

船载测控天线伺服驱动控制设计与实现

孙永江 于建成 吴昊 陶华堂

(中国卫星海上测控部 江阴 214431)

摘要: 船载大型测控天线伺服系统的最内环是伺服驱动分系统,是整个伺服系统的设计关键。从硬件设计出发,系统综合运用四象限运行的思想设计了可控硅整流系统整流放大系统,设计了三相零式反并联整流电路,实现了伺服驱动装置可逆,可调稳态变速运行。采用环流抑制技术解决了晶闸管整流带来的缺陷,实现了对环流、谐波的有效抑制。为了消除齿轮间隙,采用双传动链设计方案。多次实践检验证明了该控制策略具备优越的控制性能,雷达跟踪快速稳定。

关键词: 晶闸管;功率放大;环流;谐波;齿隙

中图分类号: TN341 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 510.8020

Design and implementation of shipborne TT&C antenna servo control system

Sun Yongjiang Yu Jiangcheng Wu Hao Tao Huatang

(China satellite maritime tracking and control department, Jiangyin 214431 China)

Abstract: Servo drive system Large shipbased is the inner ring of TT&C antenna servo system, which is the key of the servo system design. Starting from the hardware design, Using the idea of four quadrant operation, This paper designed the silicon-controlled rectifier amplification system. By zero type three-phase rectifier circuit in parallel, the servo drive device is reversible, adjustable steady speed system. We solved the thyristor rectification of defects, implements the effective circulation, harmonic suppression by adopting circulation suppression technology. In order to eliminate the gear clearance, we adopt double transmission chain design. Simulation and practice show that the control strategy has excellent control performance, radar tracking stability quickly.

Keywords: thyristor; power amplifier; circulating; harmonic; backlash

1 引言

船载大型测控天线伺服系统是为了辅助测控天线对准并稳定跟踪目标的组件,其核心动力部件是驱动系统。伺服驱动系统的发展变迁由传统的发电机-电动机组到目前小型天线采用的交流 AC 伺服系统。而船载大型测控天线的设计基于稳定性和电磁兼容等诸多原因,采用直流电机驱动的方式^[1]。本文从驱动电路的设计层面出发,研究了伺服驱动系统的设计过程,并就大型船载测控天线设备的一些特殊问题给出了解决方案^[2]。

驱动系统的核心部件是马达控制器中,包含可放大装置和调整电路。放大部分采用晶闸管整流电路。速度指令经由转速电流双闭环电路产生晶闸管的控制信号经由同步电路及触发电路产生同步信及触发脉冲信号,进而控制晶闸管的导通角和输出电压。整流变压器输出的交流电压作

为主电源。交流电压信号在导通角的控制下,通过三相零式反并联电路形成所需的直流电压。连续平稳调整速度指令信号,则可以控制电机及天线连续

2 控制电路分析

2.1 功率放大电路

系统采用意大利进口功放。SCR1、3、5 为正向组整流器,SCR2、4、6 为反向组整流器。 L_1 、 L_2 是两台电感足够大的电抗器,以滤除环流,作为环流电抗器,如图 1 所示^[3-5]。

每组整流器都有两种工作状态:以触发角 $\alpha=90^\circ$ 为界, $\alpha<90^\circ$ 时处于整流状态, $\alpha>90^\circ$ 时处于逆变或待逆变状态, $\alpha=90^\circ$ 时两组整流器输出电压为 0。利用这一特点可以实现可控硅放大器的可逆控制,可以使电动机在 4 个象限内运行,任何时刻只有一组变流器投入工作。图 2 中给出了

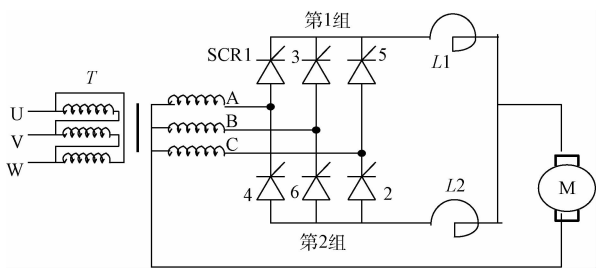


图 1 功率放大电路

其相应的工作情况^[2]。

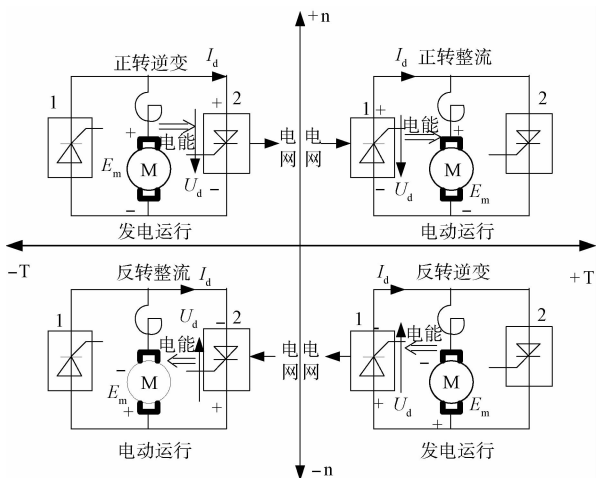


图 2 四象限运行图

第 1 象限工作情况: 第 1 组整流器处于整流状态, 导通角 $\alpha_1 < \pi/2$, $E_m < U_d$, 单台伺服电机正转, 作电动运行;

第 2 象限工作情况: 第 2 组整流器处于逆变状态, 逆变角 $\beta_2 < \pi/2$, $E_m > U_d$, 单台伺服电机正转, 作发电运行;

第 3 象限工作情况: 第 2 组整流器处于整流状态, $\alpha_2 < \pi/2$, $E_m < U_d$, 单台伺服电机反转, 作电动运行;

第 4 象限工作情况: 第 1 组整流器处于逆变状态, $\beta_1 < \pi/2$, $E_m > U_d$ 。单台伺服电机反转, 作发电运行, 该拖动系统不仅能实现正反转运行, 而且能实现回馈制动, 有效地节约了能源。伺服电机的工作原理: 在第 1 象限运转时, 伺服电机从第 1 组桥中取得能量。如果需要反转则须立即制动, 这样就必须改变电枢电流的方向, 由于晶闸管的单向导电性使得第 1 组整流器电流不能反向, 就必须通过第 2 组桥的逆变, 伺服电机转入第 2 象限作正转发电运行, 改变第 2 组整流器的逆变角就可以改变电动机的制动转矩。以同样的原理可以实现从第 3 象限到第四象限最终回到第 1 象限。

从上面的分析可以看出, 两组整流器如何配合就相当重要, 它有多种控制方案。本系统采用的是配合控制有环流系统方案。

2.2 触发电路

该伺服驱动中可控硅整流器使用的是锯齿波同步触发

电路, 它主要有两个环节组成, 即同步电路和触发脉冲电路。

1) 锯齿波同步电路

锯齿波同步电路^[6]为马达控制器 6AXC 的 01/096 板, 由于三相半波反并联可逆整流电路有 6 个晶闸管, 所以同步信号分为 6 路, 为了简便起见, 取 1 路进行分析(图 3)。

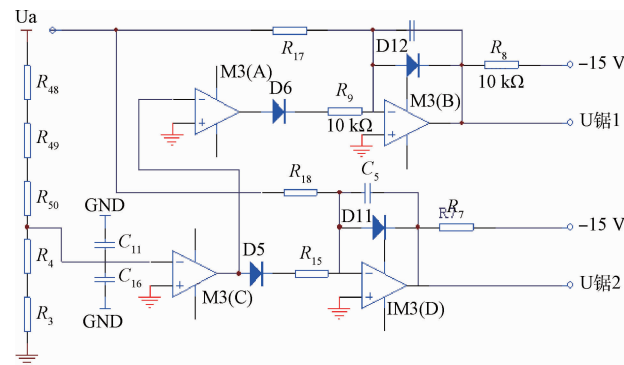


图 3 锯齿波同步原理(简图)

U_A 取自可控硅整流器的交流侧输入电源。R48、R49、R50、R3、R4、C11、C16 实现分压移相并使 U_s 与功率电源 U_A 隔离。在 U_s 的负半周, M3(A) 输出正饱和, D6 导通, 积分器 M3(B) 的电容 C_5 快速放电, M3(B) 的最终输出由 R8 限幅; 在 U_s 的正半周, M3(A) 输出负饱和, D6 截止, 电容 C_5 充电, 形成 M3(B) 输出的锯齿波。同理 M3(D) 输出极性相反的锯齿波, 在三相零式反并联可逆线路中, $U_{锯1}$ 为工作在 A 相的 SCR1 触发电路提供了同步电压, $U_{锯2}$ 为工作在 A 相的 SCR4 触发电路提供同步电压, 保证在不同的时间触发两组变流器。该同步锯齿波电路不用同步变压器, 参数适应范围广, 带负载能力强, 线性度好, 调整和使用方便。

2) 触发脉冲电路

参考马达控制器 6AXC 的可控硅触发电路^[7], 它也是由 6 路构成, 下面举其 1 路简要分析一下(图 4), 图中 M3(A), M3(B) 为运算放大器, M202 为达林顿组件, 内有 7 路达林顿管作为脉冲功放用, T 为脉冲变压器。脉冲移相电压 U_y 与锯齿波 $U_{锯}$ 在 M3(A) 输入端比较, 控制 M3(A) 的输出极性。在 M3(A) 输出由负到正的跃变时, 经 R25, R16, C5 微分的电压加到 M3(B) 的正输入端, 当 M3(B) 的正输入端电位高于负输入端的固定电位时, M3(B) 输出正跃变使达林顿管导通, 输出脉冲。 U_y 电位越低, 输出的脉冲相位越超前。输出脉冲宽度由微分时间常数 $(R25 + R16)C5$ 和 M3(B) 的负输入端电位决定, M3(B) 实际是一级整形电路, 它砍掉了微分波形的尾巴, 其正向的输出宽度也就是输出脉冲的宽度。

3 环流的产生及其抑制

在两组晶闸管之间不通过电动机或其他负载存在短路电流, 必须加以抑制。

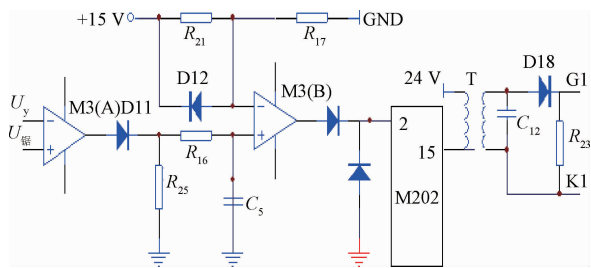


图 4 可控硅触发脉冲电路简图

3.1 直流平均环流的抑制

采用 $\alpha = \beta$ 体制可以消除直流平均环流，具体原理如下：只有在正反两组晶闸管都处于整流状态时，正组整流电压 U_{dof} 和反组整流压 U_{dor} 正负，才能产生直流平均环流造成电源短路，要防止它最好的解决办法是正组整流时，反组 $U_{dor} = -U_{dor}$ 又 $U_{dof} = U_{dofmax} \cos\alpha_f$, $U_{dor} = U_{dofmax} \cos\alpha_r$ 所以只要 $\cos\alpha_f = -\cos\alpha_r$ 即可满足条件，即 $\alpha_f + \alpha_r = 180^\circ$ 。再根据逆变角的定义， $\alpha_f = \beta_r$ 。

从上面的分析可知只要 $\alpha_f = \beta_r$ 就可以消除直流平均环流。当然，如果使 $\alpha_f > \beta_r$ 就更能消除平均环流，因此消除直流平均环流的条件应该是 $\alpha_f \geq \beta_r$ 。为了防止逆变颠覆，通常取 $\alpha_{fmin} = \beta_{rmin} = 30^\circ$ 。

3.2 瞬时脉动环流的抑制

采用配合体制可以消除直流平均环流，但是正组整流电压和反组逆变电压的瞬时值是不相等的，因此有瞬时脉动环流的存在，抑制瞬时脉动环流的方法^[8]是在环流回路中串入环流电抗器或称均衡电抗器，将瞬时脉动环流的直流分量限制在负载额定电流的 5%~10%。在三相零式反并联可逆线路中，正反两个回路各设一个环流电抗器，伺服驱动系统每个马达控制器接有两个环流电抗器，它的主要作用有以 3 种：1) 电枢电流平滑；2) 保持最小电枢电流连续；3) 限制环流对于三相半波来讲，电抗器电感量可以取为 $L = 1.46U_2 / I_{dmin}$ 。

4 谐波及传动链齿隙的抑制^[9]

4.1 谐波的抑制

而晶闸管整流器是一个谐波源，它使交流侧电流和电网电压中含有大量的谐波分量，会引起电网电压畸变。因此必须采取措施使谐波抑制在允许的范围之内。

以晶闸管为核心的 6AXC-280, 6AXC220 功率放大器每相都设置了 LC 滤波电路，作谐波滤波器使用，大大限制了谐波电流。另外在变压器三相电源的输入端安装了电磁兼容滤波器 (EMI) 用来抑制沿电源传输线传输的电磁干扰。防止对船舶供电的干扰。

4.2 传动链齿隙的抑制

大型船载天线传动系统考虑到负载和精度因素，采用相同的两台电机分别带动两套完全相同的减速机构，再由

两减速箱的输出小齿轮带动天线座主轴大齿轮转动。通过电气控制使主轴大齿轮在起动和换相过程中始终受到偏置力矩的作用。偏置力矩的产生是由一个梯形函数发生器来实现的^[10]，如图 5 所示。

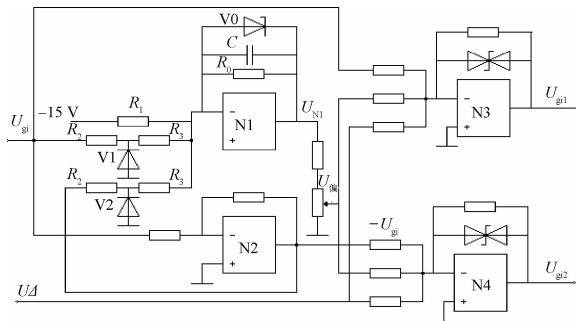


图 5 函数发生器和电流综合放大器

两个输出小齿轮分别贴紧大齿轮的两个相反的合面，使主轴大齿轮不能在齿轮间隙中来回摆动，从而达到消除齿隙，提高系统精度的目的。

5 船摇问题的解决

通过增加陀螺敏感船摇信息，将陀螺反馈信号施加到速度环路的前端示意图，其结构如图 6 所示^[11]。

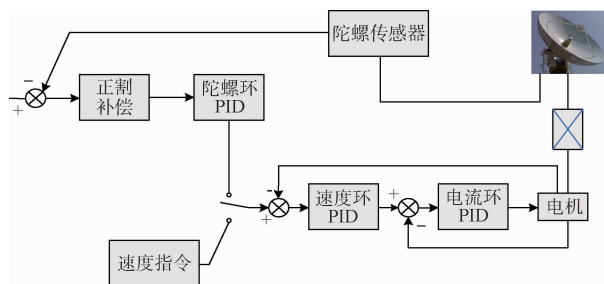


图 6 结构示意图

以某船载大型测控天线为例，传递函数框图如图 7 所示。

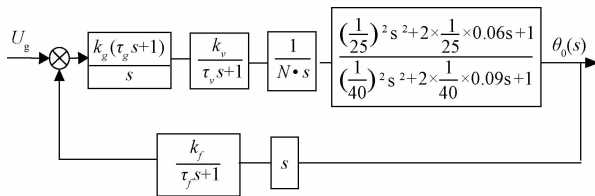


图 7 陀螺稳定环框图

陀螺稳定环路的主要内容有：
速度环闭环传递函数：

$$\varphi_v(S) = \frac{k_v}{\tau_v s + 1}$$

陀螺环反馈环节：

$$\varphi_f = \frac{k_f}{\tau_f s + 1}$$

陀螺环采用PI调节器:

$$\varphi_g = \frac{k_g(\tau_g s + 1)}{s}$$

陀螺稳定环开环对数幅频特性如图8所示。

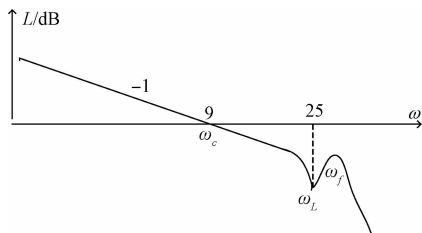


图8 开环对数幅频特性

从图8可以看出,中频段比较宽,而且开环截止频率 $\omega_c = 9$ rad/s。相比于无陀螺环的 $\omega_c = 5$ rad/s,频率增加了1倍,相应的闭环带宽也增加了。从多次船摇试验的数据分析,船摇隔离度提高将近15 dB。大大提高了系统的动态性能。

根据系统的设计参数,使用MATLAB对系统加以仿真和验证,仿真模型如图9所示。

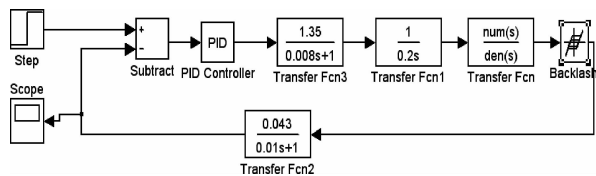


图9 系统仿真模型

仿真结果如图10所示,整个系统的带宽及阶跃特性的响应时间均满足系统设计的要求。

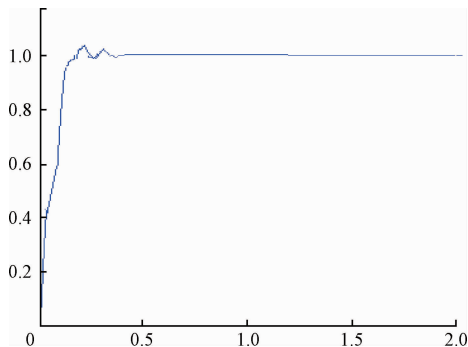


图10 传动系统阶跃特性

了详细的分析,并针对一些特殊问题进行了探讨,并对其进行了仿真和实际验证。通过采取保护及船摇稳定措施,系统的综合性能优越。该控制系统经过实践检验,驱动控制稳定,控制保护完备,运行性能良好。与当前使用比较多的交流同步伺服系统相比目前的驱动系统还有很多不足,如可控硅频繁的过压过流,也会使其击穿;可控硅整流会对电网产生干扰。但是交流伺服传动系统在舰载大型测控天线上的运用还存在一些未能突破的问题,如电磁兼容问题,和大功率变流设备的小型化问题。需要进一步加强研究。

参考文献

- [1] 赵国峰,胡维礼. 双电机驱动伺服系统齿隙非线性控制研究[J]. 电气传动, 2005, 35(2): 24-27.
- [2] 马娟丽,唐永哲,职晓波. 低速摩擦伺服系统的滑模变结构控制研究[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(3): 77-80.
- [3] 王福超,田大鹏,王昱棠. 基于简化干扰观测器的光电平台稳定与评估[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(12): 13-17.
- [4] 杨晓霞,孟浩然,张斌,等. 大型光电系统精跟踪带宽设计方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1382-1385.
- [5] 方一鸣,李宫胤. 伺服电机驱动连铸结晶器振动系统建模与分析[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2615-2618.
- [6] 张菁雯,秦攀,陈丽. 非平稳随机系统的建模与预测控制[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 262-263.
- [7] 朱俊杰,栗梅,陈程,等. 无刷直流电机反电势过零检测新方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 442-444.
- [8] 李红梅,陈涛. 永磁同步电机参数辨识研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 638-640.
- [9] 张晨亮,王红星. 基于FPGA的PSWF脉冲信号发生器设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(1): 76-78.
- [10] 薛八阳,杨忠,钟山. 基于目标跟踪的区域入侵检测方法研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(2): 51-53.
- [11] 严雪飞,朱长青,赵月飞,等. 电子负载直流侧电压分析及滤波技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(11): 22-23.

作者简介

孙永江,1980年出生,本科,工程师,主要研究方向自动化控制与测试。

6 结 论

本文针对舰载大型测控天线伺服驱动系统的设计进行