

折叠手推车多关节联动机构运动学分析与优化设计

简炜明

广东顺和工业有限公司 广东阳江 529500

摘要: 折叠手推车凭借便携优势广泛应用,多关节联动机构是其核心,直接决定折叠性能、稳定性与用户体验。当前部分产品存在折叠繁琐、运动不协调、结构刚性不足等问题,制约竞争力。本文梳理联动机构典型结构,分析运动问题与影响因素,从自由度、运动链、协调性等维度剖析运动学特性,明确干涉与奇异性机理,进而从折叠便捷性、结构稳定性、用户体验角度提出优化策略,为产品设计改进提供理论支撑。

关键词: 折叠手推车;多关节联动机构;运动学分析

折叠手推车兼具承载与便携特性,其核心价值通过多关节联动机构实现形态切换,大幅缩减闲置空间。随着物流发展、户外需求增长及家庭便捷工具需求提升,其应用场景已覆盖搬运、出行、家居等领域。多关节联动机构作为核心架构,直接决定产品品质与市场竞争力。理想的联动机构需满足折叠顺畅、展开稳固、操作清晰的要求,但运动灵活性与结构刚性的平衡始终是设计难题。多关节虽提升运动自由度却削弱刚性,减少关节则牺牲便携性,这一矛盾导致部分产品存在操作繁、卡顿、承载弱等问题。运动学分析是解决设计难题的核心工具,可明确运动范围、优化构件匹配、排查故障。本文以联动机构为研究核心,开展运动学分析并提出优化策略,为产品改进提供理论支持,推动行业品质升级。

一、折叠手推车联动机构的现状与设计难点

(一) 折叠手推车联动机构的典型结构形式

折叠手推车联动机构主要由车架、车轮和扶手三大核心部件构成,通过转动副与滑动副的合理组合与配置,实现整车的平稳折叠与展开功能。整个机构的运动形式与操作效率高度依赖于运动副的类型选择与结构设计。根据折叠运动所涉及的维度数目以及构件之间的联动方式,目前主流结构可划分为以下三种类型,分别具备不同的结构特点和适用场景。单维度折叠机构作为最基础的折叠形式,其运动方式围绕单一轴线进行转动折叠,结构核心通常为设置在车架中部的铰链关节。用户只需解锁机构并推动扶手,即可驱动车架沿中轴线对折,同时带动两侧车轮向内收拢。此类机构构件数量较少,运动链结构简单明了,制造成本较低,广泛适用于家庭日常使用及轻型物流运输场景;然而受限于单一折叠方向,

其收纳后的体积压缩程度较为有限。双维度折叠机构在纵向对折基础上增加了横向收缩功能,通过增设横向关节实现二维复合运动,属于结构升级类型。其折叠过程具有明确的时序逻辑:首先完成纵向对折以缩减整体长度,再进行横向宽度收缩,部分设计还融合了车轮转向关节以进一步优化收纳体积。这种机构折叠后的紧凑性显著优于单维结构,尤其适合户外露营、车载携带等对空间要求较高的场景,但其运动链结构相对复杂,对制造精度要求更高,成本也相应提升。多连杆联动机构代表了高端折叠手推车的发展方向,其通过多组连杆构件构成闭合运动链,能够以单一操作动作实现多个构件的同步联动折叠。部分高端产品还引入弹性元件提供辅助力,使得操作过程更为省力流畅,用户体验优越,同时在展开状态下结构稳定性强。然而,多连杆机构设计复杂度高,对加工精度和材料性能要求苛刻,制造成本居高不下,因此主要应用于中高端商用及专业级产品^[1]。

(二) 现有机构在运动过程中的主要问题

受结构设计、制造精度以及成本控制等多方面因素的综合影响,当前市面上常见的折叠机构普遍存在以下几类突出问题,制约了产品性能的进一步提升与行业健康发展。运动协调性差是一类常见问题,具体表现为机构中各构件在运动过程中无法实现良好同步,出现卡滞、顿挫甚至动作中断。在单维度折叠机构中,常因铰链关节加工精度不足导致两侧侧梁转动不同步;双维度机构则可能因时序控制机构失效引发纵向折叠与横向收缩动作间的相互干扰;多连杆机构对构件尺寸和装配精度极为敏感,微小的尺寸偏差或关节磨损都易破坏原有运动同步性,严重时甚至会导致机构进入半锁死状态。

关节锁定可靠性不足直接威胁使用安全，尤其在中低端产品中，采用单一插销锁定方式的机构易因插销磨损、变形或配合间隙增大而导致锁定失效；多连杆机构中常见的摩擦锁定机构则受环境温湿度、灰尘等因素影响较大，稳定性不足。此外，不少产品的锁定机构缺乏清晰的操作反馈（如明确的“咔哒”声或手感），用户难以判断是否锁定到位，极易因操作疏忽引发安全事故。构件之间的运动干涉与局部应力集中问题显著缩短了产品的使用寿命。在追求极致紧凑的折叠机构中，若前期设计仿真分析不足或制造精度偏低，极易在折叠过程中发生构件间的动态碰撞与干涉。应力集中现象则多发于铰链关节、截面突变区域以及薄壁构件处，设计中的直角过渡、薄弱环节在反复载荷下易萌生疲劳裂纹，最终导致断裂失效。

（三）影响折叠性能与用户体验的关键因素

折叠手推车的最终性能表现与用户使用体验主要由三大类关键因素共同决定，它们相互关联、相互影响。结构设计是基础，其中折叠体积压缩比与运动过程顺畅性需要取得平衡，过度追求极致的折叠体积往往以增加结构复杂度和降低可靠性为代价；所有运动关节的配合间隙必须得到精准控制，既要保证折叠灵活性，又要在展开后提供足够的结构刚性，任何晃动或松垮都会削弱用户对产品安全性的信任。操作逻辑设计至关重要，简化的折叠/展开步骤能显著降低用户的学习成本和使用门槛，对于老年用户尤为友好；而清晰的操作反馈，如清脆的锁定声响、明确的到位手感，能极大提升用户的操作确定性和安全感，避免因误操作导致的风险。人机工程学应用直接影响使用舒适度，所需的操作力度应适配不同年龄段和体力水平的用户群体，设计不合理的扶手形状或尺寸容易导致长时间操作时手部疲劳；折叠后的手提位置设置、整体重量分布以及抓握舒适度都需经过精心设计，以最大化提升携带与运输的便捷性^[2]。

二、多关节联动机构的运动学特性分析

（一）机构自由度与运动链的构成分析

机构自由度是判断运动可能性的核心参数，折叠手推车联动机构为平面运动机构，以低副连接为主，直接决定能否实现预期动作。自由度的“释放-锁定”是设计核心：展开时仅保留车轮滚动自由度以保稳固，折叠时解锁特定关节供机构按轨迹运动。锁定失效易导致晃动，过度锁定则阻碍运动。运动链以原动件（扶手/侧梁）带动从动件（车轮支架）运动，单维度机构采用开

式链，传递清晰但需独立控制各关节协调性。多连杆机构采用闭合链，通过构件约束自动同步运动，简化操作但对加工精度要求高，尺寸误差易影响运动精度，可通过优化润滑提升传递效率。

（二）折叠与展开过程中的运动协调性分析

运动协调性指各关节速度与位移的匹配度，确保无干涉且高效转换，可通过速度关系与位移规律分析，反映构件相对运动状态。构件运动速度需平滑，单维度机构需稳定扶手与车轮支架转速比；双维度机构需按比例控制对折与收缩速度，通过时序避免动作冲突。协调性与力传递相关，多连杆机构可通过优化连杆比例实现省力，不合理设计易导致操作力集中；运动力波动需控制在小范围，保证手感平稳。合理阻尼可使运动平稳，关键关节设置弹性阻尼元件能避免冲击与噪音，高端产品可采用可调阻尼进一步优化体验。

（三）机构运动过程中的干涉与奇异性问题

干涉与奇异性直接影响机构运动可行性，需在设计阶段通过运动学分析提前规避。干涉包括构件碰撞与空间干涉，源于设计仿真不足或精度把控不严，需在设计与生产环节双重控制。解决干涉需通过仿真确定安全间隙，按功能区分构件公差等级，采用避让式设计并通过样机测试排查隐患。奇异性指机构在特定位置出现自由度突变，多因运动链几何关系不合理，关键构件共线易导致运动不确定。解决奇异性需优化连杆比例避开共线位置，设置弹性定位装置引导运动，通过仿真提前识别并调整结构消除隐患^[3]。

三、联动机构的优化设计策略与方法

（一）以提升折叠便捷性为目标的优化策略

提升折叠便捷性需致力于简化操作步骤并降低所需施力，具体可从运动链结构设计、省力系统构建与运动轨迹优化三个主要维度展开。在运动链结构方面，将传统的开式链结构调整为闭合多连杆机构，可实现多个关节的协同运动，从而显著提高操作连贯性；同时，采用一键式弹性自锁机构替代传统复杂锁定方式，既可提升操作效率，亦能适应多样化使用场景。在省力设计层面，应优化原动件与连杆之间的长度比例以增大力臂，并通过力学仿真确保操作力在整个运动过程中保持平稳；对于关键转动节点，可引入弹簧或气动助力元件，重型产品甚至可配置电动助力系统以进一步降低人力操作强度。在轨迹优化方面，需借助多体动力学仿真手段确保构件运动平滑且无路径干涉，合理调整关节运动时序与空间

位姿以避免结构冲突；对易发生干涉的区域设置导向槽或限位装置，复杂机构可采用分段式轨迹规划策略，并辅以高性能润滑材料，全面提升操作过程的顺畅性与用户体验^[4]。

（二）以增强结构稳定性与可靠性为目标的优化策略

增强结构稳定性与可靠性需系统性地优化关节锁定机制、构件结构强度与整体受力分布，确保产品在展开状态下具备优异稳固性，并在长期使用中保持性能可靠。锁定机构可采用主-辅助双保险策略，主锁定点承担主要载荷，辅助锁定装置则用于防止意外松脱；同时应根据实际应用场景强化锁具结构，合理控制解锁力大小以实现可靠性与操作便捷性的统一。在构件强度方面，需结合有限元分析优化截面构型与材料选用，优先采用高强度铝合金或复合材料，并通过精确计算确定最优壁厚参数；关键关节部位宜采用一体成型工艺或机器人高精度焊接，同时辅以防腐蚀与耐磨处理以延长使用寿命。在力学性能优化上，应借助拓扑优化技术调整构件形态与布局，采用分布式多点连接设计以避免应力集中现象；通过动态载荷分析平衡多连杆机构中的内力分布，对高承载关节配置高强度滚动轴承，并在重型产品中增设加强肋与框架结构以提升整体刚性。

（三）以改善用户操作体验为目标的优化策略

改善用户操作体验需深度融合人机工程学原理，从操作手感设计、反馈机制建立与使用细节优化等多方面系统提升产品易用性与舒适度。操作部件应选用高摩擦系数且触感舒适的材料包覆，并根据人体手型尺寸数据优化握持部分的形态与比例；锁定按钮须布置在自然操作姿态下易于触及的区域，并精细调控其按压行程与操作阻力，重型产品可进一步配备高度与角度可调的辅助扶手装置。在用户反馈方面，应结合听觉与触觉双重提示机制，如在关键动作完成时提供清晰声响反馈与定位触感；同时可在重要操作位置设置高对比度的色彩或发光标识，折叠后应形成稳定的自立结构，小型产品还可增加挂孔或磁吸定位功能以提升收纳便利性。在细节设计上，应采用大直径且宽胎面的耐磨轮组以减少移动时

的振动与噪音，承载表面需进行防滑纹理处理与边缘圆角化设计；便携提手应布置在接近重心的位置，并根据不同用户群体的使用需求提供可调节的部件或模块化扩展接口^[5]。

结语

多关节联动机构作为折叠手推车产品设计的核心组成部分，其结构方案与运动性能直接决定了整车的功能表现与用户体验。本文系统梳理了三类典型多关节联动结构，包括其基本构型与运动特点，并深入剖析了运动过程中的协调性、锁定机构的可靠性等关键技术问题，同时指出了影响操作舒适度与整体稳定性的核心因素。基于运动学建模与分析可知，合理分配机构的自由度、优化运动链布局是提升折叠过程协调性与顺畅度的基础。基于此提出的结构优化与力学性能增强策略，可显著简化用户操作步骤、降低收展力度，同时提高承载稳定性与使用安全性，从而全面提升产品的实用性与耐用性。该研究为多关节联动机构的设计提供了理论依据与明确方向，有助于企业针对现有产品在折叠卡顿、结构松动等方面的痛点进行精准改进，不仅可增强产品市场竞争力，也为开发更符合用户实际需求的高性能便携式工具提供了技术支持，最终推动整个行业向更高质量、更人性化的方向发展。

参考文献

- [1]张婷, 张泽政. 工地手推车改良设计分析[J]. 百科论坛电子杂志, 2020, 000(016): 1650-1651.
- [2]佚名. 费雪儿童折叠手推车超轻便轻松带娃游世界[J]. 时尚育儿, 2016(9): 1.
- [3]张春红, 陈之健, 王炯炯, 等. 可转换为脚踏车的婴儿手推车的改进设计[J]. 机械设计, 2021(012): 038.
- [4]Sun Jun. 基于可拓创新法和TRIZ理论的营地手推车折叠机构设计[J]. 2021.
- [5]王军, 孙帅. 基于可拓创新法和TRIZ理论的营地手推车折叠机构设计[J]. 图学学报, 2021.