

基于 FBS 模型的智能轮椅结构设计

吴清, 吴梦, 艾险峰, 吴亮

(武汉科技大学 艺术与设计学院, 武汉 430065)

摘要: **目的** 为解决老年人及残疾人的出行问题, 设计一款帮助老年人和残疾人的智能轮椅。**方法** 首先, 分析和归纳智能轮椅的结构要素, 对轮椅在实际运用中的操作和路径进行分析, 探索将现有的自动驾驶技术应用于智能轮椅行驶辅助的可行性, 运用 FBS 模型实现功能-行为-结构的整合, 并实现映射转化过程。其次, 借助最终的分析结论指导智能轮椅结构设计, 并进行方案的迭代优化, 为智能轮椅的支撑、连接、驱动系统提供相应的设计方案, 提出增强结构功能、自动驾驶辅助的智能轮椅设计方案。**结果** 应用对偶分析法对最终方案进行设计评价, 结合所得数值与排列顺序来验证设计方案的合理性。**结论** FBS 模型将功能、行为和结构的分析可视化, 转化并提炼为结构设计的需求, 为同类智能轮椅结构设计研究提供了一个新思路。

关键词: 工业设计; 产品结构; FBS 模型; 智能轮椅; 自动驾驶技术

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)16-0170-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.16.019

Structure Design of Intelligent Wheelchair Based on FBS Model

WU Qing, WU Meng, AI Xian-feng, WU Liang

(College of Art and Design, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

ABSTRACT: The paper aims to solve the travel problems of the elderly and the disabled, design a kind of intelligent wheelchair to help the elderly and the disabled. Firstly, the structural elements of the intelligent wheelchair are summarized, and the operational behavior path in the actual application of the wheelchair is analyzed to explore the feasibility of the existing automatic driving technology to assist the intelligent wheelchair in driving. The FBS model is used to integrate the obtained function-behavior-structure and realize the process of mapping and transformation. Secondly, with the help of the final analysis conclusion, the structure design of the intelligent wheelchair is guided, and the iterative optimization of the scheme is carried out. The corresponding design scheme is provided for the support, connection and drive system of the intelligent wheelchair, and the intelligent wheelchair design scheme with enhanced structural function and automatic driving assistance is proposed. Finally, the dual analysis method is used to evaluate the design of the final scheme, and the rationality of the design scheme is verified by combining the obtained values and the sequence. The FBS model visualizes, transforms and refines the integration analysis of function, behaviors and structure into the requirements of structural design, which provides a certain reference value for the similar research on the structure design of intelligent wheelchairs.

KEY WORDS: industrial design; product structure design; FBS model; intelligent wheelchair; autonomous driving technology

我国老年人和残疾人的数量持续攀升, 电动轮椅的出现为老年人、残疾人的出行提供了便利, 但行驶

过程中出现的抢行、逆行等危险行为, 存在安全隐患, 易引发事故。老年人和残疾人使用轮椅的安全出行,

收稿日期: 2022-03-08

基金项目: 中国“互联网+”大学生创新创业大赛国家级铜奖项目(20170488006)

作者简介: 吴清(1965—), 女, 教授, 主要研究方向为产品设计。

已经不仅仅是每个家庭关注的问题,更是一个严肃现实的社会问题。

国内外对轮椅的课题研究成果主要集中在以下几个方面:针对轮椅行驶安全稳定化,通过监测环境信息进行自动避障,通过设置路径规划进行智能越障^[1-2];为帮助下肢肌力障碍患者恢复功能,基于人机工程学在轮椅上添加机械骨骼辅助康复训练^[3];对轮椅的行星式、履带式爬梯机构进行研究,以满足独居患者的出行要求^[4];从心理学、产品语义学的角度,对轮椅的造型、色彩、材质 3 个方面进行改良设计^[5-6]。对上述研究成果分析可知,在智能化基础上的轮椅结构设计,必然朝着以人为本的方向发展,必须对其功能进行合理划分,在保证用户坐姿稳定、操作简便的基础上,对轮椅结构部件进行优化设计,为用户提供多方互联,创造人与机器新的交互模式,在融合智能化的背景下,实时监控轮椅与用户的各项数据,本研究基于 FBS 模型对智能轮椅的结构设计需求进行分析,通过功能-行为-结构的映射转换,提取智能轮椅设计要素,从而实现智能轮椅结构的设计创新。

1 智能轮椅的结构功能分析

轮椅通常由椅架、椅座、靠背、制动及刹车系统、大小车轮几个部分组成。以下分别论述轮椅的各个结构部件及其功能。

1.1 车轮

大轮承载轮椅的主要重量,直径为 510~660 mm。小轮控制轮椅的方向,直径为 120~200 mm。

1.2 轮胎

实心型轮胎在平地行驶速度较快,不易刺破,便于推动,但在陡路上振动大,卡入同宽的沟内不易推出;内胎充气型轮胎较难推动,易刺破,但振动较小;无内胎充气型轮胎不易刺破,且充气式体验感舒适,但较难推动。

1.3 椅座

椅座深度为 410~430 mm,宽度为 400~460 mm,高度为 450~500 mm,应符合使用者的体型,并根据使用者的身体状况选择合适的材料质地。

1.4 坐垫

充气 ROHO 垫由大量柔软易动的塑胶充气柱组成,使受压面转化为多个受压点,这些受压点能够随用户的移动不断变换,可以避免因久坐压迫同一部位造成的压疮。

1.5 脚托

两侧分开式脚托能摇摆到一边或者拆卸,方便使

用者踩地起身。

1.6 靠背

靠背有高矮及可倾斜和不可倾斜之分^[7]。低靠背的轮椅要求使用者对躯干有一定的平衡能力和控制能力,有较大的活动度。高靠背轮椅则与之相反。

1.7 扶手或臂托

扶手高出椅座 225~250 mm,部分臂托可调节高度,也可架上搭板^[7]。

2 智能轮椅结构设计的改进方案

2.1 升降机构的改进设计方案

座椅的升降功能主要通过电动或液压升降机构实现^[8]。座椅升降机构的结构设计直接影响整个轮椅的稳固性。若升降推杆的作用面积过小,在升降过程中用户容易出现重心偏移,会导致轮椅侧翻^[9]。因此,座椅升降机构的设计应考虑轮椅座板的重心平衡,扩大升降装置的整体支撑面积。

2.2 椅身机构的改进设计方案

椅身机构主要包括背板、座板、扶手及脚托几个部分。若用户在轮椅上长时间保持不良坐姿,将会导致骨盆侧倾斜引起肩关节无力,手扶起身后容易对肩部及肘关节造成损伤。因此,椅身机构需要确保各部分能够与用户身体贴合,给予用户一定的支撑,且用户在床与轮椅间移动的过程中扶手不会成为阻碍。脚托的收放结构使用户在正常坐姿下双脚呈轻松状态,能够缓解用户上肢压力,同时也能在用户起身或入座时作为支撑点承重。由于用户下肢屈伸的幅度、频率已达不到正常人的水平^[10],所以在脚踏收放机构设计中必须要求角度具有可调整性。

2.3 操作机构的改进设计方案

操作机构的主体为智能轮椅的遥控系统,其核心是电源开启、行驶方向、速度设置、喇叭、刹车系统的整合。由于用户群体反应能力下降及技术掌握程度不足等特殊特性,智能轮椅的操作机构往往会成为发生危险的主要来源。因此,参考现有的自动驾驶技术,适当的智能化行驶辅助系统可以在操作机构中简化用户行为。

2.4 用户预期操作行为路径

由于智能轮椅各结构部件的复杂性,先对应上述结构清单,将各部件归纳为 3 个系统设备:支撑、连接、驱动。为了得出智能轮椅结构设计创新方案的最优解,分别绘制出三大系统设备在准备、进行、结束 3 个操作阶段中智能轮椅所处的场景以及使用主体存在的预期行为路径过程,见表 1—3。

表1 支撑设备操作行为路径分析
Tab.1 Support equipment operation behavior path analysis

阶段	准备	进行	结束
场景流程	1. 靠近轮椅	1. 启动电源 2. 将座板抬高至合适高度	1. 坐在轮椅上 2. 将座板降低至合适高度
预期操作行为	1. 移动	1. 按压 2. 触摸、按压	1. 下蹲 2. 触摸、按压

表2 连接设备操作行为路径分析
Tab.2 Path analysis of operation behavior of connected devices

阶段	准备	进行	结束
场景流程	1. 靠近轮椅 2. 坐上轮椅	1. 启动电源 2. 旋转背板至合适角度	1. 旋转踏板至合适长度 2. 躺在轮椅上
预期操作行为	1. 移动 2. 下蹲	1. 按压 2. 触摸、按压	1. 触摸、按压 2. 伸脚 3. 后仰

表3 驱动设备操作行为路径分析
Tab.3 Path analysis of driving equipment operation behavior

阶段	准备	进行	结束
场景流程	1. 靠近轮椅 2. 坐上轮椅	1. 启动电源 2. 遥控调节速度	1. 刹车 2. 离开轮椅
预期操作行为	1. 移动	1. 按压 2. 触摸、按压	1. 触摸、按压 2. 起身

3 自动驾驶技术的可行性研究

随着5G时代的到来,自动驾驶成为未来的必然趋势。通过对自动驾驶技术的具体分析,对智能轮椅的自动驾驶技术方案进行探究。利用局部网络或互联网等通信技术把传感器、控制器、机器、人员等通过新的方式连接在一起,形成人与物、物与物的相联,从而实现信息化和智能化的轮椅出行方式。

自动驾驶系统是由计算机视觉、传感器融合、定位、路径规划、控制5个核心部分组成的^[11],见图1。



图1 自动驾驶系统的5个核心部分^[11]
Fig.1 Five core parts of an autonomous driving system

1) 计算机视觉。单目摄像头:通过图像匹配进行识别,根据图像大小和高度来推算周围障碍物的移

动时间。双目摄像头:测量本体与障碍物之间的距离并识别物体。红外摄像头:单目及双目摄像头夜晚可见光成像信噪比较低,夜间成像难度大,而远红外系统在夜间优势大。

2) 传感器融合。常见的传感器类型有:激光、超声波、视觉、红外。各类传感器优缺点分析见表4。

表4 各类传感器优缺点分析
Tab.4 Analysis of the advantages and disadvantages of various sensors

传感器	原理	优点	缺点
激光	主动式	测距准	范围近且稀疏
超声波	主动式	范围近	位置感知粗糙
视觉	被动式	范围远且感知稠密	测距不准
红外	主动式	范围远且测速准	受光线影响大,不可测距

3) 定位:利用高清晰度地图系统自定位。首先进行预处理,消除不准确或质量差的数据。其次进行坐标变换,将不同视角的数据转换为统一的坐标系。最后对数据进行合并,得出精准的自定位^[12]。

4) 路径规划:在行驶路线上预测出周围环境中其他移动体的去向,提前推算出系统应采取的回应措施,建立一系列行驶路径点^[13]。

5) 控制: 系统根据方向盘、油门及制动命令, 预测出本体将会行驶的轨迹, 并与路径点轨迹实现重合。

4 FBS 模型映射转化流程

4.1 FBS 模型的基本概述

FBS 采用由上至下的产品概念设计分析模型, 以实现设计需求的映射转化。FBS 模型设计步骤见表 5。FBS 模型中 3 个变量的定义如下:

- 1) 功能: 是对产品系统能够“做什么”的抽象描述, 即对设计目标的描述。
- 2) 行为: 对用户在使用产品功能时所发生的行为过程的分析^[14]。
- 3) 结构: 指产品的结构, 如系统的方案、产品由行为映射得到的结构需求等内容。

4.2 映射转化

以上述得出的智能轮椅三大系统设备作为功能层, 将绘制的用户操作行为路径作为转化因子, 通过触摸、按压、下蹲、伸脚等一系列行为动作映射出智能轮椅设计中的结构需求, 进行基于 FBS 模型的设计

迭代分解, 完成智能轮椅多层次的映射求解, 如图 2 所示。

- 1) 功能 (F) —行为 (B) 映射。智能轮椅总功能层分解为支撑、连接、驱动 3 个子功能层, 提取用户操作路径中的行为关系, 生成行为集, 为功能与结构搭建桥梁。
- 2) 行为 (B) —结构 (S) 映射。对行为集与结构集所能实现的行为进行对比和匹配, 以得到最终的结构部件, 如支撑系统下触摸与按压行为映射出的液压推杆、滑动支撑杆。

经过逐层的完全映射之后, 对结构的需求因素进行划分归纳, 确定最佳分解方案进行三维建模^[15]。

表 5 FBS 模型设计步骤
Tab.5 FBS model design steps

步骤	转化	描述	状态
1	F-B	功能转化行为	分析
2	B-S	行为转化结构	分析
3	S-D	设计方案生成	生成
4	D-R	评估设计方案	评价

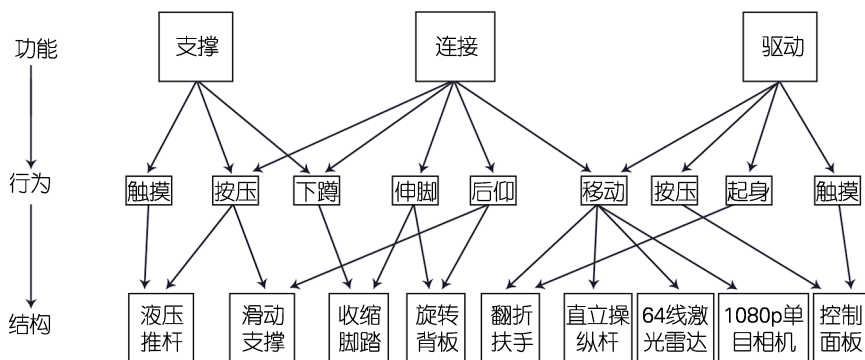


图 2 智能轮椅 FBS 映射机制
Fig.2 Smart wheelchair FBS mapping mechanism

5 设计实例

5.1 设计方案的确定

依据 FBS 模型映射机制得出的结构要素, 综合考虑用户行为特点, 通过设计迭代与优化 (见图 3), 最终完成了一款完整的智能轮椅设计方案。

该方案椅身形态呈现出包裹感, 靠垫与坐垫的设计为特殊的曲线形态, 可以更好地与人体贴合, 增强了舒适感, 同时靠垫与桌垫下设计的滑动模块可以按照用户的身高及使用体验随意调节, 表现出一种稳定、舒适的状态, 给用户带来了心理安全感, 见图 4。

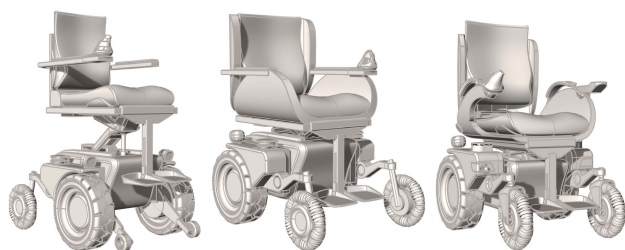


图 3 方案优化过程
Fig.3 Scheme optimization process



图 4 方案效果图
Fig.4 Scheme rendering

5.2 结构设计说明

在结构上的改良设计,弥补了现有轮椅的不足,尽可能满足了用户的实际需求。

5.2.1 液压升降装置与背板调节装置

如图5,液压推杆推动滑动支撑支架一在机箱滑轨内滑动,联动滑动支撑支架二在座板滑轨内滑动,实现了座板的整体升高与降低。固定在座板上的滑轨与固定在机箱上的滑轨都设置了一定的滑动范围,形成了座板的倾斜范围。如图6,旋转组件14转动带动座板固定座旋转,旋转组件12转动带动背板旋转,形成了背板的两节旋转。

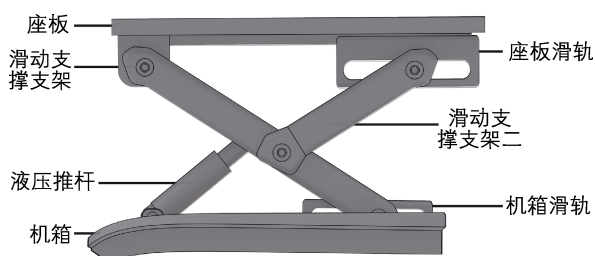


图5 液压升降装置工作原理示意图
Fig.5 Schematic diagram of the working principle of hydraulic lifting device

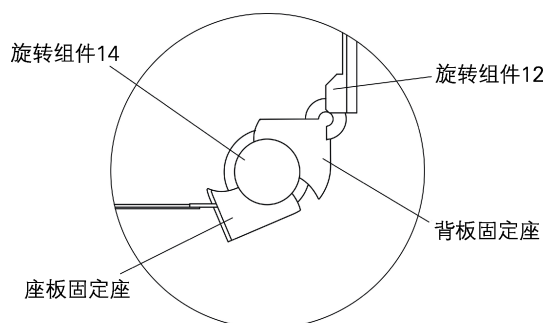


图6 背板调节装置工作原理示意图
Fig.6 Schematic diagram of the working principle of the back plate adjustment device

基于上述液压升降装置与背板及坐垫调节装置的结合,提出了一整套的椅身转位方案(见图7),实现了垂直方向的升降、 30° 以内的前倾角度范围、 20° 以内的后仰角度范围。用户可以通过调节坐高进行如开门、取物等需要一定高度的操作活动,实现与常人的物理平等。



图7 智能轮椅的转位示意图
Fig.7 Schematic diagram of transposition of smart wheelchair

5.2.2 扶手旋转装置

如图8,智能轮椅右侧扶手可旋转 75° 与椅背平齐,留出座椅右侧空间。腿部踏板可以向后旋转 20° 收起,保证座板前端正下方无遮挡。

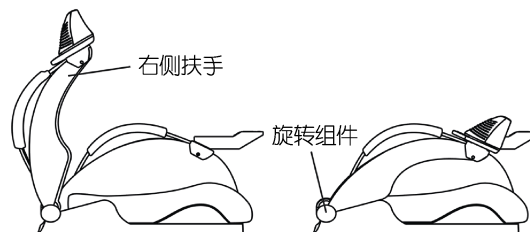


图8 扶手旋转装置工作原理示意图
Fig.8 Schematic diagram of the working principle of the armrest rotating device

通过对上述扶手旋转装置的改进,为适应老年人及残疾人身体状况的变化,提出了2种智能轮椅入座方式(见图9),若用户无法站立,只需将智能轮椅的右侧与床平齐,就可以从床上移到轮椅上;若用户在站立的情况下需要入座,考虑到用户群体腿部不便,可以将座板整体抬高,收起脚托,用户站在轮椅前就可以直接坐下。



图9 智能轮椅的入座方式示意图
Fig.9 Schematic diagram of the seating method of a smart wheelchair

5.2.3 操作系统

1) 操纵杆。位于轮椅扶手右侧,用以控制方向、速度等。按钮功能较少,增加对应指示性,配合扶手角度向下倾斜,造型符合手部放松状态下的最佳姿势,不同工作区域用材质和色差分开。与身体接触部分采用凝胶聚氨酯,从而达到柔软、亲肤的效果。

2) 控制器。位于轮椅扶手左侧,通过设置常用功能按键来完善其使用体验。为方便老人操作,采用颜色和灯光强调区分,按键符合图案语义,使用户可以轻松了解按键功能,且不容易出错。

3) 自动驾驶模块。两套照明系统内各配有一个视觉传感器,轮椅两侧各一个64线激光雷达,确保对外围环境的精确感知。在自动驾驶状态下,前向单目相机配合后向单目相机监测轮椅周围环境,雷达感应器进行远距离测量,形成全景模型。

5.3 设计评价分析

将此方案与其他几款现有智能轮椅(见图10)

进行对偶比较: 对 5 款比较对象进行成对刺激, 然后一对一对地呈现出来, 让被试者对刺激的结构特性进行比较, 并作出判断(这种特性在 2 个刺激中的哪一个上表现得更为突出)。以 5 代表刺激的总数, 那么配成对的个数为 $5(5-1)/2$ 。为了消除前后顺序的误差, 比较进行两轮, 第二轮调整呈现次序, 制成一个顺序量表。最后, 计算出矫正值 C' 、 P' , 依据正态分布表(PZO)将 P' 转化为 Z 值, 将所有 Z 值加上一个相同数使最小值变为 0, 即消除负值得到 Z' 。

邀请 3 位专家与 2 位轮椅用户, 对各个轮椅的结构特性进行介绍, 确保评价者对 5 款产品均有所了解。其中专家 1 的评价如表 6 所示。



图 10 5 款轮椅的整体图
Fig.10 Overall picture of five wheelchairs

表 6 专家 1 结构评价顺序量表
Tab.6 Expert 1 structural evaluation order scale

刺激	A	B	C	D	E
A	-	A	C	D	A
B	A	-	C	D	B
C	C	C	-	D	C
D	D	D	D	-	D
E	A	B	C	D	-
第一轮	2	1	3	4	0
第二轮	3	1	4	3	0
总计(C)	5	2	7	7	0
$P=C/2(n-1)$	0.63	0.25	0.88	0.88	0.00
顺序	2	3	1	1	4
$C'=C+1$	6	3	8	8	1
$P'=C'/2n$	0.60	0.30	0.80	0.80	0.10
Z	+0.25	-0.52	+0.84	+0.84	-1.28
Z'	1.53	0.76	2.12	2.12	0.00

类似地, 求出其他 4 位专家的比较数值与等距量表, 汇总后的结果如表 7、图 11 所示。

表 7 对偶比较结果汇总表
Tab.7 Summary table of dual comparison results

	专家 1	专家 2	专家 3	用户 4	用户 5	均值/顺序
A	0.63	0.50	0.25	0.50	0.25	0.4/3
B	0.25	0.00	0.00	0.00	0.75	0.2/4
C	0.88	0.88	0.88	0.75	0.50	0.8/1
D	0.88	0.50	0.88	0.75	0.88	0.8/1
E	0.00	0.63	0.50	0.88	0.50	0.5/2

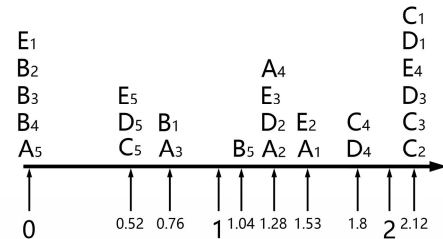


图 11 等距量表汇总表
Fig.11 Isometric scale summary chart

该设计方案(C)在顺序量表中的最终平均分为 0.8, 与 D 款智能轮椅并列第一, 由等距量表可知, 被试对象对该设计方案(C)的心理阈值普遍较高, 趋于上限, 表明该设计方案得到了用户肯定。另外, 一人对该设计方案(C)的心理阈值接近下限, 表明方案还具有一定的改进空间, 可以进一步深入与细化。

6 结语

FBS 模型的应用为智能轮椅的结构设计提供了准确的要素分析, 提高了智能轮椅使用的合理性及设计方案的可行性。首先, 分析研究了轮椅结构的各部分功能以及自动驾驶技术的形成要素, 将各要素整合为轮椅驾驶辅助系统, 对各功能的用户行为路径进行了提炼。其次, 利用 FBS 模型由行为要素映射出结构要素, 提出了拥有良好的人机交互方式以及完整的系统性特征的智能轮椅设计方案。实例表明, 通过专家评价数值分析, 验证了基于 FBS 模型指导的智能轮椅设计实践的可行性和有效性, 优化了目标用户对智能轮椅的使用体验。为解决老年人及残疾人使用及出行问题的轮椅结构设计制造提供了新的设计思路 and 方向。

参考文献:

[1] 陈灵, 王森, 胡豁生, 等. 保证智能轮椅平滑通过狭窄通道的路径曲率优化算法[J]. 自动化学报, 2016, 42(12): 1874-1885.
CHEN Ling, WANG Sen, HU Huo-sheng, et al. Novel Path Curvature Optimization Algorithm for Intelligent Wheelchair to Smoothly Pass a Narrow Space[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(12): 1874-1885.

- [2] 胡铨锬, 陈致格, 晏泉, 等. 基于坐姿传感及自主避障的轮椅控制系统[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2020, 37(3): 280-288.
HU Cheng-kun, CHEN Zhi-ge, YAN Quan, et al. Wheelchair Control System Based on Sitting Posture Sensing and Autonomous Obstacle Avoidance[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2020, 37(3): 280-288.
- [3] 赵新宇. 柔性助力式下肢肌力康复训练轮椅设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
ZHAO Xin-yu. Design of Wheelchair with Lower Limb Rehabilitation Mechanism Driven by Flexible Assistance[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.
- [4] 王秀红, 唐淑珍, 梁帅鹏, 等. 基于 TRIZ 的自动爬梯轮椅专利规避创新设计[J]. 机电工程, 2020, 37(12): 1416-1424.
WANG Xiu-hong, TANG Shu-zhen, LIANG Shuai-peng, et al. Innovative Design of Patent Circumvention for Automatic Ladder Wheelchair Based on TRIZ[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(12): 1416-1424.
- [5] 王莹莹, 张玲玉, 徐刚. 基于老年人情感需求的轮椅设计[J]. 工业设计, 2019(1): 56-57.
WANG Ying-ying, ZHANG Ling-yu, XU Gang. Wheelchair Design Based on the Emotional Needs of the Elderly[J]. Industrial Design, 2019(1): 56-57.
- [6] 倪晴, 高瞩, 林靖朋. 基于感性工学的老年轮椅造型设计研究[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(4): 172-175.
NI Qing, GAO Zhu, LIN Jing-peng. Research on Model Design of Elderly Wheelchair Based on Perceptual Engineering[J]. Intelligent Computer and Applications, 2020, 10(4): 172-175.
- [7] 乔东升. 人性化呼唤与回归——老龄化社会关爱型轮椅设计与研究[D]. 南京: 南京艺术学院, 2016.
QIAO Dong-sheng. Call for Humanity and Return—Design and Research of Caring Wheelchair in Aging Society[D]. Nanjing: Nanjing University of the Arts, 2016.
- [8] 唐宏. 多功能轮椅结构设计与应用[J]. 现代制造技术与装备, 2020(6): 58-59.
TANG Hong. Structure Design and Application of Multifunctional Wheelchair[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020(6): 58-59.
- [9] LIU Qi, ZHAO Wen-sheng, YU Yu-feng. RFID-Based Bidirectional Wireless Rollover Sensor for Intelligent Wheelchair[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63(2): 504-509.
- [10] 曹伟, 姜楠. 多功能智能轮椅的设计与运动仿真[J]. 机械工程与自动化, 2017(3): 71-73.
CAO Wei, JIANG Nan. Design and Simulation of Multifunctional Intelligent Wheelchair[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2017(3): 71-73.
- [11] BILL R. How Do Self-Driving Cars Work?[J]. Science and Children, 2017, 54(9): 72-75.
- [12] 周勇, 刘尚魁. 构建基于 Appollo 的高精度地图解决方案[J]. 电子技术与软件工程, 2018(21): 139.
ZHOU Yong, LIU Shang-kui. Build a High-Precision Map Solution Based on Appollo[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018(21): 139.
- [13] 曾辛未, 张华, 刘继忠. 智能轮椅 GPS 定位导航系统设计[J]. 现代电子技术, 2016, 39(11): 161-163.
ZENG Xin-wei, ZHANG Hua, LIU Ji-zhong. Design of GPS-Based Positioning and Navigation System for Intelligent Wheelchair[J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(11): 161-163.
- [14] 陈国强, 戴成, 申正义, 等. 基于 QFD 与 FBS 的可移动电力检测设备创新设计[J]. 包装工程, 2021, 42(2): 43-50.
CHEN Guo-qiang, DAI Cheng, SHEN Zheng-yi, et al. Design of Movable Electric Testing Station Based on QFD and FBS[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(2): 43-50.
- [15] 孙利, 张鹏, 吴俭涛, 等. 基于 FBS 拓展模型的可穿戴式康复机械手设计研究[J]. 图学学报, 2021, 42(1): 150-157.
SUN Li, ZHANG Peng, WU Jian-tao, et al. Design of Wearable Rehabilitation Manipulator Based on FBS Extended Model[J]. Journal of Graphics, 2021, 42(1): 150-157.

责任编辑: 马梦遥