

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106633

# 基于船载测控系统的多组合隔离船摇技术应用研究

胡金辉 陈小刚 范祥祥 张肖锋

(中国卫星海上测控部 江阴 214431)

**摘要:** 针对船载测控系统中常规采用单一的隔离船摇方式在复杂海况环境下,单一的隔离船摇方式不能满足测控需求的问题,提出采用多组合隔离船摇技术进行测控。全文对船载测控系统的隔离船摇方式进行了系统原理分析,提出根据不同环境选择合适的隔离船摇组合实现稳定跟踪目标,提高船摇隔离度的方法。重点介绍了各种隔离船摇技术的原理和异同点,利用试验数据进行对比分析,结果为多组合隔离度方便在不同海况环境中的应用,结果表明通过对多组合隔离度的精准选取,可以更好更稳定的跟踪目标,充分说明多组合隔离船摇技术对系统稳定跟踪和精确定轨有重要意义。

**关键词:** 前馈;陀螺;测控;伺服

**中图分类号:** TN953 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.6020

## Based on measurement and control system from a ship swinging ship combined isolation technology applied research

Hu Jinhui Chen Xiaogang Fan Xiangxiang Zhang Xiaofeng

(China Satellite Maritime Tracking and Controlling Department, Jiangyin 214431, China)

**Abstract:** In view of the problem that the conventional single isolation ship rolling mode in the shipborne TT&C system cannot meet the requirements of TT&C under complex sea conditions, proposes to adopt multi-combination isolation ship rolling technology for TT&C. This paper analyzes the system principle of isolation ship rolling mode of shipboard measurement and control system, and puts forward the method of selecting appropriate combination of isolation ship rolling according to different environment to realize stable tracking target and improve the isolation degree of ship rolling. Mainly introduced the principle of swinging ship various isolation technology and the similarities and differences, using the test data, this paper compares and analyzes the results for convenient combined isolation in different sea environment, the application of the results show that through the combined isolation more accurate selection, can better and more stable tracking target, to show more swinging ship combined isolation technology for system stability tracking and essence of determine the rail has important significance.

**Keywords:** feedforward; gyro; measurement and control; servo

## 0 引言

船在海上受到风、浪、流的作用会产生6个自由度的被动运动:3个位移量和3个角度量。3个位移量分别为纵漂、横漂和升沉,3个角度量即为3个摇摆量,分别为纵摇、横摇和船摇<sup>[1]</sup>。对跟踪测量造成不良影响的是摇摆,因为测量船跟踪的目标一般都是几百千米以外的高速目标,船的3个位移量对跟踪目标来说相对量值较小、速度也较慢,所以对跟踪影响不大<sup>[2]</sup>。但摇摆使设备视轴相对目标产生大的角度晃动,如果不采取稳定措施,天线就无法跟踪目标;即便采取稳定措施而未达到相应技术要求,虽然能跟上目标,但也影

响测量精度<sup>[3]</sup>。随着航天事业的飞速发展,现代航天任务对测控站测量系统的测量精度提出了更高的要求<sup>[4]</sup>。与陆地测控伺服系统相比,船载在海上受风浪等环境因素影响而不停地运动,船载测控设备随载体的运动也在不停地运动,为了实现目标飞行器稳定跟踪和精确定轨,船载测控系统的测量精度显得尤为重要<sup>[5]</sup>。应用在船载测控领域的隔离技术只有反馈陀螺法,比较单一。针对该问题,本文提出一种新思路,即根据不同环境选择合适的隔离船摇组合实现稳定跟踪目标。目前,国内外将多组合隔离技术应用到船载测控领域的成果比较匮乏,没有借鉴的案例,充分说明了多组合隔离船摇技术具有一定的创新性。

收稿日期:2021-05-09

### 1 隔离船摇技术原理分析

目前,船载普遍采用陀螺反馈法、前馈法和自跟踪稳定法来隔离船摇实现稳定跟踪目标。以上几种方法可以实现一般

海况条件下和低速目标运动时的稳定跟踪目标的作用<sup>[6]</sup>。但是,一旦海况复杂,目标快速运动时就会存在动态滞后误差,不能稳定、准确的跟踪目标,并最终影响测量精度<sup>[4]</sup>。现对船载隔离船摇技术进行逐一分析。系统控制环路原理如图 1 所示。

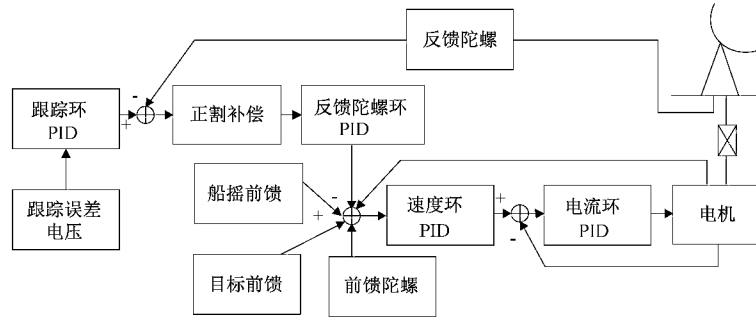


图 1 系统控制环路原理

#### 1.1 反馈陀螺法

本系统使用反馈陀螺是安装在测控设备上分别敏感方位、俯仰运动速率的两个单自由度光纤速率陀螺,它们的测量值分别为方位和俯仰方向上天线运动速度与船摇

扰动速度之和。将测得的速度信息负反馈到回路中,通过闭环实现船摇隔离<sup>[7]</sup>。

为增加系统抗扰动性,考虑在位置环闭环后端加入反馈陀螺进行陀螺环闭环调节,如图 2 所示。

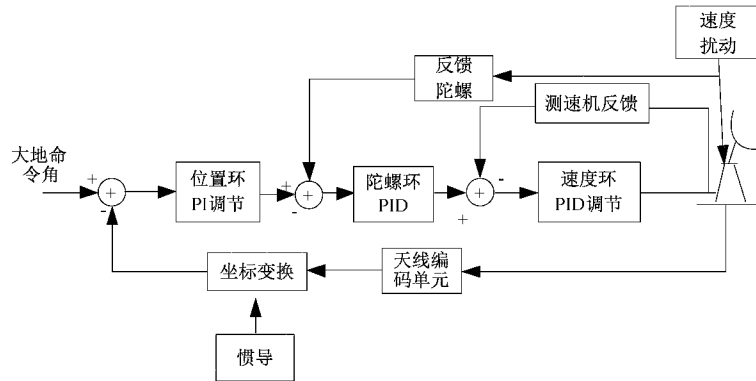


图 2 反馈陀螺法原理

反馈陀螺环是闭环调节,增加陀螺环后,虽然获得了约 16 dB 的隔离度,但原自跟踪环的频带变窄了,其跟踪环隔离度减少了约 7 dB,实际上只获得了 9 dB 的作用,而且还能使自跟踪环的跟踪性能降低<sup>[8]</sup>。因此,在实际应用中,设有“无陀自跟踪”工作方式,就是在船摇不是很严重的条件下,断开陀螺环,以保证跟踪性能。或者说,建立陀螺稳定环来提高抗船摇扰动的能力是要以牺牲一些跟踪性能为代价的。如何取舍,就要跟踪实时的船摇姿态来判断。

#### 1.2 前馈陀螺法

由于反馈陀螺法中,反馈陀螺的船摇隔离度为  $L_T = 20 \log \frac{1}{1 + K_T W_T(S)}$ , 隔离度  $L_T$  的大小取决于  $K_T W_T(S)$  的大小,  $K_T W_T(S)$  为反馈陀螺开环传递函数<sup>[9]</sup>。其中,  $K_T W_T(S)$  越小,则隔离度越大;  $K_T W_T(S)$  越大,则隔离度越小<sup>[10]</sup>。然而,由于船载设备工作环境的限制,  $K_T W_T(S)$

不能达到理想中很小的状态,且船摇残差和谐振频率是必定存在,且船摇较大时,船摇残差和谐振频率也较大<sup>[11]</sup>。

因此,在船摇扰动较大情况下,需要采取另一种船摇隔离方法:前馈陀螺法,其原理如图 3 所示。

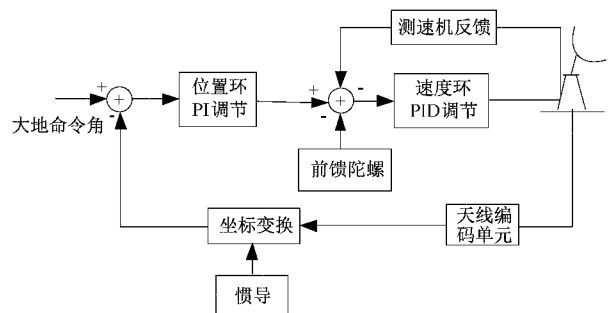


图 3 前馈陀螺法原理

前馈陀螺与反馈陀螺一致,也是单自由度光纤速率陀

螺。与反馈陀螺安装位置不同,可以实现只测量船摇速度在天线方位轴、俯仰轴上分量,其安装示意图如图4所示。

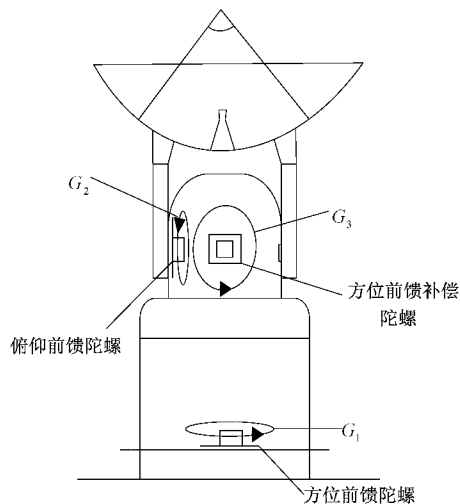


图4 前馈陀螺安装示意图

图4中, $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 分别表示各个前馈陀螺感应空间的船摇分量。其中 $G_1$ 为方位前馈陀螺感应船首摇对天线方位的影响; $G_2$ 、 $G_3$ 分别为俯仰前馈陀螺、方位前馈补偿陀螺,主要用于测量在天线转动过程中,横摇、纵摇在天线方位、俯仰方向上的分量。其中 $G_2$ 为船摇在俯仰方向上的分量, $G_3$ 为横摇、纵摇在天线方位上分量的俯仰角余切分量。设横摇、纵摇在方位上的分量为 $f'_{AZ}$ ,当前天线俯仰角为 $\theta$ ,则 $f'_{AZ} = G_3 * \tan\theta$ ,假设船摇在天线方位、俯仰方向上的分量分别为 $f_{AZ}$ 、 $f_{EL}$ ,则 $f_{AZ} = G_1 + f'_{AZ}$ ,为船摇在天线方位方向上的分量; $f_{EL} = G_2$ ,为船摇在天线俯仰方向上的分量。

前馈陀螺应用原理主要是将前馈陀螺敏感船摇在方位、俯仰分量以一定的比例加入伺服驱动速度环的输入端,使天线向减小船摇影响的方向转动,起到隔离船摇扰动的作用<sup>[12]</sup>。

### 1.3 船摇前馈法

船摇前馈法原理如图5所示。对于伺服系统来说,船摇前馈法与前馈陀螺法原理是一致的。区别在于前馈信息的来源不同。前馈陀螺法的前馈信息来自天线安装的前馈陀螺,而船摇前馈法的前馈信息是上位数据机,通过网络传输至伺服系统,但是运用原理一致<sup>[11]</sup>。这里就不再赘述。

### 1.4 目标前馈法

目标前馈法原理如图6所示。目标前馈用于补偿由于目标运动的速度,加速度而引起的伺服系统滞后误差<sup>[13]</sup>。对于目标前馈可看作船摇已采取多种措施被有效地隔离了,因而可像陆地设备一样采用惯性坐标系中的补偿公式进行计算,补偿输入点在陀螺环的指令输入处<sup>[14]</sup>。

由于目标前馈法是根据目标的速度和加速度推算出

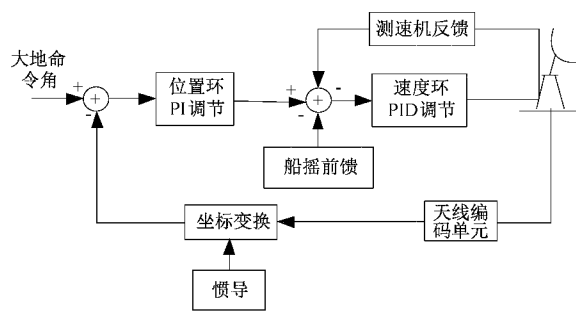


图5 船摇前馈法原理

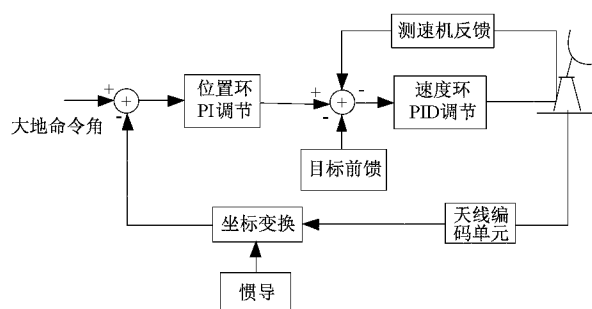


图6 目标前馈法原理

下一时刻的数引轨道参数,因此,它对改善跟踪快速移动目标过程中出现的动态滞后有很好的效果。

## 2 应用效果

### 2.1 隔离方式对比评估

根据以上理论分析,结合自身天线结构状态及设备参数,对设备各种方法的隔离度、稳定性、便捷性评估对比,评估结果如表1所示。

表1 隔离度理论评估结果

方式	船摇隔离度/dB	稳定性	便捷性
反馈陀螺法	19	优	方便
前馈陀螺法	22	良好	方便
船摇前馈法	20	良好	需船姿设备提供
目标前馈法	16	良好	需软件组提供

表1中的稳定性是指工作方式的稳定性,其中前馈陀螺法、船摇前馈法和目标前馈法为开环控制,是纯比例调节。便捷性是指工作方式对测控设备自身系统以外的设备的依赖性<sup>[15]</sup>。其中船摇前馈和目标前馈需要软件组和船姿组进行实时提供前馈信息,因此此种方法不能时刻使用。由于船摇前馈法和前馈陀螺法原理一致,前馈陀螺法比船摇前馈法隔离效果更好,前馈陀螺法也更具便捷性,因此,优选前馈陀螺法,放弃使用船摇前馈法。

### 2.2 隔离方式组合选取

根据隔离方式、隔离度指标、稳定性和便捷性,在不同船摇姿态下做了跟踪试验,试验数据如表2所示,表中 $U_A$

指方位误差电压,它反映的是跟踪精度的高低; $W_c$ 指船摇姿态角,它反映的是船舶姿态的大小,跟踪环境的优劣。多组合隔离船摇数据表如表2所示。

表2 多组合隔离船摇数据

$W_c$	$U_A/V$				
	无陀	反馈陀螺法	前馈陀螺法	反馈+前馈	反馈+前馈+日馈
$0^\circ$	$\pm 0.002$	$\pm 0.03$	$\pm 0.04$	$\pm 0.07$	$\pm 0.1$
$\pm 1^\circ$	$\pm 0.05$	$\pm 0.02$	$\pm 0.01$	$\pm 0.03$	$\pm 0.04$
$\pm 3^\circ$	$\pm 0.1$	$\pm 0.03$	$\pm 0.02$	$\pm 0.01$	$\pm 0.01$
$\pm 5^\circ$	$\pm 0.2$	$\pm 0.07$	$\pm 0.06$	$\pm 0.04$	$\pm 0.02$

由表2可知,在船摇为 $0^\circ$ 时,使用无陀跟踪效果更好;在船摇为 $\pm 1^\circ$ 时,采用前馈陀螺法跟踪效果更好;在船摇为 $\pm 3^\circ$ 时,采用反馈+前馈陀螺法跟踪效果更好;在俯仰角 $>30^\circ$ 时,采用反馈+前馈陀螺法+目标前馈跟踪效果更佳。根据实际跟踪试验数据分析,表明系统加载目标前馈对轨道超过 $60^\circ$ 仰角的航捷点附近出现的动态滞后有明显的改善效果。前馈陀螺和船摇对跟踪带宽的影响是相同的效果,所以将船摇前馈法作为前馈陀螺法的备份使用。

### 3 结 论

本文提出了船载测控系统根据不同跟踪环境和海况条件来实时选取合适的隔离组合加入到跟踪环路中,分析了各种隔离方法的原理和特点,经过多次跟踪运动目标和隔离度测试,得到了精确的多组合隔离度数据。通过对多组合隔离度的精准选取,以达到稳定跟踪目标,跟踪运动数据精度优良,精确定轨的效果。本文在自动识别海洋环境和自适应选取多组合隔离船摇技术上海存在较大差距,下一步将进行相关领域的研究。

#### 参考文献

- [1] 王家海,王岩飞.一种改进的组合实时自聚焦算法[J].国外电子测量技术,2017,36(6):41-45.  
[2] 过峰,俞建峰,陆振中.力传感器关键性能参数自动标

定系统[J].电子测量技术,2015,38(5):85-88.

- [3] 何素梅,傅锦良,吴海彬.LED隧道照明自动调光系统的设计[J].电子测量与仪器学报,2015,29(4):622-629.  
[4] 杨继森,陈自然,张天恒,等.时栅传感器直驱式误差自动标定与修正系统[J].仪器仪表学报,2016,37(5):968-975.  
[5] 贺晋宁,杜伟伟,高静.软件自动化测试的探索实践[J].国外电子测量技术,2016,35(7):1-4.  
[6] 肖圣兵.某型雷达通用自动测试系统的设计[J].电子测量技术,2016,39(4):96-100.  
[7] 王刚.高速精密滚珠丝杠副综合性能测试系统开发[D].大连:大连理工大学,2012.  
[8] 杨雪,陶卫军,韩军,等.模拟工况下滚珠丝杠副精度检测方法研究[J].组合机床与自动化加工技术,2016(1):78-80.  
[9] 王耀,范锡汶,马海锋,等.一种基于成型滤波器的信号源补偿方法[J].电子测量技术,2019,42(1):16-20.  
[10] 李红旭,常建华,朱玲熾,等.基于微脉冲激光雷达的能见度反演算法[J].电子测量与仪器学报,2017,31(10):1555-1560.  
[11] 陈丹琪,金国栋,谭力宁,等.一种基于KL-AEPP的无人机侦察移动目标定位算法[J].仪器仪表学报,2019,40(9):227-236.  
[12] 吴丹,苏一丹.基于多阈连续条件随机场的标签推荐[J].计算机应用研究,2013,30(5):1312-1315.  
[13] 刘钢,刘明,匡海鹏,等.多目标跟踪方法综述[J].光电与控制,2004,11(3):26-29,39.  
[14] 蒋恋华,甘朝晖,蒋旻.多目标跟踪综述[J].计算机系统应用,2010,19(12):271-275.  
[15] 向红标,裘祖荣,李醒飞,等.测量机滚珠丝杠Z轴伺服系统的动力学建模及补偿[J].天津大学学报,2011,44(4):291-296.

#### 作者简介

胡金辉,本科,工程师,主要研究方向为船载雷达伺服控制。

E-mail:342479925@qq.com