

# <sup>1</sup> 重力传感器水平度测量仪原理分析

刘吉富, 李敏勇

(海军工程大学指挥自动化系, 湖北 武汉 430033)

**摘 要:** 随着现代科技的发展, 人们对于各种基座平台的水平度精度要求越来越高, 而现有光学象限仪已不能完全满足基座平台水平度的检测, 特别是一些舰船(例如军用舰艇)上的基座平台, 对于水平度精度的要求很高。文中介绍了利用重力传感器测量平台倾斜度的工作原理和计算方法, 并以舰船锚泊时平台水平度误差的解算数学模型为例, 分析了舰艇纵横摇对水平度测量的影响, 以此来阐述重力传感器水平度测量仪的测量计算方法。

**关键词:** 水平度; 重力传感器; 纵横摇; 倾角误差

中图分类号: TP29

文献标示码: A

## The theory and analyse of gradienter using gravity sensor

LIU Ji-fu, LI Min-yong

(Dept. of Wenponry Eng., Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** With the development of modern science, all kinds of pedestal platforms must be more precise. However, in the gradienter checking, the capability of the current optics quadrant instruments can not adapt to some of the pedestal platforms entirely, especially to some pedestal platforms on the ships (such as: naval ships). Firstly, the principle and the calculation method of the gravity accelerometer were introduced in this article. Then, an example based on the error computational model of the platform's gradienter checking was detailedly introduced in order to analyze the effect of the ship's vibration in plat's gradienter checking.

**Key words:** gradienter; gravity sensor; freely sway in length and breadth; the error of the obliquity

### 一 概述

现代装备对一些特定系统所在平台的水平度精度要求较高, 精确测量各平台的水平度也就显得至关重要<sup>[1]</sup>。传统的检查与规正是利用光学象限仪进行平台水平度的检测, 由人工读数完成, 检测方法繁琐、读数困难、精度难以保证, 而且光学象限仪只有在多次多方位测量后方能综合给出倾斜平台的倾斜角度<sup>[2]</sup>, 这对检测平台或实时控制水平的场合是一个致命弱点。而利用重力传感器水平测量仪可使测量精度达到 0.002 弧度, 还可通过预先编程、多个传感器测量平台不同方向, 一次性得出平台与基准面之间的面夹角及面夹角的方向。这种测量方法极大的方便了平台平面的调整。文中详述了利用重力传感器测量水平度的原理, 并以舰艇纵横摇对平台水平度测量的影响为例来阐述测量方法。

### 二 加速度传感器测角原理

重力传感器是将运动或重力转换为电信号的传感器, 主要用于倾斜角、惯性力、冲击及震动等参数的测量<sup>[3]</sup>。在测量平台倾斜角时, 将重力传感器垂直放置于在所测平台上, 重力传感器的敏感轴应与倾斜平台的轴向一致, 在水平状态下应与水平面平行, 如图 1 所示, 其中  $\alpha$  为平台沿某一方向的倾斜角。重力传感器的质量块由于受到重力加速度  $g$  在倾斜方向上的分量  $g_{\alpha}$ :  $g_{\alpha} = g \sin \alpha$  的作用产生偏移, 使重力传感器的输出电压发生变化。若重力传感器在水平状态下的输出为  $V_0$ , 倾角为  $\alpha$  时的输出为  $V_{\alpha}$ , 且在  $1g$  加速度作用下的输出为  $V$ , 则有:

$$V_{\alpha} = V / g \times \sin \alpha \times 1g + V_0$$

即:

$$\alpha = \arcsin[(V_\alpha - V_0)/V]$$

利用上式可以方便求得平面某一方向上的倾斜角。如果将两个重力传感器正交放置在平台中心，如图 2 所示，则平台在  $x$  方向上倾斜角  $\alpha_x$  和平台在  $y$  方向上倾斜角  $\alpha_y$  为：

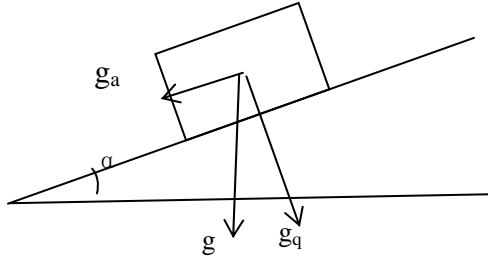


图 1 倾角为  $\alpha$  时的受力分析

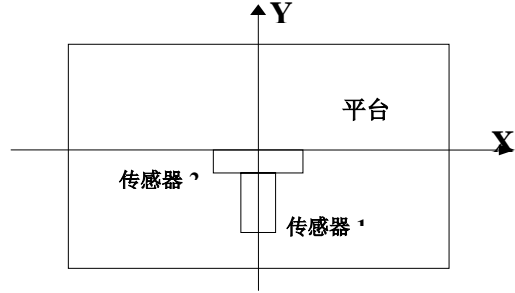


图 2 正交重力传感器的放置

$$\alpha_x = \arcsin[(V_x - V)/V], \quad \alpha_y = \arcsin[(V_y - V)/V]$$

根据这两个方向上的倾斜角可以确定出平台的横向倾角和纵向倾角。

### 三 测量平台倾角原理

#### 3.1 坐标定义

首先建立各个坐标系，① 水平坐标系 ( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ) ②参考平台坐标系 ( $X^1$ 、 $Y^1$ 、 $Z^1$ ):  $OY^1Z^1$  为平台面，在舰艇静止时处于水平状态，当存在舰艇摇摆时，与水平面存在  $\psi$ 、 $\theta$  的夹角，水平坐标系经先纵摇  $\psi$  角，后横摇  $\theta$  角得到。③平台坐标系 ( $X^2$ 、 $Y^2$ 、 $Z^2$ ): 两个相互正交的传感器轴线确定的被测平台平面及其垂线确定的坐标系，和参考平台坐标系存在  $\psi_r$ 、 $\theta_r$  的夹角，参考平台坐标系经先纵摇  $\psi_r$  角，后横摇  $\theta_r$  得到。平台参考系的  $Y^2$  轴和参考平台坐标系的  $Y^1$  轴相对于水平面的夹角之差为平台与参考平台水平度的纵向倾角  $\psi_y$ ；平台参考系的  $X^2$  轴和参考平台坐标系的  $X^1$  轴相对于水平面的夹角之差为平台与参考平台水平度的横向倾角  $\theta_y$ 。图 3 标出参考平台坐标系 ( $X^1$ 、 $Y^1$ 、 $Z^1$ )、水平坐标系 ( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ) 和平台坐标系 ( $X^2$ 、 $Y^2$ 、 $Z^2$ ) 的相互关系。

#### 3.2 平台测角数学模型

当舰艇摇摆时平台坐标系与参考平台坐标系的水平度存在纵摇误差和横摇误差，随着舰艇的纵横摇而变化。当平台相对于水平坐标系存在倾斜角时，只是改变了重力在坐标系各轴上的输入分量，而重力数学模型形式不变。

根据图 3 中各坐标系的相互关系，水平坐标系先纵摇  $\psi$  角，后横摇  $\theta$  可变换到参考平台坐标系，经过两次坐标转换将水平坐标系下的向量  $[\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z]^T$  转化到参考平台坐标系，得到在参考平台坐标系下的分量  $[\alpha_{x1}, \alpha_{y1}, \alpha_{z1}]^T$ 。

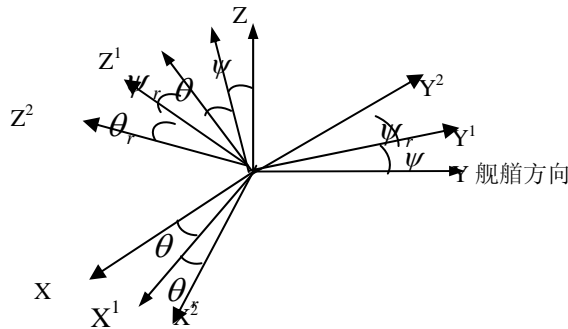


图 3 各坐标系之间的关系

$$\begin{bmatrix} \alpha_{x1} \\ \alpha_{y1} \\ \alpha_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi \\ 0 & -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

重力向量 $[0,0,-g]^T$ 在参考平台坐标系的坐标轴投影 $[a_{x1}, a_{y1}, a_{z1}]^T$ 表达式为:

$$\begin{bmatrix} a_{x1} \\ a_{y1} \\ a_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi \\ 0 & -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (2)$$

得到:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{x1} \\ \alpha_{y1} \\ \alpha_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \sin \theta \\ -\sin \psi \\ -\cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} g \quad (3)$$

设 $\beta_{x1}$ 和 $\beta_{y1}$ 分别代表参考平台坐标系 $X^1$ 轴和 $Y^1$ 轴与水平面的夹角。则重力加速度在 $X^1$ 轴和 $Y^1$ 轴上的投影 $\alpha'_{x1}$ 、 $\alpha'_{y1}$ 为:

$$\alpha'_{x1} = g \cdot \sin \beta_{x1}, \alpha'_{y1} = g \cdot \sin \beta_{y1} \quad (4)$$

由式(3)、(4)可知:

$$\begin{cases} \beta_{x1} = \arcsin(\cos \psi \sin \theta) \\ \beta_{y1} = \arcsin(-\sin \psi) \end{cases} \quad (5)$$

参考平台坐标系到平台坐标系先纵摇 $\psi_r$ , 后横摇 $\theta_r$ 变换到平台坐标系, 经过两次坐标转换将参考平台坐标系下的向量 $[\alpha_{x1}, \alpha_{y1}, \alpha_{z1}]^T$ 转换到平台坐标系, 得到向量 $[\alpha_{x2}, \alpha_{y2}, \alpha_{z2}]^T$ 在平台坐标系中的分量 $[\alpha_{x2}, \alpha_{y2}, \alpha_{z2}]^T$ 。

$$\begin{bmatrix} \alpha_{x2} \\ \alpha_{y2} \\ \alpha_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 & -\sin \theta_r \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_r & 0 & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi_r & \sin \psi_r \\ 0 & -\sin \psi_r & \cos \psi_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{x1} \\ \alpha_{y1} \\ \alpha_{z1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

重力向量 $[0,0,-g]^T$ 在平台坐标系的坐标轴投影 $[a_{x2}, a_{y2}, a_{z2}]^T$ 表达式为:

$$\begin{bmatrix} a_{x2} \\ a_{y2} \\ a_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 & -\sin \theta_r \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_r & 0 & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi_r & \sin \psi_r \\ 0 & -\sin \psi_r & \cos \psi_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{x1} \\ a_{y1} \\ a_{z1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

得到:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{x2} \\ \alpha_{y2} \\ \alpha_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r \cos \psi \sin \theta - \sin \theta_r \sin \psi_r \sin \psi + \sin \theta_r \cos \psi_r \cos \theta \cos \psi \\ -\cos \psi_r \sin \psi - \sin \psi_r \cos \theta \cos \psi \\ \sin \theta_r \cos \psi \sin \theta + \cos \theta_r \sin \psi_r \sin \psi + \cos \theta_r \cos \psi_r \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} g \quad (8)$$

设 $\beta_{x2}$ 和 $\beta_{y2}$ 分别代表平台坐标系 $X^2$ 轴和 $Y^2$ 轴与水平面的夹角, 由式(8)和式(9)可得:

$$\begin{cases} \beta_{x2} = \arcsin(\cos \theta_r \cos \theta \sin \psi - \sin \theta_r \sin \psi_r \sin \theta + \sin \theta_r \cos \psi_r \cos \theta \cos \psi) \\ \beta_{y2} = \arcsin(-\cos \psi_r \sin \theta - \sin \psi_r \cos \theta \cos \psi) \end{cases} \quad (9)$$

由式 (5)、(9) 可得, 平台相对参考平台的横向倾角  $\theta_y$ ,

$$\theta_x = \arcsin(\cos \theta_r \cos \theta \sin \psi - \sin \theta_r \sin \psi_r \sin \theta + \sin \theta_r \cos \psi_r \cos \theta \cos \psi) - \arcsin(\cos \psi \sin \theta) \quad (10)$$

平台参考系相对参考平台的纵向倾角  $\psi_y$ ,

$$\psi_y = \arcsin(-\cos \psi_r \sin \theta - \sin \psi_r \cos \theta \cos \psi) - (-\arcsin(\psi)) \quad (11)$$

当舰艇静止时, 参考平台坐标系相对于水平坐标系的纵横摇角  $\psi$ 、 $\theta$  均为零, 可认为参考平台坐标系和水平坐标重合, 平台坐标系相对于参考平台坐标系的纵横摇角为  $\psi_r$ 、 $\theta_r$ , 则在舰艇静止时平台相对于参考平台的纵横摇角,

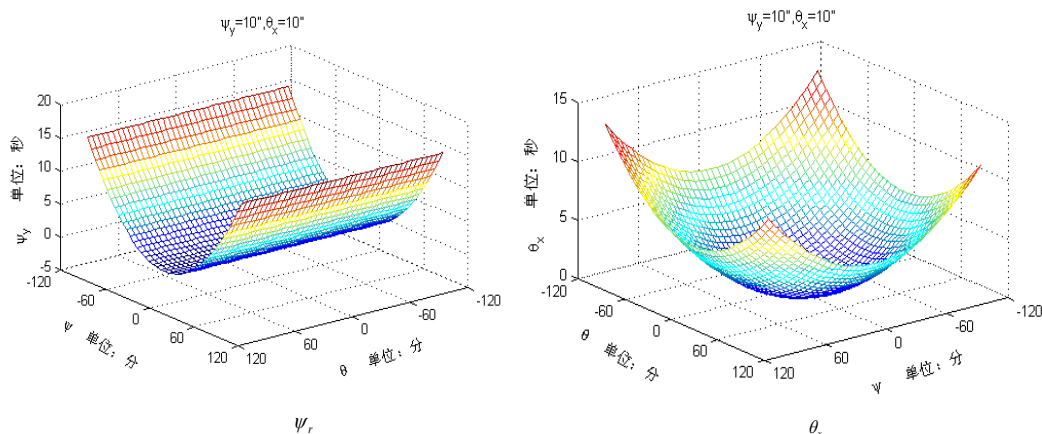
$$\theta_y' = \arcsin(\cos \psi_r \sin \theta_r)$$

$$\psi_y' = -\arcsin(\psi_r)$$

则平台横向倾角误差  $\Delta\theta_x = \theta_x - \theta_y'$ , 平台纵向倾角误差  $\Delta\psi_y = \psi_y - \psi_y'$ 。

#### 四 仿真分析

假定舰艇纵、横摇角度在  $\pm 2^\circ$  范围内, 舰艇坐坞时一般满足这一条件, 平台和参考平台之间的纵横摇误差角  $\psi_r$ 、 $\theta_r$  均为  $20''$  时, 利用 Matlab 软件进行仿真计算, 见图 4、图 5。结果显示: 平台纵摇角  $\psi$  对  $\psi_y$  的影响较大, 误差随着  $\psi$  的增大而增大, 而横摇角  $\theta$  对其影响可忽略不计, 当  $\psi_r$  为  $\pm 2^\circ$  时,  $\psi_y$  最大误差  $15''$ ; 平台横摇角  $\theta$  对  $\theta_x$  具有明显的影响, 当  $\psi_r$ 、 $\theta_r$  为  $\pm 2^\circ$  时,  $\theta_x$  最大误差达到  $15''$ 。由此可看出, 这种测量仪的精度很高, 操作简便。



#### 五 结论

本文作者的创新点在于提出一种新的水平度检测的方法, 阐述其工作原理, 并举例介绍这种水平度检测仪的测量计算方法。重力式水平度检测仪测量精度高、检测方便、客观, 远优越于光学象限仪, 利用这种检测仪可以实现各种平台水平度的适时检测。目前这种水平度检测仪已在军事领域得到广泛应用, 产生经济效益 130 多万元人民币。特别值得一提的是若在此基础上结合计算机技术加上误差控制系统, 将所测倾斜角及其误差由单片机转换为控制信号去调整平台, 可实现平台水平度的自适应调整, 实现智能平台。

#### 参考文献

1. 孙胜春, 邢昌风, 王士杰, 付庆中. 指控系统构造与调试[M]. 武汉: 海军工程学院教务部, 1998.8, 10—20。

2. 王士杰, 王航宇.舰载火控原理[M].武汉: 海军工程大学, 2001, 5—9。
3. 金玉涛, 来清民.基于 PIC 单片机的单摆智能测量控制系统[J]. 微计算机信息, 2007, 2-2: 124-125。

#### 作者简介

1. 刘吉富,男,1977 年 11 月,江苏人,汉族, 硕士研究生.主要从事智能平台研究.
2. LIU Ji-fu,male, born in November 1977 year, Jiangsu, The han nationality, Graduate student。 study field : intelligence platform. Dept. of Wenponry Eng., Naval Univ. of Engineering. Postcoat
3. 李敏勇,男,1953 年 7 月,广东人,汉族, 博士,副教授.主要从事信息作战和指控系统联调的研究. 海军工程大学指挥自动化系,430033
4. LI Min-yong, male, born in July 1956 year, The han nationality, Guangdong , doctor,associate professor。 study field :infomation war , command and control system. Dept. of Wenponry Eng., Naval Univ. of Engineering. Postcoat: 430033