

分拣小车聚氨酯滚轮在轨运行滚动摩擦系数研究

唐英¹,张靖²,赖志武¹

(1. 北京科技大学,北京 100083; 2. 中科微至智能制造科技江苏股份有限公司,江苏 无锡 214000)

摘要:为了研究分拣小车上聚氨酯滚轮在钢轨道运行时的滚动摩擦系数,基于弹性滞后效应的滚动摩擦模型进行理论计算,建立分拣小车 ADAMS 动力学分析简化模型并进行仿真分析,采用牵引法进行实验测试。理论计算、ADAMS 仿真和现场实验测试数值相互吻合,说明 3 种研究方法的可行性和所获得滚动摩擦系数值的可靠性。

关键词:滚动摩擦系数;聚氨酯滚轮;ADAMS 动力学仿真;牵引法实验

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)06-0054-04

Study on Rolling Friction Coefficient of On-track Running Polyurethane Wheel of Sorting Trolley

TANG Ying¹, ZHANG Jing², LAI Zhiwu¹

(1. University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 2. Wayzimu Intelligent Manufacturing Technology Jiangsu Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: In order to study the rolling friction coefficient of the polyurethane roller on a sorting trolley running on steel track, theoretical analysis is carried out with a rolling friction model based on elastic hysteresis effect theory. A simplified ADAMS simulation model of sorting trolley is built to conduct dynamic simulation analysis, and experimental tests are made by traction on the field. The results show that the rolling friction coefficient values obtained by the theoretical calculations, from the ADAMS simulation analysis and through the field experimental tests are basically consistent with one another, which proves the feasibility of the three research methods and the reliability of the obtained rolling friction coefficient values.

Keywords: rolling friction coefficient; polyurethane roller; ADAMS dynamic simulation; traction test

0 引言

交叉带分拣机目前在国内邮政和快递行业的应用最为广泛^[1]。聚氨酯滚轮由于耐油、耐磨、耐低温、耐臭氧、性能稳定、承重力强、消音效果好和工艺成熟等优点,在交叉带分拣机上常被用作分拣小车的滚轮,承载分拣小车沿分拣机钢轨道滚动前行。设计交叉带分拣机计算分拣小车在轨运行阻力时,需要了解聚氨酯滚轮在钢轨道上滚动时的滚动摩擦系数。

围绕聚氨酯材料摩擦系数的研究,田雨等研究了聚氨酯材料的滑动摩擦系数^[2];朱鑫波研究了带钢冷轧过程中滚动接触条件下聚氨酯胶辊的磨损机理^[3]。尚未找到适用于交叉带分拣机运行工况下阻力计算的聚氨酯滚轮与钢轨道的滚动摩擦系数数据。

迄今有关滚动摩擦系数的研究方法,主要有理论分析、仿真分析和实验测试三大类。理论分析方面,薛凤先等采用数值分析计算了汽滚轮胎的滚动摩擦系数^[4];刘万锋等通过平抛运动和能量守恒定律计算出球形材料滚动摩擦系数^[5];汪志城等基于滚动摩擦机理推导出滚动摩擦系数计算公式^[6-7];陈文枢推导了环形分拣机橡胶类滚轮的滚动摩擦系数^[8]。仿真分析方面,李敏等使用

ADAMS 搭建 Mecanum 轮滚动阻力仿真模型进行仿真分析^[9];周涛等通过 Ansys 软件搭建轮胎有限元模型对滚动阻力进行仿真^[10]。实验测试研究方面,刘声富等对圆柱滚子从斜坡自由滚下到停止的实验方法进行研究^[11];黄传辉等通过测量匀速运行小车所需推力的实验测试方法研究了不同材料的滚动摩擦系数^[7]。汽车轮胎滚动摩擦系数的测试方法有牵引法、滑行法、功率平衡法^[12-13]。

借鉴上述文献的方法,本文采用理论计算、仿真分析和实验测试相结合的方法研究聚氨酯滚轮在钢轨道上滚动的滚动摩擦系数。数值计算基于滚动摩擦理论进行,仿真分析采用 ADAMS 动力学模型,测试实验采用牵引法进行。

1 滚动摩擦系数理论计算

滚动摩擦系数为驱动力与法向载荷之比,是一个无量纲数值。分拣小车聚氨酯滚轮在轨道上滚动运行过程中,由于聚氨酯材料的高黏弹性特点,弹性滞后效应显著,所以弹性滞后是形成聚氨酯滚轮滚动阻力的最主要原因。聚氨酯材料变形使地面对滚轮法向反作用力的合力向前偏移一个距离,表现为滚动阻力偶矩。滚动摩擦系数可以根据上述理论进行分析计算,如图 1 所示。

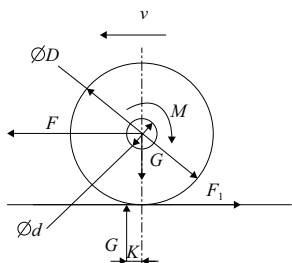


图1 滚动摩擦阻力原理图

根据力偶平衡可以得到下式:

$$F_1 \frac{D}{2} = GK + M \quad (1)$$

$$M = \frac{d}{2} \mu G \quad (2)$$

$$\omega_v = \frac{F_1}{G} = (2K + \mu d) / D \quad (3)$$

式中: F 为牵引力; F_1 为滚动阻力; M 为滚动轴承的摩擦转矩; G 为聚氨酯滚轮受到竖直方向的载荷; ω_v 为分拣小车聚氨酯滚轮与钢轨道之间的滚动摩擦系数; K 为聚氨酯滚轮材料变形后地面对滚轮法向反作用力的合力向前偏移的距离; μ 为滚轮轴轴颈和滚轮轴承内孔间的摩擦系数; d 为滚轮轴轴颈直径; D 为聚氨酯滚轮直径。一般取 $K = 0.5 \sim 0.8 \text{ mm}^{[8]}$, $\mu = 0.02^{[8]}$, $d = 0.02 \text{ m}$, $D = 0.09 \text{ m}$, 计算出分拣小车聚氨酯滚轮与轨道之间的滚动摩擦系数 ω_v 的范围值为: $0.015 \sim 0.022$ 。

2 滚动摩擦系数仿真分析

2.1 基于 SolidWorks 的仿真试验台三维模型建模

在 SolidWorks 中搭建轨道和小车模型。分拣小车实际结构及在轨运行的三维模型如图 2 所示。进行分拣小车滚动阻力分析时, 对分拣小车模型进行以下简化: 1) 忽略分拣小车实际外观及内部结构, 以轮距相同的立方体代替。给立方体设置不同质量仿真空载和满载工况。2) 分拣小车上的聚氨酯滚轮实际有两对, 支撑小车在水平轨道上运动的竖向滚轮和起水平导向作用的横向滚轮。考虑横向滚轮仅在分拣小车转弯时才与侧向轨道接触, 且本研究进行分拣小车在轨运行滚动阻力测试是在直线导轨段进行的, 因此, 建模时将分拣小车简化为 4 个竖向滚轮所组成的小车, 如图 3 所示。

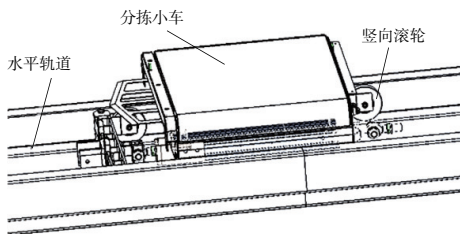


图2 分拣小车在轨运行的三维模型

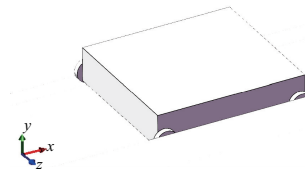


图3 分拣小车在轨运行 ADAMS 分析简化模型

2.2 基于 ADAMS 的滚动阻力仿真环境搭建

将搭建好的 SolidWorks 三维简化模型导入 ADAMS 软件中进行滚动摩擦系数仿真动力学模型的搭建, 在 ADAMS 中设置单位为 MMKS 单位制, 选择竖直方向的 y 轴负方向为重力方向。对各个部件进行定义装配和约束关系: 将轨道与地面固定; 小车的聚氨酯滚轮与轨道是相对运动且是滚动关系, 设置 4 个聚氨酯滚轮与轨道为接触。聚氨酯滚轮绕着小车的车轴做旋转运动, 设置 4 个聚氨酯滚轮与小车的车轴为旋转约束。

设置接触参数, 初步设置聚氨酯滚轮刚度为 2855 N/mm , 力指数为 1.1, 阻尼为 $0.57 \text{ N} \cdot \text{s/mm}$, 穿透深度为 0.1 m , 静摩擦系数 0.30, 滑动摩擦系数 0.25, 静平移速度为 0.1 mm/s , 摩擦平移速度 $10 \text{ mm/s}^{[14]}$ 。聚氨酯滚轮与车轴之间安装有滚动轴承, 滚动过程中有摩擦。滚动轴承的工作环境为室内湿度、正常少量磨屑的情况, 设置车轴与聚氨酯滚轮之间的滑动摩擦系数为 0.02, 摩擦力臂为轴颈与摩擦系数的乘积, 其他设置为默认值。

2.3 滚动摩擦系数仿真结果及分析

利用 ADAMS 搭建的仿真模型, 设置两前轮为驱动轮使分拣小车在轨道内匀速运行, 监测两个后轮从动滚轮受到的摩擦力来计算聚氨酯滚轮在钢轨道的滚动摩擦系数。分别对满载和空载情况进行仿真, 分拣小车上没有货物只有小车自质量情况为空载, 分拣小车上的货物质量为小车能承载的最大载重时为满载。研究对象的分拣小车自质量为 32 kg , 小车能承载的最大载重为 30 kg 。考察分拣小车在轨低速 (0.1 m/s) 运行和常规速度 (1 m/s) 运行两种工况。空载时, 设置分拣小车的总质量为 32 kg , 两前轮为驱动轮使小车以 0.1 m/s 和 1 m/s 的速度匀速运行。仿真得到小车两个从动滚轮与轨道的滚动阻力曲线和竖直方向的载荷曲线, 如图 4~图 7 所示 (本刊为黑白印刷, 如有疑问请咨询作者)。通过图 4 和图 6 可以看出, 左后轮和右后轮两个从动轮的滚动阻力变化趋势一样, 滚动阻力有波动说明在滚动过程中聚氨酯滚轮有形变, 速度为 1 m/s 时的滚动阻力波动比 0.1 m/s 时剧烈。

图4 空载 0.1 m/s 左后轮、右后轮受到的摩擦阻力

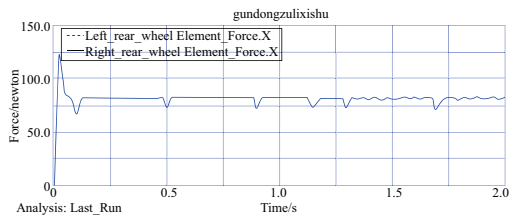


图5 空载 0.1 m/s 左后轮、右后轮的竖直载荷

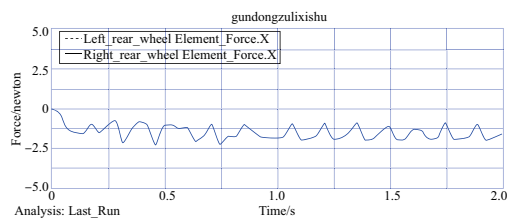


图6 空载 1 m/s 左后轮、右后轮受到的摩擦阻力



图7 空载 1 m/s 左后轮、右后轮的竖直载荷

根据图4-图7中各个曲线段具体数值,对各个曲线的匀速段取平均值,获得从动车轮的滚动阻力和滚轮竖直载荷的数据,如表1所示。通过滚动阻力平均值与竖直负载的比值,获得 0.1 m/s 和 1 m/s 运行速度下空载时的聚氨酯滚轮在轨运行滚动摩擦系数为 0.021。

表1 速度为 0.1 m/s 和 1 m/s 空载仿真数据

车轮	速度为 0.1 m/s			速度为 1 m/s		
	滚动阻力 平均值/N	车轮 负载/N	滚动摩擦 系数	滚动阻力 平均值/N	车轮 负载/N	滚动摩擦 系数
左后轮	1.627	78.381	0.021	1.617	78.337	0.021
右后轮	1.627	78.381	0.021	1.617	78.337	0.021

满载时,在 ADAMS 软件中设置分拣小车总质量为 62 kg 仿真满载情况。仿真得到小车从动滚轮与轨道的滚动阻力曲线和竖直方向的载荷曲线如图8-图11所示。

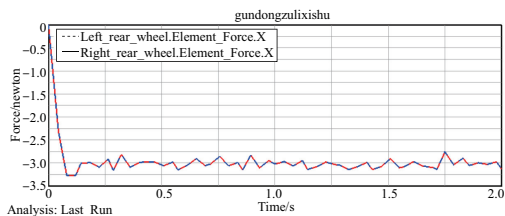


图8 满载 0.1 m/s 右后轮、左后轮受到的摩擦阻力



图9 满载 0.1 m/s 右后轮、左后轮的竖直载荷

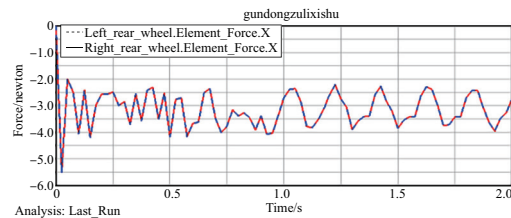


图10 满载 1 m/s 右后轮、左后轮受到的摩擦阻力

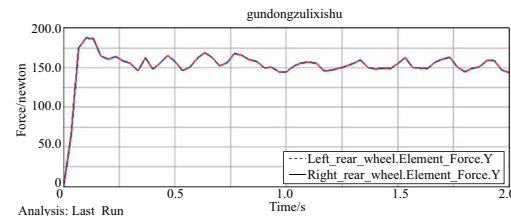


图11 满载 1 m/s 右后轮、左后轮的竖直载荷

满载情况下,左后轮和右后轮两个从动轮的滚动阻力变化趋势一样。图8-图11中各个曲线匀速段的平均值如表2所示,得到 0.1 m/s 和 1 m/s 运行速度下满载时滚动摩擦系数为 0.020。

表2 速度为 0.1 m/s 和 1 m/s 满载仿真数据

车轮	速度为 0.1 m/s			速度为 1 m/s		
	滚动阻力 平均值/N	车轮 负载/N	滚动摩擦 系数	滚动阻力 平均值/N	车轮 负载/N	滚动摩擦 系数
左后轮	3.055	151.340	0.020	3.057	151.375	0.020
右后轮	3.055	151.340	0.020	3.057	151.375	0.020

仿真分析显示,满载和空载的分拣小车分别以 0.1 m/s 和 1 m/s 的速度在轨运行时,滚动摩擦系数分别为 0.020 和 0.021,有微小差异。均在理论计算值范围 0.015~0.022 内。考虑到仿真模型简化及初始参数设置中的误差因素影响,可以忽略不同工况所得滚动摩擦系数值间的微小差异。因此,从仿真结果看,聚氨酯滚轮的滚动摩擦系数与运行速度、载荷大小无关。

3 滚动摩擦系数测试实验

3.1 测试原理及实验设备

将行车架安放在轨道内,使用电机拖动该行车架使其匀速运行,通过安装在车上的力传感器显示仪读取匀速运

动时受到的拉力,从而计算出分拣小车的聚氨酯滚轮在匀速工况下的滚动摩擦系数。试验系统基本构成如图 12、图 13 所示,压力传感器的安装如图 14 所示。

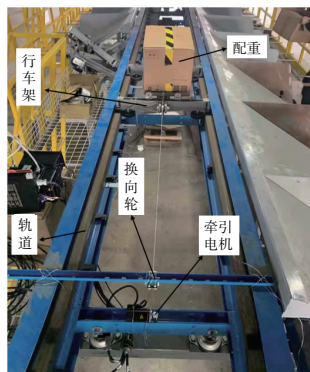


图 12 分拣小车在轨运行及牵引电机部分



图 13 伺服电机控制和传感器力值显示部分

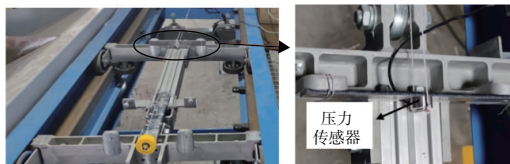


图 14 压力传感器在行车架小车的安装

试验系统中,压力传感器的型号为 CGQ-WH,量程为 500 N,精度为 1 N。牵引电机为欧姆龙伺服电机,型号为 R88M-1M10030T-S2,功率为 100 W,额定转矩为 0.32 N·m,额定转速 3 000 r/min。伺服驱动器的型号为 R88D-1SN01H-ECT,功率为 100 W。欧姆龙 PLC 控制器的型号为 NX701-1600,指令执行时间为 0.37 ns,压力传感器的采样频率为 50 kHz。

3.2 测试结果与分析

依据仿真结果,控制电机匀速转动带动小车以 0.1 m/s 的速度匀速运行,分别在空载和满载两种工况下进行测试。测试结果见表 3,得到空载下滚动摩擦系数为 0.019~0.022;满载下滚动摩擦系数为 0.019~0.021。仿真分析获得的空载和满载下滚动摩擦系数值 0.021 和 0.020 在上述测试试验值范围内,测试试验值均在理论计算值范围 0.015~0.022 内,相互吻合。测试得到空载和满载条件下滚动摩擦系数的均值分别为 0.021 和 0.020,相差不大,考虑压力传感器的精度、钢轨表面质量等测试环境中的误差因素的影响,可以忽略载荷变化对滚动摩擦系数数值的影响。

表 3 滚动摩擦系数测试实验结果

运行速度/ (m/s)	空载		满载	
	牵引力/N	滚动摩擦系数	牵引力/N	滚动摩擦系数
0.1	7	0.022	13	0.021
0.1	6	0.019	13	0.021
0.1	7	0.022	12	0.019

4 结语

本文综合应用理论分析计算、基于 ADAMS 的仿真分析、牵引法实验测试对分拣小车聚氨酯滚轮在轨运行的滚动摩擦系数进行了研究。研究结果表明:交叉带分拣机正常负载及正常速度下运行时,分拣小车聚氨酯滚轮与钢轨之间的滚动摩擦系数未受到载荷变化和运行速度的明显影响。考虑仿真分析及测试条件中的误差因素影响,可以认为其数值为 0.015~0.022 之间。根据仿真和测试试验结果,该滚动摩擦系数取较大者 0.020~0.021,符合现场工况。其次,现场测试的试验结果,也验证了所建立的分拣小车 ADAMS 分析模型的正确性,为今后采用 ADAMS 仿真分析方法进行交叉带分拣机设计打下良好的基础。

参考文献:

- [1] 黄启明. 自动分拣系统及其应用前景分析[J]. 物流技术, 2002, 21(5): 7-15.
- [2] 田雨, 张杰, 韦永继, 等. 聚氨酯弹性体摩擦系数影响因素探讨[J]. 聚氨酯工业, 2002, 17(1): 37-40.
- [3] 朱鑫波. 滚动接触条件下聚氨酯胶辊的磨损机理研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- [4] 薛风先, 王泽鹏, 朱由锋. 轮胎滚动阻力(因数)测定和数值计算方法[J]. 橡胶工业, 2006, 53(3): 174-178.
- [5] 刘万锋, 徐武彬, 李冰, 等. 滚动摩擦系数的测定及 EDEM 仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2018(9): 132-135.
- [6] 汪志城. 滚动摩擦机理和滚动摩擦系数[J]. 上海机械学院学报, 1993, 15(4): 35-43.
- [7] 黄传辉, 王前, 张磊, 等. 滚动过程中聚四氟乙烯、聚酰胺 66、聚醚型聚氨酯的弹性滞后效应与本构关系的研究[J]. 中国塑料, 2018, 32(3): 99-103.
- [8] 陈文枢. 环形包裹分拣机驱动功率的计算[J]. 中国邮政, 1980(6): 30-32, 35.
- [9] 李敏, 朱建江. Mecanum 轮滚动阻力因数仿真分析[J]. 机械制造, 2013, 51(9): 44-46.
- [10] 周涛, 杨晓光. 轮胎滚动阻力有限元仿真模拟研究[J]. 汽车工业研究, 2018(8): 53-56.
- [11] 刘声富, 刘应开. 圆柱体的滚动摩擦系数的测量研究[J]. 大学物理实验, 2017, 30(2): 58-61.
- [12] 伍江涛, 夏松茂. 汽滚轮胎滚动阻力及其测试方法[J]. 科技资讯, 2007, 23(21): 27-33.
- [13] 姚舜, 吴继业, 余俊涛, 等. 车轮滚动阻力的测试方法和设备的比较分析[J]. 橡塑技术与装备, 2018, 44(4): 28-31.
- [14] 刘晋霞, 胡仁喜, 康士廷, 等. ADAMS 2012 虚拟样机从入门到精通[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2013.

收稿日期: 2021-07-19