 控制天线轴返回重新与陀螺轴重合。

在跟踪状态下, 图3可简化成图8的形式, 这时若暂不考虑校正网的影响, 系统的开环传递函数可表示为

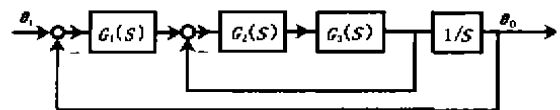


图8 天线随动系统跟踪通道方框图

$$G(S) = G_1(S) G_2(S) G_3(S) / S [1 + G_2(S) G_3(S)] = K_1 K_2 K_3 C_m / HS [L_s J S^3 + J R_s S^2 + (K_e C_m + K_e K_3) S + K_2 K_3 C_m] \quad (16)$$

系统为一型, 能够对阶跃信号进行无静差跟踪, 以恒定误差对斜坡信号进行跟踪。

(下转第45页)

3 在三坐标测量机上测量引信壳体时的情形分析

在三坐标测量机上测量和在分度头上测量是类似的, 只不过分度头是以极坐标方式测量, 三坐标测量机则是以直角坐标测量, 它是用有限个测量点的观测值来表达工件圆度的状况。

用有限次谐波分量来表达圆度状况是近似的, 要更精确地反映工件的实际情况, 则要测量更多的点。但测点过多则要增加成本, 影响生产进度。那么, 测点取多少为宜呢? 如前所述, 测点的多少取决于想要得到的谐波次数, 特别高次的谐波没有研究意义。资料表明, 工件圆度误差的谐波分量的最高阶次由加工机床上最高转数的传动构件决定,

$$k_{zg} = n_{zg} / n_1;$$

式中: k_{zg} ——谐波分量最高阶次;

n_{zg} ——传动构件的最高转数(每分);

n_1 ——工件的每分钟转数。

举例来说, 如果机床上马达的转速最高是每分钟 1500 转, 工件的转速是每分钟 300 转, 则 $k_{zg} = 1500/300 = 5$ 。由此可知, 最少必须有 11 个测量点。实际测量时常取 4 的倍数, 如 12 点、16 点、24 点等等。

4 检验方法的改进建议

在分度头上检测引信壳体时, 若误差较

小(小于 0.3), 则测量较快, 效率较高。当误差较大时(大于 0.3), 则较麻烦。而三坐标测量机精度高, 测量成本高, 用来测量几百微米误差的工件显得大材小用, 造成浪费。因此, 要提高测量效率, 提高测量准确度, 可对分度头进行微机自动化改造。用计算机控制测量设备进行采点测量, 并记录处理数据, 最后打印出圆度误差、同轴度误差、错位量等结果(可请专业厂家进行)。

综上所述, 可以得出如下结论:

a. 在分度头上以打表法检验引信壳体焊接质量时, 当综合误差小于等于 0.3 时, 工件是合格的。

b. 当综合误差大于 0.7 时, 工件是不合格的。

c. 当综合误差大于 0.3, 但小于等于 0.4 时, 应进行同轴度误差分离, 当分离出的同轴度误差小于等于 0.3 时, 工件是合格的, 否则是不合格的。

d. 当综合误差大于 0.4(小于 0.7)时, 在进行同轴度误差分离且确定其小于等于 0.3 之后, 还必须进行错位量的检测。

参 考 文 献

- 1 费业泰主编, 误差理论与数据处理, 机械工业出版社, 1981.8
- 2 黄清渠主编, 几何量计算, 机械工业出版社, 1981.9
- 3 GB1958-80. 形状和位置公差检测规定, 技术标准出版社, 1981.3

(上接第 42 页)

6 结 论

本文运用经典控制理论讨论了一种基于三自由度陀螺仪的导引头天线随动系统的性质及分析方法, 指出了陀螺稳定回路的设计对置于运动载体上的雷达伺服系统的重要意义, 给出了系统在跟踪和稳定状态下的传递函数。仿真研究表明, 天线伺服系统对运动

载体的扰动隔离度可达 40~60dB 以上。

参 考 文 献

- 1 王起飞, 导引头角跟踪系统的滤波与控制, 航空兵器, 1995, (2)
- 2 李连升, 雷达伺服系统, 国防工业出版社, 1988
- 3 郭秀中等, 陀螺仪理论及应用, 航空工业出版社, 1987
- 4 冯国楠, 现代伺服系统的分析与设计, 机械工业出版社, 1990