

【工业设计】

基于 TRIZ-GA 老龄服务机器人人因系统功能配置与设计优化

王秋惠¹, 牛志通¹, 刘力蒙²

(1.天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387; 2.普渡大学 工程学院, 西拉法叶市 IN 47907)

摘要: **目的** 基于 TRIZ 理论对老龄服务机器人用户需求、配置原理及人机关系进行分析, 并运用 GA 算法进行优化。**方法** 首先利用五阶问卷、层次分析法对老年人行为特征进行剖析, 得出老年人具体的功能需求。结合 TRIZ 理论推导出老龄服务机器人的功能结构模型。其次利用物-场模型建立较为完善的老龄服务机器人新型人机系统设计模型。在功能模型与系统模型的基础上, 利用物理矛盾原理推导出老龄服务机器人的配置原理, 并运用技术矛盾原理对其进行设计改进, 最后利用 GA 算法寻求最优解, 将其具象化并用主成分综合评价验证研究成果。**结果** 在满足老年人需求的基础上, 提出了功能模型、新型人机模型及配置模型。**结论** 提出了老龄服务机器人配置原则及优化方法与设计指标, 以期为后续老龄服务机器人交互设计及人机界面设计提供理论依据。

关键词: TRIZ; 遗传算法 GA; HRS 人因系统; 功能配置; 设计优化; 老龄服务机器人

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)24-0062-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.24.009

Function Design and Design Optimization of Service Robot for the Elderly Based on TRIZ-GA

WANG Qiu-hui¹, NIU Zhi-tong¹, LIU Li-meng²

(1.School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University 300387, China;

2.College of Engineering, Purdue University, West Lafayette 47907, USA)

ABSTRACT: The work aims to analyze the user demands, principle of structure and human-robot relationships about service robot for the elderly based on the TRIZ theory, and use GA to optimize the design. Firstly, five-stage questionnaire survey and analytic hierarchy process were used to analyze the behavioral characteristics of the elderly to obtain the specific functional needs of the elderly. Combined with the TRIZ theory, the functional structure model of service robot for the elderly was derived. Secondly, the object-field model was used to establish a relatively complete design model of the new human-robot system for service robot for the elderly. Based on the functional model and the system model, the principle of physical contradiction was used to derive the configuration principle of service robot for the elderly. The principle of technical contradiction was used to improve the design. Finally, the GA was used to find the optimal solution, and visualize it and verify the research results with the principal component comprehensive evaluation. On the basis of meeting the needs of the elderly, the functional model, HRS model and structural mode are proposed. Configuration principles, optimization methods and design indicators for service robot for the elderly were proposed to provide theoretical basis for subsequent robot design.

KEY WORDS: TRIZ; genetic algorithm (GA); human-robot system (HRS); function allocation; design optimization; service robot for the elderly

收稿日期: 2020-08-06

基金项目: 教育部人文社会科学规划基金项目《老龄服务机器人界面设计评价指标研究》(19YJAZH093)

作者简介: 王秋惠(1969—), 女, 山东人, 博士, 天津工业大学教授, 主要从事服务机器人人因工程、人机界面设计、产品可用性设计方面的研究。

人口老龄化进程不断加深趋势下^[1]，老龄服务机器人的开发与应用具有广阔的市场前景^[2]，其人因系统功能配置及设计优化研究具有重要的理论意义，能够为老龄服务机器人交互设计及人机界面设计提供重要的依据。

国外关于服务机器人技术发展较早^[3]，例如美国较早 Pearl 机器人与 Deegen 机器人，可根据用户需求将导向功能与提醒功能加入其结构原理设计中^[4-5]。Jayaawardena 设计的 HealthBot 老龄服务机器人可完成体质测量、提醒、娱乐、交流及安全保障等多种服务功能^[6]；Chandan 从人机交互设计的角度，提出了机器人结构原理^[7]；Hogan 建立了基于动作形式的服务机器人物理界面交互结构模型^[8]，Wang 建立了老龄服务机器人自然语言交互界面可用性设计结构模型^[9]。

我国自 20 世纪 90 年代开始进行服务机器人相关技术研究^[10]，经过近三十年的努力，在技术研发、实践应用方面均取得了较大进步。清华大学学者提出系统设计方案，建立了机器人设计的总体框架和控制系统；北京航空航天大学教授针对老年人的心理需求设计了动物型陪护机器人^[11]。郭亮^[12]等学者对机器人跟踪系统进行了探索性研究。天津工业大学王秋惠团队对康复机器人与服务机器人人因工程、人机界面设计进行了系统性研究，取得了较为丰富的理论成果^[13-14]。

在 TRIZ 理论方面，国内外很多学者利用 TRIZ 理论对产品造型、企业管理与系统仿真等方面进行了创新。例如，张家祺^[15]等学者将 TRIZ 理论运用在 iNPD 产品创新设计中；张建辉^[16]等学者利用 TRIZ 解决复杂产品的问题流网络构建及模型等。在 GA 算法（Genetic Algorithm）方面，我国学者将其运用在材料、电子及物理等方面，例如，施锦文等学者对高性能赋形天线进行了优化设计^[17]，郭佳鹏等学者优化了动车生产中的组车调度方法^[18]，樊巧云等学者基于量子遗传算法对多光电二极管布局进行了优化^[19]等。在老龄服务机器人结构优化方面，将两者结合应用的研究较少，具有较大的完善空间。

如上所述，我国老龄服务机器人人机工程设计相关研究虽然取得了一定成果，但是理论研究尚不系统。由于老龄服务机器人具有一定的人类生物学特征，它们与人类和环境关系也发生了改变，从人与机器人的单向互动进化为到双向互动，因此，其人因系统功能配置优化设计越发凸显其重要性。本文将运用 TRIZ 理论结合 GA 算法提出老龄服务机器人人因系统功能配置优化设计方法，以期提高其人因安全及可靠性。

1 基于 TRIZ-GA 的功能配置优化设计流程

TRIZ 理论起源于 20 世纪 60 年代的苏联^[20]，经过半个多世纪发展，这一理论得到不断丰富和完

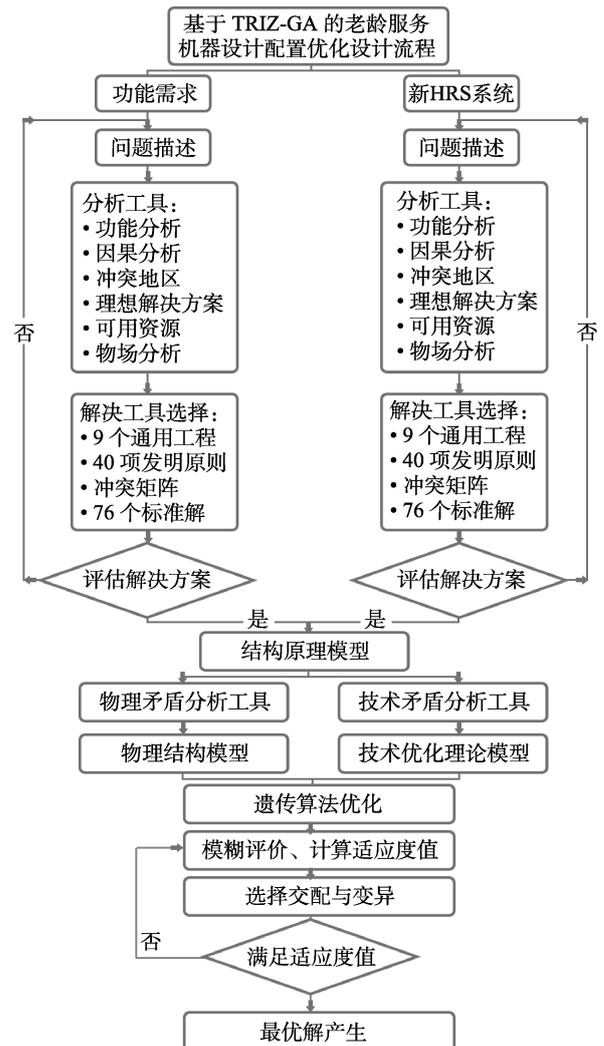


图 1 基于 TRIZ-GA 的老龄服务机器人人因系统功能优化设计流程

Fig.1 Design flow for HRS function optimization of service robot for the elderly based on TRIZ-GA

善，成为较为适用的创新方法，能够有效解决老龄服务机器人人因系统功能优化设计中的诸多问题^[21-22]。它具有 9 个通用工程参数，40 个发明原理，冲突矩阵和 76 个标准解决方案。GA 遗传算法具有全局寻优的巨大功能，可有效解决多目标设计优化问题。本研究将两者优势结合，利用 TRIZ 的创新性与 GA 算法的寻优性，推导出老龄服务机器人人因系统的最优功能配置模型，见图 1。

2 老龄服务机器人功能结构模型分析

2.1 老龄服务机器人功能结构模型

2.1.1 老年人行为需求分析

用户需求是老龄服务机器人人因系统设计首要考虑的问题^[23]。本文目标人群界定为 60 岁及以上，生活在城市中的退休、独居老年人。通过文献调查得知，老年人关心的问题主要集中在日常生活活

表1 老年人行为需求
Tab.1 Behavioral needs of the elderly

问题类型	具体问题
日常生活	与移动相关的行为活动、家务、做饭、购物、操作电子设备、公务
心理需求	缺少陪伴、对于未知的恐惧
社会参与	由于社会关系的减少而产生的孤独感、退休在家
感知觉与沟通	身体机能下降, 听觉视觉下降, 影响了与人沟通



图2 部分实验记录
Fig.2 Part of the experimental record

表2 功能需求因子分析综合评价排序结果
Tab.2 Comprehensive assessment ranking of functional demand factor analysis

功能	原始数据	第一主成分	第二主成分	综合得分	排名
日常生活	9	0.764	0.370	1.482	1
心理需求	7	-0.216	0.929	1.045	2
社会参与	2	-0.622	-0.083	0.893	3
感知觉与沟通	-27	0.682	-0.196	0.581	4

动、精神状态、感知觉与沟通、社会参与度^[24], 老年人行为需求见表1。

本研究采用问卷方式对老年人进行需求调查, 首先建立5阶问卷, 要求24位老人对四个行为需求进行打分, 其中男性为7名, 女性为17名, 部分实验记录见图2。

问卷内容如下: 您日常生活是否需要器械辅助? 您常与子女和邻居的沟通么? 您的日常生活是否需要人帮助? 您对您的生活满意么?

打分原则如下: “-2”是表示非常不满意或关注度低, “-1”表示较低, “0”表示中立, “1”表示较为满意或关注, “2”表示非常满意或非常关注。最后利用因子分析法排序结果, 具体数据见表2。日常生活活动老年人最为关注, 其次是精神状态, 然后是社会参与度、感知觉与沟通。

2.1.2 老龄服务机器人功能需求黑箱模型

利用主成分分析法计算得知, 统计显示优先级功能为日常生活类功能; 其次功能为精神状态类功能; 辅助功能为社会参与度类功能; 最后期待为感知觉与沟通类功能、友好的外观、拟人的声音及简易的操作

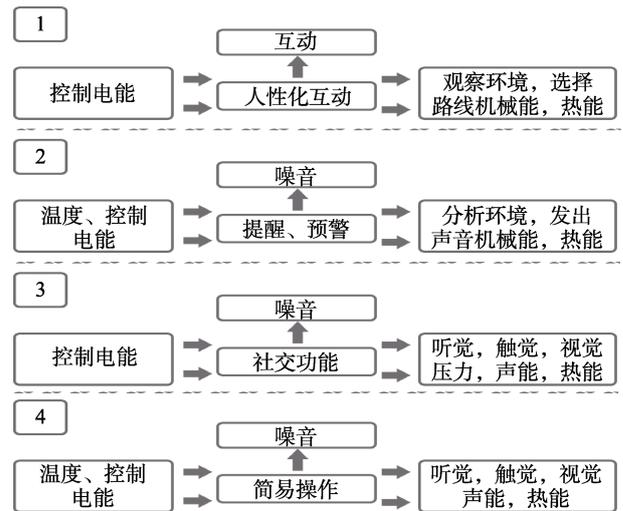


图3 黑箱模型
Fig.3 Black box model

界面。利用TRIZ理论中的How To模型中形成以下四个具体问题。(1)日常生活类功能: 如何实现拿取物品与协助功能?(2)精神状态类功能: 如何实现提醒与预警功能?(3)社会参与类功能: 如何实现社交功能?(4)感知觉与沟通类功能: 如何实现更容易让老人操作?

建立黑箱模型: 设系统输入接口由信息 S , 物质 M 和能量 E 所组成, 通过系统输出接口信息 S' , 物质 M' 和能量 E' 。

定义1 基于输入接口的测试用例: 设输入信息 S 由 x 个参数 S_1, S_2, \dots, S_x 构成测试用例组 $S=\{S_1, S_2, \dots, S_x\}$ 。输入物质 M 由 y 个参数 M_1, M_2, \dots, M_y 构成测试用例组 $M=\{M_1, M_2, \dots, M_y\}$ 。输入能量 E 由 g 个参数 E_1, E_2, \dots, E_g 构成测试用例组 $E=\{E_1, E_2, \dots, E_g\}$ 。

定义2 基于输出接口的测试用例: 设输出信息 S' 由 x 个参数 S'_1, S'_2, \dots, S'_x 构成测试用例组 $S'=\{S'_1, S'_2, \dots, S'_x\}$ 。输出物质 M' 由 y 个参数 M'_1, M'_2, \dots, M'_y 构成测试用例组 $M'=\{M'_1, M'_2, \dots, M'_y\}$ 。输出能量 E' 由 g 个参数 E'_1, E'_2, \dots, E'_g 构成测试用例组 $E'=\{E'_1, E'_2, \dots, E'_g\}$ 。

定义3 基于环境对系统输入: 设环境-系统输入 F 由 t 个参数 F_1, F_2, \dots, F_t 构成测试用例组 $F=\{F_1, F_2, \dots, F_t\}$ 。

定义4 基于系统对环境输出: 设系统-环境 Q 由 z 个参数 Q_1, Q_2, \dots, Q_z 构成测试用例组 $Q=\{Q_1, Q_2, \dots, Q_z\}$ 。

定义1、2、3、4的表示公式为(n 表示变量的个数):

$$X = \sum_n^1 x_n \quad (1)$$

把具体信息导入各个功能系统中, 总结其日常生活类、精神状态类、社会参与类和感知觉类所需要的功能, 见图3。

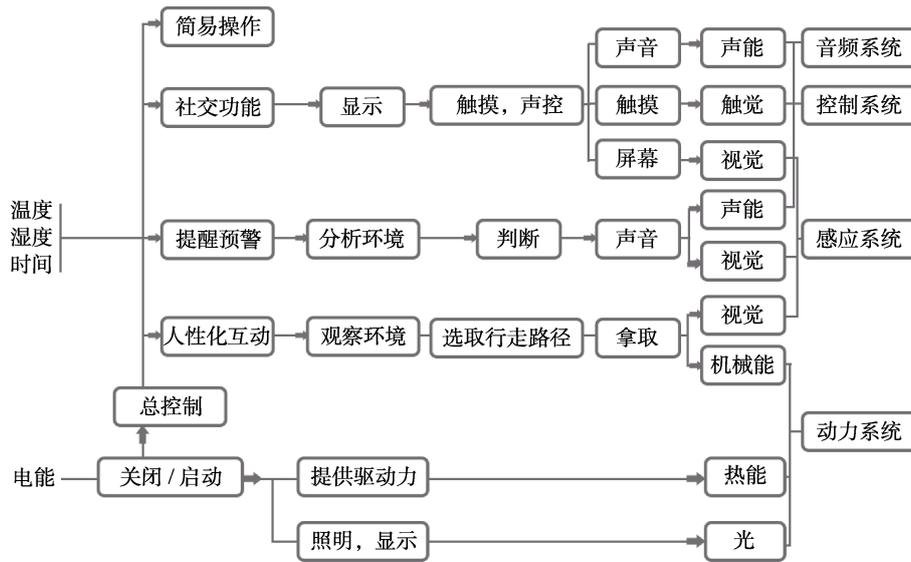


图 4 老龄服务机器人功能结构模型

Fig.4 Functional structure model of service robot for the elderly

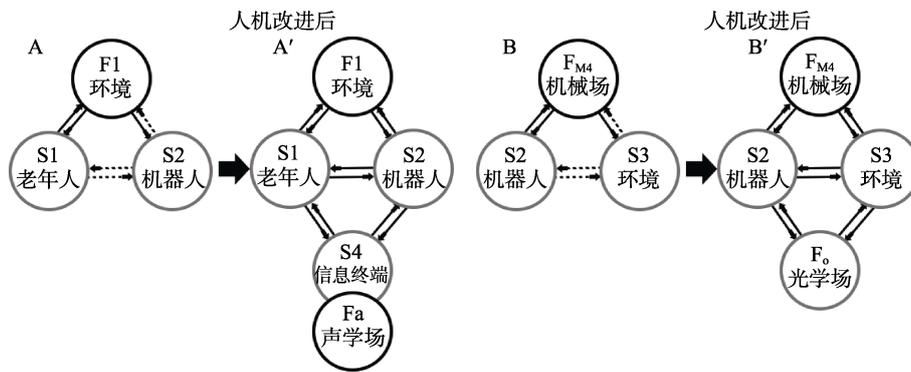


图 5 人-机和机-环物场模型优化

Fig.5 Human-robot and robot-environment object field model optimization

2.1.3 老龄服务机器人功能结构模型建立

基于老龄服务机器人的四条功能链，将控制和电能设定为是机器人工作的基础，以此构建得出机器人功能配置模型，见图 4。例如，机器人接收到命令后，首先观察环境，然后判断行走路线，最后采取行动，在此过程中，机器人的视觉和机械能量发挥重要作用。

2.2 基于物场模型的新型 HRS 模型

2.2.1 新型人-机-环模型建立

TRIZ 中物-场模型是由由两种不同的物质和一个场组成的技术系统，与人机工程学中的“人-机-环”系统具有一定的对应关系。将人和机器人视为两种物质，环境作为人和机器人的作用场。根据人因工程学原理，人-机-环系统应把交互关系中的不利因素减少到最低，达到最大程度的相互协调。基于此，首先建立老年人与机器人的物-场模型，然后建立机器人与环境的物-场模型。模型搭建玩抽建立后运用 37 种标准解对其进行优化，从而建立较为完整有效的人-机-

环系统架构。人-机和机-环物场模型优化见图 5，把原有的人机物-场模型，利用 37 种标准解中的第 4 条外部环境添加物的物-场，第 5 条外部环境物-场与第 15 条并联物-场使其完整且有效。

2.2.2 老龄服务机器人新型 HRS 系统架构

老龄服务机器人新型 HRS 系统见图 6，运用第 16 条串联物-场连接两种物-场模型，建立起完整有效的系统架构。

机器人作业环境主要在家居室内，居住环境是影响机器人工作时的可靠性和安全性最大因素，同时也影响老年人对机器人的操作和控制。由于老龄服务机器人具有部分人类生物学特性，因此老人可以对机器人进行指导性控制。机器人通过自身系统运算，为老年人服务，监测老年人行动、判断老年人的需求并主动为老年人提供服务。如机器人通过观察周边环境，来判断自身的行动路径，主动为老人提供服务。譬如，穿过障碍物、测量当天温度和湿度并提醒老人是否加衣。

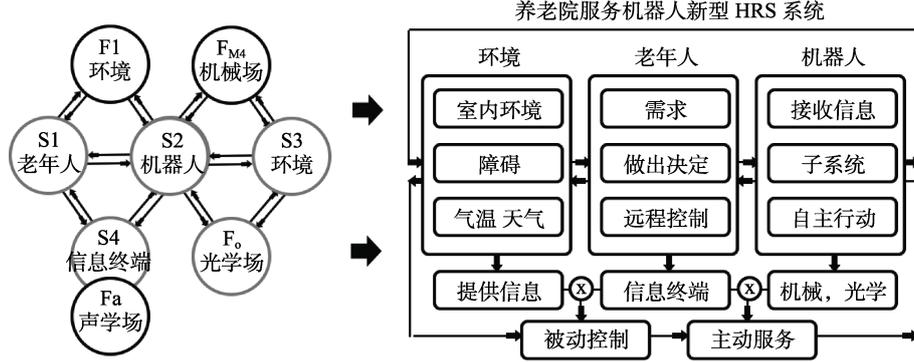


图 6 老龄服务机器人新型 HRS 系统
Fig.6 New HRS system of service robot for the elderly

表 3 老龄服务机器人矛盾矩阵

Tab.3 Contradiction matrix of service robot for the elderly

	运动物体的重量	操控和测量的复杂性	能量损失	系统的复杂性
稳定性	21、35、2、39	35、22、39、23	14、2、39、6	2、35、22、26
测量精度	32、35、26、28	26、24、32、28	26、32、27	27、35、10、34
自动化程度	28、26、18、35		23、28	15、24、16
操作方便性	25、2、13、15	34、27、25	2、19、13	32、25、12、17

3 老龄服务机器人配置原理分析

依据人因工程学原理,机器人功能配置必须满足老年人使用要求,这是当前机器人制造技术的难点。需要首先利用发明原理和分离原理来解决这些问题。

3.1 基于分离原理的配置分解模型

运用分离原理决定老龄服务机器人的功能结构配置。就其物理结构方面,采取结构分离设计方法,把首先将其结构划分为动力驱动系统、控制系统、监控系统、音频系统、拿取系统和辅助系统六大主系统;然后再把各个系统分离成子系统,进而形成其结构模型。动力驱动系统:行走系统、电机等,可以更快速的到达老人身边并清除路上的杂物。(2)控制系统:主要进行人机交互,包括中央处理系统、显示系统、遥控系统和信号传递。(3)监控系统:含有视觉感应、温度感应、湿度感应、气味感应、听觉感应和触摸感应(探测周围的事物,感知环境,感知老人的动作),其可以满足老年人需求,并提供环境信息。而且头部有音频系统,需要提醒吃、危险警报、播放音乐。(4)音频系统:为提醒和警告老年人装置,由发声器和智能处理装置组成。(5)拿取系统:是机器人最为重要的系统之一,由手臂装置和连接装置组成,可以自由摆动,帮助老年人完成取物等工作。(6)辅助系统:其辅助系统主要由各种紧固件、照明灯、机体的外壳、消音装置、轮胎等组成。

3.2 基于技术矛盾的优化配置模型

利用功能结构模型将所需要的功能置入技术矛盾的 39 个通用工程参数进行计算,数据显示老龄服

务机器人需要改善或注意的工程参数为:稳定性、测量精度、自动化程度、操作流程及方便性。老龄服务机器人矛盾矩阵见表 3,老龄服务机器人技术优化模型见图 7。提炼出需要改善参数可以用的创造原理,提高稳定性可以采用第 2、39、22、35 条原理,提高测量精度可以采用第 32、35、26、27 条原理,提高自动化程度可采用第 28 原理,改善操作流程的方便性可采用第 25、2、13 条原理。

4 基于 GA 算法结构配置优化

GA 遗传算法最大的特点就是全局寻优,在 TRIZ 理论对老龄服务机器人结构创新的基础上,利用遗传算法寻求最优的配置原理。

4.1 编码

遗传算法的编码有浮点编码和二进制编码,这里将采用二进制编码规则。二进制编码既符合计算机处理信息的原理,也方便对染色体进行遗传、交配与突变等。根据前文中的结构原理形成其基因树,编码将会由六大基因组组成:拿取系统、检测系统、控制系统、音频系统、动力驱动系统和辅助系统。将其对应的具体装置设为元基因。例如,拿取系统中的存在手臂装置表示为 10,不存在表示 01。每个个体的编码有 24 位,见图 8。

4.2 适应度函数优化

适应度值越高的样本,基因被遗传的几率会越大。但由于评估老龄服务机器人结构配置适应度值,没有明确的函数和参数,所以其适应度函数的确立有一定难度,本文利用德尔菲法与模糊评价法相结合建

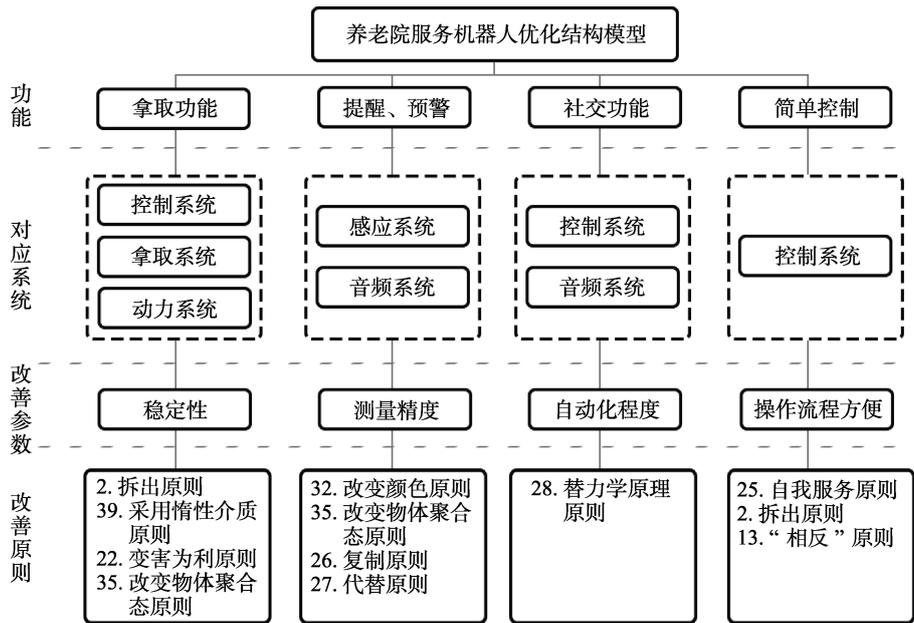


图 7 老龄服务机器人技术优化模型

Fig.7 Technology optimization model of service robot for the elderly

拿取系统	检测系统	控制系统	发声系统	动力系统	辅助系统
手臂	手指	视觉	触摸	远程控制	触摸
					发声装置
					智能处理
					行走
					电机
					照明
					消音

图 8 老龄服务机器人结构配置编码

Fig.8 Structure configuration code of service robot for the elderly

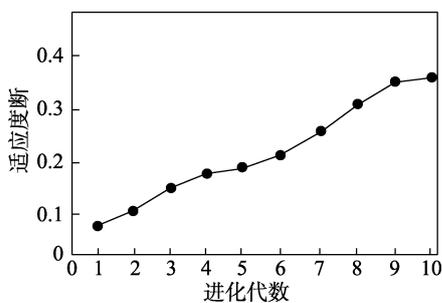


图 9 适应度变化趋势

Fig.9 Variation trend of fitness

立适应度函数。既可以解决参数化的难题，也可以使优化结果更符合功能需求。

通过前文中的结构分解模型生成一个染色体，再利用优化结构模型选取 4 个结构，即 5 种染色体。分别表示为：

$$\begin{aligned}
 U_1 &= [101010010110101001100101] \\
 U_2 &= [100110011010100110010110] \\
 U_3 &= [100110101001011010101010] \\
 U_4 &= [011010101010011010100101] \\
 U_5 &= [011001101010011010010110]
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

让 10 名老年人对其配置设计进行五阶评价，例如：“-2”为不满意，“-1”为较不满意，“0”为无感，“1”为较满意，“2”为非常满意。并建立评价矩阵 ($j=5, n=6, m=10, r$ 为对单因素的评价)：

$$R_j = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix}
 \tag{3}$$

根据前文中利用主成分分析得出老年人的功能需求，并结合德尔菲法来确定其权重值集，表示为：

$$A_n = \{0.42, 0.31, 0.22, 0.15\}
 \tag{4}$$

通过计算其隶属度 B ，来建立适应度函数表示为：

$$f(x) = eval(U_i) = B_i = A \circ R_i
 \tag{5}$$

4.3 参数设置

由于进化的种群数量较少，将其交配概率设为 0.55，变异概率为 0.03。由于计算过程较为复杂，需要大量数据统计，将停止进化条件为 10 代，或者在此之前出现最优解也将终止演算。

4.4 实验结果

根据之前对算法，当演算到第 10 代的时候适应度值接近平稳，从而也说明了专家对功能配置评价越来越高，适应度变化见图 9，第十代的适应度为 0.35，二进制编码如下：

$$U_{best} = [101010101010101010100101]
 \tag{6}$$

4.5 最优解具象化

通过遗传优化后的配置原理模型树，将老龄机器人核心技术整理见表 4。

表4 核心技术
Tab.4 Core Technology

用户需求	实现手段	关键技术
拿取功能	物品检测	视觉识别 多传感器融合技术
远程操作	远程遥控器	WiFi 通信
社交功能	交互屏幕	人脸识别技术 软件 APP
检测功能	环境检测	摄像头模块 红外传感器模块 超声波传感器模块



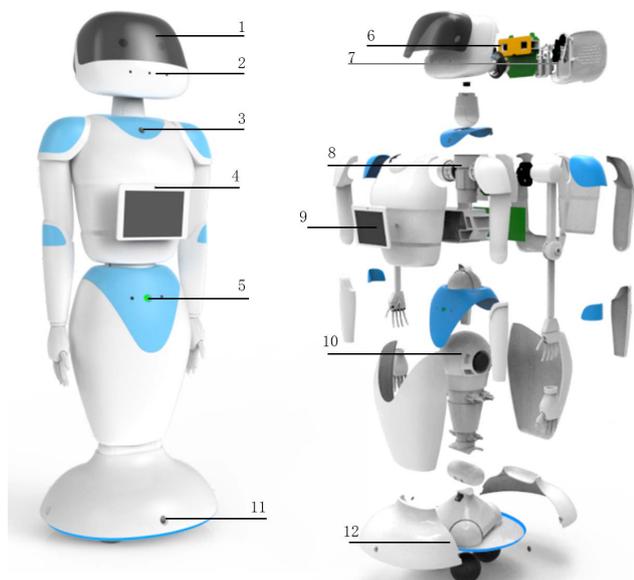
图11 部分样品

Fig.11 Part of the samples

表5 主成分综合评价得分

Tab.5 Comprehensive evaluation score of principal components

机器人代码	第一主成分得分	第二主成分得分	综合得分	名次
X2	0.2288	-0.007	0.2219	10
X5	0.1848	0.0433	0.2281	9
X10	0.2364	0.0081	0.2445	8
X7	0.2279	0.0222	0.2501	7
X6	0.2292	0.0337	0.2630	6
X4	0.2441	0.0318	0.2759	5
X9	0.4716	-0.0328	0.4388	4
X3	0.7185	-0.0499	0.6685	3
X8	0.4759	0.2028	0.6787	2
X1	0.8382	-0.1339	0.7042	1



注: 1 防尘面罩; 2 发声装置; 3 投影仪; 4 摄像头; 5 警示灯; 6 人脸识别装置; 7 红外传感器; 8 躯干支撑; 9 触摸屏; 10 电池; 11 超声波传感器; 12 万向轮

图10 最优配置原理具象化

Fig.10 Visualization of optimal configuration principle

将最优解的二进制编码解码形成具象的机器人配置, 见图 10。主要功能有健康监测、视频通话、娱乐陪护等。人脸识别系统位于机器人顶部, 便于识别用户并进行跟随。三轮式搭配圆柱形造型使其视觉上更加稳定。超声波传感器等模块设备位于机器人底部。

4.6 设计评价

把样本产品混入 10 种国内现存的老龄服务机器人设计中, 部分样品见图 11。基于评价指标都有明确的属性, 之间没有存在较强的关联性, 选择主成分综合评价有较明显的优势, 利用 5 阶问卷法, 对 14 个机器人的功能, 配置等进行评价, 建立模糊性综合评价模型。

根据以上公式利用 SPSS 计算得出 14 个机器人产品综合得分, 见表 5。样本产品 X₁ 得分最高, 证明本研究具有指导性意义。

5 结语

随着社会老龄化进程的不断加快, 人工智能技术的不断进步和成熟, 老龄服务机器人及相关领域有着广阔发展前景, 同时带动关联产业的发展, 对应对和解决老龄化问题具有重要的战略性意义。

本文以老龄服务机器人为研究对象, 采用 TRIZ 理论的解决思路和方法, 提出解决老龄服务机器人人因系统功能配置设计与评价指标, 使之符合老年人的生理和心理需求, 再利用遗传算法对其配置原理进行优化, 一定程度的完善了老龄服务机器人人机工程设计方法, 以期后续机器人设计提供理论依据。

参考文献:

- [1] 朱洪峰. 着力实现农村老年人口健康养老[N]. 中国人口报, 2019-04-03(3).
ZHU Hong-feng. Focus on Realizing Healthy Old-age Care for the Elderly in Rural Areas[N]. China Population News, 2019-04-03(3).
- [2] 王秋惠, 魏玉坤, 刘力蒙. 康复机器人研究与应用进展[J]. 包装工程, 2018, 39(18): 83-89.

- WANG Qiu-hui, WEI Yu-kun, LIU Li-meng. Research and Application Progress of Rehabilitation Robots[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(18): 83-89.
- [3] Jess H Lonner, Glenn J Kerr. Low Rate of Iatrogenic Complications during Unicompartmental Knee Arthroplasty with Two Semiautonomous Robotic Systems[J]. The Knee, 2019.
- [4] Pineau J, Montemerlo M, Pollack M, et al. Towards Robotic Assistants in Nursing Homes: Challenges and Results[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 42(3): 271-281.
- [5] Deegan P, Grupen R, Hanson A, et al. Mobile Manipulators for Assisted Living in Residential Settings[J]. Autonomous Robots, 2008, 24(2): 179-192.
- [6] Jayawardena C, Kuo IH, Unger U, et al. Deployment of a Service Robot to Help Older People[C]. 2010 IEEE/RSJ International Conference on, 2010.
- [7] Datta C. Programming Behaviour of Personal Service Robots with Application to Healthcare[D]. The University of Auckland, 2014.
- [8] Hogan N. Geometric and Numerical Foundations of Movements[M]. Cham: Springer, 2017.
- [9] Wang N, Broz F, Di Nuovo A, et al. A User-centric Design of Service Robots Speech Interface for the Elderly[C]. Recent Advances in Nonlinear Speech Processing, Springer, Cham, 2016.
- [10] 宋章军. 服务机器人的研究现状与发展趋势[J]. 集成技术, 2012, 1(3): 1-9.
- SONG Zhang-jun. Research Status and Development Trend of Service Robots[J]. Integrated Technology, 2012, 1(3): 1-9
- [11] 陶永, 王田苗, 孙书仑, 等. 陪护机器人——呵护老人生活的好伴侣[J]. 机器人技术与应用, 2013(5): 39-43.
- TAO Yong, WANG Tian-miao, SUN Shu-lun, et al. Accompanying Robots: a Good Companion for Caring for the Elderly[J]. Robot Technology & Applications, 2013(5): 39-43.
- [12] 郭亮, 张华. 狭小空间不连续折线焊缝识别移动机器人跟踪系统[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 8-13.
- GUO Liang, ZHANG Hua. Identification of Mobile Robot Tracking System for Discontinuous Weld Line in Narrow Space[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 8-13.
- [13] 王秋惠, 代欣. 基于人因视角的儿童陪伴机器人交互界面设计研究[J]. 技术与创新管理, 2019, 40(1): 44-47.
- WANG Qiu-hui, DAI Xin. Research on the Interactive Interface Design of Children's Companion Robot Based on Human Factors[J]. Technology and Innovation Management, 2019, 40(1): 44-47.
- [14] 王秋惠, 张一凡, 刘力蒙. 老龄服务机器人人机界面设计研究进展[J]. 机械设计, 2018, 35(9): 105-113.
- WANG Qiu-hui, ZHANG Yi-fan, LIU Li-meng. Research Progress on Human-machine Interface Design of Aged Service Robots[J]. Mechanical Design, 2018, 35(9): 105-113.
- [15] 张家祺, 周坤, 文豪, 等. TRIZ理论在iNPD产品创新设计中的应用[J]. 包装工程, 2018, 39(24): 194-198.
- ZHANG Jia-qi, ZHOU Kun, WEN Hao, et al. Application of TRIZ Theory in the Innovative Design of iNPD Products[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(24): 194-198.
- [16] 张建辉, 梁瑞, 韩波, 等. 面向复杂产品的问题流网络构建及求解过程模型[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 160-173.
- ZHANG Jian-hui, LIANG Rui, HAN Bo, et al. Construction and Solution Process Model of Problem Flow Network for Complex Products[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(23): 160-173.
- [17] 施锦文, 张新刚, 时政欣, 等. 基于遗传算法的高性能赋形天线优化设计[J]. 微波学报, 2019, 35(3): 16-19.
- SHI Jin-wen, ZHANG Xin-gang, SHI Zheng-xin, et al. Optimization Design of High Performance Shaped Antenna Based on Genetic Algorithm[J]. Journal of Microwaves, 2019, 35(3): 16-19.
- [18] 郭佳鹏, 赵宁, 吴秀丽. 动车生产中的组车优化调度方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(12): 1486-1492.
- GUO Jia-peng, ZHAO Ning, WU Xiu-li. Optimized Scheduling Method for Group Cars in the Production of Motor Cars[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(12): 1486-1492.
- [19] 褚理想, 樊巧云. 基于量子遗传算法的多光电二极管布局优化[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(8): 133-140.
- CHU Li-xiang, FAN Qiao-yun. Multi-photodiode Layout Optimization Based on Quantum Genetic Algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(8): 133-140.
- [20] 鲍宏, 刘志峰, 胡迪, 等. 应用 TRIZ 的主动再制造绿色创新设计研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 33-39.
- BAO Hong, LIU Zhi-feng, HU Di, et al. Research on Green Innovation Design of Active Remanufacturing Using TRIZ[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 33-39.
- [21] 江汇. 基于 TRIZ 的某型叉车驾驶舱人机工程设计与研究[J]. 叉车技术, 2013(3): 7-10.
- JIANG Hui. Design and Research of Ergonomics of a Forklift Truck Based on TRIZ[J]. Forklift Technology, 2013(3): 7-10.
- [22] 张简一, 郭艳玲, 杨树财, 等. 基于 TRIZ 理论的产品创新设计[J]. 机械设计, 2009, 26(2): 35-38.
- ZHANG Jian-yi, GUO Yan-ling, YANG Shu-cai, et al. Product Innovation Design Based on TRIZ Theory[J]. Mechanical Design, 2009, 26(2): 35-38.
- [23] 鲁麒, 任工昌, 李平平, 等. 基于 TRIZ 理论的中文专利文本挖掘模型的构建[J]. 情报科学, 2014, 32(10): 28-32.
- LU Qi, REN Gong-chang, LI Ping-ping, et al. Construction of Chinese Patent Text Mining Model Based on TRIZ Theory[J]. Information Science, 2014, 32(10): 28-32.
- [24] 赵雅宜, 丁亚萍, 李现文, 等. 老年人能力等级的分类与判定[J]. 中国卫生统计, 2015, 32(6): 1017-1019.
- ZHAO Ya-yi, DING Ya-ping, LI Xian-wen, et al. Classification and Judgment of Seniors' Ability Levels[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2015, 32(6): 1017-1019.
- [25] 肖峰, 胡小玉. 人工智能时代人机和谐的多维建构[J]. 河北学刊, 2019, 39(2): 50-56
- XIAO Feng, HU Xiao-yu. Multidimensional Construction of Human-Computer Harmony in the Age of Artificial Intelligence[J]. Hebei Journal, 2019, 39(2): 50-56.