

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.014

门座式起重机多种控制策略能耗研究

原永亮^{1,2}, 沈仟龙², 李波¹, 赵武²

(1. 豫飞重工集团有限公司, 河南 新乡 453731; 2. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要:为降低门座式起重机运行过程中的能耗, 提出不同的起重机控制策略并进行能耗对比。通过建立门座式起重机构数学模型, 得到起重机各机构的质心、速度以及角速度表达式。建立不同控制策略下起重机的能耗表达式, 代入实际案例中得出具体值进行对比能耗大小, 选出最优控制策略。结果表明: 先进行变幅收缩运动再进行旋转运动的控制策略, 门座式起重机回收货物消耗的能量最少; 同时验证了变幅速度和旋转速度对起重机运行中的能耗起着不同程度的影响。

关键词:门座式起重机; 控制策略; 能耗

中图分类号:TH213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)01-0063-04

Research on Energy Consumption of Gantry Crane with Different Control Strategies

YUAN Yongliang^{1,2}, SHEN Qianlong², LI Bo¹, ZHAO Wu²

(1. Yufei Heavy Industry Group Co., Ltd., Xinxiang 453731, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Different crane control strategies are proposed for energy consumption comparison so as to reduce the energy consumption during the operation of gantry crane. The mathematical model of the gantry crane mechanism is constructed to obtain the centroid, velocity and angular velocity expressions of each mechanism of the crane. The energy consumption expressions of the crane under different strategies are established, and the specific values are obtained by substituting the actual cases to compare the energy consumption and the optimal control strategy. The results indicate performing variable amplitude contraction motion first and rotating motion afterwards will bring about the least energy consumption of gantry crane in retrieving goods, and it is also verified that the variable amplitude speed and rotation speed have varying degrees of impact on the energy consumption during the operation of the crane.

Keywords: gantry crane; control strategy; energy consumption

0 引言

门座式起重机是一种港口、码头和造船厂常见的起重机械, 有起升、回转、变幅和运行机构。前 3 种机构分别装在转动部分上, 每一周期内都参加作业。门座式起重机通过在轨道上运行、回转机构的旋转和臂架系统的变幅来调整其工作位置, 具有作业灵活便捷、装卸货物适应性强、使用安全可靠等显著优点。近些年来, 国内外学者对门座式起重机进行了大量研究。高顺德等^[1]通过建立四连杆臂架系统的优化设计数学模型并进行优化, 得到更优的变幅机构尺寸, 降低了变幅机构的驱动功率同时提高了机构的操作性能。杨志

远^[2]考虑了系统性能以及结构之间运动的耦合关系, 通过建立多刚体系统的动力学模型, 提出一种消除残余摆动轨迹规划的理论。FAN 等^[3]通过分析吊臂提升系统的力学动力学, 建立吊臂系统的柔性动力学模型, 得到了起重机起重系统优化控制策略。

本文以门座式起重机为研究对象, 对比几种不同门座式起重机控制策略的能耗, 旨在选出能耗最小的控制策略。通过建立门座式起重机的数学模型, 计算出不同机构和整机工作过程中的能效值, 并以检测报告的形式对门座式起重机各部分能耗值及能效高低进行评判^[4]。

基金项目:河南省自然科学基金项目(222300420168); 河南省高校基础研究基金项目(NSFRF220415); 河南理工大学博士基金项目(B2021-31)

第一作者简介:原永亮(1989—), 男, 河南新乡人, 讲师, 博士后, 研究方向为多学科协同优化设计、群智能优化算法, yuanyongliang@hpu.edu.cn。

1 模型构建

对门座式起重机臂架系统各构件的尺寸进行设计后,可以实现门座式起重机臂架系统的吊重点沿着水平线的轨迹移动,根据门座式起重机机械结构简图建立的几何模型如图 1 所示。图中 $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ 分别为变幅机构最大、最小的变幅值。几何模型对门座式起重机的司机室、行走机构、平衡系统及楼梯等不影响运动的结构进行简化。图中 A 点为臂架下铰点, B 点为大拉杆下铰点。

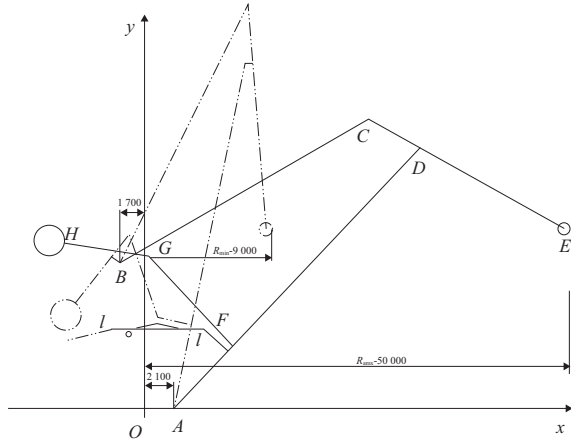


图 1 门座式起重机机构运动简图

1.1 变幅机构模型构建

臂架系统是由各个构件组合而成的,主要由臂架、大拉杆和象鼻梁 3 大部分组成,连同机架一起构成平面四连杆机构形式。门座式起重机臂架系统在运行时共有 3 个主要角度,分别为臂架俯仰角度 θ_1 、大拉杆倾斜角度 θ_2 、象鼻梁倾斜角 θ_3 , 分别可以代表臂架、大拉杆和象鼻梁的空间角位移。根据空间上的几何关系,可列出臂架系统的几何参数方程如下:

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_1 + l_4 \cos \theta_4 = l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_4 \sin \theta_4 = l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: l_1 为臂架上下两铰点距离 (AD); l_2 为大拉杆上下两铰点距离 (BC); l_3 为臂架和大拉杆下铰点距离 (AB); l_4 为臂架和大拉杆上铰点距离 (DC); θ_4 为 l_4 与水平面夹角。

由此方程组可求得门座式起重机机构质心位置表达式。

$$\begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_1 \cos \theta_1 + 2x_A)/2 \\ (l_1 \sin \theta_1 + 2y_A)/2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_{c2} \\ y_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_2 \cos \theta_2 + 2x_B)/2 \\ (l_2 \sin \theta_2 + 2y_B)/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_{cs} \\ y_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_5 \cos \theta_5 / 2 + l_2 \cos \theta_2 + x_B \\ -l_5 \sin \theta_5 / 2 + l_2 \sin \theta_2 + y_B \end{bmatrix} \quad (4)$$

对上式进行时间求导,可以得到机构质心的速度表达式。将式(1)对时间变量求导,可得机构的角速度表达式。

1.2 变幅机构和旋转机构协同运动模型构建

门座式起重机协同运动时,各杆的运动为空间运动,因此建立空间坐标系,以门座式起重机旋转轴为 y 轴,以起吊货物方向为 x 轴,以行走方向为 z 轴,重新确立各杆质心位置关系^[5-7]。设做旋转运动时,旋转运动的角速度为 ω_r ,旋转过的角度为 α 。空间坐标系如图 2 所示。

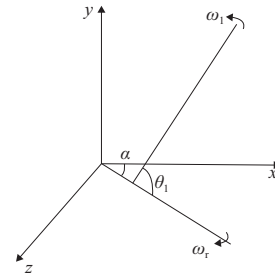


图 2 协同运动空间坐标系

假定臂架系统 6 个杆件均为均质杆,各杆分别可以设为 l_{si} ($i=1 \sim 10, i \neq u, u=3, 4, 6, 8$)。将各杆质心坐标系用空间坐标系的方式表示,表达式为

$$\begin{bmatrix} x_{si} \\ y_{si} \\ z_{si} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ci} \cos \alpha \\ y_{ci} \\ x_{ci} \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

对式(5)进行时间求导,能得到各杆空间坐标系上的质心速度表达式。

2 门座式起重机能耗计算

2.1 做变幅运动时的能耗计算

设门座式起重机变幅运动中各杆的质心速度为 v_{ci} ($i=1 \sim 9, i \neq u, u=3, 4, 6, 8$), 转动惯量为 J_i ($i=1 \sim 10, i \neq u, u=3, 4, 6, 8$), 坐标原点为势能面位置,忽略其他影响因素,则港口门座式起重机变幅运动的总动能 E_1 与总势能 W_1 分别为:

$$E_1 = \sum_{i=1, i \neq u}^9 E_{li} + E_{lk} + E_{l10} \quad (6)$$

$$W_1 = \sum_{i=1, i \neq u}^9 m_i g (y_i - y_{i,init}) + W_{lk} \quad (7)$$

式中:

$$E_{li} = \frac{1}{2}(m_i v_{ci}^2 + J_i \omega_i^2) \quad (8)$$

$$E_{IK} = \frac{1}{2}(m_K v_{cK}^2 + J_{IK} \omega_{IK}^2) \quad (9)$$

$$E_{l10} = \frac{1}{2} m_{10} v_{c10}^2 \quad (10)$$

$$\text{式中 } W_{IK} = m_K g(y_K - y_{K,init}) \quad (11)$$

2.2 做旋转运动时的能耗计算

设门座式起重机旋转运动中各杆的转动惯量为 J_{ri} ($i=1\sim 10, i \neq u, u=3, 4, 6, 8$), 港口门座式起重机旋转运动的总动能 E_r 为

$$E_r = \sum_{i=1, i \neq u}^{10} E_{ri} + E_{rK} + E_{ro} \quad (12)$$

式中:

$$E_{ri} = \frac{1}{2}(J_{ri} + m_i d_i^2) \omega_r^2 \quad (13)$$

$$E_{rK} = \frac{1}{2}(J_{rK} + m_K d_{rK}^2) \omega_r^2 \quad (14)$$

$$E_{ro} = \frac{1}{2} J_{ro} \omega_r^2 \quad (15)$$

式中: $J_{ro} = J_{11} + J_{12} + J_{13}$, J_{11} 为上转柱的转动惯量; J_{12} 为转盘平衡部分的转动惯量; J_{13} 为转盘结构的转动惯量。

2.3 变幅旋转协同运动时的能耗计算

设门座式起重机变幅运动中各杆的质心速度为 v_{si} ($i=1\sim 9, i \neq u, u=3, 4, 6, 8$), 港口门座式起重机变幅运动的总动能 E_s 与总势能 W_s 分别为:

$$E_s = \sum_{i=1, i \neq u}^9 E_{si} + E_{sK} + E_{s10} + E_{ro} \quad (16)$$

$$W_s = W_1 \quad (17)$$

式中:

$$E_{si} = \frac{1}{2} m_i v_{si}^2 + \frac{1}{2} J_i \omega_i^2 + \frac{1}{2} J_{ri} \omega_r^2 \quad (18)$$

$$E_{sK} = \frac{1}{2}(m_i v_{sK}^2 + J_{IK} \omega_{IK}^2 + J_{rK} \omega_r^2) \quad (19)$$

$$E_{s10} = \frac{1}{2} J_{r10} \omega_r^2 + \frac{1}{2} m_{10} v_{s10}^2 \quad (20)$$

3 基于不同控制策略的模型求解研究

本文以河南某公司的门座起重机为例, 已知 2530 门座起重机的技术参数为 $R_{\max} = 30 \text{ m}$, $R_{\min} = 9 \text{ m}$, 变幅工作速度 40 m/min , 旋转工作速度 1.5 r/min 。其他原始参数如下: 臂架下铰点 A 距离回转中心 2.1 m , 大拉杆下铰点 B 距离回转中心 1.7 m , 大拉杆下铰点 B 至臂架下铰点 A 的垂直距

离为 10.1 m , 水平距离 3.8 m , 象鼻梁与臂架和大拉杆铰接点所成角度 $\angle DCE = 7^\circ$ 。

本文基于门座式起重机回收货物过程提出 3 种控制策略, 分别为: 方案 1, 先进行变幅收缩运动再进行旋转运动; 方案 2, 先进行旋转运动再进行变幅收缩运动; 方案 3, 变幅收缩和旋转运动协同进行。

变幅机构在搬运货物过程中, 变幅运动对应齿条的运动过程为启动加速阶段、匀速阶段、制动减速阶段。模拟起重机搬运货物时启动、匀速运动和制动的 3 个过程。启制动齿条的运动设为匀加速运动, 启制动时间均为 0.47 s , 匀速运动时间 0.31 s 。旋转机构旋转 90° , 旋转机构的运动也设为匀加速运动, 启制动时间均为 3.34 s , 匀速运动时间 6.66 s 。变幅机构和旋转机构均以最大速度进行匀速运动。其余各构件的速度如图 3 所示。

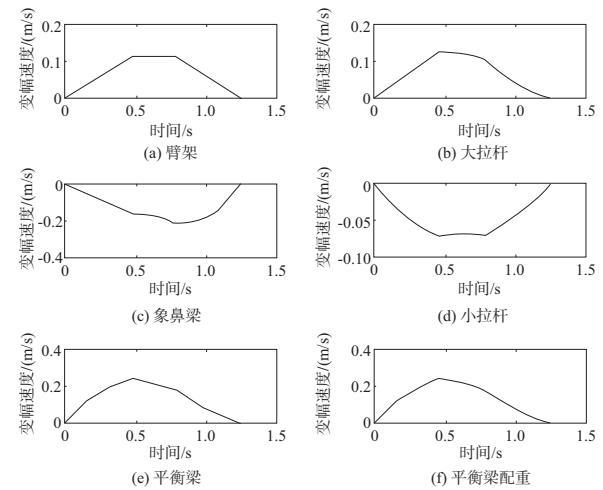


图 3 变幅机构各构件变幅速度

经过计算, 3 种控制策略分别表示为 $W1$ 、 $W2$ 、 $W3$, 最终能耗如表 1 所示。

表 1 控制策略能耗表

控制策略	W1	W2	W3
能耗/(kJ)	979.61	988.58	984.54

方案 1 (先进行变幅收缩运动再进行旋转运动) 中能耗分布情况如图 4 所示, 其中旋转运动势能占比最多, 约为 72.07% , 旋转运动占比次之, 约为 27.4% , 变幅运动最少, 约为 0.53% 。

方案 1 中, 变幅运动和旋转运动动能的大小差距较为明显, 其中变幅运动动能占总消耗比较大, 因此进行优化设计时, 变幅运动速度的权重应

比旋转运动的权重更大。其中变幅运动动能和旋转运动动能如表 2 所示。

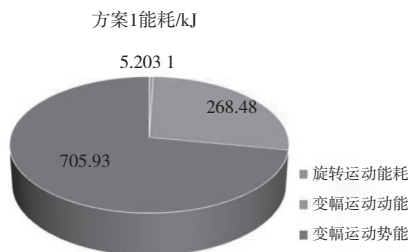


图4 方案1中能耗占比

表2 时间动能关系表

变幅运动动能		旋转运动动能	
时间/s	能耗/kJ	时间/s	能耗/kJ
0.16	23.29	1.67	0.65
0.31	75.02	3.33	2.60
0.47	134.24	5.00	2.60
0.62	154.88	6.67	2.60
0.78	161.22	8.33	2.60
0.93	199.84	10.00	2.60
1.09	236.34	11.67	4.55
1.25	268.48	13.33	5.20

在门座式起重机搬运货物时,将变幅机构拉伸至不同的变幅角度进行货物的搬运,变幅机构角度的变化表现为货物与回转中心距离的变化。门座式起重机搬运货物时,货物与回转中心的距离和能耗的关系如图 5 所示。其中货物与回转中心距离和能耗呈现正相关,随着货物与回转中心距离增加,能耗增加,但超过 26 m 后,由于自身配重的影响,能耗增加幅度变小甚至能耗降低。

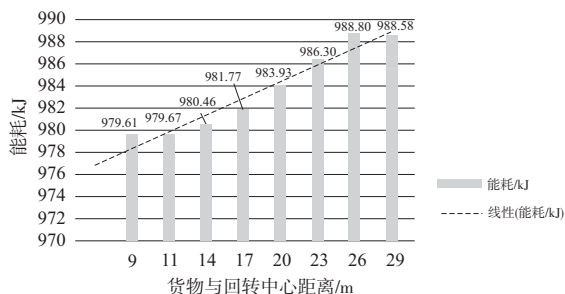


图5 货物与回转中心距离和能耗的关系图

4 结语

在门座式起重机回收货物的运动过程中,方案 1 即先进行变幅收缩运动再进行旋转运动所消耗的能量最少,比先进行旋转运动再进行变幅收缩运动节约了 0.96% 的能量。在方案 1 中,重力势能消耗的能量占比最大,因此门座式起重机应当加强重力势能的回收利用。研究过程中发现:相较于旋转运动速度,变幅运动速度对门座式起重机能耗影响较大,因此在进一步的优化过程中应当对门座式起重机的变幅速度进行优化,以达到减少能耗的目的。

经过数据对比后发现,在不同的运动过程中,先进行变幅运动使货物靠近回转中心处于收缩状态相较于货物远离回转中心能耗更低。此操作(搬运货物时先进行变幅运动再进行旋转运动)可以在复杂操作环境中避免障碍物的干扰,同时可以在起重机控制技术中作为冗余系统中的控制策略,增加自动化起重机控制技术的可靠性。

参考文献:

- [1] 高顺德,王景波.四连杆式门座起重机臂架及平衡系统优化设计[C]//第五届中国 CAE 工程分析技术年会论文集.兰州,2009:341-351.
- [2] 杨致远.门式起重机系统防摇技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [3] FAN S L,SHU Y F,ZHANG H Y,et al.Kinetic analysis of four-link gantry crane hoisting system[J].MATEC Web of Conferences,2016,63:02028.
- [4] 张诚龙,万梓清.门座式起重机吊具旋转机构变频调速改造[J].港口科技,2022(4):31-36.
- [5] 尤祺,柳林燕,汪惠芬.均衡作业下的散货港口卸船设备协同调度研究[J].机械制造与自动化,2023,52(1):11-15.
- [6] 李立涛,秦立成,李新超,等.半潜式起重铺管船起重吊钩起升速度参数优化研究[J].石油和化工设备,2018,21(6):12-16.
- [7] 钱森,晔斌.多起重机协作吊装避障路径规划研究[J].机械设计与制造,2015(10):260-263.

收稿日期:2023-03-21