

# 多节伸缩装车机相关计算理论研究

曹冲振<sup>1</sup>, 曹美慧<sup>1</sup>, 徐杰<sup>2</sup>, 李赫<sup>1</sup>, 王晶蕊<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学, 山东 青岛, 266590; 2. 中远海运物流仓储配送有限公司, 山东 青岛, 266111)

**摘要:** **目的** 对多节伸缩装车机的输送运动和伸缩运动进行相关计算理论的研究, 方便进行关键部件的选型, 保证选型的正确性。**方法** 以伸缩装车机的结构为基础, 结合现有的相关研究理论, 分析多节伸缩装车机输送带驱动辊筒圆周力的组成部分, 得出输送带驱动辊筒圆周力的计算方法; 以机架伸缩运动原理为基础, 对伸缩装车机各级伸缩部分进行受力分析, 得出伸缩驱动力的计算方法; 以某伸缩装车机产品为例, 结合 SolidWorks motion 模块仿真结果, 对计算方法进行验证。**结果** 验证结果表明, 通过输送带驱动辊筒圆周力和伸缩驱动力计算所得的驱动电机功率与产品一致。**结论** 伸缩装车机输送运动和伸缩运动相关参数计算方法可行, 结果正确, 在伸缩装车机的研究中有一定的参考价值。

**关键词:** 伸缩装车机; 主运动; 伸缩运动; 静力学分析; 结果验证

中图分类号: TB486; TH136 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)17-0182-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.17.026

## Related Calculation Theory of Multi-section Telescopic Loader

CAO Chong-zhen<sup>1</sup>, CAO Mei-hui<sup>1</sup>, XU Jie<sup>2</sup>, LI He<sup>1</sup>, WANG Jing-rui<sup>1</sup>

(1. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. COSCO SHIPPING Logistics Warehousing & Distribution Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the relevant calculation theory of conveying motion and telescopic motion of multi-section telescopic loader to facilitate the selection of key components and ensure the correctness of the selection. Based on the structure of telescopic loader and combined with the relevant existing research theories, the components of the circumferential force of conveyor belt driving drum of multi-segment telescopic loader were analyzed, and the calculation method of the circumferential force of conveyor belt driving drum was obtained. Based on the principle of telescopic motion of frame, the force analysis of telescopic parts of telescopic loader at all levels was carried out, and the calculation method of telescopic driving force was obtained. Taking the product of a telescopic loader as an example and combined with the simulation results of SolidWorks motion module, the calculation method was verified. The results showed that, the power of the driving motor calculated by the circumferential force and the telescopic driving force of the conveyor belt driving drum was the same as that of the product. The calculation method of parameters related to conveying motion and telescopic motion of telescopic loader is feasible and the results are correct. It has certain reference value in the research of telescopic loader.

**KEY WORDS:** telescopic loader; main motion; telescopic motion; static analysis; result verification

装卸搬运是生产的重要流程之一<sup>[1]</sup>。随着生产要求的不断提高, 人力往返车厢与库房的传统装卸方式

装卸效率低、劳动量大、人工成本高的问题日益凸显, 为了解决这些问题, 伸缩装车机应运而生。

收稿日期: 2019-02-22

作者简介: 曹冲振(1975—), 男, 博士, 山东科技大学副教授、硕导, 主要研究方向为物流技术装备、移动机器人技术。

通信作者: 徐杰(1994—), 男, 硕士, 助理工程师。主要研究方向为物流装备及其自动化, 物流仓储规划等。

与矿用伸缩皮带机类似，伸缩装车机是典型的机电一体化产品。目前国内外学者针对伸缩装车机的研究主要集中在伸缩装车机结构优化、降低纵向振动的方法以及传感器的应用创新等方面，在伸缩装车机相关计算理论方面研究较少。为了方便进行电机选型等工作，要对其主运动即输送带运动与机架伸缩运动进行分析计算。在参考文献[2]中，介绍了一种矿用伸缩皮带机相关参数的计算方法，但伸缩装车机与矿用伸缩皮带机相比，在整机结构、输送物料类型、工作环境等方面均与伸缩皮带机有较大的差异，因此不能一味沿用其计算方法。

文中以三节伸缩装车机的结构为基础，结合现有矿用伸缩皮带机的计算理论，详细研究伸缩装车机主运动与伸缩运动的原理；通过静力学分析，研究输送带驱动辊筒圆周力以及伸缩驱动力的计算方法；最后以某伸缩装车机产品为例，对计算方法进行分析验证。

## 1 三节伸缩装车机介绍

伸缩装车机可分为固定部分、一级伸缩部分和二级伸缩部分<sup>[3]</sup>。其中固定部分安装在地面上，一级、二级伸缩部分与固定部分逐级嵌套，能够实现伸缩部分相对于固定部分的伸缩运动。三节伸缩装车机的结构见图 1。

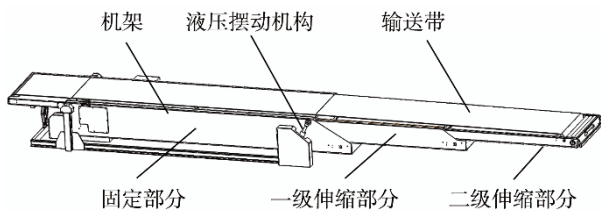


图 1 伸缩装车机结构  
Fig.1 Structure of telescopic loader

装车机主要由机架、输送带以及安装在内部的驱动等部分构成<sup>[4]</sup>。其中，机架是伸缩装车机的支撑结构；输送带作为输送结构，缠绕过整个输送机，输送带下装有支撑板承载货物的重量<sup>[5]</sup>；固定部分前端设有液压摆动机构，能够控制伸缩装车机首端上下摆动，改变输送角度，满足不同场景的装卸要求；内置 2 个驱动分别控制输送带和伸缩机架运动，能够同时实现输送与机架伸缩。

## 2 伸缩装车机主运动与伸缩运动分析

### 2.1 主运动分析

主运动原理见图 2。输送带绕过改向辊筒缠绕在

装车机上，输送带驱动采用挠性摩擦原理<sup>[6]</sup>，即利用驱动辊筒与输送带之间的摩擦力驱动输送带运动；采用后置单辊筒驱动，减少了驱动数目，有效降低了控制和维护难度。

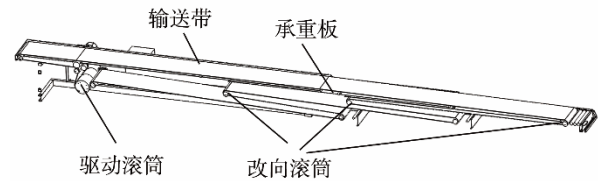


图 2 主运动原理  
Fig.2 Principle of principal motion

驱动辊筒圆周力是驱动输送带的力，也是主运动分析的核心部分。结合现有的带式输送机研究成果，可将伸缩装车机驱动辊筒圆周力分为托辊运行阻力  $F_H$ 、滑动摩擦阻力  $F_S$ 、提升阻力  $F_{St}$  等 3 个部分<sup>[7-8]</sup>。

#### 2.1.1 托辊运行阻力 $F_H$

输送机的托辊运行阻力是改向辊筒旋转所产生阻力的总和：

$$F_H = f[\sum m_{ti} + (2.5q_B + q_m)L]g \quad (1)$$

式中： $f$  为托辊转动摩擦因数，根据工作条件及制造安装水平决定，一般取  $f=0.02$ ； $m_{ti}$  为单根托辊的质量 (kg)； $L$  为头尾辊筒中心距 (m)，近似视为输送机长度； $g$  为重力加速度 ( $m/s^2$ )； $q_B$  为每米长度输送带质量 (kg/m)； $q_m$  为线载重 (kg/m)。

#### 2.1.2 滑动摩擦阻力 $F_S$

在伸缩装车机中，输送带下方设有支承板承担货物以及皮带自身重量，因此输送带与支承板之间的滑动摩擦阻力是输送过程中的主要阻力，其大小为：

$$F_S = \mu_1(q_m + q_B)Lg \quad (2)$$

式中： $\mu_1$  为输送带与支承板之间的摩擦因数。

#### 2.1.3 倾斜提升阻力 $F_{St}$

伸缩装车机可以在液压摆动机构的作用下进行一定角度的提升运输，用  $F_{St}$  表示在倾斜输送过程中，物料上运高度  $\Delta H$  时要克服的重力。其计算式为：

$$F_{St} = q_m \cdot g \cdot \Delta H \quad (3)$$

驱动辊筒圆周力  $F_t$  可按式 (4) 进行计算：

$$F_t = F_H + F_S + F_{St} \quad (4)$$

## 2.2 伸缩运动分析

机架伸缩的动力来自单驱动链条伸缩机构<sup>[9]</sup>，原理见图 3。固定部分的中部和伸缩部分的尾部装有链条卡扣，卡紧链条；伸缩驱动通过链条带动一级伸缩部分运动；与此同时，安装在一级伸缩部分上的驱动链条在链条卡扣的作用下相对一级伸缩部分转动，带动二级伸缩部分运动<sup>[10]</sup>。伸缩部分末端的行走轮可在导轨上行走，固定部分与一级伸缩部分头部装有支撑

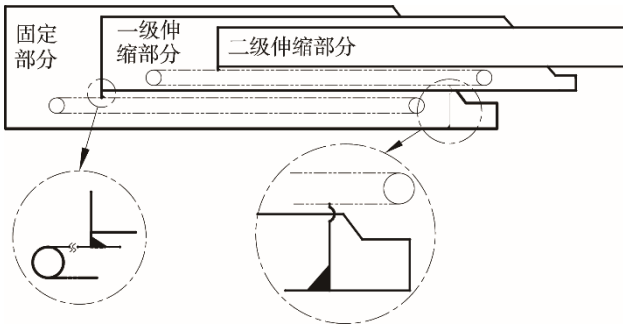


图3 伸缩运动原理

Fig.3 Principle of telescopic motion

装置，在伸缩过程中支撑机架。

从伸缩运动的原理可以看出，伸缩驱动力的作用是克服伸缩过程中的摩擦力做功，使得机架能够伸出和收回。要准确计算伸缩驱动力，要在伸缩过程中对机架的受力进行分析。由于固定部分和一级伸缩部分的受力较为复杂，为了计算更加简便精确，从受力较为简单的二级伸缩部分开始，逐级分析<sup>[11-12]</sup>。

为了表现更加直观，在原理简图的基础上对二级伸缩部分进行分析，见图4。在受力分析中， $m_0, m_1, m_2$  分别表示固定部分和一、二级伸缩部分的质量。由伸缩原理可知<sup>[7]</sup>，一、二级伸缩部分相对固定部分的伸缩速度分别为  $v$  和  $2v$ 。

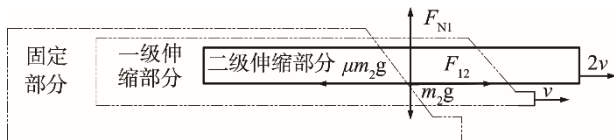


图4 二级伸缩部分受力情况

Fig.4 Force condition of secondary telescopic part

由图4可知，二级伸缩部分受力有：自身重力  $m_2g$ ，一级伸缩部分提供的二驱动力  $F_{12}$ 、支撑力  $F_{N1}$  以及摩擦力  $\mu m_2g$ 。根据牛顿第二定律： $F_{12} - \mu m_2g = m_2a$ 。其中， $\mu$  为滑轮与导轨之间的摩擦因数，此处取  $\mu=0.15$ 。

同理，一级伸缩部分受力分析见图5。与二级伸缩部分不同，一级伸缩部分在运动过程中除了受到固定部分施加的推力  $F_{01}$  外，还受到二级伸缩部分运动施加的惯性力： $F_{12}=m_2a$ 。

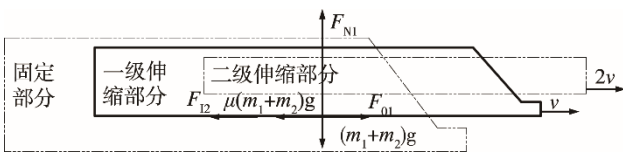


图5 一级伸缩部分受力情况

Fig.5 Force condition of primary telescopic part

故有：

$$F_{01} - \mu(m_1g + m_2g) - m_2a = m_1a \quad (5)$$

$F_{01}$  即伸缩运动驱动力。

### 3 计算理论的验证分析

为了验证上述计算理论的正确性，以某伸缩装车机产品为例，按照上述方法分别计算该伸缩装车机的主运动和伸缩运动驱动力，并进行验证。该伸缩装车机的主要参数为：改向辊筒旋转部分质量  $m_{ii}=7.39$  kg，输送速度  $v_1=0.6$  m/s，伸缩速度  $v_2=0.35$  m/s，伸缩加速度  $a=0.35$  m/s<sup>2</sup>，线载重  $q_m=60$  kg/m，输送带线质量  $q_b=2.64$  kg/m，总长度  $L=7000$  mm，最大提升高度  $\Delta H=1.5$  m，主运动驱动电机功率  $P=1.7$  kW。

#### 3.1 伸缩装车机相关参数计算

在主运动分析中，将机器相关参数分别代入式(1—3)，可求得  $F_H=102$  N， $F_S=982$  N， $F_{Si}=735$  N，代入式(4)可得驱动辊筒上所需圆周驱动力  $F_i=F_H+F_S+F_{Si}=1819$  N。

在伸缩运动分析中，将该产品的参数代入式(5)，可以得到  $F_{01}=405$  N。

#### 3.2 计算结果分析验证

##### 3.2.1 主运动结果分析验证

计算得出驱动辊筒圆周力后，可计算得出主运动驱动电机的功率，若计算得出的主运动驱动电机功率与产品实际的伸缩电机功率一致，则可以认为主运动计算理论是合理的。

驱动电机的功率可以通过公式  $P=F_i \cdot v_i / (1000\eta)$  计算。其中  $v_i$  为输送带运行速度， $\eta$  为减速器的机械效率，此处取  $\eta=0.85$ 。将参数代入公式，并考虑15%的备用功率<sup>[13]</sup>，可以计算得出主运动驱动电机功率  $P=1.71$  kW。与伸缩装车机实际功率差距很小，可以认为主运动计算结果正确，方法可行。

##### 3.2.2 伸缩运动分析验证

伸缩运动的验证使用 SolidWorks motion 模块进行。该模块可以对复杂机构进行运动学和动力学仿真分析，得到各构件的运动规律，包括位移、速度、加速度等<sup>[14]</sup>。将仿真得出的加速度与产品加速度进行比较，若误差较小，则可以证明计算的正确，进而可以验证计算理论的正确性。

仿真步骤主要包括：设置重力；设定接触力，即行走轮和导轨之间以及支撑轮和机架之间的接触；设置驱动力，文中即固定部分给一级伸缩部分的推力  $F_{01}$ ；仿真分析<sup>[15]</sup>。

motion 仿真结果见图6，可以看出：在驱动力  $F_{01}$  为405 N时，伸缩装车机伸缩加速度稳定在  $0.36$  m/s<sup>2</sup>，与产品给出的参数的差距较小，故可以认为伸缩运动的计算结果正确，方法可行。

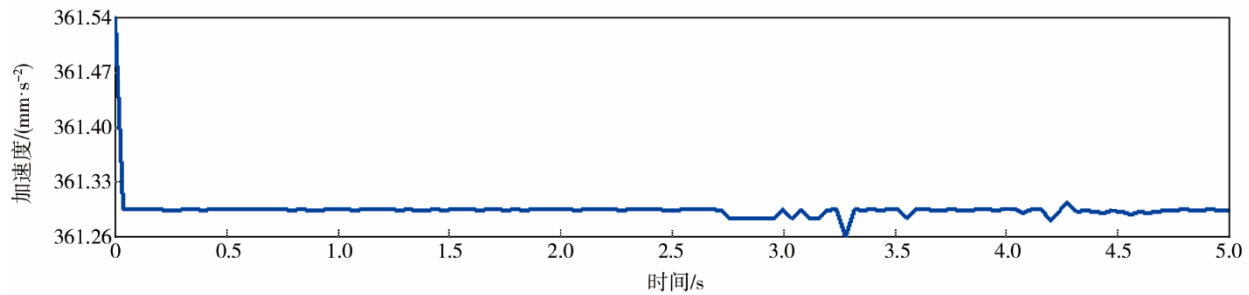


图6 仿真结果  
Fig.6 Simulation result

## 4 结语

为了解决没有适用于伸缩装车机的相关计算方法的问题,结合现有带式输送机的计算理论,以伸缩装车机的结构为基础,得出了伸缩装车机主运动与伸缩运动的计算方法,并以某三节伸缩装车机产品为研究对象,用不同方法验证了计算方法的正确性。该计算方法填补了目前多节伸缩装车机研究的空白,有较强的应用价值和参考意义。

### 参考文献:

- [1] 王保华,刘敬平,卢杉.大功率高速带式输送机发展分析[J].矿山机械,2014,42(1):27—30.  
WANG Bao-hua, LIU Jing-ping, LU Shan. Analysis on Development of Large-power and High-speed Belt Conveyors[J]. Mining & Processing Equipment, 2014, 42(1): 27—30.
- [2] 赵红伟.大型带式输送机胶带动态特性试验研究[J].科技信息,2011,21:549—550.  
ZHAO Hong-wei. Experimental Study on Dynamic Characteristics of Large Belt Conveyor Belt[J]. Science & Technology Information, 2011, 21: 549—550.
- [3] 李有唐,王皓.新型单油缸倍增伸缩输送机的设计[J].机械设计,2014(8):91—94.  
LI You-tang, WANG Hao. Design of a New Single Cylinder Multiplication Telescopic Conveyor[J]. Machine Design, 2014(8): 91—94.
- [4] 岳银鹏,贺宾,欧开良,等.铁路自动收料机的结构设计及计算分析[J].现代制造技术与装备,2017(12):97—99.  
YUE Yin-peng, HE Bin, OU Kai-liang, et al. Structural Design and Calculation Analysis of Railway Automatic Reclaimer[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2017(12): 97—99.
- [5] 冯俊飞.带式输送机与刮板输送机的比较分析[J].现代矿业,2015(12):220—221.  
FENG Jun-fei. Comparative Analysis of Belt Conveyor and Scraper Conveyor[J]. Modern Mining Industry, 2015(12): 220—221.
- [6] 李鑫.带式输送机系统动力学仿真及软件开发[D].太原:太原科技大学,2014.  
LI Xin. Dynamic Simulation and Software Development of Belt Conveyor System[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2014.
- [7] DING H, CHEN L Q. Approximate and Numerical Analysis of Nonlinear Forced Vibration of Axially Moving Viscoelastic Beams[J]. Journal of Acta Mechanica Sinica, 2011, 27(3): 426—437.
- [8] 徐巨林,何海川.关于淮安碱厂压滤皮带机的改造方案[J].盐科学与化工,2018(5):50—54.  
XU Ju-lin, HE Hai-chuan. Revamping Scheme of Pressure Filter Belt Machine in Huai'an Alkali Plant[J]. Salt Science and Chemical Industry, 2018(5): 50—54.
- [9] 牛巍巍.带式输送机的动态分析研究[D].太原:太原科技大学,2010.  
NIU Wei-wei. Study on Dynamic Analysis of Belt Conveyor[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2010.
- [10] 修萌萌.自行式袋装货物自动装卸机工作系统优化设计及研究[D].济南:山东理工大学,2016.  
XIU Meng-meng. Optimum Design and Research on Working System of Self-propelled Bagging Cargo Handler[D]. Jinan: Shandong University of Technology, 2016.
- [11] 苏鹏.带式输送机起制动一体化自动控制系统的研究[D].青岛:山东科技大学,2012.  
SU Peng. Research on Integrated Automatic Control System for Rising and Braking of Belt Conveyor[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2012.
- [12] 李勇.可伸缩带式输送机卷带装置的现状与发展趋势[J].煤炭工程,2013(S1):12—13.  
LI Yong. Current Situation and Development Trend of Belt Winding Device of Scalable Belt Conveyor[J]. Coal Engineering, 2013(S1): 12—13.
- [13] 李玉瑾.带式输送机的动力学设计及理论计算[D].

阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.

LI Yu-jin. Dynamic Design and Theoretical Calculation of Belt Conveyor[D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2013.

- [14] 韩庆红, 张锁怀, 陈香利. 基于 SolidWorks Motion 的灌装机分瓶机构凸轮曲线设计[J]. 包装工程, 2016, 37(5): 110—114.

HAN Qing-hong, ZHANG Suo-huai, CHEN Xiang-li. Design of the Cam Curve for Filling Machine Sub-bottle

Mechanism Based on SolidWorks Motion[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(5): 110—114.

- [15] 张铭, 贺乃宝, 宋伟. 基于 Solid Works Motion 的六自由度平台运动仿真[J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(6): 36—39.

ZHANG Ming, HE Nai-bao, SONG Wei. Motion Simulation of 6-DOF Platform Based on SolidWorks Motion[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(6): 36—39.