

# 基于阿克曼原理的 16 轮起重机转向机构设计

纽科伦(新乡)起重机有限公司 张 鑫

**摘 要:** 在分析了阿克曼转向原理的基础上,针对 16 轮 600 t 轮胎式船艇搬运起重机所要实现的转向功能,提出了一种新的转向机构,使 16 轮起重机能实现直行、斜行、阿克曼转向、原地转向等 9 种行走模式;运用 MathCAD 对转向机构进行计算,找到各轮转角的关系;运用 PLC + 编码器 + 液压系统的方法实现对各轮转角的精确控制。

**关键词:** 船艇搬运起重机; 游艇吊; 阿克曼转向原理; MathCAD; 液压转向机构

## Steering Mechanism Design of Crane with 16 Wheels Based on Ackerman Principle

Nucleon (Xinxiang) Crane Co., Ltd. Zhang Xin

**Abstract:** To meet the needs of steering function of the 16 wheels 600 t boat carrying wheel crane, this paper proposes a new type steering mechanism which can realize 9 moving models including straight moving, diagonal moving, Ackerman steering and pivot steering based on the Ackerman principle. It calculates the steering mechanism by MathCAD to find out the relationship of each wheel's steering angle and realizes the accurate control of each wheel by using PLC, coder and hydraulic system.

**Key words:** boat carrying crane; yacht crane; Ackerman steering principle; MathCAD; hydraulic steering mechanism

目前,关于阿克曼转向的研究大多集中在机动车辆领域,且多是对梯形转向机构或凸轮-连杆组合式转向机构的研究<sup>[1]</sup>。国内关于起重机的 16 轮多轴转向研究还不多见,国内外市场对具有灵活转向和自由行走功能的大型轮胎式起重机的需求越来越多。本次设计的 600 t 轮胎式船艇搬运起重机采用的是 16 轮 8 轴结构,要实现原地 360° 转向、直行、阿克曼转向、原地转向等行走模式,就必须确定每个轮的精确位置。因此,有必要对 16 轮 8 轴转向机构进行研究。

### 1 阿克曼转向原理

阿克曼转向原理是以这一理论的提出者 Rudolph Ackermann 的名字命名的一种汽车转向原理,它的基本观点是车辆在直线行驶或转弯过程中,每个车轮的运动轨迹都应符合它的自然运动轨迹,从而保证轮胎与地面间无滑移现象而处于转向力也最小的纯滚动状态。对于 4×2 车辆来说,如果转向时 2 个转向前轮的车轴延长线的交点落在后轴轴线延长线上(如图 1 所示),即符合阿克曼转向原理。而对于 16 轮 8 轴的轮胎式起重机来说,转向要复杂得多。

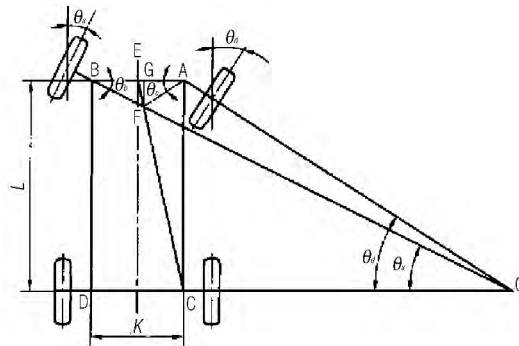


图 1 4×2 转向阿克曼原理

### 2 16 轮起重机转向原理

600 t 轮胎式船艇搬运起重机(也叫游艇吊,以下简称起重机)外形如图 2 所示,将 16 只车轮分为 8 组,分别编号为 1-8,每组的 2 只轮由车桥连接在一起,共同由 1 个回转机构带动回转。回转机构由回转支承、编码器、液压缸及回转柱组成。

阿克曼转向时,16 只轮绕着同一个瞬时圆心 O 做无滑移的滚动(如图 3 所示)。得到以下等式:

$$\theta_1 = \theta_4 \quad (1)$$

$$\theta_2 = \theta_3 \quad (2)$$

$$\theta_5 = \theta_6 \quad (3)$$

$$\theta_7 = \theta_8 \quad (4)$$

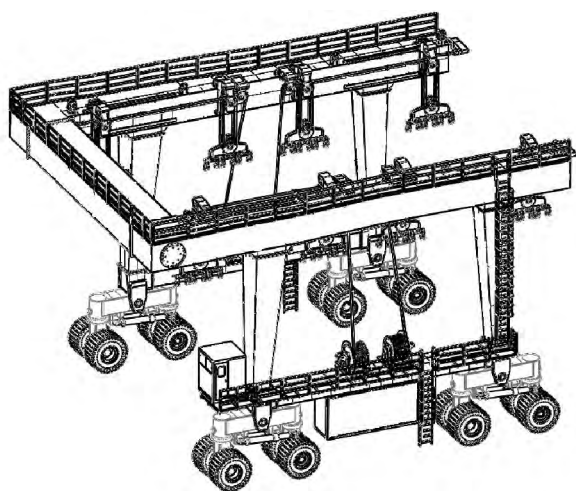


图 2 600 t 轮胎式船艇搬运起重机外形

$$\cos\theta_1 - \cos\theta_5 = \frac{S}{L_1} \quad (5)$$

$$\cos\theta_2 - \cos\theta_6 = \frac{S}{L_1} \quad (6)$$

$$\cos\theta_1 = \frac{S+R}{L_2} \quad (7)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{S+R}{L_2} \quad (8)$$

式中:  $S$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  为已知的常量  $R$  为未知的变量。

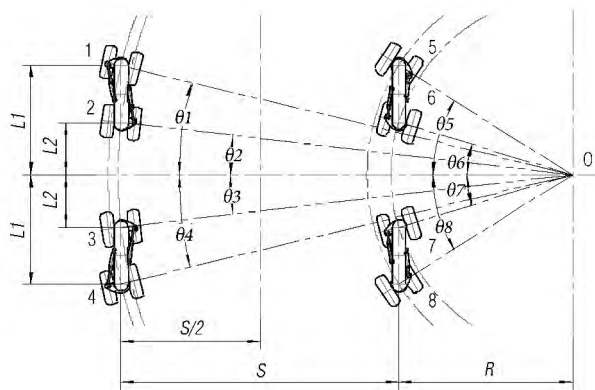


图 3 起重机 16 轮转向阿克曼原理

满足以上 8 个等式时,起重机的 16 轮转向即符合阿克曼转向原理。

本次设计采用摇杆式遥控器控制起重机的转向 8 个车桥立柱上均安装有液压缸和编码器,通过 PLC 控制各轮的转角。因此,需要以某个轮为基准,找出阿克曼转向时其他轮转角与基准轮转角的关系,以便编程和控制。以转向时所需转角最大的第 1 组轮为基准轮,通过三角函数可找出其他各轮组转角与基准轮转角  $\theta_1$  的关系式。原地 360°转向时,16 只轮绕着同一个瞬时圆心  $O'$  做无滑移的滚动(如图 4 所示)。此时仍是第 1 组轮转角最大,即

$$\theta_1 = \operatorname{atan}\left(\frac{2L_2}{S}\right) \quad (9)$$

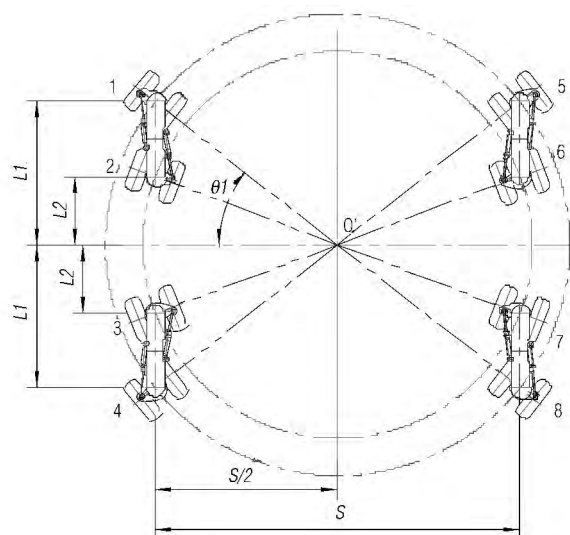


图 4 起重机 16 轮原地 360 度转向原理

转向机构一般采用液压缸 + 无齿回转支承的结构形式,可以是液压马达 + 回转减速机 + 有齿回转支承、液压马达 + 回转减速机 + 蜗轮蜗杆式回转支承、电动机 + 回转减速机 + 有齿回转支承、电动机 + 回转减速机 + 蜗轮蜗杆式回转支承等多种形式。

### 3 转向阻力矩的计算

转向阻力矩受转向轴负载、轮胎结构、胎体材料特性、轮胎气压、轮胎下沉量、使用情况、风载阻力、惯性阻力等多种因素影响,精确计算阻力矩有困难。研究表明,在原地转向(停止状态下偏转车轮)时的转向阻力最大,一般是运行时阻力的 2~3 倍,可选择运行驱动辅助转向、顶升辅助转向或回转平台辅助转向等多种方式来减少所需的转向阻力。

在沥青或是混凝土路面上的原地转向单轴阻力

$$\text{矩 } T_r = \frac{f_t}{3} \cdot \sqrt{\frac{G_t^3}{P_t}} \text{ 行走时的转向单轴阻力矩 } T_{rx} =$$

$$\frac{T_r}{2.5} \text{。式中, } T_r \text{ 为原地转向单轴阻力矩, kN} \cdot \text{m; } f_t \text{ 为轮胎和地面的滑动摩擦系数,一般取 } f_t = 0.7; G_t$$

为转向轴竖直压力 kN;  $P_t$  为轮胎气压 MPa。

### 4 回转支承的计算选择

可根据回转支承产品样本所提供的信息,利用静承载能力曲线图(一般产品样本中每一型号回转支承都对应一个承载能力曲线图,曲线图可帮助用户初步地选择回转支承),按回转支承选型计算方法初步选择回转支承。

不计风力,考虑 125% 试验负荷的回转支承静态参照载荷为:

$$F'_a = 1.25 \times F_s \times F_a$$

$$M' = 1.25 \times F_s \times F_a \times L_{\max}$$

上述二式中,  $F'_a$  为回转支承静态参照总垂直力, kN;  $M'$  为回转支承静态参照总倾覆力矩, kNm;  $F_s$  为回转支承的安全系数, 根据应用场合不同而不同, 这里取  $F_s = 1.25$ ;  $F_a$  为回转支承总垂直力, kN;  $L_{\max}$  为回转支承最大倾覆力臂长度, m。

连接螺栓的计算载荷为:

$$\text{螺栓总拉力: } F_{\text{螺栓}} = 1.25 \times F_a$$

$$\text{螺栓总力矩: } M_{\text{螺栓}} = 1.25 \times F_a \times L_{\max}$$

按上述计算结果, 查找回转支承样本, 在承载能力曲线中选择合适的型号。

## 5 转向液压缸计算

### 5.1 转向液压缸长度计算

增大回转半径, 能增大力臂、减小油缸拉力, 但油缸行程也要增大, 结构不紧凑。反之, 减小回转半径, 会使力臂变小, 油缸行程也小, 结构紧凑, 但油缸拉力会增大。因此需要合理确定回转半径和最大转角, 以能满足原地回转需要的  $\theta_1$  为最大转角较为合理。

先确定初始状态时油缸后支点  $b$  的位置: 以回转立柱中心为原点  $o$ , 直行时为初始状态, 回转半径为  $oc$ , 油缸长度为  $bc$ , 回转臂初始偏角为  $\alpha$ , 油缸前支点为  $c$ , 行程设为  $l_x$ , 油缸最小长度为  $l_x + l_A$  (如图 5 所示), 此时  $oc$  与  $bc$  垂直, 油缸伸长量为行程的  $1/2$ 。

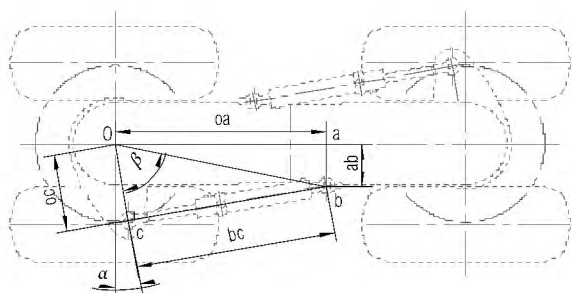


图 5 转向初始位置

确定转向时油缸长度与转角  $\theta$  的关系:  $R(\theta)$  为油缸长度,  $\theta$  为车轮转角 (如图 6 所示), 根据余弦定理可得油缸长度与转向角度的函数关系, 再找出力臂长度与转向角度的函数关系, 采用 MathCAD 软件可方便地画出油缸长度  $R(\theta)$  及力臂长度  $od(\theta)$  在  $[-\theta_1, \theta_1]$  区间的曲线<sup>[2]</sup>, 如图 7 所示。

由此可知, 所需油缸长度在  $\theta_1$  时最大, 在  $-\theta_1$  时最小。油缸所需最大长度为  $R(\theta_1)$ , 油缸所需最小长度为  $R(-\theta_1)$ 。如果满足  $R(\theta_1) \leq 2l_x + l_A$  并且

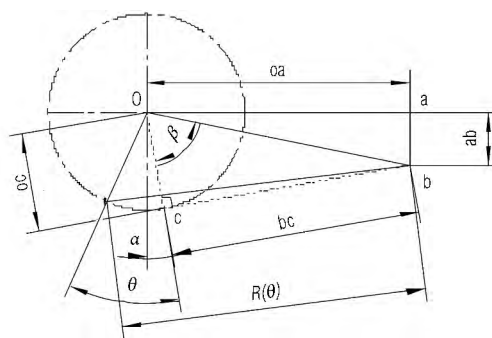


图 6 转向位置

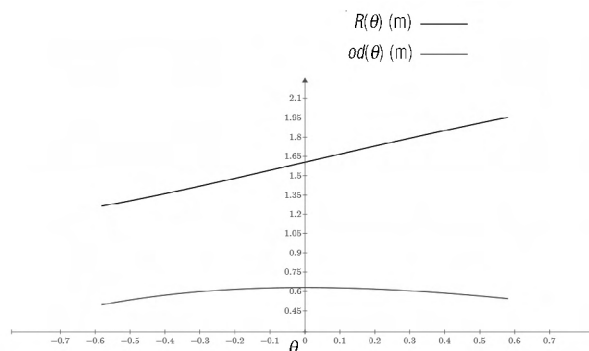


图 7  $R(\theta)$  及  $od(\theta)$  在  $[-\theta_1, \theta_1]$  区间的曲线

$R(-\theta_1) \geq l_x + l_A$ , 则液压缸行程满足要求。反之, 需要重新选择油缸行程后再计算。

### 5.2 转向液压缸计算

液压缸所需最小拉力:  $f_g = \frac{T_g}{od_{\min}}$ , 式中  $od_{\min}$  为回

转液压缸最小力臂长度, m。

### 5.3 转向液压缸直径初步计算

液压缸内径  $D_g = \sqrt{\frac{4f_g}{\pi p} + d^2}$ , 式中  $D_g$  为液压缸

内径, m;  $f_g$  为液压缸所需最小拉力, kN;  $d$  为液压缸活塞杆直径, m;  $p$  为液压供油压力, MPa。

## 6 转向机构电液控制设计

起重机全车前后左右分成 8 组转向机构, 每组由 1 个编码器、1 个液压缸、1 个回转支承组成。当摇杆遥控器发出转向信号时, 在电气控制下油缸推动立柱带动轮胎按设计比例转动角度, 实现整车的转向功能。

转向机构液压回路为开式回路, 由 1 台负载敏感泵供油, 控制 8 个转向液压缸的伸出和缩回, 从而实现直行、斜行、阿克曼转向等不同的转向模式。选用负载敏感泵能有效提高系统的工作效率, 减少系统的发热量, 有利于延长系统元件的使用寿命。

在起重机转向时, 由于轮胎受挤压可能导致轮

胎偏离预定转向角度,因此采用比例多路阀控制转向液压缸的转向角度,用电液比例阀控制转向,编码器对转角做精确测量,通过指令与反馈角度的比较,

形成电液比例控制系统,使控制精度高,系统转向顺畅。

转向机构液压原理图如图 8 所示。

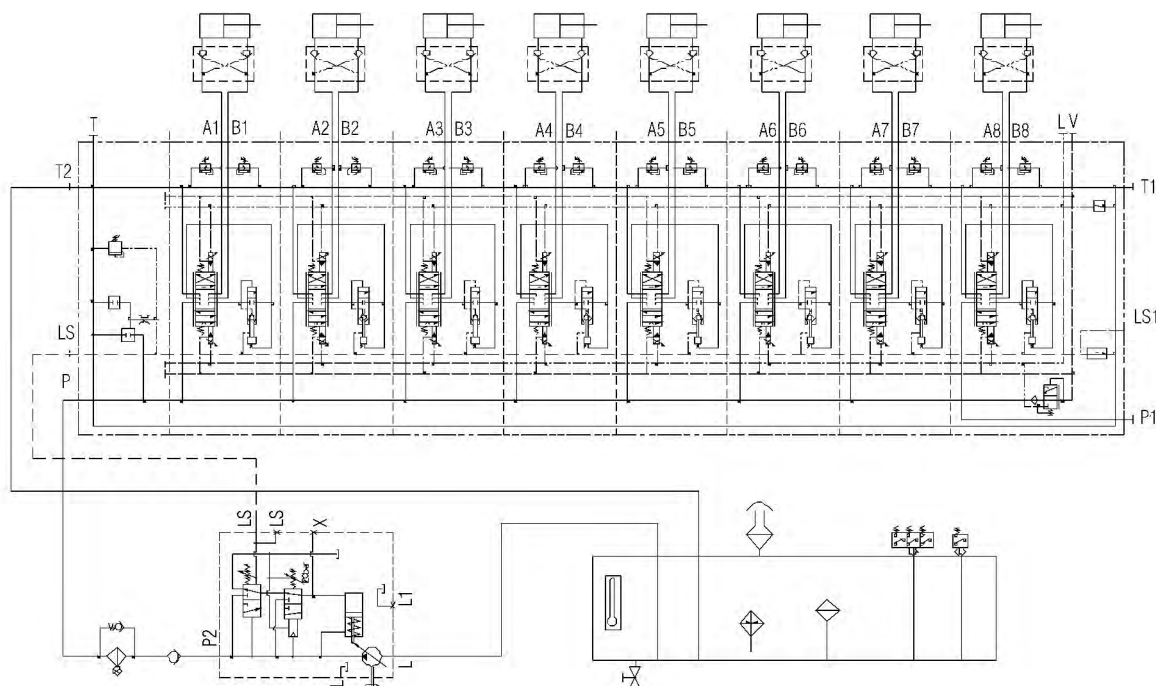


图 8 转向机构液压原理图

## 7 结语

在轮胎式起重机液压驱动转向机构的设计计算中,推导演化出通用公式,再运用数学 CAD 软件 MathCAD 编写出通用设计计算书模板,可实现自动计算、实时更新<sup>[3]</sup>,在几分钟内便可完成整套计算说明书的编制<sup>[4]</sup>。

### 参考文献

- [1] 曾锦锋,陈晨,杨蒙爱.基于阿克曼转向原理的四轮转向机构设计[J].轻工机械.2013,31(3):13-16.

- [2] 郑桂水等. Mathcad 2000 实用教程[S]. 北京:国防工业出版社,2000.5-48.  
[3] 张鑫,吴海召,刘新生等.基于 MathCAD 的船用起重机吊钩不水平位移计算[J].港口装卸 2013(05):5-6.  
[4] 孟文生,张鑫,陈俊辉等.基于门式起重机标准化图库的参数化设计研究[J].港口装卸 2012.(02):5-6.

张鑫:453400,河南省长垣县

收稿日期:2015-10-20

DOI: 10.3963/j.issn.1000-8969.2016.01.004

## 征稿启事

### 1 2016 年主要栏目

港口机械:港口机械设计与制造;港口装备制造集成制造。

自动化与信息化:港口机械自动化与信息化;港口物流工程自动化与信息化;港口管理信息化。

装卸工艺:港口装卸工艺与技术。

港口管理:港口设备管理;港口生产运作管理;

港口安全管理;港口服务管理;港口人力资源管理。

物流管理:港口物流与供应链管理;内陆港建

设与管理;港口物流金融;多式联运;临港自贸区、保税物流园区和工业区的建设与管理。

### 2 投稿须知

(1) 文稿应结合技术前沿和现实需要,要求主题明确、资料准确,具有一定的学术交流价值。

(2) 文稿文责自负,勿一稿多投,确保署名无争议。编辑部有权对文稿作必要的删改。

(3) 专用投稿邮箱: gkzxzss@126.com

(4) 稿件初审期为 15 天。