

差动轮系在桥式抓斗卸船机中的应用

周刚

武汉钢铁有限公司运输部, 湖北 武汉 430080

摘要 : 对散货码头卸船设备的工艺需求进行了解构, 梳理了桥式抓斗卸船机的核心: 抓斗的驱动需求。分析了差动轮系的运行原理, 论证了差动减速机在桥式抓斗卸船机中的应用的可行性。论述了桥式抓斗卸船机1台抓斗通过2台差动减速机、3台电机、4根钢绳实现起升、下降、双向平移、开闭等5个方向(维度)运行的基本原理, 并在此基础上对差动减速机机械运行原理的分析方法进行了总结。

关键词 : 差动轮系; 四卷筒; 桥式抓斗卸船机

Application Of Differential Gear System in Bridge Grab Ship Unloader

Zhou Gang

Transportation Department of Wuhan Iron and Steel Co., Ltd., Wuhan , Hubei 430080

Abstract : The process requirements for unloading equipment at bulk cargo terminals were deconstructed, and the core of the bridge type grab bucket unloader was sorted out: the driving requirements for the grab bucket. Analyzed the operating principle of differential gear system and demonstrated the feasibility of applying differential reducer in bridge grab ship unloader. This paper discusses the basic principles of a bridge type grab ship unloader, which operates in five directions (dimensions) including lifting, lowering, bidirectional translation, and opening and closing through two differential reducers, three motors, and four steel ropes. Based on this, the analysis method of the mechanical operation principle of the differential reducer is summarized.

Keywords : differential gear system; four rolls; bridge type grab bucket unloader

一、背景

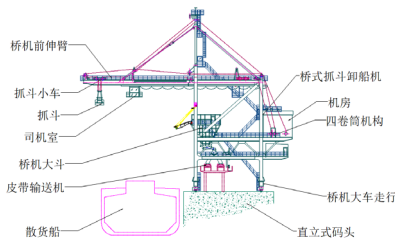
武汉钢铁有限公司运输部现有4座直立式码头泊位, 用于接卸铁矿石。码头上的主要卸船设备是750t/h 四卷筒牵引小车式桥式抓斗卸船机(简称桥机)。桥式抓斗卸船机的主要功能是通过抓斗将散货船舶上的物料抓取、接卸至物料传输系统, 通过皮带输送机输送至后方原料堆场。

为实现该功能, 抓斗需具备沿船舶横向、纵向的水平移动、竖直升降移动、船舶与桥机大斗间的水平移动、开闭运动等动作。

二、桥式抓斗卸船机的机械运行工艺

(一) 直立式码头卸船工艺

直立式码头桥式抓斗卸船机卸船工艺如下: 散货船靠泊在码头前沿。码头上布置的桥式抓斗卸船机工作时, 抓斗自船舱内抓取散料, 并向岸侧移动, 将散料卸入桥机大斗。散料沿大斗下的给料器、漏斗落入下方的皮带输送机, 实现散货船的物料接卸。详见图1。



> 图1 直立式码头卸船示意图

(二) 桥式抓斗卸船机主要运行机构

为完成码头卸船工艺, 桥式抓斗卸船机在其金属结构上, 配备了抓斗起升、开闭、运行机构、前伸臂俯仰机构、大车走行机构、物料输送系统、司机室及其他辅助机构。

1. 抓斗起升、开闭、运行机构

抓斗起升、开闭、运行机构由抓斗、桥机前伸臂上的抓斗小车、机房内的四卷筒机构及布置在桥式抓斗卸船机上的钢绳、滑轮组成。通过机房内4个钢绳卷扬筒对钢丝绳的卷扬收放, 实现抓斗在散货船横截面上的起升、下降、水平移动及抓斗本体的开闭。

2. 前伸臂俯仰机构

前伸臂俯仰机构, 用于实现桥机前伸臂的俯仰。通过机房内的钢绳卷扬筒驱动钢绳, 曳引桥机前伸臂沿根部的铰点进行回转, 实现前伸臂俯仰动作。该机构用于散货船靠离泊时将桥机前伸臂扬起, 避免与船舶的舰桥发生碰撞。

3. 大车走行机构

大车走行机构由4组运行台车组成, 驱动机构为三合一减速机, 用于实现桥机沿散货船纵向, 在码头平台轨道上的水平移动。

4. 物料输送系统

物料输送系统由外接料板、桥机大斗、给料器、分料漏斗等组成。用于实现将抓斗抓取的物料平稳的落入下方的皮带输送机的功能。

5. 司机室及其他辅助机构。

为确保桥机司机在卸船操作时具有良好的视野, 司机室可在

桥机前伸臂上的司机室轨道内水平运行。同时，为确保安全、环保受控，桥式抓斗卸船机上布置了喷淋抑尘装置、各机构的联锁保护装置、防风装置、防撞装置等机构。因本文主要讨论卸船工艺的实现，主要针对抓斗及四卷筒机构进行探讨，对其他机构不再赘述。

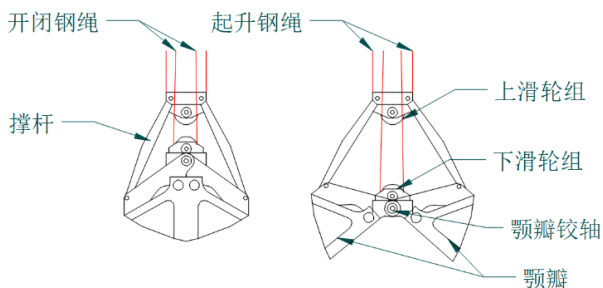
(三) 抓斗运行工艺

根据码头的卸船工艺，为正常完成卸船作业，桥式抓斗卸船机的抓斗必须能够实现沿船舶横向、纵向的水平移动、竖直升降移动、船舶与桥机大斗间的水平移动、开闭运动等动作。

通过前文对桥式抓斗卸船机各机构的梳理，可以看出，桥式抓斗卸船机大车走行机构可实现抓斗沿船舶纵向的移动。抓斗其他各方向的移动，均需由抓斗起升、开闭、运行机构完成。

1. 抓斗结构

桥式抓斗卸船机的抓斗采用双瓣四绳四撑杆式结构。抓斗的2个颚瓣通过铰轴连接，与撑杆形成连杆机构。结构型式见图2。



> 图2 抓斗示意图

2. 抓斗的开闭、起升、下降

抓斗由2根起升钢绳、2根开闭钢绳驱动。起升钢绳的绳头布置在抓斗顶部，可实现对抓斗整体的直接曳引。开闭钢绳的绳头穿过抓斗内的上下滑轮组，绳头固定在抓斗内下滑轮组的滑轮上，可实现对抓斗内上下滑轮组间相对位置距离的曳引。当上、下滑轮组间的位置变化时，2个颚瓣分别沿铰轴旋转，实现抓斗的开闭。

由上述的抓斗机构原理可知，抓斗的开闭动作完全取决于起升绳与开闭绳之间的相对运动速度，当起升、开闭钢绳速度相同时，抓斗保持一定的开闭度状态，2个颚瓣保持相对静止；当起升、开闭钢绳速度不相同，2个颚瓣分别旋转，实现抓斗的开斗或闭斗。即抓斗开闭及竖直方向运行的决定因素完全是起升钢绳的竖直方向速度（ $v_{起升}$ ）与开闭钢绳的竖直方向速度（ $v_{开闭}$ ）。其相对关系见表1：

钢绳状态	抓斗	
	开闭状态	竖直运行状态
$v_{起升} = v_{开闭}$	不变	与起升、开闭钢绳同向
$v_{起升} > v_{开闭}$	开斗	与起升绳同向
$v_{起升} < v_{开闭}$	闭斗	与起升绳同向
备注	以竖直向上为速度正方向	

3. 抓斗的平移

因抓斗的开闭、起升、下降，只取决于起升、开闭钢绳的竖

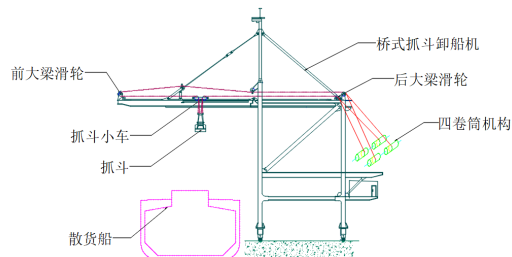
直方向上的相对速度。为实现抓斗的平移，仅需实现曳引抓斗的四根钢绳同步水平移动。

(四) 四卷筒机构运行需求分析

通过上述论证可知，抓斗的各向运动，直接取决于曳引抓斗的起升、开闭钢绳的运行状态，即四根钢绳的卷扬筒的运行状态。

1. 抓斗起升、开闭、运行机构布置

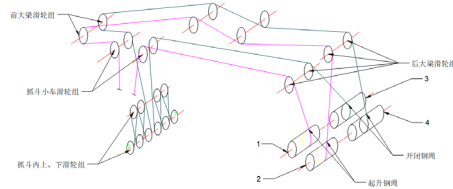
抓斗起升、开闭、运行机构的布置见图3。其执行单元为抓斗，动力单元为四卷筒机构。四卷筒机构驱动的四根钢绳分别通过前、后大梁滑轮经抓斗小车连接抓斗。



> 图3 抓斗起升、开闭、运行机构布置示意图

2. 钢绳布置及四卷筒机构运行状态分析

桥式抓斗卸船机起升、开闭钢绳的布置见图4。起升钢绳通过卷扬筒1、2驱动，分别经后大梁滑轮组、前大梁滑轮组，绕至抓斗小车滑轮组，固定在抓斗上。开闭钢绳通过卷扬筒3、4驱动，分别经后大梁滑轮组、前大梁滑轮组，绕至抓斗小车滑轮组，绕入抓斗内上、下滑轮组，并固定在下滑轮上。



> 图4 钢绳布置示意图

四卷筒机构的4个钢绳卷扬筒与抓斗的运行状态关系见表2。

表2：四卷筒机构与抓斗的运行状态关系

四卷筒机构				抓斗	4卷扬筒相对运动状态
起升卷扬		开闭卷扬			
卷扬筒1	卷扬筒2	卷扬筒3	卷扬筒4		
正转	正转	正转	正转	上升	4个卷扬筒同向旋转
反转	反转	反转	反转	下降	
停止	停止	正转	正转	闭斗	仅卷扬筒3、4旋转
停止	停止	反转	反转	开斗	
正转	反转	正转	反转	向陆侧水平移动	卷扬筒1、3同向 卷扬筒2、4反向
反转	正转	反转	正转	向江侧水平移动	
备注				以图4顺时针方向旋转为正转。	

抓斗采用2组（起升、开闭）4根钢绳曳引，为确保抓斗运行问题，需保证起升卷扬筒1、2的旋转速率（同向或反向）相同，

开闭卷扬筒3、4的旋转速率（同向或反向）相同。否则，抓斗会在运行中出现偏斜。

当两组卷扬筒（起升、开闭）间速率有差值时，抓斗呈现升降或平移中同步开闭的复合运行状态。

3. 四卷筒机构驱动装置的需求

为实现抓斗的各向驱动控制，对四卷筒机构的驱动装置要求如下：

(1) 分组控制

由表2可知，为实现抓斗的各向运行，4个卷扬筒即需要同向旋转、也需要分组相向旋转，必须能够实现4个卷扬筒分别分组驱动。

(2) 传动比恒定

为保证抓斗运行稳定，起升、开闭钢绳的速率需保持稳定，即要求4个卷扬筒运行时，在同一工况下，驱动机构减速机的传动比保持相对恒定。

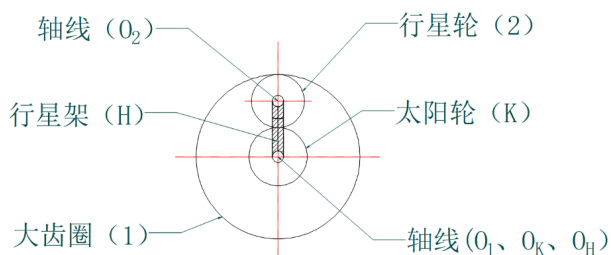
为实现该功能，同时尽量优化四卷筒机构结构，可利用有2个自由度的差动轮系，通过不同的输入组合，实现不同的输出结果。即在四卷筒驱动机构中，引入差动减速机。

三、差动减速机在四卷筒机构中的应用

(一) 差动轮系的原理

1. 差动轮系结构型式

差动轮系由太阳轮、行星轮、行星架、大齿圈（内齿圈）组成。其结构型式见图5。



> 图5 差动轮系示意图

太阳轮(K)、行星架(H)、大齿圈(1)沿同一轴线(O_1 、 O_K 、 O_H)做圆周运动。行星轮(2)松套在行星架(H)的末端，因此，行星轮(2)一方面沿轴线(O_2)回转(自转)，同时又随行星架(H)绕轴线(O_1 、 O_K 、 O_H)回转(公转)。

行星轮(2)分别与太阳轮(K)、大齿圈(1)的齿轮啮合。

2. 差动轮系传动分析

为明确太阳轮(K)、大齿圈(1)、行星架(H)三者的传动关系，将上述差动轮系加上一个与行星架(H)相反的角速度($-\omega_H$)^[1]，即将该差动轮系转化为了定轴轮系。根据周转轮系的基本原理，三者的角速度满足以下公式：

$$(\omega_K - \omega_H) / (\omega_1 - \omega_H) = -z_1/z_k$$

其中： ω_K ：太阳轮角速度

ω_H ：行星架角速度

ω_1 ：大齿圈角速度

z_1 ：大齿圈齿数

z_k ：太阳轮齿数

由此可知，太阳轮(K)、大齿圈(1)、行星架(H)三者的角速度满足确定的函数关系，即：

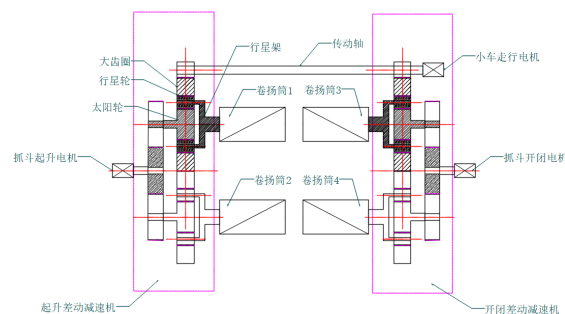
$$\omega_H = f(\omega_K, \omega_1)$$

因此，当太阳轮(K)、大齿圈(1)为输入构件、行星架(H)为输出构件、行星轮作为传动构件时，该差动轮系有2个自由度，但输入、输出构件的传动比满足恒定的函数关系，可实现该差动轮系的精确传动。

(二) 差动减速机实现四卷筒驱动的技术方案

1. 差动减速机的结构型式

在桥式抓斗卸船机四卷筒机构中，布置2台差动减速机，每台差动减速机由2个差动轮系组成。两个差动轮系结构型式及技术参数完全一致。2个差动轮系的太阳轮通过一个中间齿轮，由1台电机（起升、开闭电机）同步驱动。2个差动轮系的大齿圈通过其外齿轮相互啮合，大齿圈由1台电机（小车走行电机）通过传动轴同步驱动。其结构型式见图6。



> 图6 差动减速机示意图

2. 差动减速机的运行状态分析

四卷筒机构运行时，差动减速机基本运动状态如下：

(1) 小车走行电机运行，抓斗起升、开闭电机停止

此时，起升、开闭差动减速机内部各2套差动轮系的太阳轮均停止，大齿圈驱动行星架，带动卷扬筒运行。因起升、开闭差动减速机内部2套差动轮系的大齿圈为外啮合，转动方向相反，故同一台减速机的2个卷扬筒相向运行。实现卷扬筒1、3同向，卷扬筒2、4反向，4个卷扬筒同速率的运行状态，抓斗水平运动。

(2) 小车走行电机停止，抓斗起升、开闭电机同向运行

此时，起升、开闭差动减速机内部各2套差动轮系的大齿圈均停止，太阳轮驱动行星架，带动卷扬筒运行。因2套差动轮系的太阳轮由一个中间轮驱动，转动方向相同，故同一台减速机的2个卷扬筒同向运行。实现卷扬筒1、2、3、4同向、同速运行，抓斗升降运动。

(3) 小车走行电机停止，抓斗起升电机停止，开闭电机运行

此时，起升差动减速机停止，卷扬筒1、2停止。开闭差动减速机内部2套差动轮系的大齿圈均停止，太阳轮驱动行星架带动卷扬筒3、4同向、同速运行，抓斗开闭运动。

(4) 小车走行电机停止，抓斗起升电机、开闭电机不同速

运行

此时，起升、开闭差动减速机内部各2套差动轮系的大齿圈均停止。起升电机驱动起升差速减速机2个太阳轮带动卷扬筒1、2同速运行。开闭电机驱动开闭差速减速机2个太阳轮带动卷扬筒3、4同速运行。因2组卷扬筒存在速度差，抓斗呈现在升降过程中同步开闭的复合运行状态。

(5) 抓斗起升电机、开闭电机同速运行，小车走行电机不同速运行

此时，起升开闭差动减速机4个太阳轮速度相同，4个大齿圈做相向同速率运动。卷扬筒1、3速度相同，卷扬筒2、4速度相同。因2组卷扬筒间存在速度差，抓斗呈现在升降过程中，同步横移的复合运行状态（竖直平面曲线运动）。

(6) 小车走行电机、抓斗开闭电机不同速运行，抓斗起升电机停止

此时，起升差动减速机太阳轮停止、开闭差动减速机2个太阳轮同向、同速运行，起升、开闭差动减速机4个大齿圈做相向同速率运动。卷扬筒1、2速率相同、方向相反，卷扬筒3、4方向相反，速度差值为横移状态速度差。抓斗呈现在水平移动过程中，同步开闭的复合运行状态。

(7) 小车走行电机、抓斗起升电机、开闭电机均不同速运行
此时，抓斗呈现升降、横移、开闭的复合运行状态。

根据上述不同运行状态的分析，可以看出，差动减速机可通过3台电机（小车走行电机、抓斗起升、开闭电机）的不同运行状态，控制4个卷扬筒实现不同的运行状态，从而实现抓斗起升、下降、双向平移、开闭等不同的运行状态。

3. 差动减速机原理总结与认知

根据相对运动的原理，在差动轮系中，附加一个公共转动后，差动轮系各构件的相对运动并不会改变。结合前述的差动轮系原理及差动减速机机构运行分析，可将上述起升、开闭差动减速机作为一个差动轮系的整体。因2个差动减速机内各个差动轮系的技术参数均相同，起升开闭电机、小车走行电机回转速度各自对4个卷扬筒回转速度的影响也相同。

由此，可以将4个卷扬筒的回转速度，简化管理为起升开闭电机、小车电机的回转速度的函数叠加。由此，4个卷扬筒的转动速度可通过以下公式进行简化管理：

$$\omega_{\text{卷扬筒1}} = f(\omega_{\text{抓斗起升电机}}) + f(\omega_{\text{小车走行电机}})$$

$$\omega_{\text{卷扬筒2}} = f(\omega_{\text{抓斗起升电机}}) - f(\omega_{\text{小车走行电机}})$$

$$\omega_{\text{卷扬筒3}} = f(\omega_{\text{抓斗开闭电机}}) + f(\omega_{\text{小车走行电机}})$$

$$\omega_{\text{卷扬筒4}} = f(\omega_{\text{抓斗开闭电机}}) - f(\omega_{\text{小车走行电机}})$$

其中： $\omega_{\text{卷扬筒1、2、3、4}}$ ：卷扬筒1、2、3、4的转动速度。

$\omega_{\text{抓斗起升电机}}$ ：抓斗起升电机转动速度

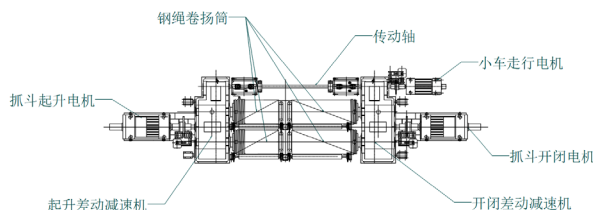
$\omega_{\text{抓斗开闭电机}}$ ：抓斗开闭电机转动速度

$\omega_{\text{小车走行电机}}$ ：小车走行电机转动速度

需要说明的是，根据前述差动轮系的机械原理，4个卷扬筒的回转速度虽与起升开闭电机、小车走行电机回转速度呈固定的线性函数关系，但并不是简单的加减计算。本文提出的四卷筒机构回转速度函数关系公式，仅用于说明差动减速机的运行原理，便于形成感性认知。

(三) 四卷筒机构总体布置

四卷筒机构采用差动减速机后，其驱动装置由3台驱动电机、2台减速机组成。其中，起升、开闭电机分别驱动起升、开闭差动减速机，小车走行电机通过传动轴同步驱动起升、开闭减速机。结构型式见图7。该结构型式简洁、运行稳定、可靠。



> 图7 四卷筒机构驱动装置示意图

四、结语

本文对散货码头卸船设备的工艺需求进行了解构，梳理了桥式抓斗卸船机的核心机构需求，分析了差动轮系的运行原理，论证了差动减速机在桥式抓斗卸船机中的应用的可行性。论述了桥式抓斗卸船机1台抓斗通过2台差动减速机、3台电机、4根钢绳实现起升、下降、双向平移、开闭等5个方向（维度）运行5个方向运行的基本原理，并在此基础上对差动减速机机械运行原理的分析、认知方法进行了总结。对港口机械技术管理人员有积极的参考、指导意义。对其他有复杂、精细机械结构需求的设备提供了积极的借鉴意义。

参考文献

- [1] 郑文纬, 吴克坚. 机械原理高等教育出版社, 1997.
- [2] 程树界. 对差动行星减速机的分析三峡大学学报, 1985.
- [3] 钟尚文. 港口机械桥式抓斗卸船机的探讨科技创新与应用, 2012.
- [4] 李东. 桥式抓斗卸船机性能考核分析科学与信息化, 2018.
- [5] 张展. 行星差动减速机机械设计与研究, 1984.
- [6] 王亚武. 桥式抓斗卸船机选型要点港口装卸, 2011.
- [7] 龙小兵. 论抓斗卸船机的自动作业性能科技创业家, 2012.
- [8] 司军营. 抓斗卸船机与连续式卸船机协同工作的分析起重运输机械, 2016.
- [9] 朱慧翔, 李军君, 孙波. 抓斗卸船机结构优化分析科技创新与应用, 2016.
- [10] 吴国威. 卸船机 PLC 及变频技术应用探讨科技风, 2015.