

[新材料·新设备·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.02.011

铰接摆动式 AGV 结构设计及运动学分析

张洪^{1,2}, 张广杰^{1,2*}

(1. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;
2. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:自动导引车 AGV 在行驶过程中驱动轮与地面的接触情况对其运动性能具有重要影响,为了保证 AGV 在复杂路面上行驶时具有足够的附着力和较好的稳定性,课题组设计了一种铰接摆动式 AGV。课题组对 AGV 进行整体受力分析,建立了减震结构的受力模型,确定 AGV 在凹陷和凸起路面的减震弹簧刚度范围;运用 ADAMS 动力学仿真软件对 AGV 小车进行了运动仿真,在满负载和空负载 2 种情况下分析了弹簧刚度对运行稳定性的影响,选取了合适的弹簧刚度。仿真结果验证了该结构及模型的合理性。铰接摆动式结构的设计及优化可以提高 AGV 在地面的行驶性能。

关键词:AGV;铰接摆动式;减震弹簧;ADAMS

中图分类号:TH12 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)02-0072-06

Structure Design and Kinematics Analysis of Articulated Swing Type AGV

ZHANG Hong^{1,2}, ZHANG Guangjie^{1,2*}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
2. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: The contact situation between the driving wheel and the ground surface has important impact on its movement performance of the AGV. In order to guarantee enough adhesion and better stability of the vehicle when driving on the complex road, an articulated swing type AGV was designed. The overall stress condition of the AGV was analyzed, and the stress model of the shock absorption structure was established, the range of spring stiffness was selected for the shock absorption structure under concave and convex road surface respectively. The dynamic simulation software ADAMS was used to simulate the motion of the AGV car. The influence of different spring stiffness on driving stability was analyzed under full load and no load, and the reasonable spring stiffness was selected. Finally, the rationality of the structure and model was verified. The design and optimization of articulated swing structure can improve the driving performance of AGV on the road.

Keywords: AGV (Automated Guided Vehicle); articulated swing type; shock absorber spring; ADAMS

自动导引车(automated guided vehicle, AGV)是装备有电磁或光学等自动导引装置,能够沿规定的导引路径行驶,具有安全保护以及各种移载功能的运输车^[1-3]。AGV 属于轮式移动机器人,以轮式移动为特征,较之步行、爬行或其他非轮式的移动机器人具有行动快捷、工作效率高、结构简单、可控性强和安全性好

等优势^[4-5]。目前,AGV 已经广泛应用于物流、工业、交通和运输等行业。

AGV 在实际使用过程中,可能需要在不同车间来回行驶,车间与车间之间的过渡地段以及不同车间的地面情况难免会有所差异,因此 AGV 对路面的适应性能非常重要^[6]。为了应对不同使用场合的要求,AGV

收稿日期:2022-08-02;修回日期:2022-11-17

第一作者简介:张洪(1966),男,江苏无锡人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为机电检测与控制技术。通信作者:张广杰(1998),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要研究方向为机电控制技术。E-mail:306580260@qq.com

的减震结构设计尤为关键^[7]。

为解决 AGV 在不平整路面上行驶不稳定的问题,课题组设计了一种 6 轮差动、铰接摆动减震式 AGV,分析了减震装置的受力情况,运用 ADAMS 动力学软件对其结构模型进行仿真和分析。

1 AGV 结构设计

AGV 的轮系布局对 AGV 的运动性能有很大影响^[8-10]。课题组设计的 AGV 选择 6 轮差速驱动,6 轮即中间 2 个驱动轮,以及前后共 4 个万向从动轮,相较于 4 轮驱动有更好的承载能力和平衡性。这种布局方式能够实现原地旋转以及双向运行。但 6 轮布局形式对地面的平整度有更高的要求,在小车行驶过程中要保证 6 轮同时着地则需要增加悬挂机构或者缓冲机构^[11]。

AGV 总体结构如图 1 所示,由车架、电池、万向轮和驱动轮构成。

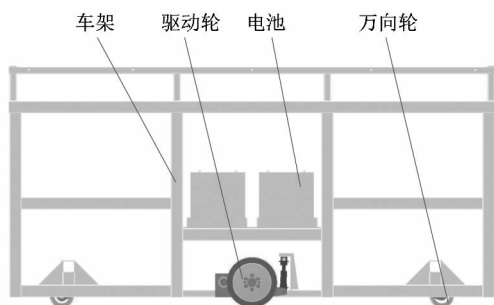


图 1 AGV 结构

Figure 1 Schematic of AGV

在驱动轮与车架连接处设计了减震结构。AGV 的减震浮动结构可以使 AGV 在复杂路面上行驶也能保持较好的驱动性能^[12-13]。减震浮动结构通过弹簧使驱动轮可以上下浮动,在行驶过程中始终和地面贴紧。当遇到凸起地面时,减震弹簧由于小车质量将进一步压缩;当遇到凹陷地面时,弹簧的反作用力使驱动轮与地面压紧^[14]。通过减震结构,AGV 在不平整路面下也可以实现多轮共同着地。除此之外,减震弹簧还可以缓解冲击,减少车体的振动,提高小车运行过程中的稳定性^[15]。

如图 2 所示,铰接摆动式减震装置有 3 个铰接点,铰接点 1 和铰接点 3 通过转动轴与车架相连接,只有

一个转动自由度;铰接点 2 和铰接点 3 之间设有推杆和减震弹簧。当 AGV 在不平整路面上行驶时,地面对驱动轮的反作用力使减震弹簧的压缩量发生变化,驱动轮可以绕铰接点 1 上下浮动,保证足够的抓地力以及与地面的良好接触。

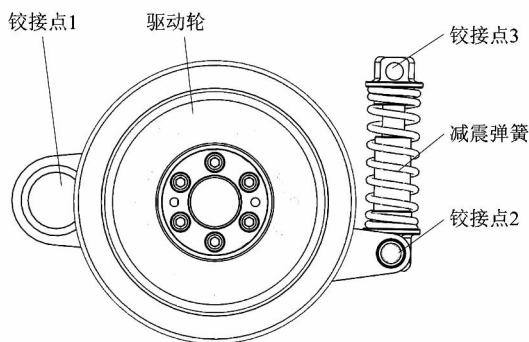


图 2 减震装置结构

Figure 2 Structure of shock absorber

AGV 的运行性能与驱动装置的电机选型有直接关系,根据小车的载质量以及运行速度要求,初步选用电机型号为 MF3S-60CS 伺服电机,功率 400 W,搭配行星减速机,输出扭矩为 33 N·m。驱动轮的直径 160 mm,材料选用聚氨酯。

2 AGV 受力分析

在平地路面时,AGV 的结构可以等效为图 3 所示的模型。

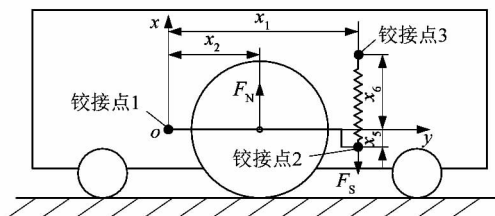


图 3 AGV 平地路面受力分析

Figure 3 Stress analysis of AGV on flat road

要保证 AGV 能在地面上正常行驶且不打滑,则驱动轮附着力 F_f 要满足:

$$2F_f > F_q; \quad (1)$$

$$F_f = \mu_1 F_N; \quad (2)$$

$$F_q = \mu_2 Mg. \quad (3)$$

式中: F_f 为驱动轮附着力; F_q 为 AGV 行走所需牵引

力; μ_1 为驱动轮与地面的附着系数,取 0.5; μ_2 为 AGV 与地面的滚动摩擦因数,取 0.02; M 为 AGV 和负载总质量,满载时取 $M=500$ kg,空载时 $M=200$ kg; g 为重力常数; F_N 为支撑力。

驱动轮的铰接摆动结构使支撑力 F_N 与弹簧反力 F_S 之间存在力臂关系,即:

$$F_N \cdot x_2 = F_S \cdot x_1 + mg \cdot x_2 \quad (4)$$

式中: x_1 为铰接点 1 和铰接点 2 之间的水平距离, x_2 为铰接点 1 到驱动轮中心点的水平距离, m 为减震装置的质量。

由式(4)可以看出,当支撑力 F_N 一定时, x_1 和 x_2 的比值越大,所需的弹簧反力越小,对弹簧刚度的需求也越小,但同时结构占用空间越大,结构稳定性也相应会下降,因此 x_1/x_2 的值选取在 2 附近时较为合适。

对驱动轮的减震结构来说,弹簧的刚度选取尤为重要,对于给定了压缩量的弹簧而言,刚度越大,对驱动轮提供的支撑力越大,其产生的抓地力就越大。但刚度过大时,当 AGV 遇到凸起障碍,提供的弹簧反力较大会使车体浮动,部分从动轮不能着地,导致出现滑移现象,影响小车运行的稳定性。现假定 AGV 在平面上 6 个轮子完全着地后,驱动轮的减震弹簧压缩量为 x_0 ,铰接点 2 和铰接点 3 之间的推杆刚好与地面垂直,减震弹簧刚度为 K ,路面起伏不平度为 $\pm\delta$ 。

2.1 凹陷路面

在凹陷路面上,减震弹簧反力会使驱动轮贴紧地面,因此需要保证驱动轮安装时有一定的外凸量,否则驱动轮会处于悬空状态。为了保证驱动轮不打滑,还需保证驱动轮的抓地力足够。AGV 凹陷路面受力分析如图 4 所示。

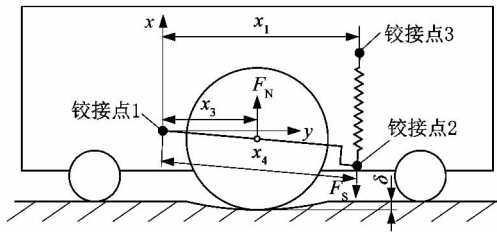


图 4 AGV 凹陷路面受力分析

Figure 4 Stress analysis of AGV on concave road

此时,驱动轮与地面的作用力:

$$F_N \cdot x_3 = F_S \cdot x_4 + mg \cdot x_3 \quad (5)$$

式中: x_3 和 x_4 分别为支撑力 F_N 和弹簧反力 F_S 到铰接点 1 的力臂。

以铰接点 1 为坐标原点建立坐标系,在平面时铰接点 2 的坐标为 $(x_1, -x_5)$,铰接点 3 的坐标为 (x_1, x_6) 。在凹陷地面时可以看作驱动轮绕铰接点 1 顺时针旋转了 θ 。旋转后铰接点 2 的坐标可由旋转矩阵算出为 $(x_1 \cos \theta - x_5 \sin \theta, -x_1 \sin \theta - x_5 \cos \theta)$ 。由此可进一步算出弹簧压缩量 x'_0 和弹簧力的力臂 x_4 :

$$x'_0 = x_0 + x_5 + x_6 -$$

$$\sqrt{2x_1^2 + x_5^2 + x_6^2 + 2x_1(x_5 + x_6) \sin \theta + 2(x_5x_6 - x_1^2) \cos \theta}; \quad (6)$$

$$x_4 = \frac{x_1(x_5 + x_6) \cos \theta + (x_1^2 - x_5x_6) \sin \theta}{\sqrt{2x_1^2 + x_5^2 + x_6^2 + 2(x_5x_6 - x_1^2) \cos \theta + 2x_1(x_5 + x_6) \sin \theta}} \quad (7)$$

式中: x_5 为平地路面时铰接点 1 和铰接点 2 的垂直距离, x_6 为平地路面时铰接点 1 和铰接点 3 的垂直距离。

AGV 在室内行驶时,地面较为平整,旋转角度 θ 较小,公式(6)和(7)可进一步简化为:

$$x'_0 = x_0 - x_1 \sin \theta; \quad (8)$$

$$x_4 = x_1 \cos \theta. \quad (9)$$

将式(8)和(9)代入式(1)和(4),可得:

$$K > \frac{(\mu_2 Mg - 2\mu_1 mg) \sqrt{x_2^2 - \delta^2}}{2\mu_1 x_1 (x_0 - x_1 \sin \theta) \cos \theta} \quad (10)$$

2.2 凸起路面

在凸起路面上,路面的外凸会使减震弹簧进一步压缩,驱动轮抬起,此时,驱动轮受到的地面反力最大。为了保证 AGV 所有轮子共同着地,则需保证弹簧的弹力小于 AGV 的总质量,避免其将 AGV 整体抬起,影响行驶的稳定性的 AGV 凸起路面受力分析如图 5 所示。

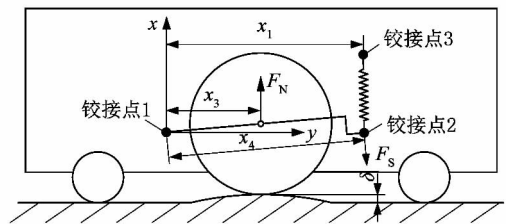


图 5 AGV 凸起路面受力分析

Figure 5 Stress analysis of AGV on convex road

此时,驱动轮与地面的作用力 F_N 需要保证:

$$2F_N < Mg。 \quad (11)$$

式中: M 为 AGV 空负载时总质量,取 200 kg。

在凸起地面时可以看作驱动轮绕铰接点 1 逆时针旋转了 θ 。旋转后铰接点 2 的坐标可由旋转矩阵算出为 $(x_1 \cos \theta + x_5 \sin \theta, x_1 \sin \theta - x_5 \cos \theta)$ 。同理可得此时的弹簧压缩量 x'_0 和弹簧力的力臂 x_4 :

$$x'_0 = x_0 + x_5 + x_6 -$$

$$\sqrt{2x_1^2 + x_5^2 + x_6^2 - 2x_1(x_5 + x_6) \sin \theta + 2(x_5x_6 - x_1^2) \cos \theta}; \quad (13)$$

$$x_4 = \frac{x_1(x_5 + x_6) \cos \theta - (x_1^2 - x_5x_6) \sin \theta}{\sqrt{2x_1^2 + x_5^2 + x_6^2 + 2(x_5x_6 - x_1^2) \cos \theta - 2x_1(x_5 + x_6) \sin \theta}}。 \quad (14)$$

当旋转角度 θ 较小时,公式(13)和(14)可进一步化简为:

$$x'_0 = x_0 + x_1 \sin \theta; \quad (15)$$

$$x_4 = \frac{x_1}{\cos \theta}。 \quad (16)$$

将公式(15)和(16)代入公式(4)和(11)得:

$$K < \frac{(Mg - 2mg) \sqrt{x_2^2 - \delta^2} \cos \theta}{2x_1(x_0 + x_1 \sin \theta)}。 \quad (17)$$

根据驱动轮所选直径 160 mm 以及安装尺寸要求,选定 $x_0 = 30$ mm, $x_1 = 192$ mm, $x_2 = 90$ mm, $x_5 = 32$ mm, $x_6 = 74$ mm, $\delta = 5$ mm,代入公式(10)和(17)可以求出此时的弹簧刚度要求为 1.19 N/mm $< K < 10.7$ N/mm。

3 ADAMS 运动仿真及分析

3.1 模型的建立

在 SolidWorks 中建立好 AGV 的三维模型后,导入到 ADAMS 运动学仿真软件中,AGV 仿真模型如图 6 所示。在车架与万向轮支架之间添加固定副;在万向轮与转轴之间以及驱动轮 3 个铰接点处添加转动副;在铰接点 2 和铰接点 3 之间除了弹簧还存在一个推杆结构,需要设置移动副和平行副;驱动轮和地面之间需要设置接触力,并添加摩擦因数。

为了模拟实际路面的凸起和凹坑,在路面模型的表面上分别建立高度 5 mm 的凸起障碍和深度 5 mm 的凹坑障碍,二者之间的距离需要大于车身长度。地

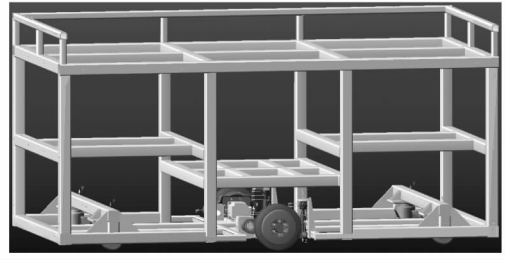


图 6 AGV 仿真模型

Figure 6 Simulation model of AGV

面的材料设置为混凝土。分别给 2 个驱动轮的转动副添加驱动,设置 AGV 经过 3.0 s 从 0.0 m/s 加速至 1.2 m/s,之后保持匀速行驶,仿真时间为 10.0 s。

3.2 运动仿真结果及分析

根据力学分析的结果,选定 3 种刚度分别为 4.46, 5.65 和 6.98 N/mm,原长均为 110 mm 的弹簧进行仿真分析。

3.2.1 满载直线行驶

图 7 所示为驱动轮与地面接触力变化情况。从图中可以看出,接触力在 AGV 运行前 3.00 s 加速启动阶段先是增大,随后减小,稳定后数值与力学计算结果接近。小车在 4.00 ~ 5.50 s 时经过凹陷障碍,因为驱动轮与地形产生碰撞,接触力出现一定的波动。在 6.50 ~ 8.00 s 时越过凸起障碍,接触力出现峰值 836 N。分析可得,弹簧刚度越大,驱动轮与地面接触力越大,产生的驱动力也越大;但是驱动轮本身承受压力有一定范围,接触力过大会对驱动轮本身产生损坏,同时较大波动的接触力也不利于小车的稳定行驶。

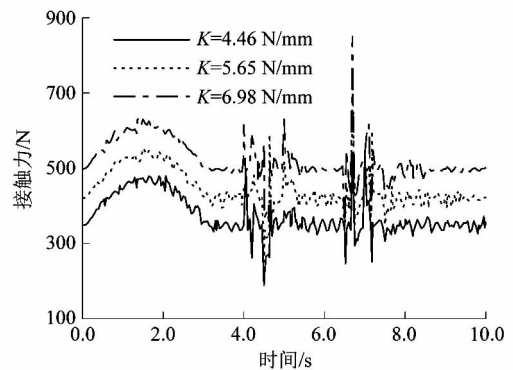


图 7 驱动轮与地面接触力曲线

Figure 7 Contact force curve between driving wheel and road

图8和图9所示为AGV行驶过程中4.80~5.40 s时的底架质心位移曲线和车身俯仰角曲线。在AGV稳定行驶时,3种情况的质心高度几乎一样,小车的车身俯仰角接近 0° ,说明小车与地面保持平行。在4.90~5.20 s时小车驱动轮从凹陷障碍爬出,质心高度和俯仰角出现波动,2个变量一定程度上反应了小车运行的稳定性。从图中可以看出,弹簧刚度为4.64和6.98 N/mm时,质心高度和俯仰角曲线斜率的绝对值较大,说明此时车身的波动较大,行驶状况不如弹簧刚度为5.65 N/mm表现的稳定。同时,弹簧刚度为4.64 N/mm时,2种曲线变化都有一定的延时,说明当弹簧刚度较小时,驱动轮会与地面发生打滑。

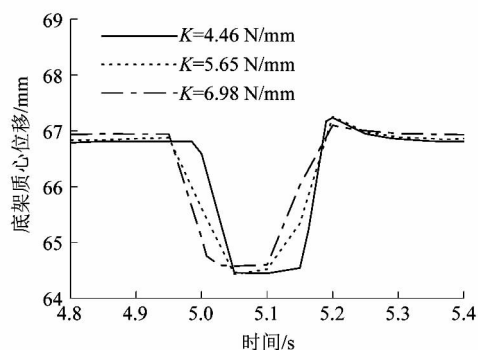


图8 底架质心位移曲线

Figure 8 Center of mass displacement curve of underframe

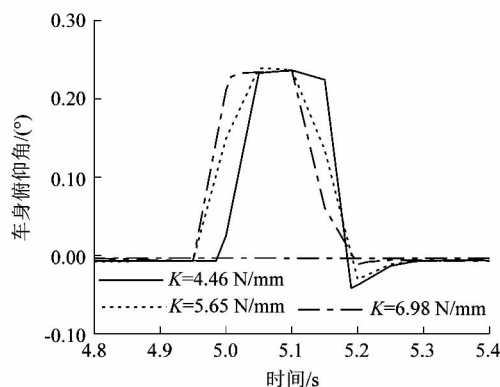


图9 车身俯仰角曲线

Figure 9 Pitch angle curve of car body

AGV在满载情况下对弹簧刚度差异的敏感度更高,并且满负载更能体现出AGV行驶过程中的极端情况。根据以上仿真分析结果明显看出,在弹簧刚度

度为5.65 N/mm时,AGV在凹凸路面行驶的状况最佳。

3.2.2 空载直线行驶

图10和图11所示为弹簧刚度为5.65 N/mm时,在空载和满载情况下AGV底架质心位移曲线和车身俯仰角曲线。可以看出,空载情况下,AGV底架的质心高度较满载时上升2 mm左右,在经过凹凸障碍时,质心高度的波动较大,相比较满载情况下行驶,出现更高的尖点;在经过凹凸障碍时,车身俯仰角的波动也较大,只是空载和满载时差别不大。这是由于在空载时, M 变小,受到波动的影响更大,运行的稳定性反而不如满载时;但满载情况下小车对驱动轮的抓地要求更高,并且容易出现打滑现象。

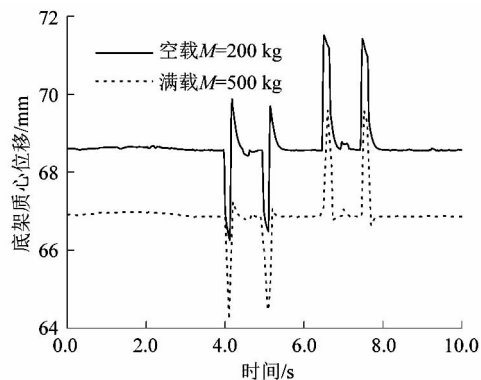


图10 底架质心位移曲线

Figure 10 Center of mass displacement curve of underframe

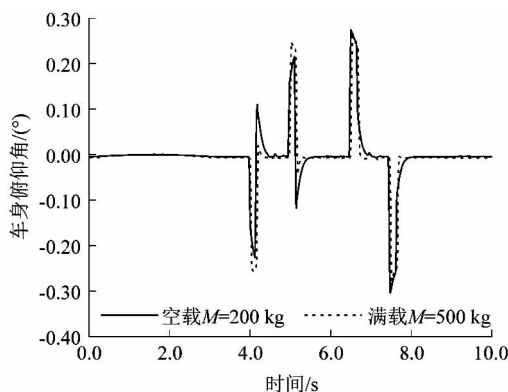


图11 车身俯仰角曲线

Figure 11 Pitch angle curve of car body

4 结语

课题组针对AGV行驶稳定问题设计了一款6轮

差动铰接减震式 AGV,建立了 AGV 力学模型,对驱动轮受力情况进行分析,再根据结构空间限制,初步选取减震结构的尺寸和减震弹簧的参数。通过 ADAMS 软件,对 AGV 满载和空载情况下在凹凸路况下行驶的稳定性进行分析,最终选取弹簧刚度为 5.65 N/mm。仿真结果表明,设计的 AGV 在空载和满载情况下均能较好的通过地面的凹凸障碍。进一步的研究可以对 AGV 的结构尺寸进行优化,提高其运动性能。

参考文献:

- [1] 姚建余,林义忠,黄斌鹏,等. AGV 减震弹簧刚度的选择及仿真[J]. 装备制造技术,2016(2):13.
- [2] 刘书婷. 自动导航小车(AGV)驱动与导航系统的研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2011:1-2.
- [3] 梁睿,杨黎明. AGV 在智能化物流系统中的应用[J]. 起重运输机械,2019(4):66-68.
- [4] 鲁飒. 车间四轮独立转向 AGV 驱动单元运动稳定性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019:1.
- [5] 周驰东. 磁导航自动导向小车(AGV)关键技术与应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012:1.
- [6] 车睿,陈金,陆久云. 基于 ADAMS 的货叉式 AGV 稳定性研究[J].

机电产品开发与创新,2015,28(3):93-95.

- [7] 王奉晨,高宏力,宋兴国,等. 全地形六轮移动机器人的设计与制作[J]. 机械设计与制造,2020(5):253-256.
- [8] 张瑞,卢林芳,王婷婷. 基于动力学分析的差速驱动 AGV 原地转向稳定性研究[J]. 机械设计与制造,2021(9):140-144.
- [9] 暴海宁,宋科,黎原,等. 差速驱动六轮导引车运动轨迹分析[J]. 火控雷达技术,2015,44(2):96-100.
- [10] 闫国荣,张海兵. 一种新型轮式全方位移动机构[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,33(6):854-857.
- [11] 韩乐. AGV 常见减震浮动结构对比分析[J]. 中国设备工程,2020(10):130-134.
- [12] 蒋小龙. AGV 差速驱动单元的减震结构设计[J]. 机械工程与自动化,2017(1):142-143.
- [13] 周益林,曹志宏,刘佳斌,等. 一种油桶搬运用 AGV 小车减震装置的设计[J]. 包装与食品机械,2019,37(1):44-49.
- [14] 曹冲振,王洪祥,徐杰,等. AGV 的设计计算和不平路况下运行稳定性的仿真分析[J]. 物流技术与应用,2019,24(4):128-131.
- [15] 杨建强,焦学健,杨磊,等. 新型室外重载 AGV 机械结构设计与分析[J]. 农业装备与车辆工程,2021,59(9):54-58.

(上接第 71 页)

增加机械臂的工作寿命。

进一步研究应结合时间-能量-冲击等方面进行,以提高机械臂的性能。

参考文献:

- [1] 郭勇,赖广. 工业机器人关节空间轨迹规划及优化研究综述[J]. 机械传动,2020,44(2):154.
- [2] KOHRT C, STAMP R, PIPE A G. An online robot trajectory planning and programming support system for industrial use[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2013, 29(1):71-79.
- [3] 张鑫,杨棉绒,郝明. 五自由度关节式机械臂运动学分析与仿真[J]. 机械设计与制造,2017,312(2):9-12.
- [4] 蔡永超. 机械臂关节空间轨迹的时间最优智能规划研究[J]. 机械设计与制造,2020,349(3):272-276.
- [5] 付泽民,余奇,熊鹏鹏,等. 基于改进人工势场法的机械臂路径规划仿真[J]. 机床与液压,2021,49(17):20-24.

- [6] 陈晗,李林升. 基于复合形法的时间最优机械臂轨迹规划[J]. 机械传动,2019,43(3):72.
- [7] 居鹤华,付荣. 基于 GA 的时间最优机械臂轨迹规划算法[J]. 控制工程,2012,19(3):472.
- [8] 马振书,张云峰,孙华刚,等. 排爆机械臂多目标轨迹规划研究[J]. 振动与冲击,2016,35(2):116.
- [9] 王怀江,刘晓平,王刚,等. 基于改进遗传算法的移动机械臂拣选路径优化[J]. 北京邮电大学学报,2020,43(5):34.
- [10] 邓颢,张潇,龙勇,等. 基于五次 B 样条的起竖装置时间最优轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016(6):21.
- [11] 王毅,滕举元,张哲,等. 六自由度采摘机械臂采摘姿态规划研究[J]. 机械设计与制造,2019,342(8):235-238.
- [12] 梅阳寒,张锐豪,张文龙,等. 一种六自由度机械臂的振动特性研究[J]. 机电工程,2020,37(6):671-676.
- [13] 皮格. 非均匀有理 B 样条[M]. 北京:清华大学出版社,2010:79-82.