

智能家居养老椅的结构设计与有限元分析

赵跃鹏, 杨金林*, 何其臻, 杨景

浙江理工大学, 浙江 杭州

Email: 321392830@qq.com, jinlinyang@126.com, 1548224606@qq.com, 553141505@qq.com

收稿日期: 2020年9月13日; 录用日期: 2020年9月21日; 发布日期: 2020年9月28日

摘要

针对目前国内外智能家居养老椅结构过于简单、实现功能单一且安全性能并未达到很好的市场要求, 本文基于此提出了一种智能家居养老椅。首先通过优化动力学模型得到产品理论运动参数与受力情况, 利用Solidworks软件建立机构三维模型, 结合有限元仿真进行机构静力学强度校核。其次, 对产品机构进一步优化, 改善养老椅的舒适性能, 降低产品受力损伤的概率。最后, 搭建实物样机, 并通过实地试验进行了性能检验。结果表明: 该产品的实际运动参数误差小于7%, 产品的工作具有可靠性并保证了工作的效率。

关键词

智能家居, 动力学模型, 有限元仿真, 优化

Structural Design and Finite Element Analysis of Intelligent Home Care Chair

Yuepeng Zhao, Jinlin Yang*, Qizhen He, Jing Yang

Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Email: 321392830@qq.com, jinlinyang@126.com, 1548224606@qq.com, 553141505@qq.com

Received: Sep. 13th, 2020; accepted: Sep. 21st, 2020; published: Sep. 28th, 2020

Abstract

In view of the current domestic and foreign smart home endowment chair structure is too simple, achieve a single function and safety performance does not meet good market requirements, this paper based on this put forward a smart home endowment chair. Firstly, the theoretical motion parameters and forces of the product were obtained by optimizing the dynamic model. Solidworks software was used to establish the three-dimensional model of the mechanism, and the static strength of

*通讯作者。

the mechanism was checked in combination with the finite element simulation. Secondly, the product organization is further optimized to improve the comfortable performance of the endowment chair and reduce the probability of mechanical damage of the product. Finally, the prototype was built and the performance was tested by field test. The results show that the actual motion parameter error of the product is less than 7%, and the working efficiency of the product is guaranteed.

Keywords

Smart Home, Dynamic Model, Finite Element Simulation, Optimization

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前老龄化趋势不断加剧,老年人口激增,但市场养老产品研发却停滞不前[1]。目前市场已有的该类产品设计以老年辅助用品及代步装置为主,缺乏从身体健康层面出发针对老年人研发的家居健身装置产品,因此针对老年人群体家居健身锻炼产品的研发尤为重要[2]。

文献查阅发现,针对智能家居养老椅结构设计,国内外研究学者开展了一系列研究工作。Fatima University 设计了一种自动电子椅装置,该装置主要协同 Arduino 微控制器和 MIT 软件帮助残疾人士独立移动[3]。Universiti Putra Malaysia 采用模糊逻辑的人工智能设计了一种电子按摩椅[4],可以根据控制系统改善用户的健康情况。西安理工大学设计了一种投币式按摩椅装置[5],该装置具备音乐播放、按摩速度显示、按摩模式选择等功能。目前国内外智能家居椅的装置结构简单,功能较为单一,控制系统操控难度较大[6] [7] [8]。本文针对现有智能家居椅装置的诸多问题,提出一种新型的智能家居椅装置。为确认其机械的可行性,先用 SolidWorks 软件进行建模,进行动力学计算,确认其各项动力学数据,再应用有限元模块,分析其关键部位,确认机械的强度和刚度是否符合要求。在优化各项尺寸数据,完善性能后,制造出实物样机,并进行性能检验,验证其各项性能的达标程度。为新一代智能家居椅装置的开发提供一种新思路。

2. 设计原理及结构

智能家居养老椅将整个系统分离成多个独立的模块[9],通过 SolidWorks 进行三维建模,如图 1 所示。每个模块可独立且高效地运转,集成后各个子模块之间互不干扰,共同组成一个完整的系统。养老健身椅共有以下四大模块:

1) 阅读一体化模块:模块主要通过电机驱动气泵沿齿条上下运动,舵机带动气泵下移使吸盘接触书表面,电动气泵启动使吸盘内形成负压,吸盘再上移使书页被吸起,实现翻面功能;此时,翻书杆由另一个齿轮传动机构带动,向对侧移动将书页推至另一侧,实现翻书功能。

2) 捶背敲肩联动模块:模块具有调整敲击高度,水平平移的功能。高度调节依靠整套链条链轮构成的减速机构,将目标链轮与击打装置连接,电机的转动减速带动击打装置改变高度,使击打装置在高度调整更平稳、精确;水平平移主要借助电机带动丝杠转动,实现装置的左右平移,使得装置改变水平击打位置。

3) 换鞋一体化模块:模块主要由送鞋装置和除臭烘干装置组成。通过固定在水平移动平台上的鞋拔子辅助脱鞋,利用螺旋传动机构带动水平平台移动,实现鞋子的送入和送出。除臭烘干由风扇与平台旋转装置构成当鞋子送入指定位置(即椅子下方)时,风扇旋转吹风,通过齿轮传动机构,使得电机带动整个平台定点旋转,使得鞋子能更好地除臭烘干。

4) 多功能椅子复合模块: 多功能椅子复合模块包含辅助起身、座椅前后调节功能。辅助起身装置由电机带动齿轮传动, 使推杆杆传动, 与铰接处形成三连杆结构, 控制椅垫的升降, 完成辅助起身过程; 座椅前后调节装置中齿轮齿条机构起到辅助平移效果, 螺旋传动机构则由电机带动, 以保证推动椅子的平稳性, 座椅前后调可根据老人自身选择性调节。

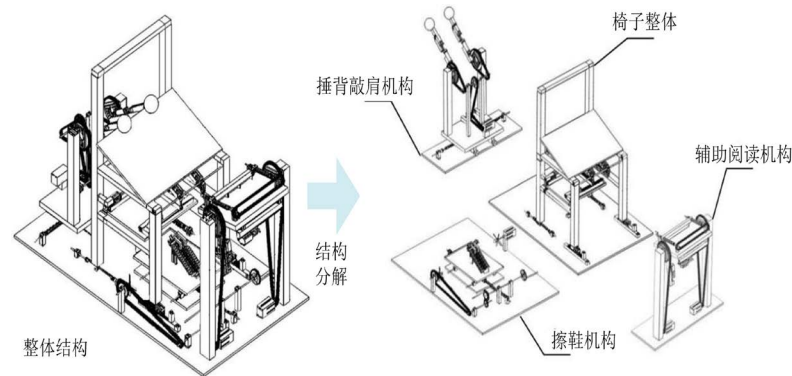


Figure 1. Three-dimensional model of intelligent home for the aged chair
图 1. 智能家居养老椅三维模型

3. 动力学与有限元分析

根据已知的智能家居养老椅的输出数据, 基于动力学模型, 对各关键部位进行运动学与力学分析[10], 以获取需要的数据。

3.1. 捶背机构和椅子移动机构的丝杠运动分析与有限元分析

捶背机构和椅子移动机构的主要传动方式为丝杠[11]传动(图 2), 丝杠副受到轴向载荷作用, 在丝杠公称直径 d_0 处产生螺纹力矩 M_t 。当机械手臂台中丝杠螺母无预紧情况下[12], 有:

Table 1. The related screw parameters on the back punching device

表 1. 捶背装置上的相关丝杠参数

丝杠相关参数名称	参数大小	备注
丝杠公称直径 d_0	7.10 mm	
丝杠导程 L_0	2 mm	
螺纹传动效率 η	0.9	
丝杠副受到的轴向载荷 F_a	3.92 N	
电机额定转矩 M_N	1.80 N·m	

代入表 1 参数:

$$M_0 = M_t = F_a \times \frac{d_0}{2} = \frac{F_a L_0}{2\pi\eta} \approx 1.39 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (1)$$

式中: M_0 为丝杠受到总力矩, N·m; M_t 为在丝杠公称直径 d_0 处产生螺纹力矩, N·m; d_0 为丝杠公称直径, mm; F_a 为丝杠副受到的轴向载荷, N; L_0 为丝杠导程, mm; η 为螺纹传动效率。

代入式(1)的计算结果可得:

$$M_N - M_0 = 0.41 \text{ N}\cdot\text{m} > 0 \quad (2)$$

故可以通过电机旋转带动捶背结构的横向移动。

Table 2. The related screw parameters on the chair moving mechanism
表 2. 椅子移动机构上的相关丝杆参数

丝杆相关参数名称	参数大小	备注
丝杆公称直径 d_0	7.10 mm	
丝杆导程 L_0	2 mm	
螺纹传动效率 η	0.9	
丝杆副受到的轴向载荷 F_a	4.116 N	
电机额定转矩 M_N	1.80 N·m	

代入表 2 参数:

$$M_0 = \frac{F_a L_0}{2\pi\eta} \approx 1.46 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (3)$$

$$M_N - M_0 = 0.34 \text{ N}\cdot\text{m} > 0 \quad (4)$$

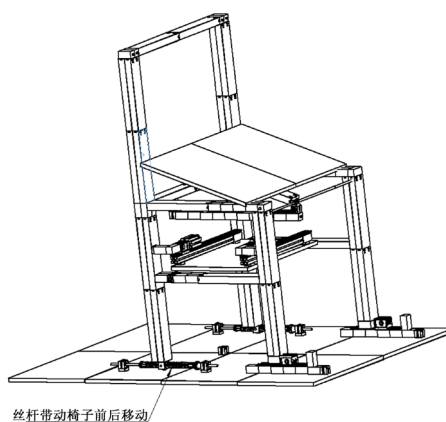


Figure 2. The way in which the lead screw drives the mechanism
图 2. 丝杠带动机构运动的方式

在 Adams 导入三维模型(图 3), 并添加一个固定副, 一个转动副和最大载荷。以及阻尼、摩擦等条件, 根据实际情况选定丝杠和固定板的材料属性[13], 如图 3 所示。运行模型得到输出转矩如图 4 所示。

选用扭矩为 1.8 N·m 电机驱动丝杠, 所选电机扭矩足够大, 符合要求, 故可以通过电机旋转带动捶背横向移动和椅子机构前后移动。

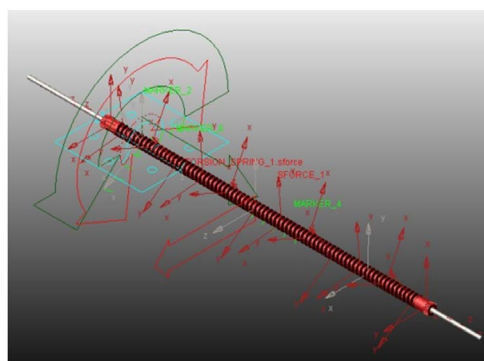


Figure 3. Adams simulation of lead screw
图 3. 丝杠 Adams 仿真

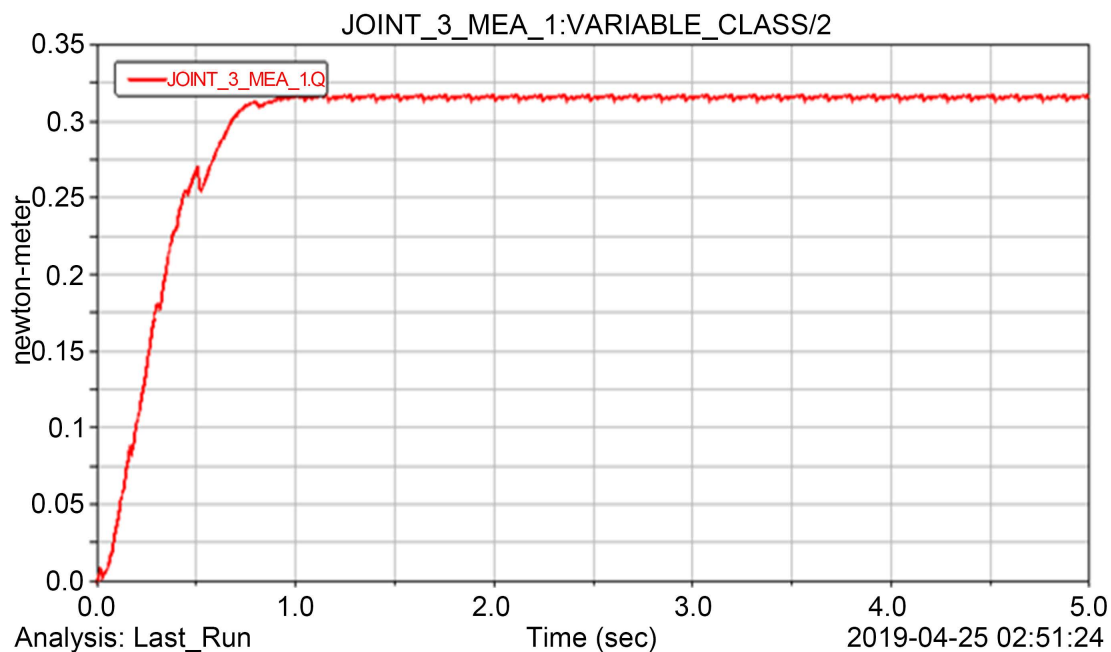


Figure 4. Output torque curve

图 4. 输出转矩曲线

从仿真曲线中可以得知，实际输出转矩最大在 0.325 N·m 左右波动，与理论计算的结果 0.34 N·m 相差不是很大，仿真验证有效。

3.2. 链传动的输出转速分析与有限元分析

链传动主要用于脚踏传递动力到风扇上，电机带动翻书机构的转动，电机带动丝杆运动，丝杆联动，带动二次传动，带动捶背机构前倾后仰调整角度等。

链传动在机构中的布置如图 5 所示：

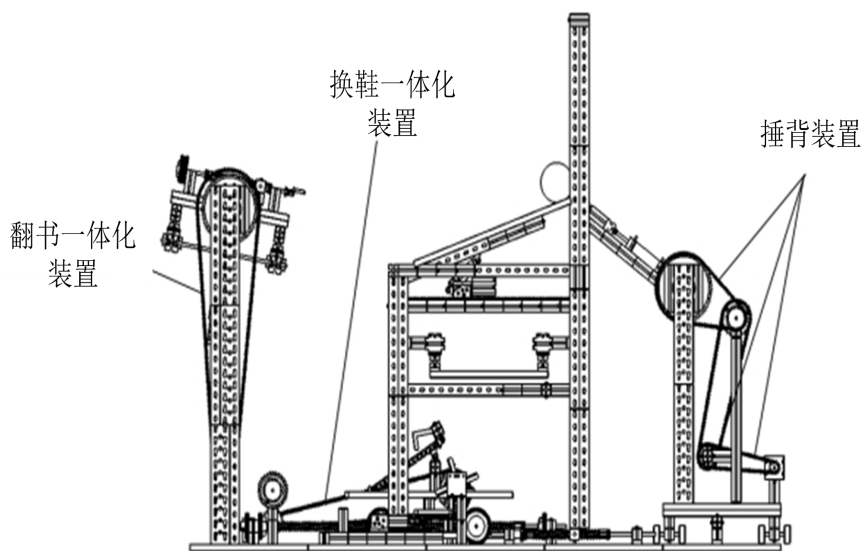


Figure 5. Chain arrangement

图 5. 链传动布置

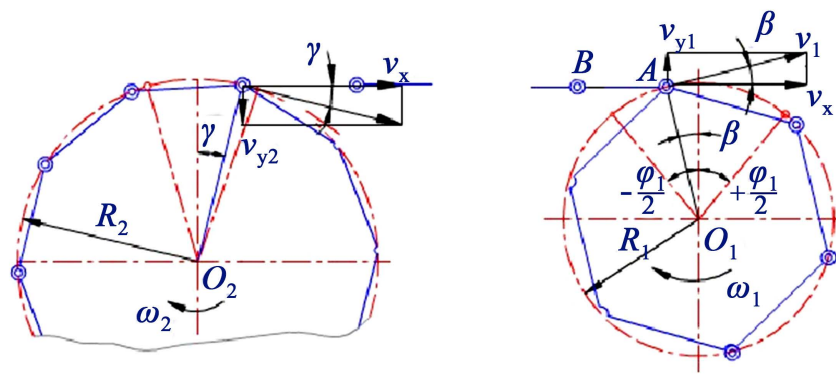


Figure 6. Schematic diagram of conveying chain
图 6. 输送链原理图

如图 6 所示为输送链原理图，链的速度完全取决于图中 B 点的速度，而铰点 B 的速度即为主动轮的圆周速度：

$$v_1 = R_1 \omega_1 \quad (2)$$

链的水平前进速度：

$$V_x = V_1 \cos \beta = R_1 \omega_1 \cos \beta \quad (3)$$

链的垂直速度：

$$V_y = V_1 \sin \beta = R_1 \omega_1 \sin \beta$$

式中： V_1 为 A 点的圆周速度； β 为链节进入啮合后，铰链中心和链轮中心连线与链轮中心到链条铅垂线的夹角； R_1 为主动轮分度圆半径。当 $\beta = \pm \psi/2$ 时，水平链速最小，有：

$$V_x = V_{x\min} = R_1 \omega_1 \cos \frac{\pi}{Z_1} \quad (4)$$

当 $\beta = 0$ 时，水平链速最大，有：

$$V_x = V_{x\max} = R_1 \omega_1 \quad (5)$$

由上式可见，每转过一个链节，链速都要周期性变化一次，即瞬时链速是变化的。这就造成链传动速度的不均匀。链条线速度变化可用链速不均匀系数 k (或称不平稳系数) 来表示：

$$k = \frac{V_{x\max} - V_{x\min}}{V_m} = \frac{R_1 \omega_1 \left[1 - \frac{\cos \pi}{2Z_1} \right]}{R_1 \omega_1 \left[1 + \frac{\cos \pi}{2Z_1} \right] / 2} = 2 \tan^2 \frac{\pi}{4Z_1} \quad (6)$$

式中： V_{\max} 为最大链速； V_{\min} 为最小链速； V_m 为均链速。

基于实验室仿真数据，代入公式，得到以下结果：

$$k = 2 \tan^2 \frac{\pi}{4Z_1} \approx 0.31 \quad (7)$$

$$V_{\text{理论max}} = \frac{zpn}{60 \times 1000} \approx 0.0018 \text{ m/s} \quad (8)$$

$$V_{\text{实际max}} = V_{\text{理论max}} \times (1 - k) \approx 0.001794 \text{ m/s} \quad (9)$$

紧边有效拉力：

$$F = 1000 \frac{P}{V} = 105.48 \text{ N} \quad (10)$$

离心拉力:

$$F_c = qv^2 \approx 3.24 \times 10^{-9} \text{ N} \quad (11)$$

链传动时悬垂拉力:

$$F_y = k_y qga = 0.018375 \text{ N} \quad (12)$$

其中, a 为链传动中心距, K_y 为下垂量 $y = 0.02a$ 时的垂度系数。

通过计算得:

链的紧边拉力:

$$F_1 = F + F_c + F_y = 105.4983 \text{ N} \quad (13)$$

链的松边拉力:

$$F_2 = F_c + F_y \approx 0.018378 \text{ N} \quad (14)$$

利用 Solidworks 自带的有限元软件对最大拉力下的链条应力应变进行分析。

由图 7、图 8 可见最大应力为 7.130×10^{-9} MPa, 最大应变为 1727 mm, 即不会发生变形崩断, 故符合设计要求。

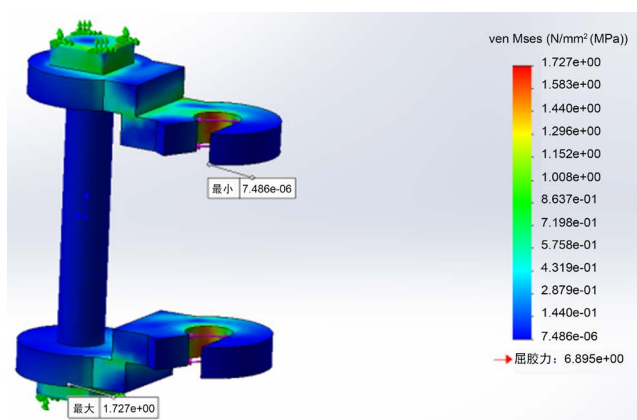


Figure 7. Analysis of maximum stress of chain

图 7. 链条最大应力情况分析

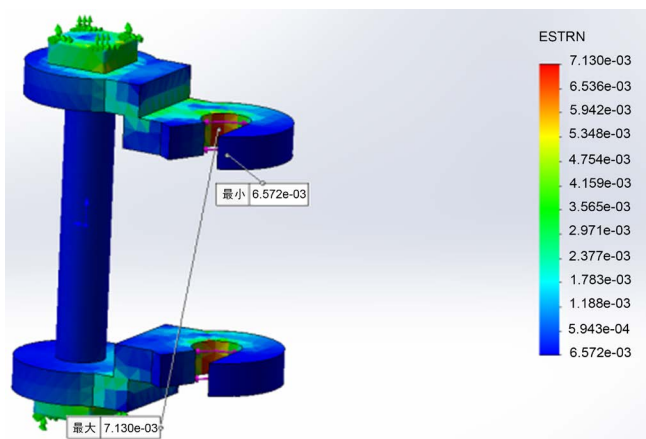


Figure 8. Analysis of maximum strain of chain

图 8. 链条最大应变情况分析

3.3. 翻书机构和抽屉机构中齿轮齿条受力分析

齿轮齿条的受力情况如图9所示,其中 F_t 代表周向力、 F_r 代表径向力、 F_a 代表轴向力、 F_n 代表法向力、 β 代表螺旋角、 a_n 代表法面压力角、 a_t 代表端面压力角[14]。

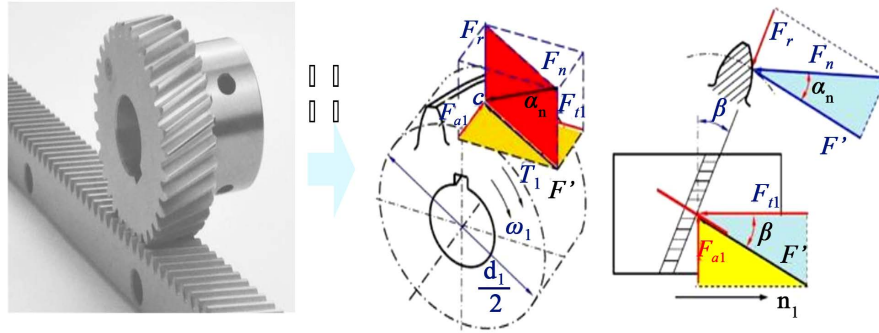


Figure 9. Force acting on rack and Pinion
图9. 齿轮齿条啮合受力

由受力分析可得以下方程组:

$$\begin{cases} F_t = 2T_1/d_1 \\ F_r = F_t \operatorname{tg} a_n = \frac{F_t \operatorname{tg} a_n}{d_1 \cos \beta} \\ F_a = F_t \operatorname{tg} \beta = \frac{2T_1 \operatorname{tg} \beta}{d_1} \\ F' = F_n \cos a_n = \frac{F_t}{\cos \beta} = \frac{2T_1}{d_1 \cos \beta} \end{cases} \quad (15)$$

对翻书机构和抽屉机构进行受力分析,由上式计算齿轮齿条受力情况,得知不会产生零件失效,符合设计要求。

4. 运动参数结果分析

通过前面的运动学分析所得出的数据,再结合运动学基本定理,获得本智能家居养老椅的运动参数。其具体关键结构理论运动参数如下表1~3所示。

4.1. 链传动运动参数分析

对受力情况进行模拟,得到下表3所示参数:

Table 3. Theoretical parameters of drape tension
表3. 悬垂拉力理论参数

参数名称	参数大小
中心距 a	0.75
链的每米长质量	0.001 kg/m
重力加速度 g	9.8 m/s ²
垂度系数	2.5
悬垂拉力	0.184

4.2. 齿轮齿条运动参数分析

对受力情况进行模拟, 得到下表 4 所示参数:

Table 4. Gear rack analysis parameter

表 4. 齿轮齿条分析参数

齿轮齿条啮合参数名称	参数大小
转矩 T	0.12 N·m
齿轮公法线直径 d_i	5 mm
法面压力角 α_n	20°
螺旋角 β	0°
法向模数 m_n	1
齿数 Z	20

代入表 2 的参数, 计算可得表 5 所示分析结果:

Table 5. Analysis results

表 5. 分析结果

受到的力	力的大小
径向力 F_r	4.5 N
轴向力 F_a	0 N
合力 F'	4.5 N

由以上结果可知, 不会发生破坏现象, 设计符合要求。

5. 实物试制与实验

5.1. 实物试制

通过仿真可知, 智能家居养老椅具有良好的工作可靠性以及较好的适应性, 基于三维模型和设计数据, 对智能家居养老椅进行实物样机的制造, 其实物模型如图 10 所示。

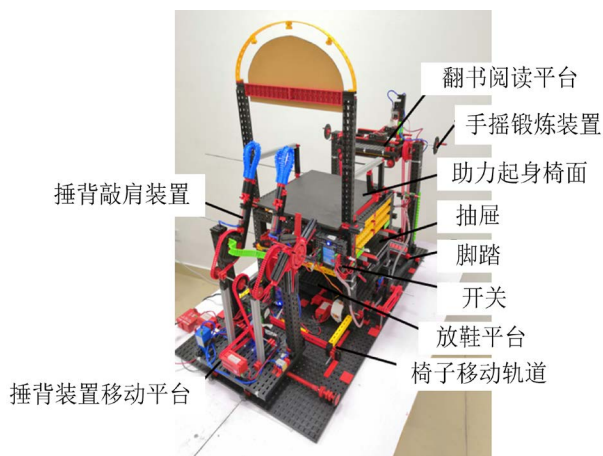


Figure 10. Physical model of the intelligent home for the aged chair

图 10. 智能家居养老椅实物模型图

5.2. 实物试验

试验地是产品开发附近的一所养老院。先对产品进行模拟化工业设计，分设为不同的模块，进行产品样品批量化生产，让老人进行各模块产品性能试验；未来研究为制作铝合金样机，进行完整工能体验。本次试验老人对象多为 60~75 岁的老人，其中 30% 以上不适合室外运动。

5.3. 试验结果

通过对 87 位老人的试验获得数据，得到本智能家居养老椅的实际性能指标，如表 6 所示。

Table 6. Performance test index
表 6. 性能试验指标

内容操作难度/%	功能要求/%	智能性/%
技术要求<7.2	>97.5	>30.12
人工模拟结果>60.4	<30.6	0
机器试验结果<6.5	>92.7	>34.7

由表 4 可见：本文提出的一种智能家居养老椅装置，操作难度小于 7.2%，功能要求达到用户要求的 97.5%，智能性高于 30%，相比于传统的人工养老或者普通养老装置，具有更好的性能，结构设计较为复杂，可以很好地满足更多用户的要求，实现多功能集合于一体的存在。同时，可以发现智能家居养老椅的各性能指标基本都达到技术和市场要求，设计是合理的。

6. 总结

本文从老龄化趋势出发，关注老年人的健康状态，设计了一种基于模块化设计的智能居家养老椅，从设计方案、理论校核计算对本产品进行了研究，并综合运用 Adams 以及 Solidworks 软件对所设计的模型进行了有限元分析和动力学仿真，分别对所设计机构的安全性以及对选用电机的合理性进行了校验，结果发现，所设计的智能家居养老椅满足理论要求，各项性能均具有较高的要求；最后将智能椅子分多个模块分别进行实地试验，在产品各项性能指标都基本满足技术和市场要求的情况下，进一步验证了智能家居养老椅的可行性和合理性。为智能家居养老椅的结构设计提出了一种新的思路，可供更多的学者进行研究。

基金项目

浙理工高等教育科学研究课题(Xgz1803)、浙理工实践教学类教改课题(XKJS1801)和浙理工机械工程优势特色学科(2018)项目资助。

参考文献

- [1] Fotiou, D., Ntanasios-Stathopoulos, I., Gavriatopoulou, M. and Dimopoulos, M.A. (2020) Multiple Myeloma: Current and Future Management in the Aging Population. *Maturitas*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2020.04.015>
- [2] 曾鸣晨. 基于人工智能技术的养老服务机器人设计[J]. 电子制作, 2018(24): 21-22.
- [3] Comandao, A.S., Macatangga, R., Velasco, L., et al. (2019) Automated E-Chair Controlled Using Hand Gesture and Smartphone Application. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*. <https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.20.S2.32>
- [4] Jaafar, H., Fariz, A., Ahmad, S.A., et al. (2012) Intelligent Massage Chair Based on Blood Pressure and Heart Rate. *IEEE EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences*, 514-518. <https://doi.org/10.1109/IECBES.2012.6498196>

-
- [5] Yang, X., He, J., Kong, L., *et al.* (2018) The Control System Design of Coin-Operated Massage Chair. *International Conference on Virtual Reality*. <https://doi.org/10.1109/ICVRIS.2018.00092>
- [6] 林朝阳, 陈临强, 任彧, 等. 基于模糊控制的智能按摩椅研究[J]. 机电工程, 2011, 28(11): 1350-1353.
- [7] 桂静宜. 智能家居系统家庭近距离无线自动控制仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(4): 353-357.
- [8] 李双领, 王晨. 嵌入式技术在智能家居控制系统中的应用探究[J]. 电子技术与软件工程, 2016(8): 201.
- [9] 张坤, 饶颖卿, 张明一, 曾海峰, 马兵. 基于模块化设计的养老机器人[J]. 电子设计工程, 2018, 26(3): 151-155 + 159.
- [10] Mohanraj, R., Elangovan, S., Arun Prakash, R., Sanjeev, S., Swetha, R. and Agalya, K. (2020) Stress Analysis on Single and Herringbone Helical Gears. *Materials Today: Proceedings*, **22**. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.219>
- [11] 张兆龙, 孙金凤, 胡亮. 丝杆移动型爬杆机器人的机构设计与分析[J]. 机械, 2018, 45(1): 66-71.
- [12] 刘冬野. 侧装煤车链传动的结构动力学分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2018, 8(18): 19-20.
- [13] Sajeer, M., Mitra, A. and Chakraborty, A. (2020) Spinning Finite Element Analysis of Longitudinally Stiffened Horizontal Axis Wind Turbine Blade for Fatigue Life Enhancement. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **145**. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106924>
- [14] 蔡改贫, 李小燕. 内啮合锥齿轮章动传动的运动学分析[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(3): 72-74+79.