

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.02.014

基于 TRIZ 理论的便捷式榨汁机优化设计

徐梦媛, 鲁玉军*, 唐曹丹, 胡小勇

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要:针对目前便捷式榨汁机存在较多无效空间的缺点,课题组基于 TRIZ 理论提出了一种可进行自收纳的便捷式榨汁机结构。采用六步法定义最终理想解,利用榨汁机本身的空间资源实现期望的结构和功能;运用组件分析定义了便捷式榨汁机的有用功能和不足功能;通过技术矛盾和物理矛盾分析提出了体积可变的榨汁杯概念方案;通过物场分析设计了榨汁机自身可收纳的结构,包括主机外壳间隙、L 型槽及榨汁杯外部突起等。应用结果表明:自身可收纳结构具有较强的可行性和实用性;携带时的体积可以减小至使用时体积的 1/2,有效提高了携带的便捷性。

关 键 词:便捷式榨汁机;自收纳;发明创造解决理论(TRIZ);矛盾矩阵;计算机辅助创新软件

中图分类号:TS972.21

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2020)02-0077-07

Optimum Design Method of Portable Juicer Based on TRIZ

XU Mengyuan, LÜ Yujun*, TANG Caodan, HU Xiaoyong

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In view of the shortcomings that the current portable juicer has invalid space, a portable juicer structure which can be self-contained was proposed based on TRIZ. Six-step definition method was used to define the final ideal solution and the desired structure and function were realized by using its own available resources. Component analysis was used to define the useful and inadequate functions of the portable juicer. The concept scheme of the juice cup with variable volume was put forward through the analysis of technical and physical contradictions. The structure of the juicer itself was designed through the substance-field analysis, including the shell clearance of the main frame, the L-shaped groove and the exterior protuberance of juice cup, etc. The application results show that the self-contained structure has strong feasibility and practicability, and the carrying volume can be reduced to 1/2 of the using volume, which effectively improves the convenience of carrying.

Keywords: portable juicer; self-contained; TRIZ (theory of inventive problem solving); contradiction matrix; CAI (computer aided innovation)

TRIZ(theory of invention problem solving)表示发明创造解决理论,其拼写是由有相同含义的俄文单词替换英文单词构成^[1-2]。TRIZ 中包含多种分析和解决问题的工具,提供一种系统化创新方法^[3-4],尤其在解决产品创新模糊前端设想的问题和产品进化过程中发挥着重要的作用^[5]。

产品设计主要分为概念设计和详细设计 2 个阶段。其中,概念设计阶段对产品性能和 70% 的成本起着决定性的作用。计算机辅助创新软件(computer aided innovation, CAI)可以有力支持产品的创新设计^[6],有效填补概念设计工具的空白。课题组运用 TRIZ 创新设计方法,结合 IKC 计算机辅助创新设计平

收稿日期:2019-08-17;修回日期:2019-11-29

基金项目:国家科技部创新方法工作专项(2016IM020100);浙江省科技厅重点研发计划项目(2018C01074);浙江省软科学研究计划项目(2019C35008)。

第一作者简介:徐梦媛(1997),女,河南焦作人,本科,研究方向为 TRIZ 创新方法、专利挖掘等。通信作者:鲁玉军(1976),男,重庆人,博士后,教授,硕士生导师,主要研究方向为创新设计,数字化设计与制造、智能制造等。E-mail:luet_lyj@zstu.edu.cn

台^[7]对传统便捷式榨汁机结构占用空间大、储汁量低等问题开展优化设计研究。

1 问题描述

目前,便捷式榨汁机因其便捷的特点受到人们的青睐^[8-12],因此制作者不断对便捷式榨汁机结构进行完善。一些学者通过集中增加滤网和接汁桶或吸管口以减少人为过滤和倾倒汁液的操作^[13-14],或者通过增加保温层对汁液进行保温或保冷^[15],但都未能较好地解决榨汁机便捷携带的问题,反而因功能复杂化而带来的结构复杂化。目前市场上的便捷式榨汁机结构主要由主机机体、榨汁杯和刀具3部分组成,如图1所示。在使用时,由主机机体承接刀具底座,刀具与刀具底座固定,榨汁杯下部螺纹与刀具底座内部螺纹配合连接;在携带时,可选择将3个模块拆分携带或整体携带2种方式。

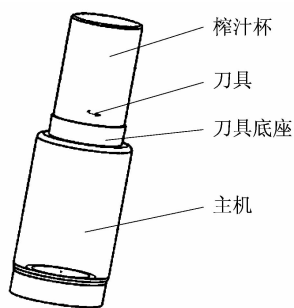


图1 普通便捷式榨汁机结构

Figure 1 Structure of common portable juicer

一味追求功能多样化会造成榨汁机结构复杂,体积增大,设计者们只有减小榨汁机体积才能满足携带的便捷性,但这又带来了单次榨汁量少等问题。因此课题组针对传统便捷式榨汁机结构进行创新研究,在储汁量不变甚至更大的情况下,减小携带便捷式榨汁机时占用的空间。

2 基于TRIZ的便捷式榨汁机优化设计过程

TRIZ理论解决问题基本流程如图2所示^[16]。

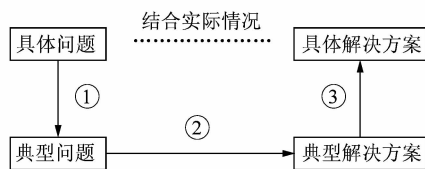


图2 TRIZ理论解决问题的基本流程

Figure 2 Basic process of TRIZ theory for solving problem

运用TRIZ理论解决问题的基本思想是将待解决的问题转化成典型问题,找出问题的主要矛盾,再针对性

地使用TRIZ工具得出解决特定问题的方案,最后根据实际情况(如实用性、美观性等特性)得到最终解决方案。

2.1 定义最终理想解

TRIZ之父阿奇舒勒指出,系统总是在沿着增加其理想度^[17]的方向发展和进化,最终表现为:系统能够实现所有既定的有用功能,却不占用时间和空间,不消耗资源,也不产生任何有害功能。

2.1.1 六步法定义最终理想解

对于便捷式榨汁机理想解的分析包括以下6个步骤:

1) 设计的最终目的

改善便捷式榨汁机储汁量少,结构功能单一等问题。

2) 明确最终理想解

储汁量多,结构多样,功能完善,造型美观。

3) 遇到的障碍

便捷式榨汁机传统结构固化,不能与顾客需求协调同步。

4) 出现障碍的结果

便捷式榨汁机整体结构越来越小,储汁量越来越少。

5) 不出现障碍的结果

功能和结构的创新要及时响应市场的需求。

6) 明确创造这些条件的可用资源

便捷式榨汁机现有的机械结构和功能。

2.2 普通便捷式榨汁机组件分析

如图3所示为运用IKC软件构建普通便捷式榨汁机的组件列表。

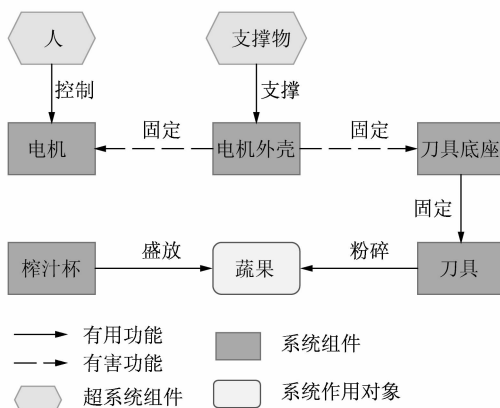


图3 普通便捷式榨汁机组件

Figure 3 Ordinary portable juicer assembly

为了明确普通便捷式榨汁机各组件之间的相互关系,首先对其进行系统组件分析,建立起各组件间的相

互联系并明确组件之间的功能关系,进而合理地匹配组件、优化结构。

为了有利于电机散热,大部分电机外壳与存放电机位置之间都有一定的间隙,该间隙部分仍然具有很大的可拓性,因此电机外壳固定电机和刀具底座的功能被定义为不足功能,其余“固定”、“控制”、“支撑”、“粉碎”和“盛放”均为有用功能。

2.3 工程参数和矛盾分析

为了更好地解决具体问题,将其系统性地转化为由若干工程参数描述的典型问题,根据阿奇舒勒提出的 39 个通用工程参数,并按照这些参数在技术系统中出现几率的大小进行编码。基于“工程参数”的概念,就可以定义矛盾。

2.3.1 技术矛盾分析

技术矛盾^[18]是发生在技术系统中的冲突,表现为某一参数的改善导致其他参数的恶化,可通过查询矛盾矩阵加以解决。技术矛盾往往隐含着物理矛盾^[19-20],两者之间可以相互转化,利用这一转化机制,可将冲突程度较低的技术矛盾转化为冲突程度较高的物理矛盾。

通过对技术矛盾的问题分析,构造如图 4 所示的逻辑链。链的两端为技术矛盾中 2 个矛盾的参数,即技术矛盾表现为:在使用时需要增加存放的蔬果量,会导致榨汁杯的体积增大;同时体积更大、功率更大的电机可以满足较高的出汁率。在逻辑链中,选择体积作为中间参数,沿着逻辑链向体积这个结点推进和汇合,表现为物理矛盾:在使用时希望榨汁杯体积较大,增加可盛放的蔬果量,在携带时希望榨汁机整体体积减小,具有较高的携带便捷性。物理矛盾逻辑链如图 5 所示。

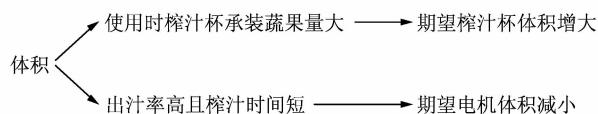


图 4 构建技术矛盾逻辑链

Figure 4 Technical contradiction logical chain construction

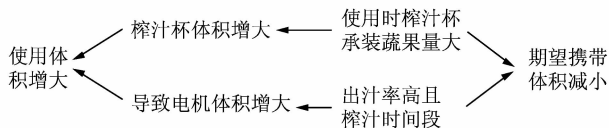


图 5 构建物理矛盾逻辑链

Figure 5 Physical contradiction logical chain construction

2.3.2 物理矛盾分析

为了实现某一功能,同一个工程参数产生了互斥现象,为物理矛盾,可运用表 1 所示的 4 大分离原理^[21]加以解决。

表 1 4 大分离原理

Table 1 Four principles of separation

类型	定义
系统级别分离原理	将矛盾双方在不同的系统层级上进行分离
空间分离原理	将矛盾双方在不同的空间上进行分离
条件分离原理	将矛盾双方在不同的条件下进行分离
时间分离原理	将矛盾双方在不同的时间段上进行分离

选择体积作为中间参数,物理矛盾描述如下:为了提高存放蔬果量,需要增大榨汁机的体积,能量消耗增加;为了携带的便捷性,需要减小榨汁机体积,造成物质或事物的数量减小。因此,要求榨汁机体积既要大又要小,构成物理矛盾,在矛盾矩阵 39 个参数中,“体积”对应参数“静止物体体积”,如表 2 所示。

表 2 物理矛盾分析

Table 2 Analysis of physical contradictions

物理矛盾	改善的参数	恶化的参数	对应的分离原理
矛盾 1	NO. 8 静止物体的体积	NO. 8 静止物体的体积	时间分离

经过有效分析,这组物理矛盾在不同时段对体积有着不同的要求,可采用时间分离原理解决。分离原理与发明原理之间的对应关系如表 3 所示。

因此,可采用与时间分离原理对应的 12 条发明原理解决矛盾。受到 10 预先作用原理的启发,让榨汁杯和刀具部分的收纳工作处于易操作状态,同时满足占用较少空间的状态需求。因此,提出概念方案 I:针对榨汁杯体积大的问题,换用自身体积可以变化的榨汁杯,从而使榨汁杯在收纳时占用的空间资源减小,具体如图 6 所示。

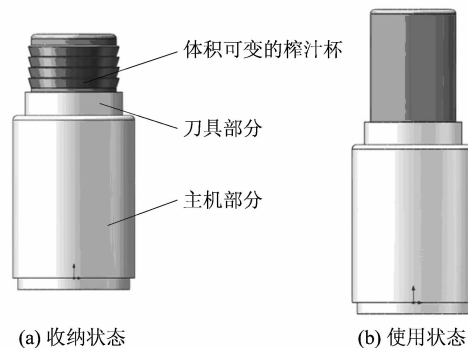


图 6 概念方案 I

Figure 6 Conceptual Scheme I

表3 4大分离原理对应的发明原理

Table 3 Inventive principles corresponding to four separation principles

分离类别		对应的发明原理					
空间分离		1	分割	7	嵌套	26	复制
		2	抽取	13	反向作用	30	柔性壳体或薄膜
		3	局部质量	17	空间维数变化		
		4	增加不对称性	24	借助中介物		
时间分离		9	预先反作用	16	不足或过量作用	21	减少有害作用
		10	预先作用	18	机械振动	26	复制
		11	预先防范	19	周期作用	34	抛弃或再生
		15	动态性	20	有效作用持续性	37	热膨胀
系统级别分离	转换到子系统	1	分割	25	自服务	40	复合材料
		12	等势	33	均质性		
	转换到超系统	5	组合	22	变害为利		
		6	多用性	23	反馈		
	转换到竞争系统	27	廉价替代品				
	转换到相反系统	8	质量补偿	13	反向作用		
条件分离		28	机械系统替代	32	颜色改变	38	强氧化剂
		29	气压和液压结构	35	物理或化学参数改变	39	惰性环境
		31	多孔材料	36	相变原理		

3 物场分析

作为 TRIZ 的基础,阿奇舒勒通过对功能的研究后发现,一个技术系统至少由两个物质(目标物质 S1 和工具物质 S2)和一个场(F)组成^[22]。针对不同的问题,可以将物场模型分为 4 个模块展开讨论,分别为:有效完整模型、不完整模型、效应不足模型和有害效应模型。采用物场分析理论解决问题基本思想如图 7 所示。

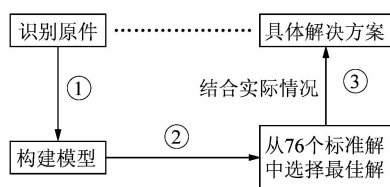


图7 物场分析理论解决问题的基本思想

Figure 7 Basic thought of substance-field analysis theory to solve problems

3.1 便捷式榨汁机的物场分析

1) 问题描述:要解决便捷式榨汁机结构局部在时间上做好榨汁杯和刀具的收纳工作。

2) 对体积占用最多且较为固定的主机部分进行物质-场分析,可知被固定物为 S1,主机部分为 S2, F 为机械场。分析发现,主机固定刀具的功能为不足功能,如图 8 所示。

3) 通过查询物场模型可知图 7 模型为不完整模

型,可通过改变物质或场、增加物质或场加以解决。通过分析传统的主机模型,发现主机外壳和电机部分均有间隙,将其定义为场 F2 完成收纳功能;同时改进物质结构,该物质为 S3 刀具、S4 主机和 S5 榨汁杯,实现收纳的配合。

4) 在充分考虑物场分析模型的基础上,提出概念方案 II:利用电机部分未充分利用的空间资源,来保存携带时需要额外占用空间资源的榨汁杯和刀具,既满足了果蔬存放量又减小携带体积。

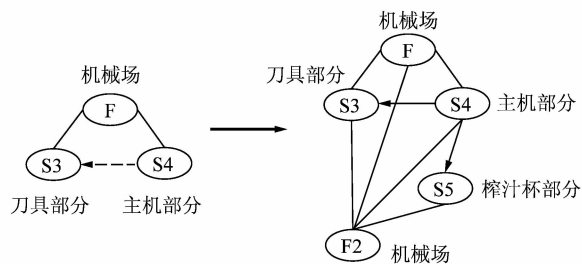


图8 便捷式榨汁机物-场分析

Figure 8 Substance-field analysis of portable juicer

3.2 概念方案提取

基于物场分析原则,初步得出如下 2 种设想:

1) 概念方案 II。①榨汁杯收纳时,利用主机外壳和电机之间间隙进行存放榨汁杯;取用时,向下按压榨汁杯,使榨汁杯向上弹起,然后向右旋转榨汁杯一定角度,再向上拔出,使榨汁杯外表面凸台脱离套筒内部槽孔,同时榨汁杯外表面凸台通过主机外壳内表面凹槽

脱离主机外壳。②刀具收纳时,刀具部分保存在主机外壳下端;使用时,旋转刀具底座使之与主机外壳脱离。正常使用时,将榨汁杯底部和刀具部分以及主机外壳进行连接即可。示意结构如图 9 所示。

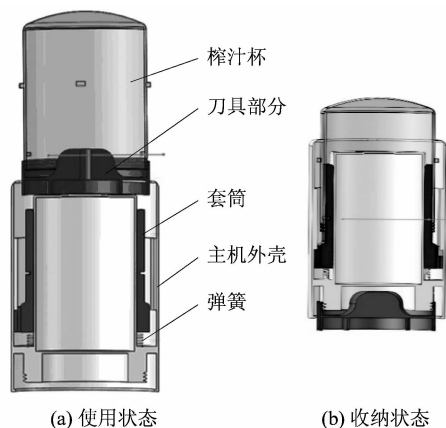


图 9 概念方案 II

Figure 9 Conceptual scheme II

2) 概念方案 III。在保存榨汁杯时,也是利用主机外壳和电机之间的间隙进行存放。依靠外部作用力来实现榨汁杯的存放和取拿。收纳时,刀具部分保存在主机外壳下端;使用时,旋转刀具底座使之与主机外壳脱离,榨汁杯底部内表面螺纹与刀具外壳外表面螺纹配合连接,刀具外壳下部与主机外壳上部通过定位杆连接,示意结构如图 10 所示。

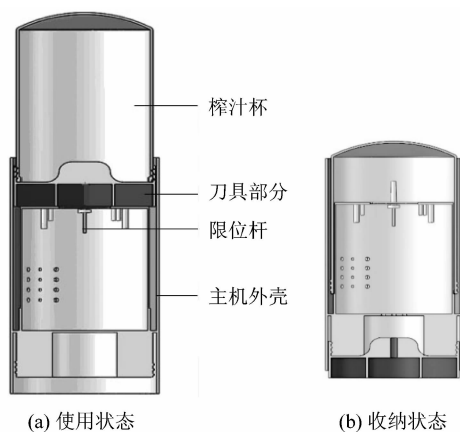


图 10 概念方案 III

Figure 10 Conceptual scheme III

4 概念方案评价

以理想度为评价准则对上述概念方案进行选择,理想度表示公式为^[23-24]:

$$\text{理想度} = \frac{\sum \text{有用功能}}{\sum \text{有害功能} + \sum \text{成本}}。$$

结合概念方案结构以及人们实际购买力,假定有

用功能占比 0~60% (可以正常榨汁占比 0~30%,能够便捷携带占比 0~15%,能够承装较多蔬果量占比 0~15%);有害功能占比为 0%~30% (承装蔬果量少占比 0~15%,携带体积大占比 0~15%);成本占比 0%~10% (组件的增多或者材料特殊造成成本上升)。对概念方案 I、概念方案 II 和概念方案 III 进行分析,采用模糊综合评价法对 3 个概念方案进行评价,具体结果如表 4 所示。

表 4 评价指标

Table 4 Evaluating indicators %			
方案	评价因素		
	有用功能	有害功能	成本
I	43	15	10
II	50	10	10
III	50	10	5

用理想度对各个概念方案进行功能评价,结果如图 11 所示。

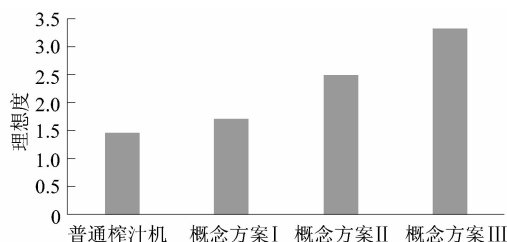


图 11 功能评价结果

Figure 11 Results of functional evaluations

由图 11 可以看出,概念方案 III 理想度最高,因此选择该方案为最终的设计方案。

5 最终方案

5.1 自收纳便捷式榨汁机结构

通过上述分析,考虑实际情况,并结合设计者经验,最终设计一款自收纳便捷式榨汁机。

1) 在收纳时,如图 12 所示,可将刀具装置取下,与榨汁机下部的散热底盖配合连接;当榨汁杯插入到壳体与电机间隙时,榨汁杯外表面凸起沿着 L 型滑槽插入到底端时,转动榨汁杯,使得凸起卡入 L 型滑槽内部。

2) 在使用时,如图 13 所示,可将刀具从榨汁机下部的散热底盖取出,通过限位杆卡接在榨汁机本体上部,并且使刀具与电机连接;反向旋转榨汁杯,然后拔出榨汁杯即可将榨汁杯从榨汁机间隙取出;将榨汁杯连接在刀具底座上,便可进行榨汁的工作。

通过这种连接方式可以快速对榨汁杯进行取用或者收纳和更换。

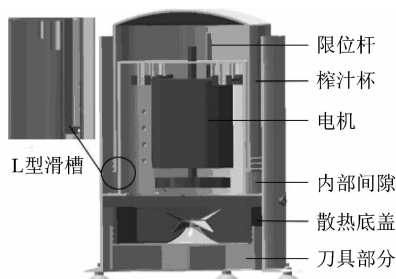


图 12 收纳状态

Figure 12 Storage states

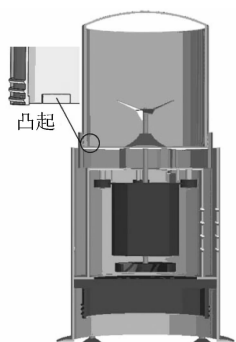


图 13 使用状态

Figure 13 Usage states

5.2 自收纳便捷式榨汁机优势

这款自收纳便捷式榨汁机在使用时与普通家用榨汁机具有相同的尺寸要求。如图 14 所示,其整体高度约为 377.16 mm,榨汁杯高度为 121.02 mm,圆周直径为 114 mm,计算得榨汁杯体积约为 1.2 L,可以满足一次榨汁、多人分享的需求。携带时,其自身可收纳的结构让它在收纳时的高度缩减为正常使用状态下的 2/3 甚至更小,如图 15 所示。携带时的整体高度与市面上的普通便捷式榨汁机的高度相同,满足携带的需求。

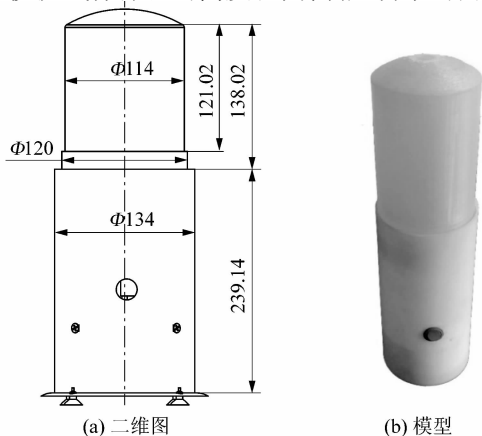


图 14 使用状态的二维图和模型

Figure 14 Two-dimensional diagram and model of usage states

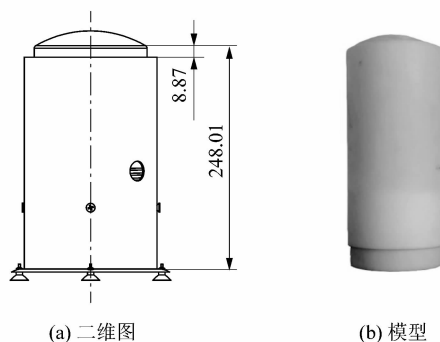


图 15 收纳状态的二维图和模型

Figure 15 Two-dimensional diagram and model of storage states

6 结语

TRIZ 作为一种系统化的创新方法,其基本理念是将一个待解决的具体问题转化成典型问题的模型,然后针对不同问题的属性采用相应的 TRIZ 解决工具以及解决流程,以得到典型解决方案模型,最后结合实际情况得到具体的解决方案。课题组将 TRIZ 解决问题基本原理运用到便捷式榨汁机结构改善的研究中,提出了自收纳保存结构;同时利用 TRIZ 工具,提出了多个概念方案,结合实际运用情况得到最终解决方案;最后运用增材制造技术做出实物模型,验证了方案的可行性。

本课题的创新点如下:

1) 将系统化的 TRIZ 创新方法应用到便捷式榨汁机结构改善的研究中,并对 TRIZ 工具以及计算机辅助创新软件进行相关阐述。

2) 课题组采用 TRIZ 创新方法对现有的便捷式榨汁机系统进行组件分析、技术和物理矛盾分析和物场分析,确定问题产生的原因以及寻找解决问题的资源。并用理想度对概念方案进行评价,找出最具可行性的概念解决方案。

3) 课题组提出了一种自收纳式结构,并产生实物进行分析,模拟该榨汁机结构的使用状态和收纳状态,收纳状态下的体积是使用状态下体积的 1/2。

该自收纳结构的提出将对便捷式榨汁机结构改进产生有力影响,可对其他类似产品的便捷式结构改进产生启发。课题组运用 TRIZ 理论对便捷式榨汁机结构进行再设计,但尚未将研究结果应用到生产中,在结合实际应用时,其材质、颜色以及尺寸等各项参数有待进一步研究。

参考文献:

[1] 牛占文,徐燕申,林岳,等.发明创造的科学方法论:TRIZ[J].中国

- 机械工程,1999,10(1):84-85.
- [2] FEY V S, RIVIN E I, 烟村洋太郎. TRIZ 入门[M]. 东京:日刊工业新闻社,1997:30-60.
- [3] RANTANEN K, DOMB E. Simplified TRIZ: new problem-solving applications for engineerings and manufacturing professionals [M]. Boca Raton: CRC Press, 2002: 20-200.
- [4] ALTSHULLER G S, RODMAN S. The innovation algorithm, TRIZ, systematic innvation and technical creatiy [M]. Worcester, MA: Technical Innovation Center, 2000: 10-100.
- [5] 檀润华, 杨伯军, 张建辉. 基于 TRIZ 的产品创新模糊前端设想产生模式研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(16): 1990-1995.
- [6] 包宇. 基于 TRIZ 的计算机辅助创新系统设计研究[J]. 电子制作, 2014(19): 66.
- [7] 赵恒. 面向企业的创新私有云平台的搭建[D]. 天津: 河北工业大学, 2015: 1-20.
- [8] 张芸. 便携式榨汁机能否突破价格红海战, 寻求发展新动力[J]. 电器, 2019(3): 70.
- [9] 言小艾. 榨汁机的选购与使用[J]. 大众用电, 2012, 28(3): 43.
- [10] 佚名. 如何选购家用榨汁机[J]. 中国防伪报道, 2014(06): 126.
- [11] 黄成宏. 12 款榨汁机口碑排榜: 谁是最好的那款[J]. 消费者报道, 2017(5): 70-74.
- [12] 段旭东, 李德明, 马克顿丽思. 一种家庭用便捷式榨汁机: CN201810138646.4[P]. 2018-08-28.
- [13] 泽郎格西. 一种便捷式榨汁机: CN201220602458.0[P]. 2013-06-05.
- [14] 沈群华. 一种便捷式榨汁机: CN201910224438.0[P]. 2019-05-10.
- [15] 姚威, 朱凌, 韩旭. 工程师创新手册[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2015: 8-242.
- [16] ALTSHULER G. And suddenly the inventor appeared: TRIZ, the theory of inventive problem solving [M]. Worcester: Technical Innovation Center, INC, 1999: 10-20.
- [17] 刘桂涛, 袁春静, 戴义贵. TRIZ 中技术矛盾解决矩阵的应用[J]. 机械设计与制造, 2007(8): 63-65.
- [18] 吕欣. 基于 TRIZ 理论中 39 矛盾矩阵与 40 创新原则的产品创新设计研究[J]. 包装工程, 2009, 30(5): 211-213.
- [19] 周永清. TRIZ 中矛盾理论及应用[J]. 科学与管理, 2010, 30(3): 15-17.
- [20] 冯燕. 基于 TRIZ 的车门: 行人碰撞保护系统设计研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018: 15.
- [21] 文竹, 文宗川, 张永正. 基于 TRIZ 物场分析的管理创新方法[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2012, 33(4): 12-16.
- [22] 王刚. 基于 TRIZ 方法的台车炉冷却水循环系统研发[J]. 世界有色金属, 2019(1): 257-260.
- [23] 冷崇杰, 项辉宇, 闫晓玲. 基于 TRIZ 理论的产品结构创新设计[J]. 制造业自动化, 2010, 32(8): 27-30.

(上接第 76 页)

使用 db5 小波基对图 4(c) 信号进行 4 层分解降噪后, 如图 5 所示, 146 Hz 频点峰值相对突出, 由于同样的调制原因 261 Hz 处峰值明显。

4 结语

课题组选择自适应随机共振为滚动轴承早期故障诊断的基本方法; 通过使用加有强噪声的正弦信号证明了以信噪比为目标的优化自适应随机共振具备早期故障诊断的能力; 课题组使用实测滚动轴承早期故障数据, 通过研究优化自适应随机共振的输出信号证明了该方法可以直接用于轴承内外圈的故障诊断; 将 db5 小波滤波与随机共振相结合, 成功实现了滚动体故障的诊断。该方法能实现滚动轴承早期故障及其位置的诊断, 为早期故障诊断提供了一种新方法。

参考文献:

- [1] 冷永刚, 郑安总, 范胜波. SVD 分量包络检测方法及其在滚动轴承早期故障诊断中的研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(5): 794.
- [2] BENZI R, PARISI G, SUTERA A, et al. A theory of stochastic resonance in climatic change [J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 1983, 43(3): 565-578.
- [3] 杨定新. 微弱特征信号检测的随机共振方法与应用研究[D]. 北京: 国防科学技术大学, 2004: 46-120.
- [4] 翟玉卫, 郑世棋, 刘岩, 等. 热反射测温中基于随机共振的微小信号测量[J]. 计量学报, 2019, 40(4): 618.
- [5] 陈剑, 陶善勇, 王维, 等. 基于周期势函数的自适应二阶欠阻尼随机共振信号增强方法[J]. 计量学报, 2019, 40(4): 681.
- [6] 徐蕾, 彭月平, 贺科宁. 基于改进双边滤波与随机共振的图像去噪算法研究[J]. 激光杂志, 2018, 39(8): 142.
- [7] 贺利芳, 曹莉, 张刚, 等. 基于幂函数型随机共振的微弱信号恢复[J]. 电子学报, 2018, 46(8): 1906.
- [8] 胡葛庆. 随机共振微弱特征信号检测理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 60-62.
- [9] MCNAMARA B, WIESENFELD K. Theory of stochastic resonance [J]. Physical Review A, 1989, 39(9): 4854-4869.
- [10] Case Western Reserve University Bearing Data Center Seeded Fault Test Data. Download a data file [DB/OL]//[2019-04-10]. <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/download-data-file>.