

文章编号: 1001- 2486(2007) 03- 0118- 05

# 一种新型主动式波浪补偿系统的原理及数学建模<sup>\*</sup>

徐小军, 陈 循, 尚建忠

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 基于差动行星齿轮传动机构, 提出了一种新型主动式波浪补偿系统。介绍了波浪补偿的系统组成, 在分析差动行星轮系调速特性的基础上, 阐述了波浪补偿系统的工作原理和补偿机制。根据波浪补偿的两个主要目的, 按照从补给船吊装载荷到被补给船的整个工作过程, 建立了波浪补偿系统的数学模型, 为实现系统的计算机控制提供依据。

**关键词:** 波浪补偿; 差动行星齿轮传动; 数学建模

中图分类号: TH132.41 文献标识码: A

## The Principle and Mathematical Modeling of a New Active Heave Compensation System

XU Xiao-jun, CHEN Xun, SHANG Jian-zhong

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A new active heave compensation system (AHCS) was proposed, based on a differential planet transmission mechanism. The velocity adjusting feature of differential gear train was analyzed and the working and compensation principles of the AHCS were presented. Furthermore, in terms of the two main purposes of heave compensation and in accordance with the whole process of hoisting from despot ship to aim ship, a mathematical model was established for the computer control of the system.

**Key words:** heave compensation; differential planet transmission; mathematical modeling

波浪补偿系统是伴随着海上作业日益发达和频繁而产生的一种新型吊装作业系统。其主要工作目的是保证过驳时不受波浪起伏的限制, 使补给船在恶劣海况下也可以对被补给船予以补给。普通起重机在海上对驳作业时, 是通过卷扬机回转和改变起重臂的跨度, 实现载荷在岸/舰或舰/舰之间的吊装的。由于作业船舶之间通常会因风浪的影响相对上下运动, 从而造成下放中的载荷与上升的船体发生碰撞, 或已放落到甲板上的载荷由于船体的下沉出现再次悬空的现象, 这都会给海上对驳吊装的效率 and 安全性带来不利影响。装有波浪补偿系统的起重机, 可以补偿由于风浪引起的两船相对运动, 从而避免或者大大减轻影响。

波浪补偿系统在国内外的舰船及海上平台已被广泛使用。目前, 各国应用的波浪补偿起重机尽管形式不同, 其结构和原理基本接近。归纳起来有两种类型: 一是主动式补偿; 二是随动式补偿<sup>[7]</sup>。我国有关研究单位已经开发了油缸加蓄能器的气液混合型补偿系统以及随动小车补偿系统, 这两种系统都是随动式补偿, 需要体积庞大的辅助装置, 并且相对主动补偿, 随动补偿所引起的起吊绳索张力变化要大很多。

本文提出一种新型主动式波浪补偿系统, 利用内嵌于卷扬机的差动行星齿轮传动机构的调速特性来实现补偿, 不需要额外的辅助装置, 结构简单, 其补偿范围不受辅助装置的行程限制。

### 1 波浪补偿系统的组成

如图 1 所示, 波浪补偿系统由机械执行系统(卷扬机)、液压驱动系统、计算机控制系统和传感器检

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2006- 11- 14

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 徐小军(1972-), 男, 讲师, 博士生。

测系统组成。

起重机要实现平稳吊装功能,必须补偿由波浪引起的两船相对速度,该补偿速度的大小等于两船的相对速度。系统实现的基本过程:传感器检测系统检测到两船相对运动的相关参数(舰船位移、上下波动速度、绳索压力和张力),将数据传递给计算机控制系统,计算机控制系统根据当前误差及误差变化率的大小,经运算后给出控制信号,并将其传递给液压驱动系统(液压马达),液压系统根据控制信号的大小,决定比例阀的开口大小和方向,从而决定液压马达的转速和转向,液压马达驱动机械执行系统(卷扬机)完成波浪补偿功能;同时,检测系统不断地将检测到的载荷以及船舶的实际位移、绳索的张力等参数反馈给计算机控制系统,计算机控制系统根据误差和误差变化率的大小再计算出下一周期控制信号的大小,并将其传递给液压系统,进行下一周期的控制。

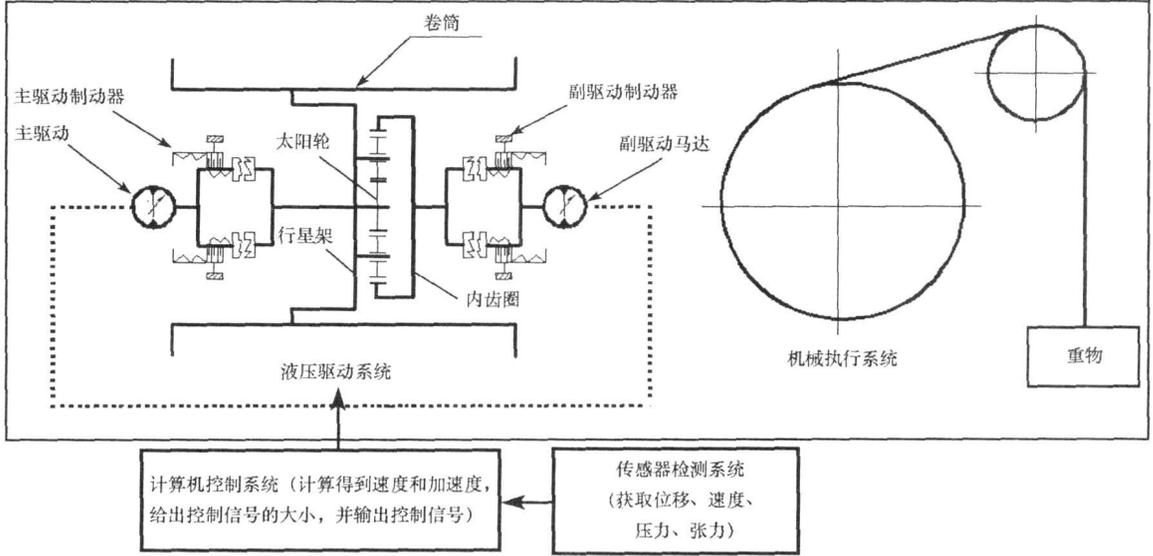


图1 系统组成

Fig. 1 Components of system

## 2 波浪补偿系统的补偿工作原理

### 2.1 差动行星轮系的运动方程及调速特性

新型主动式波浪补偿系统的补偿原理是利用差动行星轮系的调速特性来实现。如图2所示为2K-H(NWG)型差动轮系。设3个基本构件太阳轮 $a$ 、内齿圈 $b$ 、行星架 $H$ 的齿数分别为 $Z_a$ 、 $Z_b$ 、 $Z_H$ ,转速分别为 $n_a$ 、 $n_b$ 、 $n_H$ ,其所受外力矩分别为 $M_a$ 、 $M_b$ 、 $M_H$ , $u_0$ 为定轴轮系部分的传动比,则它们满足以下关系式:

$$\frac{n_H}{n_a} = \frac{n_a - n_H}{n_b - n_H} = -\frac{z_b}{z_a} = -u_0 \quad (1)$$

$$\frac{M_a}{-1} = -\frac{M_b}{-u_0} = -\frac{M_H}{1+u_0} \quad (2)$$

由式(1)得:

$$n_H = \frac{n_a - u_0 n_b}{1 + u_0} \quad (3)$$

由式(2)得到  $M_H = -(1 + u_0)M_a$ 、 $M_b = u_0 M_a$ 。外力矩中  $M_H$  的绝对值最大、 $M_a$  最小,因此,将行星架  $H$  作为输出力矩。

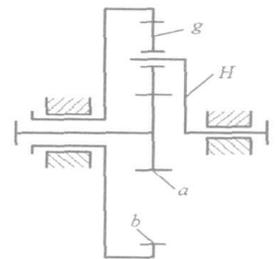


图2 NGW型差动轮系

Fig. 2 A differential gear train of NGW type

当  $n_a$  与  $n_b$  同向旋转时, 行星架  $H$  输出转速最高, 设为  $n_{H1}$ :

$$n_{H1} = \frac{n_a + u_0 n_b}{1 + u_0} \quad (4)$$

当  $n_a$  与  $n_b$  反向旋转时, 设计时, 使  $n_a$  在数值上大于  $u_0 n_b$ , 此时, 输出转速最低, 设为  $n_{H2}$ :

$$n_{H2} = \frac{n_a - u_0 n_b}{1 + u_0} \quad (5)$$

因此, 可以得到差动轮系的调速范围  $R_\Delta$  为:

$$R_\Delta = \frac{n_{H1}}{n_{H2}} = \frac{n_a + u_0 n_b}{n_a - u_0 n_b} \quad (6)$$

如果要增加调速范围, 可以在内齿圈端的输入端再增加一级齿轮传动, 以满足工作需要<sup>[5-6]</sup>。

## 2.2 波浪补偿基本原理

如图 1 所示, 卷扬机内部装有一个差动行星齿轮减速机以推动滚筒, 两个输入端分别为太阳轮(主驱动端)和内齿圈(副驱动端), 行星架为输出端。由 2.1 节的分析可以得到: 当太阳轮和内齿圈转向相同时, 行星架转速增加; 相反, 则转速降低。主驱动端的控制与普通液压起重机相同, 采用另一端耦合的副驱动端来实现波浪补偿功能。副驱动端的液压马达设计功率(转动扭矩)小于主驱动端。当两侧马达同向驱动, 卷扬机转速增加; 当两侧马达反向驱动, 卷扬机转速降低。这样, 就可以通过改变重物的升降速度来实现波浪补偿。

在正常工作状态下(没有风浪的情况下), 副驱动制动器处于接合的状态, 副驱动端不旋转, 这时的减速器就是典型的 NGW 行星传动, 使用主驱动端以完成正常的起升/下降工作。当海浪波动较大时, 启动副驱动便形成波浪补偿系统。

## 3 波浪补偿数学建模

波浪补偿目的主要有两个: 避免载荷与船发生碰撞; 避免吊装绳索张力变化过大或者发生绕绳现象。要实现补偿, 计算机控制系统需要根据两船的相对速度、吊装状态以及其他影响因素, 计算出差动行星齿轮传动两个输入端的速度大小和方向, 从而给出控制信号的大小。按照从补给船吊装载荷到被补给船的整个工作过程, 分两种情况进行讨论。

### 3.1 升沉运动方程

如图 3 所示, 舰船在波浪作用下, 将产生 6 个自由度的运动。沿三个坐标轴的往复振荡:

$X$ : 进退运动 (surge)

$Y$ : 横荡运动 (sway)

$Z$ : 升沉运动 (heave)

绕三个坐标轴的旋转振荡:

$\Phi$ : 横摇, 绕  $X$  (roll)

$\theta$ : 纵摇, 绕  $Y$  (pitch)

$\Psi$ : 首尾摇, 绕  $Z$  (yaw)

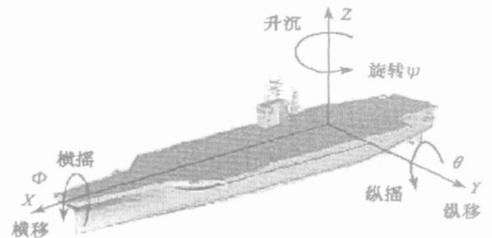


图 3 舰船位移图

Fig. 3 Ship displacements

各自由度运动之间是耦合作用, 可以将各个自由度运动方程联立求解。在已知海况的情况下, 这里只考虑垂直方向的波浪补偿:  $Z$  方向上的升沉运动以及绕  $Y$  方向上的纵摇运动, 且纵摇和升沉是耦合的, 其运动方程式<sup>[1-3]</sup>为:

$$\begin{cases} (m + a_{zz})z'' + b_{zz}' + c_{zz}z + a_z\theta'' + b_z\theta' + c_z\theta = F_z \cos \omega t + F_z \sin \omega t \\ (I_{yy} + a_{00})\theta'' + b_{00}\theta' + c_{00}\theta + a_{0z}z'' + b_{0z}z' + c_{0z}z = M_{0c} \cos \omega t + M_{0s} \sin \omega t \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$m$ : 船体质量;

$a_{ij}$ : 附连质量或附连质量惯性矩;

$b_{ij}$ : 运动线速度或角速度相联系的阻尼系数;

$c_{ij}$ : 复原力或复原力矩系数;

$I_{yy}$ : 船体质量对  $Y$  轴的惯性矩;

$F_{ij}$ : 波浪引起的扰动力幅值;

$M_{ij}$ : 波浪引起的扰动力矩幅值。

采用格里兹玛方法可以得到式中的各个系数, 即对于特定的船和环境下这些系数是一定的, 因此可以采用 Matlab 求出方程的解。为建模方便, 简化后可以将升沉运动、纵摇运动的运动方程设为:

$$Z = Z(t) \quad (6)$$

$$\phi = \phi(t) \quad (7)$$

### 3.2 载荷从补给船上起吊时的数学模型

为了简化模型, 可以将纵摇运动在垂直方向的运动分解到升沉运动中, 对于方程(7), 可以把它转化成  $Z$  方向上的运动, 得到

$$Z_{\phi-t_0-z} = x \sin[\phi(t)] \quad (8)$$

式中,  $x$  为补给船横移的位移量。因此, 对于船上的任意一点  $(x, y)$ , 其在  $Z$  方向的运动合成为:

$$Z = Z_1(t) + Z_{\phi-t_0-z}(t, x) \quad (9)$$

如图 4 所示, 载荷从补给船上起吊时, 如果不考虑绳子的弹性形变, 波浪引起的  $Z$  方向的升沉运动不会使载荷与船发生碰撞, 但起吊绳子的张力将发生变化; 波浪引起的绕  $Y$  方向上的纵摇运动, 有可能使载荷与船发生碰撞(如图 5 所示)。为避免碰撞, 只要考虑绕  $Y$  方向上的纵摇运动产生的影响。

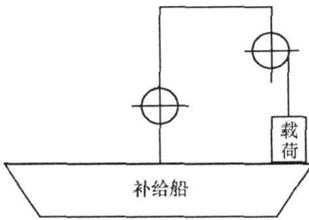


图 4 升沉运动分析  
Fig. 4 Heave analyzing

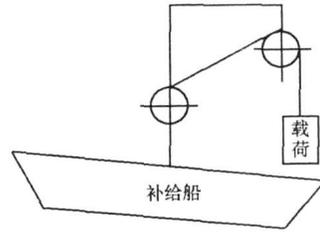


图 5 纵摇运动分析  
Fig. 5 Pitch analyzing

设在吊装工作过程中, 绳子的速度方程为:  $V = V(t)$ 。要保证不发生碰撞, 需要满足:

$$\forall T, T \in (T_L = 0, T_H = \text{const}), \text{有: } Z_{\phi-t_0-z}(T, x) \leq \int_0^T \alpha(t) dt \quad (10)$$

这时, 假设绳子上的最大受力为  $N$ , 载荷重量为  $G$ , 当船向上运动时, 即  $Z(t + \Delta t) \geq Z(t)$ , 如果不考虑绳子的弹性形变, 有

$$N \geq G + \frac{G}{g} \dot{v}(t) + \frac{G}{g} Z''(t) \quad (11)$$

当船向下运动时, 即  $Z(t + \Delta t) < Z(t)$ , 如果不考虑绳子的弹性形变, 也只需满足式(11)即可。

因此, 要使得钢丝绳不发生绕绳, 当船向下运动, 且船的下降速度大于起吊绳下降速度时, 就必须满足

$$Z'(t) < \alpha(t) \quad (12)$$

综上所述, 可以建立以下数学模型: 要避免碰撞和避免发生绕绳现象, 必须求得一个  $\alpha(t)$ , 满足式(10)~(12)即可, 为了使  $\alpha(t)$  波动在不大范围内, 需要增加一个条件: 使  $D[\alpha(t)]$  尽可能小。

### 3.3 载荷吊放到被补给船时的数学模型

这种情况主要考虑载荷不与被补给船发生碰撞的情况。假设不碰撞的定义如下: 当载荷与被补给船接触的瞬间, 设其相对速度为  $\Delta v$ , 如果  $\Delta v$  在一个许用范围内, 则认为没有发生碰撞。

对补给船来说, 要考虑的是式(11)、式(12)两个条件。而对于被补给船来说, 则需要考虑碰撞问题。由不碰撞的定义可以得知, 需要满足以下的条件:

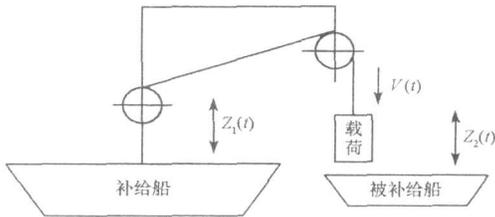


图6 载荷与船体接触时  
Fig. 6 Load touches aim ship

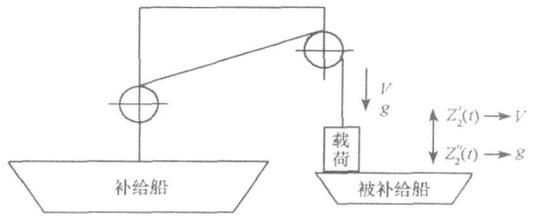


图7 载荷与船体刚好接触  
Fig. 7 Load touches aim ship nearly completely

$$|Z_1'(t) + V(t) + Z_2'(t)| \leq \Delta v \quad (13)$$

如果此时载荷与被补给船只是接触,尚未达到相同的速度和加速度,则有以下两种情况:

(1) 被补给船突然下沉

如图6所示,由于被补给船的下沉加速度不可能达到 $g$ ,而此时,载荷是处于自由落体的过程当中,一定会在一个很短的时间(可忽略不计)与船达到速度和加速度一致。

(2) 被补给船突然上升

如图7所示,考虑绳子收缩的速度,为避免发生绕绳现象,只要满足:

$$\forall T, T \in (T_L = 0, T_H = \text{const}), \text{有: } Z_2(T, x) \leq \int_0^T \psi(t) dt \quad (14)$$

## 4 结束语

该系统采用内嵌卷扬机,波浪补偿是通过控制差动行星齿轮减速器的两个输入端的转向和速度来实现,相对目前常用的油缸加蓄能器的气液混合型补偿系统,其补偿范围不受油缸行程和蓄能器压力的限制;相对随动系统,其补偿范围不再受小车导轨长度的限制,因此,补偿范围更大;同时,该系统不需要额外庞大的辅助装置,操作和安装维护非常方便,具有较高的工程应用价值。本文建立的波浪补偿数学模型为实现波浪补偿的计算机控制提供依据。

## 参考文献:

- [1] Love L J. Compensation of Wave-induced Motion and Force Phenomena for Ship-based High Performance Robotic and Human Amplifying Systems [R]. <http://www.osti.gov/bridge>, 2003.
- [2] 陶尧森. 船舶耐波性[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1983.
- [3] 朱军. 舰船静力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
- [4] 戴遗山. 舰船在波浪中运动的频域与时域势流理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [5] 饶振钢. 行星齿轮传动设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [6] 渐开线齿轮行星传动的设计与制造编委会. 渐开线齿轮行星传动的设计与制造[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [7] 邵曼华. 几种船用起重机波浪补偿装置[J]. 机械工程师, 2004(4).