

新型单轨悬挂搬运系统设计

阚常凯, 曹冲振, 许彤然, 徐杰
(山东科技大学, 青岛 266590)

摘要: **目的** 满足现代物流仓储搬运的自动化需求与空间利用最大化的要求。**方法** 借助三维软件建立系统模型, 合理设计该系统的布置与基本结构, 包括搬运功能区的布置与流程、总体结构方案的设计、升降机构的设计与牵引车的设计。利用 SolidWorks 软件对新型机构和牵引车的运行速度进行仿真分析。**结果** 新型升降机构升降高度和牵引车的运行速度满足设计要求, 达到了预期的设计目的。**结论** 该系统可以实现快速、高效搬运, 能够满足制造业和配送中心对空间利用率的要求。
关键词: 悬挂搬运; 系统流程; 新型剪叉机构; 仿真分析
中图分类号: TS02 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)05-0034-06

Design of New Mono-rail Suspended Handling System

KAN Chang-kai, CAO Chong-zhen, XU Tong-ran, XU Jie
(Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

ABSTRACT: The work aims to meet the demands of modern logistics warehousing and handling automation and the maximum use of space. With the help of the 3D software, the system model was built, and the arrangement and basic structure of the system were designed reasonably, including the arrangement and flow of handling function areas, and the design of general structure scheme, elevating mechanism and tractor. Finally, the simulation analysis on the running speed of the new mechanism and tractor was conducted with SolidWorks. The results showed that the elevating height of the new elevating mechanism and the running speed of the tractor met the design requirements and reached the anticipated design goals. In conclusion, the system can achieve fast and efficient handling, and can meet the space utilization required by the manufacturing industry and distribution center.

KEY WORDS: suspended handling; system flow; new scissors mechanism; simulation analysis

悬挂搬运是现代化工业搬运装备与技术的主要组成部分^[1]。近年来, 劳动力成本的增加加快了无人搬运系统的发展。悬挂搬运系统具有自由选择搬运线路、有效利用空间、节省人力的优势, 被广泛应用于货物的远距离搬运、楼层提升、空中储存、送料等生产环节。随着物流自动化的快速发展, 智能搬运系统及相关技术的发展不仅得到现代制造业、物流仓储业的高度重视^[2], 也开始应用于农业货物的搬运^[3-4]。2013 年格力电器提出悬挂式无人搬运车概念^[5], 但是并未给出其结构。为了满足现代物流与生产装备自动化的需求与空间的要求, 文中基于新型剪叉机构与

RFID 技术, 设计了一种的新型单轨悬挂搬运系统。

1 系统布置与流程

1.1 悬挂搬运功能区布置

悬挂搬运线的功能是根据搬运需求将货物从上件区运输到存储区, 或者从存储区运输到对应的下件区^[6]。按照功能目的将整个悬挂搬运线划分为 4 个区: 上件区、存储区、下件区、修理区。在上件区, 机械手按照分层将货物装载至悬挂车; 牵引车拖引悬挂车, 将其运输至存储区; 根据调度策略, 牵引车拖引

收稿日期: 2017-01-03

基金项目: 山东省高等学校科技计划(J16LB05)

作者简介: 阚常凯 (1991—), 男, 山东科技大学硕士生, 主攻机器人与物流自动化。

通讯作者: 曹冲振 (1975—), 男, 博士, 山东科技大学副教授, 主要研究方向为工业自动化与机器人技术。

悬挂车运至下件区，卸载货物。修理区主要是对牵引车以及悬挂车进行维修。悬挂搬运线应设计在上件区、下件区的上方，方便机械手取放货物，存储区应设计多组轨道以保证足够的存储空间，悬挂搬运线布局见图 1。

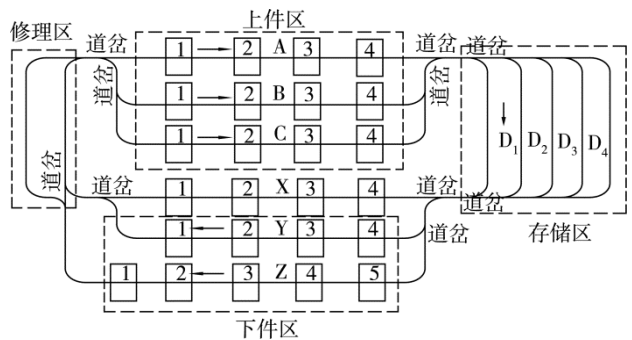


图 1 悬挂搬运线布局
Fig.1 The layout of suspended handling line

1.2 悬挂搬运系统流程

悬挂搬运系统流程为：货物在上位区打包、包装完成，在上件工位 A_1 、 A_2 装载 P 货物，上件工位 B_1 、 B_2 装载 Q 货物，上件工位 C_1 、 C_2 装载 R 货物。每个悬挂车和货物都具有独一无二的射频标签，货物和悬挂车通过 RFID 读写器写入射频标签并对应绑定。写入成功后，系统下发指令给牵引车，牵引车拖引多组悬挂车沿轨道运行；运行至道岔处，安装在道岔处的 RFID 读写器自动识别悬挂车的射频标签，并上传至 PLC，PLC 按照存储区的储存原则或配送需求，发送指令进行道岔切换，将悬挂车存放于存储区 D_1 、 D_2 ... D_n 分区等待系统调度或直接运送至下件工位。如果下件工位 X、Y、Z 发送指令，要求配送货物，牵引车会按照配送次序，至存储区拖引装有所要求货物的悬挂车，并将其运送到对应的工位，而后返回上件工位，等待系统指令。

2 总体方案设计

2.1 主要组成部分

悬挂搬运系统主要由牵引车、悬挂车、升降机构、轨道、道岔、货物托盘、控制系统等组成。悬挂车与牵引车通过挂钩相连接，牵引车为其提供动力。悬挂车底盘与升降机构相接，随悬挂车底盘一起沿轨道运动。货物托盘安装在升降机构上，用于承载货物。道岔实现牵引车和悬挂车的转线与换轨，提高系统灵活性。多个悬挂车组成一组，悬挂车与牵引车根据指令灵活连接，且运行在不同的轨道，互不干扰。在控制系统方面，由于每台悬挂车以及货物上安装有射频标签，分布于现场的各个上件工位、道岔和下件工位处均安装有 RFID 读写器，能够实现货物信息跟踪与识

别。悬挂搬运系统整体结构见图 2。

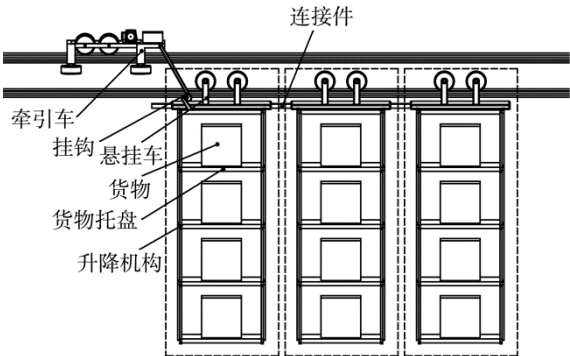


图 2 悬挂搬运系统整体结构
Fig.2 The structure of suspended handling system

2.2 主要设计参数

根据系统布置要求与货物调度需求，进行调查与数据采集。悬挂车的外形尺寸为 $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times 2500\text{ mm}$ ，托盘尺寸为 $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}$ ，行走速度为 $1\sim 1.2\text{ m/s}$ ，升降高度为 $160\sim 240\text{ cm}$ ，单个托盘载重为 20 kg 。

3 关键部件设计

3.1 升降机构

升降机构的主要目的是尽可能保证承载更多的货物，同时最大程度节约空间，即搬运时收缩节省空间，装卸货物时伸展，方便机械手抓取^[7]。由于剪叉连杆机构有良好的可折叠性，运动单元模块化、成本低廉等特点。设计方案对传统剪叉连杆进行改进，改进后整体升降结构见图 3a。设计方案中包括 4 个托盘，可放置 4 个货物箱，每个托盘的两侧设置有滑槽，以限制剪叉连杆的运动范围。连杆之间通过销轴连接，连杆两端销轴安装有轴承，轴承可在滑槽中滑动，见图 3b 和图 4。剪叉主连杆与副连杆连接，以保证托盘不发生偏移^[8]，其中 $a=b=l/4$ 且 O_1 、 O 、 O_2 铰接点共线。最低端的货物托盘两侧安装有电动推杆，水平推动连杆，控制升降机构的升降。

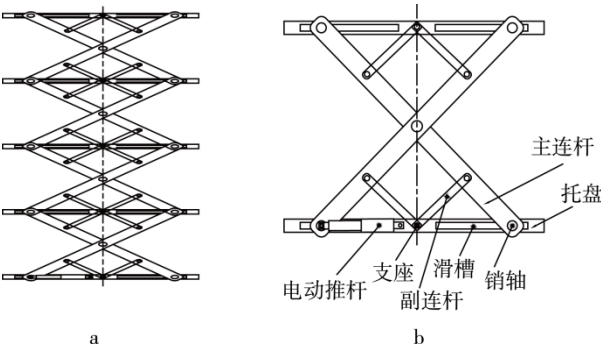


图 3 升降机构结构
Fig.3 The structure of elevating mechanism

根据悬挂车设计要求,结合室内高度、货物等参数,由剪叉机构的几何关系: $h=l\sin a$ 。选取剪叉主连杆长 l 为780 mm,主连杆工作时与水平方向最大角度 α 为 50° ,经计算可求的机构最大升降高度为1560~2390 mm,符合设计要求。

3.2 新型剪叉机构受力分析

3.2.1 电动推杆推力计算

由于承载载荷或工作台所处高度不同时,剪叉机构在工作时所需输入的驱动力也不同^[9],因此,需要对其在极限载荷作用下,处于最低位置时进行受力分析,此时,电动推杆输出推力最大。对此状态下进行受力分析,受力简图见图4,其中 F 为电动推杆推力方向。

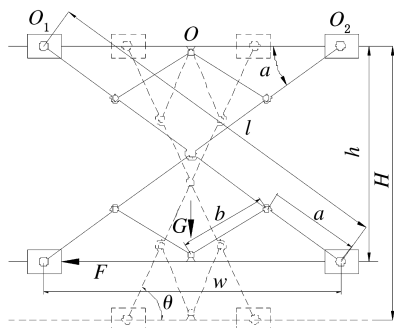


图4 新型剪叉机构受力分析

Fig.4 The force analysis of new scissors mechanism

当整个机构满载工作时,将整个剪叉机构视为静止对象。利用虚位移原理对剪式机构进行受力分析^[10-11]。推杆推力 F 和负重极限载荷 G 为主动力,作用于质点系的所有主动力在任何虚位移中所作的虚功的和等于0,即

$$\sum(F_{xi}\delta_{xi}+F_{yi}\delta_{yi}+F_{zi}\delta_{zi})=0 \quad (1)$$

式中: F_{xi} , F_{yi} , F_{zi} 分别表示作用在质点上的主动力 F_i 在直角坐标系中 x , y , z 轴上的分量; δ_{xi} , δ_{yi} , δ_{zi} 分别表示虚位移 δ_i 在广义坐标轴上的虚位移分量。

由图4可得:

$$F_x\delta_{xF}-G\delta_{yG}=0 \quad (2)$$

式中: $F_x=F$; $x_F=l\cos(a/2)$; $y_G=l\sin a$; l 为剪叉连杆的长度。对广义坐标求变分得: $\delta_{xF}=l\delta_a\sin(a/2)$, $\delta_{yG}=l\delta_a\cos a$,代入式(2)可得, $F=2G\cot a$,其中, a 为剪叉连杆初始位置时与水平方向的夹角,大小为 30° ; G 为最大负重;经计算得到每个电动推杆最大推力为 $F/2=1358$ N。

3.2.2 杆件的有限元分析

该新型剪叉机构可以看作是三级剪叉机构,将其简化为二级剪叉机构计算分析^[11],且新型剪叉机构具有对称性,选取机构杆件的一半进行受力分析,忽略铰接处摩擦力。杆件材料选用合金钢,利用 Simulation

进行有限元分析,得到其应力云图及位移云图分别见图5a和图5b。有限元分析结果表明,最大应力为513.1 MPa,最大位移变形量 3.17×10^{-3} mm,杆件强度符合设计要求,满足实际应用。

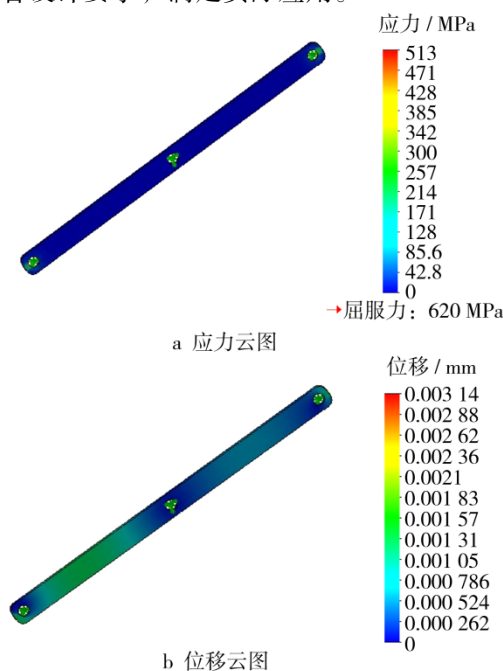


图5 杆件的有限元分析

Fig.5 The finite element analysis of mechanism bar

3.3 牵引车

3.3.1 结构设计

牵引车的主要作用是在控制系统的控制下,牵引悬挂车在轨道上运行,通过接受控制指令,准确地将悬挂车从起始地搬运至目的地。牵引车由直流牵引电动机、铝合金车体、整体轴承式走行轮、无油润滑型导向轮、控制装置等部件所组成。牵引车通过安装在轨道上的导电轨获取电源^[12],电动机通过同步带轮驱动走行轮转动。导向轮保证牵引车始终沿着轨道方向运行,牵引车结构见图6。

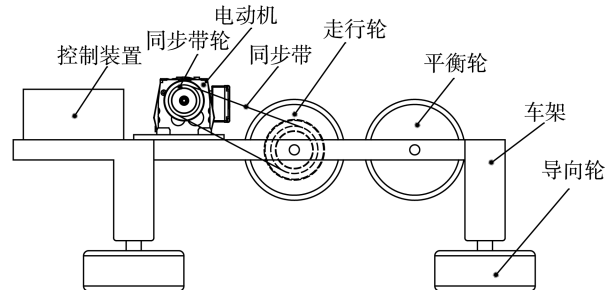


图6 牵引车结构

Fig.6 The structure of tractor

3.3.2 电动机功率

分别以悬挂车、牵引车为研究对象,对其受力进行分析,假定车轮与悬挂车车轮相同,不考虑导向轮

的滚动阻力, 计算牵引单个满载悬挂车时所需的拉力见式(3)。

$$F_z = \mu G_1 + \frac{\mu G \cos \alpha}{1 + \mu \sin \alpha} + \frac{\mu^2 G \sin \alpha}{1 + \mu \sin \alpha} = 0.12 \text{ kN} \quad (3)$$

式中: 悬挂车重力为 $G=(m_1+m_2)g=901.6 \text{ N}$ (m_1 为悬挂车的质量; m_2 为货物的最大质量); 牵引车重力为 $G_1=98 \text{ N}$; α 为牵引拉力与水平线的夹角, 取 $\alpha=60^\circ$; μ 为车轮与轨道摩擦因数, $\mu=0.2$ 。牵引单个满载悬挂车时的电机功率计算公式见式(4)。

$$P = \frac{v_{\max} k F_z \sin \alpha}{60 \eta} = 0.178 \text{ kW} \quad (4)$$

式中: P 为牵引车电机功率 (kW); k 为电动机起动系数, 取 $k=1.2$; $v_{\max}$ 为牵引车最大速度 (m/min), 取 $v_{\max}=60 \text{ m/min}$; η 为驱动总传动效率, $\eta=0.75$; F_z 为牵引车运行所需牵引力(N)。

4 系统架构设计

系统控制设计见图 7。系统硬件由 3 部分组成: 上位机模块、PLC 控制模块、无源 RFID 标签读写器。上位机模块主要由数据服务器、监控主机、交换机、系统管理机等部分组成, 具有人机交互界面。PLC 控制模块主要由 SIEMENS S7-400 系列 CPU、分布式 I/O 模块、通讯模块等组成。无源 RFID 标签读写器由 4 个部分组成: 天线模块、射频模块、控制模块、通信模块。上位机模块和 PLC 控制模块之间采用 Ethernet 通讯^[6], 通过交换机交互; RFID 读写器通过网关模块接入 I/O 模块, 通过 Profinet 网络与 PLC 模块通信^[13]。

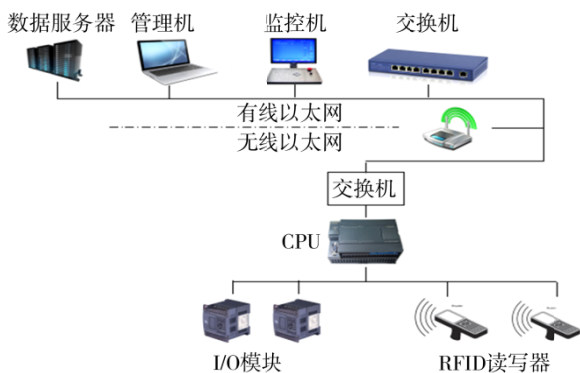


图 7 系统架构

Fig.7 System architecture

上位机模块的作用是显示悬挂搬运系统在运行过程中的状态变化、各种故障以及完成所有部件运行控制、调度管理、数据的存储与处理等功能。PLC 控制模块在理念上采用集中控制与分散控制相结合的方式, 既能在人机交互界面上进行所有的控制, 又能在现场进行整个系统的操作。每个牵引车有一个独立的控制箱, 用于控制牵引车运动; 分布式 I/O 模块是 PLC 与现场控制的接口界面的输入通道, 负责采集现

场的开关信号并输出动作控制信号; 所有设备均由 CPU 控制。RFID 模块的射频标签记忆有悬挂车、牵引车信息, 读或写都是通过控制系统发送指令给读写器完成的, 实现了悬挂车、悬挂车信息的确认、识别的自动化。

5 仿真与试验分析

该单轨悬挂输送系统的关键结构是新型剪叉式机构, 该机构能否按照设计要求运动是重点。利用电动推杆推力的计算结果作为新型剪叉机构的输入力进行分析。SolidWorks 的 COSMOS Motion 三维仿真软件是一款用于模拟机械运动和校验机械设计的动力学插件^[14-15]。利用 SolidWorks 建立虚拟样机模型见图 8。

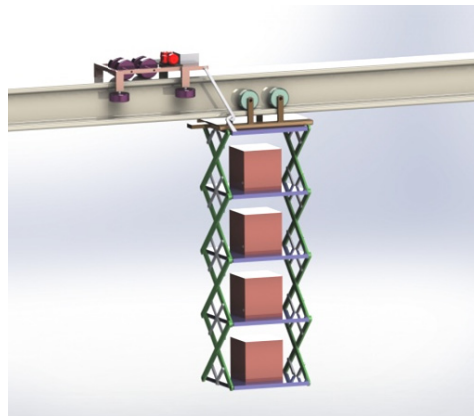


图 8 虚拟样机模型

Fig.8 Virtual prototype model

文中着重验证了新型剪叉式机构, 选择最低层托盘进行 Motion 分析。首先, 添加各部件材料属性; 在托盘两侧的电动推杆与连杆的铰接点分别添加线性马达, 每个马达驱动力为 $F/8$; 固定上托盘, 在下托盘中心施加向下的重力为 $G/4$, 运动类型中选择数据点。仿真结束后单击“结果和图解”, 选择查看下托盘的位移变化曲线, 即其满载时单个货物托盘位移的变化曲线见图 9, 实际单个托盘的位移变化区间为 44~62 cm, 可以认为误差在范围之内, 符合设计要求。

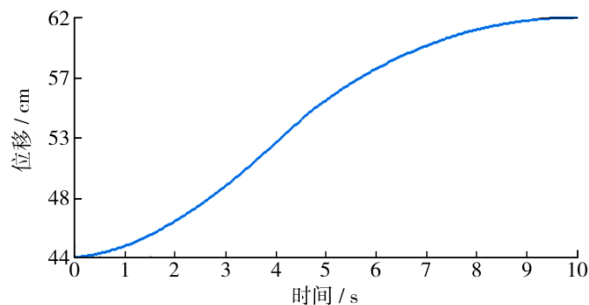


图 9 位移变化曲线

Fig.9 Displacement curve

为验证其结构设计的合理性与运行过程中的平顺稳定性,利用牵引功率计算结果,在虚拟样机模型里,对牵引车施加沿轨道方向马达驱动力 F_z ,添加各部件材料属性,增加重力、摩擦力,进行仿真,同时仿真过程中也未出现到零件干涉、不正常运动等异常情况,表明结构设计合理。仿真结束后,单击“结果和图解”,得到其满载时的运行速度曲线见图10。图10中产生的尖点对应着多次碰撞,应当忽略碰撞情况的极值,提取出静态接触力^[16],其运行平时牵引车运行速度为58~66 m/min,基本与设计要求一致。

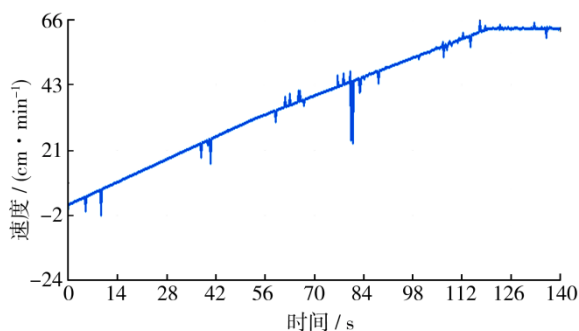


图10 速度变化曲线
Fig.10 Velocity curve

6 结语

提出了一种基于新型剪叉机构的智能升降式单轨悬挂搬运系统,该系统悬挂于高空的轨道上,节省地面空间,满足制造业和配送中心对空间利用率的要求,能够实现快速、高效地搬运。另外,悬挂式搬运系统能够自动补充物品到存储区,并按照需求运送至下件工位,实现了预期设计的功能。主要包括:根据悬挂系统的功能要求,对搬运区进行了合理的布置,并详细介绍了搬运的流程;对搬运系统进行了总体方案设计,使用电动推杆作为工作平台的动力,升降结构作为悬挂车的主体,并将三者有效结合起来,实现功能;设计新型剪叉机构有效缩小悬挂车的体积,同时保证剪叉机构升降过程,托盘位置及受力方向不发生变化,使机体稳定;对搬运系统的整体架构进行分析,确定其主要组成部分与功能,保证系统稳定运行;对新型剪叉机构及牵引车运行仿真试验,确定单个剪叉机构升降范围44~62 cm;确定牵引车前进后退运行速度为58~66 m/min,运行平稳,满足设计要求。该设计结构简单,操作方便,提高了搬运效率、搬运智能化水平。

参考文献:

[1] 余汪洋. 自行车悬挂输送系统的研究现状与发展趋势[J]. 中国工程机械学报, 2011, 9(1): 122—125.
YU Wang-yang. Advances and Future Trends on Sus-

pending Vehicle Conveying Systems[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2011, 9(1): 122—125.

[2] 朱宏辉. 流自动化系统设计与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
ZHU Hong-hui. Design and Application for Logistics Automatic System[M]. Beijing: Publishing House of Chemical Industry, 2005.

[3] 李震, 洪添胜, 孙同彪, 等. 山地果园蓄电池驱动单轨运输机的设计[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 221—227.
LI Zhen, HONG Tian-sheng, SUN Tong-biao, et al. Design of Battery Powered Monorail Transporter for Mountainous Orchard[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2016, 44(6): 221—227.

[4] 杨洲, 李雪平, 李君, 等. 果园钢索牵引悬挂式货运系统关键部件设计[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 18—24.
YANG Zhou, LI Xue-ping, LI Jun, et al. Design on Key Parts of Cable-driven Hanging Transportation System for Orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 18—24.

[5] 杨永红. 悬挂式单轨无人搬运系统的特点及应用分析[J]. 科技创业家, 2013(8): 103.
YANG Yong-hong. Characteristics and Application of Suspended Monorail Unmanned System[J]. Science and Technology Entrepreneurs, 2013(8): 103.

[6] 刘晓楠, 匡永江, 吴双, 等. 一种多路径电动单轨小车悬挂输送系统(EMS)设计[J]. 制造业自动化, 2014(19): 23—24.
LIU Xiao-nan, KUANG Yong-jiang, WU Shuang, et al. Design of Multi-path Electric Monorail System[J]. Manufacturing Automation, 2014(19): 23—24.

[7] 熊强, 章军, 陈春华, 等. 柔性快递包装盒的分拣机械手结构设计[J]. 机械设计与制造, 2014(10): 69—72.
XIONG Qiang, ZHANG Jun, CHEN Chun-hua, et al. Flexible Express Delivery of Package Sorting Manipulator Structure Design[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(10): 69—72.

[8] 曹冲振. 铰接菱形多杆机构式升降装置: 中国, 200420020715.5[P]. 2005-03-23.
CAO Chong-zhen. Articulated Diamond Multi Bar Mechanism Type Lifting Devices: China, 200420020715.5 [P]. 2005-03-23.

[9] 田素博, 刘国均, 邢大伟, 等. 温室多功能轨道作业车的研制[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 116—121.
TIAN Su-bo, LIU Guo-jun, XING Da-wei, et al. Design and Experiment on Greenhouse Multi-function Rail Vehicle[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 116—121.

[10] 于永江, 郭云绯, 高畅. 虚功原理法进行多层剪叉机构受力分析[J]. 机械设计与制造, 2008(3): 84—86.
YU Yong-jiang, GUO Yun-fei, GAO Chang. Adopt Virtual Work Principle to Analyze Multi-layer Scissor

- Structure's Force Condition[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(3): 84—86..
- [11] 刘俊谊, 杨刚, 张万军, 等. 剪叉式提升机构受力特性分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2014, 15(2): 133—138.
- LIU Jun-yi, YANG Gang, ZHANG Wan-jun, et al. Force Analysis of Scissor Lift Mechanisms[J]. Journal of PLA University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2014, 15(2): 133—138.
- [12] 侯隆斌. 电动自行车系统(EMS)无接触供电拾电器的研发与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- HOU Long-bin. Research and Application on Contactless Power Supply Pickups for EMS[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [13] 姚栋. 基于Profinet的制丝线移动加香加料RFID控制系统[J]. 烟草科技, 2015, 48(3): 103—106.
- YAO Dong. Profinet-based Mobile RFID Control System for Flavoring and Casing in Primary Processing Line[J]. Tobacco Science & Technology, 2015, 48(3): 103—106.
- [14] 李光. 基于COSMOSMotion的包装机横封机构运动仿真[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 83—85.
- LI Guang. Kinematic Simulation of Traverse Seal Mechanism of Packaging Machine Based on COSMOSMotion[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5): 83—85.
- [15] 姜文超. 剪叉式液压升降平台参数化系统设计及优化[D]. 济南: 济南大学, 2015.
- JIANG Wen-chao. The Parametric System Design of Hydraulic Scissors Lifting Platform and Optimization [D]. Jinan: University of Jinan, 2015.
- [16] DS Solidworks 公司. Solidworks Motion 运动仿真教程[M]. 陈登祥, 胡其灯, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- DS Solidworks Company. Solidworks Motion Motion Simulation Tutorial[M]. CHEN Deng-xiang, HU Qi-deng, Translate. Beijing: China Machine Press, 2014.