

doi: 10.7690/bgzdh.2023.08.015

轮足混合式移动机器人转向机构力学特性分析

卫 伊¹, 刘 勇², 徐震宇², 王会彬¹, 高学山¹

(1. 北京理工大学机电学院, 北京 100081; 2. 内蒙古第一机械集团股份有限公司科研院所, 内蒙古 包头 014000)

摘要: 为适应山地等复杂地形的要求, 设计一种适用于轮足混合式移动机器人的新型转向机构。对其进行整体受力分析与关键零部件受力分析, 建立理论上的受力分析公式; 利用 Solidworks Simulation 对关键零部件进行静力学仿真分析实验, 并将仿真结果与理论分析结果进行比较。结果表明: 该转向机构具备可靠性, 能解决传统转向机构不能将车轮大幅度抬起的问题。

关键词: 移动机器人; 转向机构; 静力学分析; Simulation

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Mechanical Characteristics Analysis of Steering Mechanism of Wheel-foot Hybrid Mobile Robot

Wei Yi¹, Liu Yong², Xu Zhenyu², Wang Huibin¹, Gao Xueshan¹

(1. School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Research Institute, Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd., Baotou 014000, China)

Abstract: In order to meet the requirements of complex terrain such as mountains, a new steering mechanism suitable for wheel-foot hybrid mobile robots is designed. The overall force analysis and the force analysis of key parts are carried out, and the theoretical force analysis formula is established; the static simulation analysis experiment of key parts is carried out by Solidworks Simulation, and the simulation results are compared with the theoretical analysis results. The results show that the steering mechanism is reliable and solves the problem that the traditional steering mechanism cannot lift the wheel greatly.

Keywords: mobile robot; steering mechanism; static analysis; Simulation

0 引言

传统的轮式移动机器人的转向机构通常采用的结构形式有齿轮齿条式^[1-2]、蜗杆曲柄销式^[3]和循环球式^[4]。移动机器人的车轮轮毂转向节臂通过外拉杆与内拉杆实现与动力转向器相连, 动力转向器能够实现车轮的左右转向功能^[5], 转向横内拉杆与机械动力转向器采用铰链的连接形式, 该方式可以承受移动机器人在行驶过程中车轮的小幅度径向跳动, 适用于平坦路面上行驶和普通轮式移动机器人。

虽然传统的转向机构能够满足大部分轮式移动机器人的需要, 但在高速、复杂地形、重载与高山等复杂应用环境下难以满足需要。为满足特殊情况下车辆^[6]与铁路^[7]的转向需要, 越来越多的转向机构被研究并应用。2011年, 军事交通学院设计了一款应用于特种车的转向轮4连杆结构。此结构以传力比的最大值为目标, 以边界、性能、几何约束为约束条件^[8], 在约束条件允许的情况下, 转向

结构的传力性能达到了最优。2014年, 广州地铁设计了一款用于直线电机车辆转向的转向架结构^[9]。该结构已经应用于地铁工作中, 并具有良好的应用效果。2020年, 西南交通大学设计了一款悬挂式PRT车辆转向架结构, 该转向架以轮毂电机为驱动装置, 电动缸提供制动原动力, 牵引悬挂系统放置在轨道梁下方, 同时添加自主转辙装置, 可实现自主过道岔功能, 其特点在于整体结构紧凑, 易于智能化控制^[10]。

虽然许多研究对转向结构都进行了优化或新的设计, 但针对在山地环境中使用的特殊移动机器人, 尤其是轮足混合式构型^[11]的移动平台, 此类的转向机构难以完成应用需求。特别是在崎岖山地中行驶时, 当车轮无法满足使用要求时需要切换至足式, 此时需要将轮足混合式移动机器人的车轮升起, 由于这种情况下车轮的升降幅度比车轮行驶过程中的径向跳动幅度大得多, 当车轮上下移动幅度超过传统转向器结构能承受的范围时, 会导致传统

收稿日期: 2023-04-21; 修回日期: 2023-05-20

作者简介: 卫 伊(1999—), 女, 河北人, 硕士。

动力转向器结构的损坏；因此，传统的转向器不能用于这类轮足混合式移动机器人。为解决此问题，笔者提出一种具备轮足混合移动方式的山地运行特种车辆转向机构，重新设计并改进了转向摇臂、内拉杆、外拉杆等结构，可解决传统动力转向器在用于轮足混合式移动机器人时，当车轮上下移动幅度较大时，转向器结构会损坏的问题。

1 转向机构设计

笔者所提结构是一种通过球铰转动结构与左右摇臂、左右转向节臂相连的组合形式，实现车轮左右转向功能和上下移动功能的新型机械式动力转向器结构。该结构具有结构简单、使用方便的特点，可以在传统转向器的基础上，解决当车轮上下移动较大幅度时，会导致动力转向器结构损坏的问题，从而满足轮足混合式移动机器人的需求。此外，笔者还对移动机器人做出整体结构性的改变，使车辆在特定情况下可以切换轮式与足式的移动方式，使车辆运行更加稳定，解决了车轮大幅度升降会导致转向器结构损坏的问题。

针对以上设计要求和基本要求，笔者设计了如图 1 所示的动力转向系统结构。

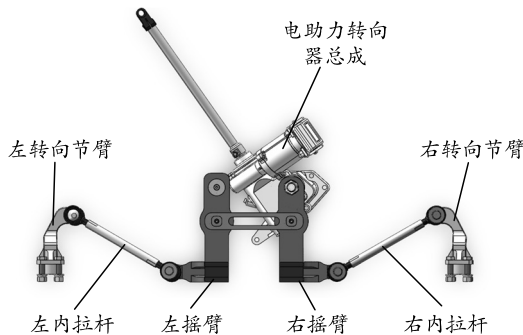


图 1 转向系统结构设计

图中：电助力转向器通过连接左右摇臂控制移动机器人的转向，摇臂连杆可以保证左右摇臂转向保持一致，不会出现车轮内外八字的情况；左右内拉杆通过球铰连接摇臂和转向节臂，球铰结构可以保证车轮在需要升起时的灵活大范围移动，不会因为大幅度径向移动而造成转向结构的损坏。该结构解决了传统转向系统的问题，可应用于轮足混合式移动机器人，保证轮足 2 种移动方式的自由切换。

2 转向机构力学分析

为保证转向机构在结构上满足力学要求，对转向传动系统进行了静力学分析。图 2 为转向机构运动简图。

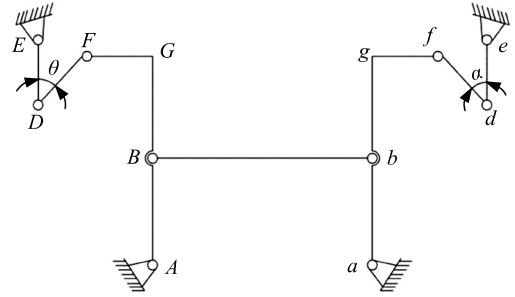


图 2 转向机构运动

图中： θ 为连杆 DF 与 DE 的夹角； α 为连杆 df 与 de 的夹角。现假定移动机器人总重量为 m ，车轮数量为 k ，车轮宽度为 l ，车轮半径为 R ， F_i 为节点 i 所受合力；各节点间的直线距离为 l_{xy} ，其中 x 与 y 为节点编号。故单个车轮所受的压力为：

$$F_{Ee} = mg/k \tag{1}$$

不同路面的摩擦系数如表 1 所示。

表 1 摩擦系数

| 路面 | 滚动摩擦系数 | 滑动摩擦系数 |
|-----|--------|--------|
| 混凝土 | 0.010 | 1.00 |
| 沥青 | 0.012 | 0.90 |
| 碎石 | 0.015 | 0.90 |

根据上表，由于移动机器人在碎石路面运动的时间较多，车轮经常接触碎石路面，取滑动摩擦系数为 $f=0.9$ 。

故车轮所受摩擦阻力为：

$$F_f = mgf/k \tag{2}$$

根据转向机构运动简图，在刚刚发生转向时有：

$$F_f l/2 = F_D R \sin \theta; \tag{3}$$

$$F_D = F_f; \tag{4}$$

$$F_f \sin \theta l_{GB} = F_A l_{AB}; \tag{5}$$

$$F_B = F_f \sin \theta + F_A; \tag{6}$$

$$F_B = F_b; \tag{7}$$

$$F_b l_{ab} = F_f l_{ga} \sin \alpha; \tag{8}$$

$$F_a = F_b + F_f; \tag{9}$$

$$F_f = F_d \tag{10}$$

故各节点所受合力为：

$$\left. \begin{aligned} F_D &= F_f = mgf/2kR \sin \theta \\ F_B &= F_b = mgf/2kR + mgf l_{GB} l/2kR l_{AB} \\ F_A &= mgf l_{GB} l/2kR l_{AB} \\ F_a &= mgf/2kR + mgf l_{GB} l/2kR l_{AB} + \\ &\quad mgf l_{ab} l/2kR l_{ga} \sin \alpha + mgf l_{GB} l/2kR l_{AB} \sin \alpha \\ F_f &= F_d = mgf l_{ab} l/2kR l_{ga} \sin \alpha + \\ &\quad mgf l_{GB} l/2kR l_{ga} \sin \alpha \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

3 转向机构力学仿真

根据力学分析结果，转向系统的关键受力部件有：左转向摇臂、右转向摇臂、横向内拉杆与转向摇臂连杆。笔者采用 Solidworks Simulation 对以上几个关键受力部件进行了静力学仿真分析，仿真结果如图 3—6 所示。

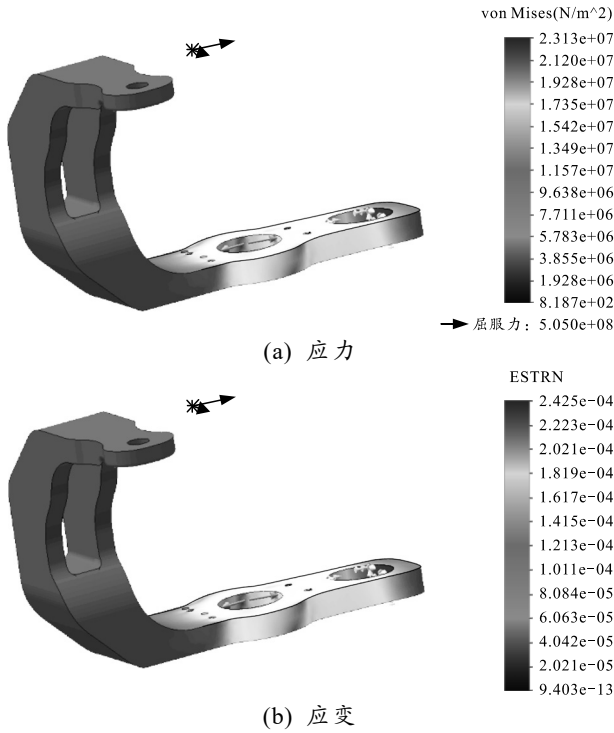


图 3 左转向摇臂仿真结果

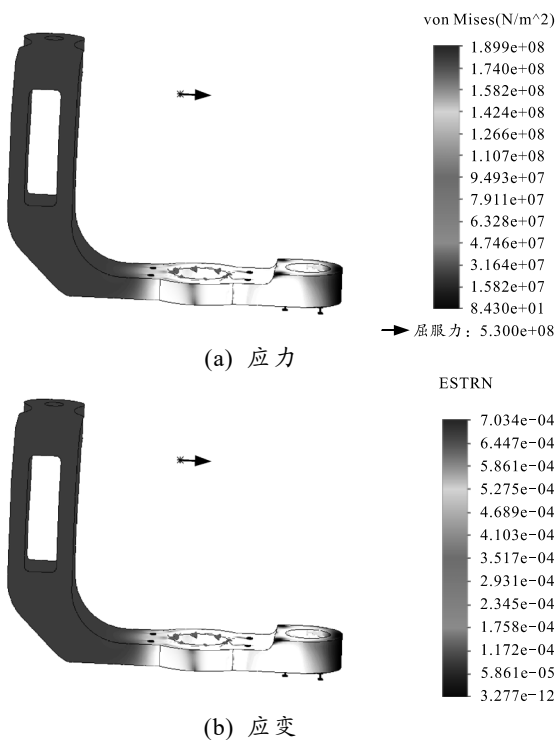


图 4 右转向摇臂仿真结果

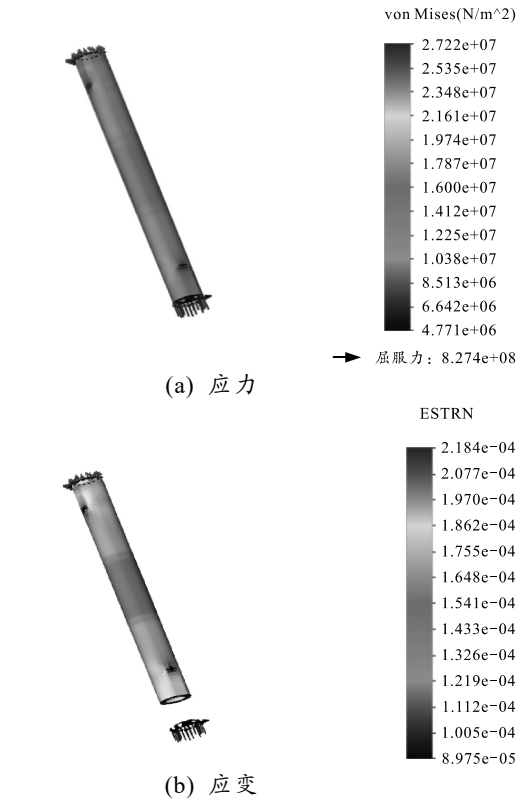


图 5 左横向内拉杆仿真结果

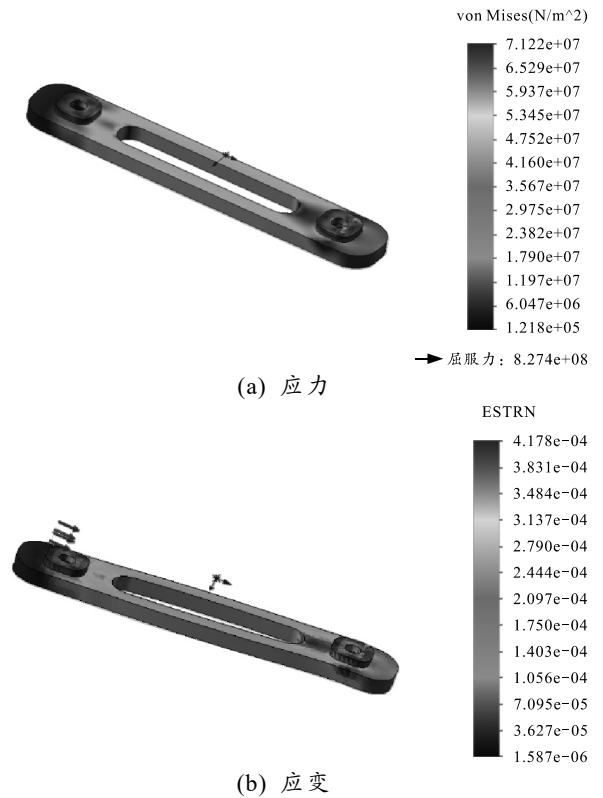


图 6 转向摇臂连杆仿真结果

由于转向机构的主要受力零部件需受拉压应力的影响，故零件材料选择高耐候钢 Q295GNHB，这种材料的屈服极限为 295 MPa。

图 3 为左转向摇臂仿真结果, 通过图 3(a)可见, 左转向摇臂在刚发生转向情况下的最大应力为 23.13 MPa, 小于材料的屈服极限, 符合应力要求; 由图 3(b)可见, 左转向摇臂的最大形变量为 0.242 5 mm, 结合零件尺寸, 该形变量不会导致零件损坏, 因此符合应变要求。综上分析, 左转向摇臂符合设计要求。

图 4 为对右转向摇臂的仿真结果, 由图 4(a)可见, 右转向摇臂在刚发生转向情况下的最大应力为 189.9 MPa, 小于材料的屈服极限, 符合应力要求; 由图 4(b)可见, 右转向摇臂的最大形变量为 0.703 4 mm, 结合零件尺寸, 该形变量不会导致零件损坏, 符合应变要求。综上分析可知, 右转向摇臂符合设计要求。

图 5 为左侧横向内拉杆的仿真结果, 由图 5(a)可见, 左侧横向内拉杆在刚发生转向情况下的最大应力为 27.22 MPa, 小于材料的屈服极限, 说明左横向内拉杆符合应力要求。由图 5(b)可见, 左侧横向内拉杆的最大形变量为 0.218 4 mm, 结合零件尺寸, 该形变量不会造成零件损坏; 因此, 该零件也符合应变要求, 左侧横向内拉杆符合设计要求。由于右侧横向内拉杆与左侧是对称的, 仿真结果基本一致, 可以说明右侧横向内拉杆也符合设计要求。

图 6 为转向摇臂连杆的仿真结果, 由图 6(a)可见, 转向摇臂连杆在刚发生转向情况下的最大应力为 71.22 MPa, 小于材料的屈服极限, 符合应力要求; 由图 6(b)可见, 转向摇臂连杆的最大形变量为 0.417 8 mm, 结合零件尺寸, 该形变量不会导致零件损坏, 符合应变要求。因此, 转向摇臂连杆符合设计要求。

通过以上 Simulation 静力学仿真结果可知: 应力发生的最大位置在右转向摇臂, 由于右转向摇臂直接与电助力转向器相连, 因此受力最大符合实际情况, 且以上几个部件的最大应力均不超过材料的屈服极限, 都符合要求, 不会在正常使用过程中发生损坏, 即笔者所提动力转向器具有可行性与可靠性。

4 结束语

笔者针对当车轮上下移动幅度较大时转向器结构会损坏的问题, 并结合轮足混合式移动机器人的

运动需要, 设计一种适用于轮足混合式移动机器人的转向机构。

为保障该转向机构在运动过程中的可靠性, 笔者对该机构进行力学模型的建立, 通过机构力学运动简图, 对转向机构进行整体力学分析和公式建立。之后, 结合整体力学分析, 总结出关键的受力部件主要是右转向摇臂、左转向摇臂、转向摇臂连杆以及两侧的横向内拉杆。

然后, 笔者利用 Simulation 静力学仿真, 对以上几个关键受力部件进行静力学仿真分析, 在理论上对关键受力部件进行力学校核, 通过仿真结果可知, 右转向摇臂所受应力最大, 为 189.9 MPa, 该应力小于材料的屈服应力 295 MPa, 并且其他几个关键受力部件的应力均小于材料的屈服应力; 因此, 该转向机构符合应力应变要求, 可以投入实际应用, 具有可行性与合理性。

参考文献:

- [1] 林逸, 施国标. 汽车电助力转向技术的发展现状与趋势[J]. 公路交通科技, 2001, 18(3): 79-82.
- [2] GUPTE V V, WILLIAMS D, SHERWIN K. Electrically powered hydraulic steering on medium duty trucks[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2010, 3(1): 1-8.
- [3] 刘均. 高速货车转向架结构设计及构架强度分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [4] 施国标, 杨丽鑫, 赵万忠, 等. 电动推杆式电助力转向装置: CN101450677A[P]. 2009-06-10.
- [5] 杨胡飞. 重型车转向系统路感跟踪控制策略研究[D]. 十堰: 湖北汽车工业学院, 2019.
- [6] 朱健伟, 王伯铭, 刘莉. 悬挂式 PRT 车辆转向架设计与分析[J]. 机车电传动, 2020(3): 122-126.
- [7] 梁云, 贾洪龙, 张英春, 等. 200 km/h 速度铁路客车转向架设计[J]. 机车电传动, 2020(6): 120-125.
- [8] 张德坤, 李立顺, 孟祥德. 基于 Matlab 的某特种车转向轮四连杆机构设计[J]. 专用汽车, 2011(7): 64-67.
- [9] 漆瑾. 直线电机车辆转向架的研制与优化[J]. 机车电传动, 2015(6): 53-55, 59.
- [10] 朱健伟, 王伯铭, 刘莉. 悬挂式 PRT 车辆转向架设计与分析[J]. 机车电传动, 2020(3): 122-126.
- [11] 裴永臣, 方宇明, 王子扬, 等. 多适应性轮足切换移动平台设计与分析[J]. 北华大学学报, 2018, 19(3): 417-420.