

· 光电工程系统技术 ·

## 速率陀螺在船载地平式电视跟踪仪视轴稳定中的应用

赵建川<sup>1</sup>, 薛乐唐<sup>2</sup>

(1. 海军驻哈尔滨汽轮机厂有限责任公司军事代表室, 黑龙江 哈尔滨 150046; 2. 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 利用速率陀螺稳定运动基座上的测量系统是目前常采用的一种方法. 不同安装方式的速率陀螺, 其敏感轴上测到的角速度不同, 从而决定了获取基座运动对测量系统的速度扰动量的计算方法. 结合速率陀螺在船载地平式电视跟踪仪上的应用, 归纳了速率陀螺的几种安装方式, 并在实用中达到了预期的稳定效果.

**关键词:** 电视跟踪仪; 速率陀螺; 视轴稳定

中图分类号: TP211<sup>+</sup>.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)01-0022-04

### Application of Rate Gyroscopes to Optical Axis Stabilization for TV Tracker on Deck.

ZHAO Jian-chuan<sup>1</sup>, XUE Le-tang<sup>2</sup>

(1. Office Resided at Harbin Turbine Company Limited, Harbin 150046, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, china;)

**Abstract:** Rate gyroscopes are widely applied to stabilize measuring systems with active carriers. When the gyros are set in different ways, the different values can be obtained at their sensor axis, which decides the mathematic expressions of accounting the disturbance values of measuring systems caused by carriers' movements. The gyro setting ways are summarized according to the applications in TV-tracker on deck. And the desired goals can be achieved in practice.

**Key words:** TV tracker; rate gyroscopes; optical axis stabilization.

为保证船载电视跟踪仪对目标的捕获成功率及稳定跟踪时的精度, 必须采取办法隔离船摇对视轴的影响. 船载电视跟踪仪利用速率陀螺测量船体摇摆速度, 通过一定的数学运算获得船摇速度耦合到视轴方位方向及俯仰方向上的扰动量, 并将这 2 个扰动量分别反馈到方位及俯仰回路的速度环, 构成复合控制, 抵消船摇对视轴的速度影响. 下面就速率陀螺在船载地平式电视跟踪仪视轴稳定中的应用进行分析和探讨.

### 1 速率陀螺简介

速率陀螺是陀螺仪的一种, 能够敏感运动载体

上的角速度, 它具有只敏感其敏感轴方向的角速度、不敏感线速度以及其敏感轴位置可以平移的特点.

### 2 船载地平式电视跟踪仪结构

船载地平式电视跟踪仪的机械结构如图 1 所示. 其中垂直轴是电视跟踪仪整机的支撑架, 其下端通过调平机构固定在甲板上. 水平轴垂直于垂直轴, 它可以绕垂直轴自由旋转. 视轴也叫瞄准轴, 它实际上是电视跟踪仪望远镜的光学系统的中心轴, 视轴垂直于水平轴, 并且可绕水平轴自由旋转.

收稿日期: 2008-12-19

作者简介: 赵建川(1969-), 男, 吉林长春人, 工程师, 从事光电设备质量监造方面的研究.

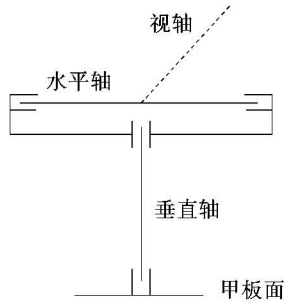


图 1 船载地平式电视跟踪仪结构图

### 3 坐标系定义

为方便分析,需要定义甲板坐标系、方位环坐标系、俯仰框坐标系等 3 个坐标系,甲板坐标系、方位环坐标系、俯仰框坐标系间的相对位置关系如图 2 所示。

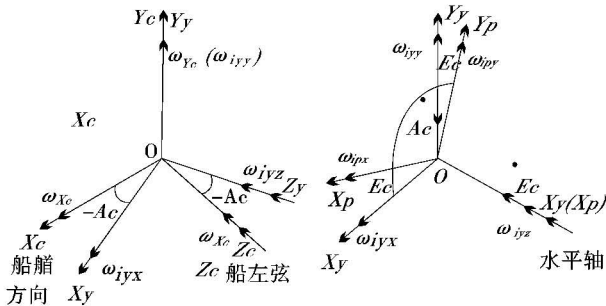


图 2 3 个坐标系空间关系示意图

#### 3.1 甲板坐标系

建立甲板坐标系  $O - X_c Y_c Z_c$ , 其中  $O X_c$  为船艏线方向, 船头为正方向;  $O Y_c$  是垂直甲板面, 向上为正方向;  $O Z_c$  是按右手规则确定正方向。

#### 3.2 方位环坐标系

定义方位环坐标系  $O - X_y Y_y Z_y$ ,  $O Y_y$  轴与甲板坐标系的  $O Y_c$  轴重合, 即如果将甲板坐标系  $O - X_c Y_c Z_c$  绕  $O Y_c$  轴旋转一个角度  $A_c$ , 则旋转后得到的新坐标系为坐标系  $O - X_y Y_y Z_y$ 。

#### 3.3 俯仰框坐标系

定义俯仰框坐标系  $O - X_p Y_p Z_p$ , 其  $O Z_p$  轴与

方位环坐标系  $O - X_y Y_y Z_y$  的  $O Z_y$  轴重合, 即如果将方位环坐标系  $O - X_y Y_y Z_y$  绕  $O Z_y$  轴旋转一个角度  $E_c$  后得到的新坐标系就是俯仰框坐标系  $O - X_p Y_p Z_p$ 。视轴安装在俯仰框上, 并与  $O X_p$  轴平行, 即视轴在甲板坐标系内的位置由  $A_c$ 、 $E_c$  唯一确定。

### 4 船摇对视轴影响的数学模型

当电视跟踪仪的方位、俯仰伺服回路不工作时, 视轴在甲板坐标系内位置为  $(A_c, E_c)$  且视轴静止。设  $\omega_{X_c}$ 、 $\omega_{Y_c}$ 、 $\omega_{Z_c}$  为船体角速度  $\omega_c$  沿甲板坐标系  $O - X_c Y_c Z_c$  的 3 个轴的分量,  $\omega_{X_c}$ 、 $\omega_{Y_c}$ 、 $\omega_{Z_c}$  将通过轴  $O Y_c$  的摩擦约束和几何约束耦合给方位环。  $\omega_{X_c}$ 、 $\omega_{Y_c}$ 、 $\omega_{Z_c}$  分解到方位环坐标系各轴上的分量为

$$\begin{bmatrix} \omega_{iyx} \\ \omega_{iyy} \\ \omega_{iyz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{X_c} \cos A_c + \omega_{Z_c} \sin A_c \\ \omega_{Y_c} \\ -\omega_{X_c} \sin A_c + \omega_{Z_c} \cos A_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

与此同理,  $\omega_{iy}$  (其分量为  $\omega_{iyx}$ 、 $\omega_{iyy}$ 、 $\omega_{iyz}$ ) 将通过轴  $O Z_y$  的摩擦约束和几何约束耦合给俯仰环坐标系。  $\omega_{iyx}$ 、 $\omega_{iyy}$ 、 $\omega_{iyz}$  分解到俯仰环各坐标轴的角速度分量为

$$\begin{bmatrix} \omega_{ipx} \\ \omega_{ipy} \\ \omega_{ipz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{iyx} \cos E_c + \omega_{iyy} \sin E_c \\ -\omega_{iyx} \sin E_c + \omega_{iyy} \cos E_c \\ \omega_{iyz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2), 得

$$\begin{bmatrix} \omega_{ipx} \\ \omega_{ipy} \\ \omega_{ipz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{X_c} \cos A_c \cos E_c + \omega_{Y_c} \sin E_c + \omega_{Z_c} \sin A_c \cos E_c \\ -\omega_{X_c} \cos A_c \sin E_c + \omega_{Y_c} \cos E_c - \omega_{Z_c} \sin A_c \sin E_c \\ -\omega_{X_c} \sin A_c + \omega_{Z_c} \cos A_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

此时再考虑方位、俯仰回路工作时的情况, 方位、俯仰伺服系统所产生的角速度  $\dot{A}_c$ 、 $\dot{E}_c$  也向俯仰框坐标系耦合, 耦合到该坐标系下的角速度由式(4)定义

$$\begin{bmatrix} \omega_{jpx} \\ \omega_{jpy} \\ \omega_{jpz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{A}_c \sin E_c \\ -\dot{A}_c \cos E_c \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{E}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{A}_c \sin E_c \\ -\dot{A}_c \cos E_c \\ \dot{E}_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $\dot{A}_c$ 、 $\dot{E}_c$  分别为方位、俯仰伺服系统所产

生的角速度; $\omega_{jp}$ 为方位、俯仰伺服系统耦合到俯仰框坐标系上的角速度。

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{ipx} + \omega_{jpx} \\ \omega_{ipy} + \omega_{jpy} \\ \omega_{ipz} + \omega_{jpz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{Xc} \cos Ac \cos Ec + \omega_{Yc} \sin Ec + \omega_{Zc} \sin Ac \cos Ec - \dot{A}c \sin Ec \\ -\omega_{Xc} \cos Ac \sin Ec + \omega_{Yc} \cos Ec - \omega_{Zc} \sin Ac \sin Ec - \dot{A}c \cos Ec \\ -\omega_{Xc} \sin Ac + \omega_{Zc} \cos Ac + \dot{E}c \end{bmatrix} \quad (5)$$

按照视轴稳定的要求,应该有  $\omega_y = 0$ 、 $\omega_z = 0$ , 即

$$\begin{cases} \omega_y = -\omega_{Xc} \cos Ac \sin Ec + \omega_{Yc} \cos Ec - \\ \omega_{Zc} \sin Ac \sin Ec - \dot{A}c \cos Ec = 0 \\ \omega_z = -\omega_{Xc} \sin Ac + \omega_{Zc} \cos Ac + \dot{E}c = 0 \end{cases} \quad (6)$$

所以可得出方位、俯仰伺服回路应该产生的补偿角速度如式(7)所示.等式右端方括号内部分表示船摇对视轴在甲板方位、俯仰方向的速度扰动,方括号外面的负号表示伺服回路应该产生的补偿角速度与视轴所受扰动的速度方向相反,下同。

$$\begin{cases} \dot{E}c = -[-\omega_{Xc} \sin Ac + \omega_{Zc} \cos Ac] \\ \dot{A}c = -[(\omega_{Xc} \cos Ac \sin Ec - \omega_{Yc} \cos Ec + \\ \omega_{Zc} \sin Ac \sin Ec) / \cos Ec] \end{cases} \quad (7)$$

## 5 速率陀螺安装方式及视轴速度扰动量计算

式(7)给出了速率陀螺视轴稳定系统角速度补偿的一般表达式,通过式(7)可以在理论上归纳出3种陀螺安装方法:

方案一,采用3个单自由度速率陀螺.分别沿甲板坐标系的轴  $OXC$ 、 $OYC$ 、 $OZC$  安装在船体上,依次测量船体运动的3个角速度  $\omega_{Xc}$ 、 $\omega_{Yc}$ 、 $\omega_{Zc}$ ,通过式(7)就可以计算伺服系统的理论补偿量  $\dot{A}c$ 、 $\dot{E}c$ 。

方案二,采用3个单自由度速率陀螺.一个陀螺固定在船体上,并使其敏感轴与甲板坐标系坐标轴  $OYC$  平行,用来测量  $\omega_{Yc}$ ;另一个陀螺安装在方位环上,敏感轴与方位环坐标系的坐标轴  $OXY$  平行,用来测量  $\omega_{iyx}$ ;第3个陀螺也安装在方位环上,其敏感轴平行于电视跟踪仪的水平轴即轴  $OZY$ ,用来测量  $\omega_{iyz}$ .由式(1)可知

$$\begin{cases} \omega_{iyx} = \omega_{Xc} \cos Ac + \omega_{Zc} \sin Ac \\ \omega_{iyz} = -\omega_{Xc} \sin Ac + \omega_{Zc} \cos Ac \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7),则得到方位、俯仰伺服回路应该产生的补偿角速度如式(9)所示,其中负号表示伺服系统产生的补偿角速度与视轴所受扰动速度的

俯仰框坐标系上最终的角速度等于船体、伺服系统分别耦合到该坐标系上的角速度的叠加,即

方向相反。

$$\begin{cases} \dot{E}c = -\omega_{iyz} \\ \dot{A}c = -(\omega_{iyx} \tan Ec - \omega_{Yc}) \end{cases} \quad (9)$$

方案三,采用2个陀螺.一个陀螺安装在俯仰框上,测量轴与水平轴垂直,并与  $OYP$  轴平行,用来测量  $\omega_{ipy}$ ;另一个陀螺也安装在俯仰框上,其测量轴平行于水平轴  $OZY$ ,用来测量  $\omega_{iyz}$ .由式(1)和式(2)知

$$\begin{cases} \omega_{ipy} = -\omega_{Xc} \cos Ac \sin Ec + \omega_{Yc} \cos Ec - \\ \omega_{Zc} \sin Ac \sin Ec \\ \omega_{iyz} = -\omega_{Xc} \sin Ac + \omega_{Zc} \cos Ac \end{cases} \quad (10)$$

再代入式(7)可得方位、俯仰伺服回路应该补偿的角速度为

$$\begin{cases} \dot{E}c = -\omega_{iyz} \\ \dot{A}c = \omega_{ipy} / \cos Ec \end{cases} \quad (11)$$

但是仔细分析后发现,用来测  $\omega_{ipy}$  的陀螺需要其敏感轴既与水平轴垂直又与  $OYP$  轴平行,这就决定了该陀螺必须装在俯仰框的转子上,而低平式电视跟踪仪的机械结构决定了俯仰框的转子必须要绕垂直轴转动,这样一来伺服系统产生的  $\dot{A}c$  就会耦合到测  $\omega_{ipy}$  的陀螺上,使其测得的角速度不再单纯是船摇速度在  $OYP$  方向的分量,而是船摇角速度、伺服系统产生的角速度共同在  $OYP$  方向产生的分量,所以第3种陀螺安装方案在工程上不可行。

比较前2个方案可以看出:第1种方案陀螺安装很直观,但由  $\omega_{xc}$ 、 $\omega_{Yc}$ 、 $\omega_{Zc}$  得到  $\dot{A}c$ 、 $\dot{E}c$  过程中的运算量较大,不利于伺服处理器进行处理;第2种方案使用3个单轴陀螺,安装方式巧妙,从陀螺测得的  $\omega_{iyz}$ 、 $\omega_{iyx}$ 、 $\omega_{Yc}$  得到  $\dot{A}c$ 、 $\dot{E}c$  值的过程中仅有一次三角函数运算和若干次算术运算,降低了运算难度,有利于进行实时数据处理。

## 6 实验结果

在船载地平式电视跟踪仪的实践中,采用第2种速率陀螺安装方式.在外场跟飞过程中记录视轴

的甲板方位角  $A_c$ 、甲板俯仰角  $E_c$  及 3 个陀螺测得的角速度  $\omega_{Yc}$ 、 $\omega_{iyz}$ 、 $\omega_{iyz}$ ，自定义仿真模块  $hq\_comp\_acv$  以计算船摇对视轴在方位方向上的速度扰动

量  $Acv$ ，构建如图 3 所示的仿真系统，仿真结果如图 4 所示。

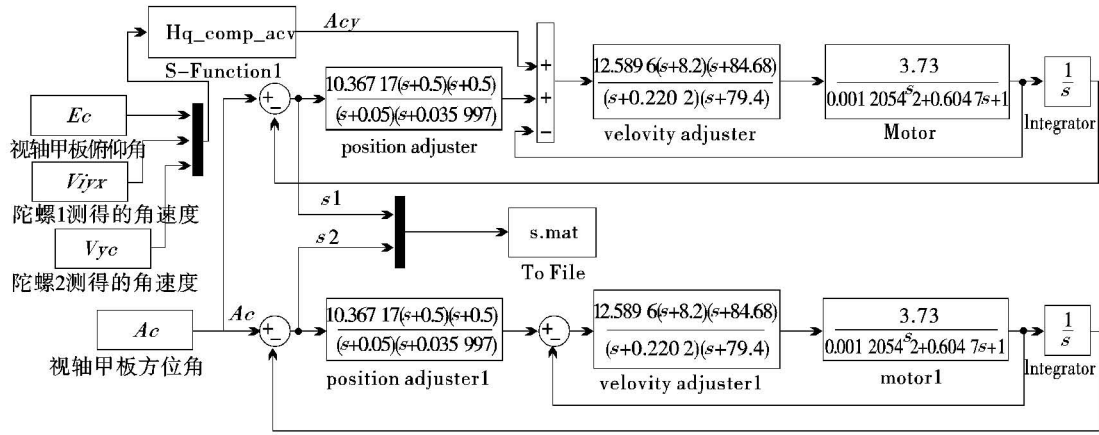


图 3 用速率陀螺实现视轴稳定的仿真模型

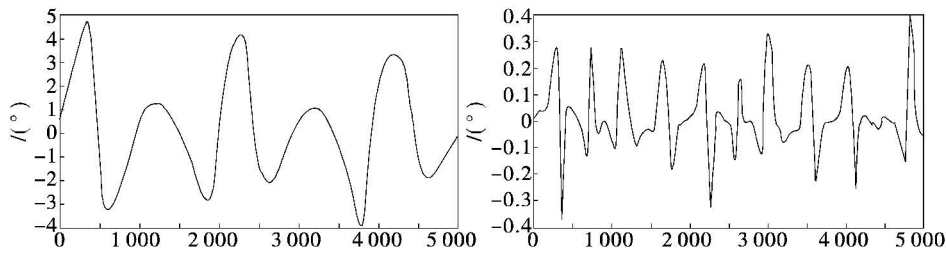


图 4 补偿视轴扰动前后方位跟踪误差对比

仿真结果表明，未补偿视轴扰动时方位最大跟踪误差为  $4.72^\circ$ ，补偿视轴扰动后方位最大跟踪误差为  $0.42^\circ$ ，这与利用试验中记录下来的跟踪误差数据进行的分析结果基本相符。船摇隔离度为

$$20\lg(4.72/0.42) = 20.01.$$

### 7 结 论

利用速率陀螺稳定车载电视跟踪仪的视轴在实际中获得了良好效果。在分析陀螺安装方式时，要区分船摇角速度与伺服系统所产生的补偿角速度的不

同，避免概念的混淆。另外，需要注意速率陀螺的零位漂移问题，可以建立陀螺零偏稳定性模型，采用 kalman 滤波算法对其进行估计。

### 参考文献

- [1] 罗护. 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.
- [2] 陈涛. 光电经纬仪跟踪架结构模式浅析[J]. 吉林工学报, 2002, 23(3): 19 - 22.
- [3] 郭富强. 陀螺稳定装置及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995: 101 - 103.

### 本 刊 声 明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊;《中文科技期刊数据库》收录期刊;《中国期刊全文数据库》全文收录期刊;《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊;《电子科技文摘》数据库收录源之数据期刊。本期刊所刊载的文章在国内外数据库检索机构(包括纸版、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。文稿刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊一份。