DOI: 10.3901/JME.2020.11.108

标准解辅助多层次系统资源衍生的裁剪方法研究*

白仲航^{1,2} 张珊^{1,2} 于菲^{2,3} 檀润华^{2,3}

(1. 河北工业大学建筑与艺术设计学院 天津 300132;

2. 河北工业大学国家技术创新方法与实施工具工程技术研究中心 天津 300401;

3. 河北工业大学机械工程学院 天津 300401)

摘要: 准确挖掘出系统内及超系统的可用资源进行系统有用功能重组是高质量裁剪创新设计的关键, 其中潜在可用资源的挖掘是难点及重点。通过构建资源-属性列表实现系统可直接应用资源搜索; 以物质属性为约束, 提出基于资源相似度的潜在可用资源挖掘方法。基于功能类型重构标准解, 以标准解为知识源辅助实现系统可用资源衍生; 构建标准解-属性列表, 基于标准解与资源属性二次属性相似度对比, 引入外加资源实现系统可用资源重构。以此形成标准解辅助多层次系统可用资源衍生的系统化方法。最后以机械式水果采摘杆实例验证了该裁剪方法的可行性和有效性。

关键词: 裁剪方法; TRIZ; 标准解; 属性资源; 相似度

中图分类号: TH122

Research on Trimming Method of Standard Solutions Aided Multi-level System Resource Derivation

BAI Zhonghang^{1,2} ZHANG Shan^{1,2} YU Fei^{2,3} TAN Runhua^{2,3}

(1. School of Architecture & Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300132;

2. National Engineering Research Center for Technological Innovation Method and Tool, Hebei University of Technology, Tianjin 300401;

3. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401)

Abstract: Key of the high quality trimming innovative design is to exploit available resources within the system and super-system to redistribute useful functions, in which the difficulty is to find potential available resources. The readily-available resources of the system searched by the list of resource-attributes which is constructed, and with substance attribute as constrain, the exploit method of potential available resources based on the resource similarity is proposed. The standard solutions are reconstructed based on the function feature, and the derivation of the available resources assisted by the standard solutions which are used as knowledge source. The list of standard solutions-attributes is constructed, on the basis of second attribute similarity between standard solutions and resource attributes, introducing additional ideal resource to reconstruct available resource. On this base, the systematic method of deriving available resources with the assist of standard solutions is formed. Finally, the feasibility and effectiveness of the trimming method are verified by the example of mechanical fruit picking rod.

Key words: trimming method; TRIZ; standard solutions; attribute; similarity

0 前言

裁剪是 TRIZ 中分析及解决问题的一种方法, 通过去除系统内有害或冗余元件、充分利用系统内或超系统资源进行有用功能重组完成产品创新^[1-6]。

裁剪过程可分为确定裁剪元件和搜索可用资源进行有用功能重组两部分, 其中, 裁剪元件的确定, 主要指系统元件裁剪优先权的确定^[7]。目前裁剪元件优先权主要是根据不同问题和设计需求, 选用根原因分析、成本分析、功能等级分析、价值分析等分析方法辅助确定^[5-6], 现阶段也建立了计算机辅助系统以定量方式确定裁剪元件^[2]。

针对系统有用功能重组, 现有研究主要是在裁剪规则的引导下, 设计者依靠自身知识经验挖掘可

* 河北省自然科学基金(E2017202260)和国家自然科学基金(51805142)资助项目。20190626 收到初稿, 20200324 收到修改稿

用资源并完成系统功能重组。YEOH 基于元件之间的作用关系提出三条系统有用功能重组规则^[2]; 计算机辅助创新软件 TechOptimizer 提供了四种基于被裁剪元件功能的有用功能重组规则^[9]; 林芸蔓、SHEU 在此基础上基于裁剪创新目标进行扩展, 整理为六条裁剪规则^[5,10]; RAHIM 等基于复杂系统理想目标, 归纳为六条裁剪规则^[11]; LI 等基于专利设计特征将其整理为三条裁剪规则, 并根据技术特征对裁剪规则进行分类^[12]。以上裁剪规则主要围绕裁剪设计目标进行了适用性扩展, 扩展了裁剪创新设计方法的适用范围, 有效性得以提高, 但裁剪规则作为裁剪创新设计方法中引导设计者寻找资源、完成有用功能重组的工具, 受设计者的思维惯性及自身知识水平制约, 影响系统有用功能重组的效率和创新方案的质量。

于菲等基于裁剪本质及实现方式提出通过知识原理辅助有用功能再分配, 弥补主观分析过程中设计者自身知识的局限性^[7]。杨伯军等利用标准解、进化趋势及效应等创新方法辅助实现功能重组^[11]。以上研究提出了利用知识对有用功能重新分配的方法, 在一定程度上可以弥补设计者知识的局限性对功能重组过程的制约, 但由于启发知识的种类和数量众多, 逐条选用会降低工作效率。为此, 石卫刚等提出基于裁剪规则的多层次进化趋势选择策略, 并利用进化趋势辅助功能重组^[14]; 张二甲等通过构建设计需求与裁剪原理的映射关系, 建立面向设计需求的裁剪创新设计过程模型^[15]。以技术进化趋势、发明原理为知识源辅助系统有用功能重组, 可以有效弥补设计者自身知识局限性的局限性、避免思维惯性的限制, 但二者缺少对整体目标系统的考量, 解资源的获取与裁剪的系统功能模型无直接关联, 因此不利于系统整体资源优化配置; 此外, 以上研究主要实现知识的搜索过程, 其作用是引导设计者对系统潜在资源进行变换来衍生可用资源, 并没有提出客观的资源搜索方法, 因此搜索具体资源的过程仍存在一定主观性及盲目性。

资源指一切可被人类开发及利用的物质、信息及能量^[16]。基于资源获得的难易程度, 资源可分为内部资源、外部资源及超系统中的资源; 基于能否直接利用, 资源可分为可直接应用资源及潜在资源, 也称为衍生资源。根据资源的类型, 资源可被分为物质资源、能量资源(场资源)、信息资源、时间资源、空间资源及功能资源^[17]。而属性是物质本质的、必然的性质, 物质与功能通过属性联系, 功能通常是两个物质属性发生相互作用的结果, 该相互作用改变或保持了某个物质属性, 或影响、激发了第三

个物质某种属性的过程^[18]。

裁剪后系统功能重组的关键在于可用资源的挖掘。而功能是属性的变化或保持, 功能实现的本质是物质属性相互作用的结果。可用资源挖掘的本质在于所需属性的获取, 故挖掘可用资源的过程即为功能实现所需属性载体的确定过程。每种物质所具有的属性是固定的, 当物质之间存在作用关系, 物质属性发生了变化或保持。在物质与属性对应关系、属性间关联关系的基础上, 可以借助物质属性这一桥梁挖掘系统内及超系统潜在可用资源, 并利用属性计算资源的可用度, 提高资源搜索效率和实用性。

TRIZ 中 76 条标准解是在物质-场模型基础上, 基于知识的解资源构造方法, 这些知识方法可以有效弥补目前裁剪规则引导下有用功能重组的知识局限性。标准解的系统物质-场模型与裁剪的系统功能模型均基于结构、面向功能, 表达方式基本相同, 这为裁剪过程中基于标准解的系统可用资源衍生提供基础及可行性。

基于以上研究, 以解决裁剪规则引导有用功能重组存在的主观盲目性及知识局限性问题为核心, 以客观搜索可用资源并有效优化系统为目标, 结合系统元件位置优先权提出基于属性相似度的资源相似度计算方法, 以物质属性为约束, 通过客观方法检索系统可用资源; 筛选具有裁剪特征的标准解, 基于功能类型对标准解重新归类, 以标准解为知识源衍生可用资源, 并结合属性进行二次相似度对比, 深入衍生资源, 实现系统可用资源重构。在此基础上, 形成基于标准解的多层次系统资源衍生模型。

1 系统潜在可用资源挖掘方法

挖掘潜在可用资源, 实际上是寻找替代被裁剪元件执行有用功能且满足目标期望的资源。基于资源与属性的内在联系, 挖掘可用资源的过程即为功能实现所需属性载体的确定过程, 故综合被裁剪元件的有用功能和待重组目标功能定义期望属性, 通过属性相似度筛选系统潜在可用资源; 除属性外, 系统资源可用难易程度也与区域距离因素有关, 若物质资源与系统待分配功能区域距离越近, 代替被裁剪元件执行功能的可能性越高, 其资源可用度越高^[17], 故资源可用度还需综合考虑资源的位置因素。因此, 系统潜在可用资源挖掘应综合计算资源的属性相似度与位置优先权获得资源相似度, 通过资源相似度数衡量资源可用程度, 资源相似度越高, 则资源可用度越高, 经筛选可用度最高的资源

作为潜在可用资源。

1.1 属性汇总列表

为便于确定资源的属性,完成属性相似度计算,首先对现有属性相关研究成果进行汇总。邱圣家在MANN、ALTSHULLER、Oxford Creativity、CREAX提出的功能属性参数基础上整合了75个属性及56个功能列表并加以名词解释^[19],在此基础上,张家玮^[20]、黄钰婷^[21]对属性的研究整合了传统的属性与工程参数,分别归纳为71个属性与扩张属性列表与75个功能列表。

基于邱圣家、黄钰婷等归纳的属性列表,本文扩展为119个属性列表,并根据应用领域划分为物理属性、化学属性、工艺属性、材料属性及几何属性。由于属性之间存在一定的关联,如:电流与铁磁性,若系统内存在铁磁性物质产生磁场,该物质通过电磁感应现象可以产生电流,将这类可以衍生为另一属性的特殊属性称为相关属性,并基于属性关系总结归纳,以便在属性相似度对比阶段找出相关属性资源,提高可用资源搜索的全面性。属性列表节选如表1所示。

表1 属性列表^[19-21]

	序号	属性	评价	相关属性
物理属性	1	导电性	高/低	功、功率、电场强度、电流、电压、电阻、磁化性
	2	温度	高/低	铁磁性、声音、导热性、沸腾性、溶解性、湿度、散热性、吸热性、反应放热性、水解性、可降解性、弹性、脆性、热膨胀性、黏性、耐热性、隔离性
	⋮	⋮	⋮	⋮
化学属性	41	导热性	高/低	温度、金属性、厚度、面积
	42	催化性	强/弱	速度
	⋮	⋮	⋮	⋮
工艺属性	64	可切削性	—	强度、硬度、塑性、脆性、可分割性
	65	可压缩性	—	力、压强、体积
	⋮	⋮	⋮	⋮
材料属性	84	热膨胀性	高/低	温度、体积
	85	隔离性	—	声音、温度、绝缘性、亮度、气味
	⋮	⋮	⋮	⋮
几何属性	108	面积	大/小	长度、宽度、体积、半径/直径、导热性、压强、亮度、散热性、柔度、强度、黏性
	109	半径/直径	长/短	面积、体积
	⋮	⋮	⋮	⋮

1.2 资源相似度对比算法

资源相似度对比算法为资源的属性相似度与位置优先权的综合,通过将系统内及超系统中的潜在资源属性与理想资源的期望属性对比得到属性相似度;计算潜在资源与被裁剪元件之间的距离得到潜在资源的位置优先权,二者综合获得该资源的资源相似度数值,资源相似度对比过程如图1所示。

图1 资源相似度对比过程

(1) 属性相似度计算。

系统内及超系统中的资源属性与期望属性直接对比,归纳出至少具有一项期望属性的资源,即相似属性资源 S_n ,相似属性资源的集合为 U_s , $U_s = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, $n \in [1, N]$;通过查找属性汇总列表,归纳出期望属性的相关属性,结合相关属性挖掘系统内及超系统中存在的相关属性资源 R_m ,并判断该属性与期望属性的同义性,同义相关属性资

源即为 $R_{m'}$,相关属性资源集合为 U_R , $U_R = \{R_1, R_2, \dots, R_M\}$, $m' \in [1, M]$ 。由此得到潜在资源 E_i 的集合 U_E ,即相似属性资源 S_n 与同义相关属性资源 $R_{m'}$ 的集合, $U_E = \{S_1, \dots, S_N, R_1, \dots, R_M\} = \{E_1, E_2, \dots, E_u\}$,其中 $i \in [1, u]$, $u = N + M$ 。

将潜在资源的属性集 U_{ea} 及理想资源 X 的期望属性集 U_{xa} 构成统一属性集合 U_a , $U_a = U_{ea} \cup U_{xa} = \{a_1, a_2, \dots, a_t\}$;将各资源的属性转化为空间矢量,若该资源具有属性 a_r 则子矢量 $e_r = 1$,若属性不同或相反 $e_r = 0$,其中 $r \in [1, t]$,由此得到潜在资源的向量 $E_i = (e_1, e_2, \dots, e_t)$ 以及理想资源矢量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_t)$,其中 $e_r = 0$ 或 1 , $x_r = 0$ 或 1 。

基于层次分析法,获得资源的各项属性权重 ω_{er} 及理想资源的各项期望属性权重 ω_{xr} 。分别将各项潜在资源与理想资源的属性单独对比,计算潜在资源的属性相似度。

潜在资源 E_i 与理想资源 X 的属性集为 U_i , $U_i = U_{ia} \cup U_{xa} = \{a_1, a_2, \dots, a_t\}$,其中, U_{ia} 为潜在资源 E_i 的属性集, U_{xa} 为理想资源 X 的属性集。为增加共同属性的资源获取机会,提高共同属性的权重,式(1)、(2)计算在潜在资源与理想资源属性对比情况下的二者属性权重,分别为 α_{er} , α_{xr} ,归一后即潜在资源与

理想资源对比时的资源属性权重，分别为 ω'_{er} ， ω'_{xr} 。

$$\alpha_{er} = \frac{\omega_{er} \cdot e_r \cdot k}{2l} \quad (1)$$

$$\alpha_{xr} = \frac{\omega_{xr} \cdot x_r \cdot k}{2l} \quad (2)$$

式中， e_r 为潜在资源子变量， x_r 为理想资源子变量， l 为潜在资源 E_i 与理想资源 X 对比时的综合属性数量， k 为该属性所占比例，若仅一项资源具有该属性，则 $k=1$ ，若二者均具有该资源，则 $k=2$ ； ω_{er} 为潜在资源的属性权重； ω_{xr} 为理想资源的期望属性权重。

式(3)利用夹角余弦法计算潜在资源与理想资源的属性相似度 $S_{E_i, X}$ 。

$$S_{E_i, X} = \frac{\sum_{r=1}^l (\omega'_{er} \times \omega'_{xr})}{\sqrt{\sum_{r=1}^l (\omega'_{er})^2} \times \sqrt{\sum_{r=1}^l (\omega'_{xr})^2}} \quad (3)$$

式中， ω'_{er} 为潜在资源的属性权重 ω'_{xr} 为理想资源的期望属性权重。

(2) 位置优先权计算。

以被裁剪元件为基点，记为 $d_0=0$ ，与之相邻的元件距离记为 1，间隔元件记为 2，元件与被裁剪元件之间的距离记为 $d_{E_i, O} = d+1$ ，其中， d 为间隔元件数。式(4)利用反距离加权插值计算潜在资源与被裁剪元件的距离权重。

$$\lambda_{E_i, O} = \frac{\frac{1}{d_{E_i, O}}}{\sum_{i=1}^u \frac{1}{d_{E_i, O}}} \quad (4)$$

(3) 资源相似度计算。

由于潜在可用资源的挖掘过程实质上是确定功能实现所需属性的过程，此外，资源可用度也与资源位置有关，故将资源的属性和位置综合计算资源相似度，由资源相似度数值决定资源可用度，获得潜在可用资源。式(5)综合考虑属性相似度与资源的位置优先权，得到资源相似度 Sim_{E_i} ，计算过程如下

$$\text{Sim}_{E_i} = S_{E_i, X} + \lambda_{E_i, O} \quad (5)$$

资源相似度越高，则表示该资源与理想资源的属性相似度较高，执行理想资源主要功能的可行性较高，且该资源与被裁剪元件的距离较近，故该资源可用度高，代替被裁剪元件的可能性较大。

2 基于功能类型的标准解分类

2.1 标准解概述

76 个标准解是由 ALTSHULLER 等在 1975~1985 年间通过专利研究总结完成的 TRIZ 工具，可以用于解决三级发明问题，而三级发明显著改善了

现有系统，占总专利的 18%^[22]。标准解与 TRIZ 中其他解决问题的工具相比，应用范围更广泛，能获得更多高级的创新解；标准解从功能的角度描述和解决问题，通过分析解决问题的“标准条件”确定解决问题的“标准方法”。标准解和裁剪功能重组过程中的基础模型一致，标准解通过建立技术系统内部结构化的问题模型以描述系统存在的问题，而裁剪方法则基于结构面向功能，裁剪操作建立在系统功能模型的基础之上，故物质-场模型和系统功能模型相同，都是通过元件之间的作用描述功能。因此，以标准解作为引导，能更有效地启发设计者搜索资源。76 个标准解的分类如表 2 所示。

表 2 76 个标准解的分类^[17]

类别	数量
不改变或少量改变以改进系统	13
改变系统	23
系统传递	6
检测与测量	17
简化与改进策略	17

2.2 标准解的重新归纳

现有的 76 个标准解信息量过多且难以学习，而传统的标准解检索流程通常为一类物质-场模型对应多项标准解，需要逐一选用来解决问题，存在查找使用困难的问题^[23]，导致创新效率降低^[24]。分析标准解可知，76 标准解使用流程为判断系统是否需要检测与测量，确定物质-场模型的类型，从第 1、2、3、5 类标准解中查找具体标准解帮助得到创新解，进而应用第 5 类标准解完善解。传统的标准解纵向流程较短，且标准解具体类别少，故查找可用标准解的过程盲目尝试次数过多。

针对以上问题，MAO 等总结了 76 个标准解决方案，并以图形演示和示例将其归纳为 7 个一般原则^[25]。王秋月等针对标准解过多难以选择的问题将前三类标准解分为不完整物质-场模型、非完整物质-场模型及有害物质-场模型，并归纳出标准解解题流程^[26]。KIM 提出将排序理论与标准解结合，并将标准解划分为不足作用、有害作用及测量问题三类^[27]。RUSSO 等在 76 个标准解的基础上提出了一种新的 111 标准体系，并将其分为有害功能、不足功能、测量和检测三类^[28]。HAINES-GADD 等在此三类标准解的基础上对 76 个标准解进一步划分^[23]。陈矿俊提出 43 主类和 87 子类标准解结构，其中现有的 76 个标准解仅占 35 主类和 41 子类^[24]。

以上标准解的重新分类使易用性提高、尝试次数减少，能有效提高标准解的搜索效率。但本课题

应用标准解启发解资源的过程中, 现有标准解仍存在少量标准解与裁剪内涵相违背、部分标准解的属性难以确定的问题。因此, 仍需要基于现有研究成果, 根据裁剪本质从 76 个标准解中筛选出符合裁剪特征的标准解; 以现有标准解的分类为基础, 根据功能类型对标准解进行分类。

基于 RUSSO 的研究, 增加原有标准解的搜索层次, 逐层缩小相应标准解范围, 以降低尝试次数,

提高使用效率。以 76 个标准解为基础, 将第 1、2、3、5 类标准解分为增加物质、改变物质、增加场、改变场、最大-最小作用类型以及将系统转换为双系统或多系统六类, 并基于功能类型将标准解划分为不足作用及有害作用, 标准解重新分类结果如图 2 所示。首先, 判断是否需要检测与测量, 确定物质-场模型的类型, 获得相应的具体措施, 进而得到相应标准解, 其应用过程如图 3 所示。

图2 标准解重新分类(部分)

图3 标准解应用过程

此外, 为便于通过标准解搜索资源, 归纳标准解相应属性, 形成标准解-属性列表, 部分标准解-属性列表如表 3 所示。

表3 部分标准解-属性列表(部分)

类型	序号	标准解	属性
1 S+ 增加物质	1.1	在 S ₁ /S ₂ 之间添加 S ₃ , 隔离 S ₁ /S ₂	—
	1.1.1	在系统施以很强的场时, 保护物质 S ₁	隔离性
	...	...	...
2 S' 改变物质	2.1	在物质中增加空穴或毛细结构	空心、多孔性
	2.2	利用磁性物质	—
	2.2.1	铁磁物质	铁磁性、导磁性、磁化性、导电性
...	...	...	...
...	...	...	...

3 标准解辅助多层次系统资源衍生的裁剪过程模型

对原有裁剪过程及方法进行改进, 在系统功能重组过程引入属性概念和标准解工具辅助系统可用资源挖掘并衍生, 形成标准解辅助多层次系统资源衍生的裁剪过程模型, 其中系统可用资源挖掘过程根据资源挖掘的难易程度先后分为可直接应用资源搜索、初步可用资源衍生、深度可用资源重构三个层次, 依次搜索资源。标准解辅助多层次系统资源

衍生的裁剪过程模型如图4所示,具体步骤如下。

图4 标准解辅助多层次系统资源衍生的裁剪过程模型

(1) 确定待改进的技术系统,明确目标系统。

(2) 进行系统功能属性分析,建立功能属性分析模型,结合问题分析方法,确定裁剪元件,根据被裁剪元件的有用功能及目标功能定义期望属性。针对目标系统建立功能属性分析模型,明确系统内元件的物质属性。针对目标系统存在的技术问题,利用根原因分析、有害功能分析等方法明确系统的根源问题,确定裁剪元件。明确被裁剪元件的有用功能及有害功能,根据被裁剪元件的功能及目标功能确定理想资源的期望属性。

(3) 建立资源-属性列表。基于目标系统的功能属性分析模型,建立系统内及超系统的资源-属性列表,以待进行属性相似度对比。

(4) 搜索可直接应用资源。将期望属性与资源-属性列表的物质属性作直接对比,属性若完全相同,则该元件为可执行被裁剪有用功能的潜在元件,视为

可直接应用资源。进一步判断该资源是否满足裁剪后的系统要求,即能否执行被裁剪元件的有用功能且不产生有害作用,若该资源可满足设计要求,则完成系统有用功能重组;若该资源尚不满足设计要求,可能存在该可直接应用资源与理想资源虽然属性相同,但属性权重不同,导致二者实现的主要功能不同,该情况则进入下一步进行系统可用资源衍生过程。

(5) 资源相似度对比,寻找潜在可用资源。从资源-属性列表中选取至少具有一项期望属性的物质资源,即相似属性资源;建立期望属性的相关属性列表,选取资源-属性列表中具有该属性的资源,即相关属性资源,判断其与期望属性是否存在同义性,若存在,则与相似属性资源统称为潜在资源。将潜在资源进一步与期望属性作相似度对比,与此同时计算潜在资源与被裁剪元件的位置优先权,将二者综合作为潜在资源相似度,资源相似度越高,潜在资源可用度越高,则可代替被裁剪元件的可行性越高,选取相似度最高的资源为潜在可用资源。

(6) 建立物质-场模型,利用标准解衍生资源。基于上一步所得可用资源建立裁剪后的物质-场模型,根据物质-场类型检索标准解,直接利用标准解改造资源,使物质-场模型完整且有效,以此完成系统可用资源衍生。

(7) 判断是否满足设计要求,若满足则完成系统有用功能重组;若不满足则跳转至下一步进行系统可用资源重构。

(8) 对衍生后的问题系统建立物质-场模型,再次检索标准解,二次属性相似度对比,引入外加资源完成系统可用资源重构。对标准解衍生后的系统建立物质-场模型,根据物质-场模型类型,再次检索标准解的属性与资源-属性列表中的资源属性进行属性相似度对比,引入所需外加资源,完成系统可用资源重构。

(9) 判断是否满足设计要求,若满足,则完成系统有用功能重组过程;若不满足,则说明系统内不存在可以满足期望属性的资源,返回步骤(2)重新定义期望属性。

(10) 评价合理性。完成有用功能重组后,建立裁剪后的功能分析模型,判断是否已满足设计要求,系统内是否仍存在有害作用或不足作用,若已满足设计要求,则完成设计方案;若不满足,返回步骤(1)重新建立功能属性分析模型,再次执行裁剪过程。

4 案例验证

水果采摘作业是水果生产作业中最耗时、费力

的一个环节^[29]。很多地区的水果采摘上依然依赖人工,对于高枝生长的果实需要借助高梯采摘,这在平原地区果实密集情况下尚可接受,但我国苹果类果实种植中,山区占据了很大比重,果树种植多呈分散种植,此种情况下采用高梯作业劳动强度大、作业效率低,危险系数大、采摘成本高。为应对山区高枝水果采摘问题,目前割断果蒂式采摘杆较为常用,但使用过程中刀刃难以对准果蒂,容易损伤果实,操作效率较低,且损坏率高。现利用裁剪方法对这类采摘杆进行改进,本案例设计目标如下。

(1) 避免锋利元件损伤果实,降低伤果率。

(2) 降低采摘难度,减轻设备重量,提高可操作性和采摘效率。

(3) 降低成本。

4.1 确定裁剪元件

对现有的割断果蒂式采摘杆进行功能属性分析,割断果蒂式采摘杆系统整体由伸缩结构、牵引结构、执行结构几部分构成,基于系统元件功能建立系统的功能属性模型,如图5所示。由图5可知,应用采摘杆摘取水果的过程为,人按压手柄,手柄连接的转动端牵动拉线,拉线拉动活动刀刃固定端,此时弹簧压缩,活动刀刃固定端带动活动刀刃,使之张开一定角度接近果蒂;放开手柄时,弹簧复位,

带动活动刀刃固定端及活动刀刃复位,活动刀刃闭合,与固定刀刃接触,切割水果蒂。结合原因分析可知,如图6所示,由于果蒂的可捕捉面积小,果实位置较高时,V型刀口不易对准果蒂,且切断果蒂的过程中,果实易沿剪刀滑动,容易损伤果实,故刀刃对水果蒂存在不足作用,对果实存在有害作用,由此确定造成割断果蒂式采摘杆误伤水果的根本原因为刃口锋利及果蒂光滑且接触面积过小,可解决的问题为刀刃刀口,因此确定裁剪活动刀刃及固定刀刃。

首先裁剪活动刀刃。在使用采摘杆摘取水果的过程中,活动刀刃的主要功能为在拉线的带动下接近并切断果蒂,期望保留活动刀刃摘取水果的有用功能,裁剪刀刃破坏果实这一有害功能。基于活动刀刃的主要功能确定其主要属性为力、位移、角度、可切削性、接触面积(小)、质量(小)、操作方便性(难)。由于活动刀刃执行摘取果实功能的属性,即可切削性及接触面积(小),导致损伤果实这一有害作用,其有害属性为可切削性、操作方便性(难)、接触面积(小),有用属性为力、位移、角度、质量(小)。

根据活动刀刃的有用功能确定采摘杆的期望功能为通过简单施力摘取水果且不损伤果实。结合活动刀刃的有用属性,确定理想资源X的基本属性为力、位移,以保证该资源与水果接触并摘下水果。

图5 采摘杆系统的功能属性模型

图6 采摘杆系统问题的根原因分析图

由于一般伸缩采摘杆长度至少为 2 m，重心较高，需要该资源具有附加属性质量(小)、操作方便性(易)，以降低操作疲劳。此外，采摘杆若接触果实，为避免对果实的损伤需要降低压强、减小接触面积，故需要附加属性接触面积(大)，因此理想资源 X 的期望属性定义为力、位移、质量(小)、操作方便性(易)、接触面积(大)。

4.2 建立资源-属性列表

根据系统功能属性分析模型建立资源-属性列表，如表 4 所示。由表 4 可知，系统内及超系统中不存在与期望属性完全对应的资源，因此不存在可直接应用资源，需要进一步寻找衍生资源。

表 4 资源-属性列表

资源位置	物质资源	物质属性	场资源	参数资源
冲突内部资源	活动刀刃	力、位移、角度、可切削性、接触面积(小)、质量(小)、操作方便性(难)	机械场 (重力、直接接触作用)	刀刃角度 果实成熟程度 两刀刃之间空间
	固定刀刃	力、稳度、可切削性、接触面积(小)、质量(小)		
	水果蒂	硬度、脆性		
系统内资源	手柄	力、位移、角度、操作方便性(易)	机械场 (重力、直接接触作用、压缩、形变)	施力程度 拉线拉动刀刃的时间 伸缩杆内空间 活动杆内空间
	伸缩杆	长度、质量(小)、可伸缩性、操作方便性(易)		
	固定装置	力、操作方便性(易)		
	转动端	角度、半径/直径		
	卷线盒	容积、空心		
	锁紧装置	力、操作方便性(易)		
	固定刀刃固定座	力、稳度、质量(小)		
	弹簧	位移、弹性、可压缩性、可拉伸性		
	拉线	力、长度、位移		
	活动刀刃固定端	力、位移、角度、质量(小)、操作方便性(易)		
超系统资源	空气	密度、湿度	风力	空间

4.3 资源相似度对比

(1) 建立潜在资源列表

查找属性汇总列表，归纳期望属性的相关属性，如表 5 所示。将资源-属性列表中的资源属性与期望属性对应，归纳出相似属性资源；根据表 5 中的相关属性获得相关属性资源。判断该资源属性与期望属性是否存在相关性，如表 6 所示。

表 5 期望属性的相关属性列表

资源类型	期望属性	相关属性
理想资源	力	功、功率、质量
	操作方便性(易)	—
	质量(小)	密度、力
	位移	速度、功
	接触面积(大)	长度、容积/体积、半径/直径、形状

由表 6 可知，相似属性资源集合 $U_S = \{\text{手柄, 伸缩杆, 固定装置, 锁紧装置, 拉线, 活动刀刃固定端, 固定刀刃固定座}\}$ ，记为集合 $U_S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7\}$ 。相关属性资源集合 $U_R = \{\text{转动端, 卷线盒}\}$ ，记为集合 $U_R = \{R_1, R_2\}$ 。期望属性中的“接触面积”存在长度、容积/体积、半径/直径、形状四个相关属性，系统中的元件“转动端”具有属性半径/直径，但在采摘杆系统中转动端为滚轮结构，而期望属性中的接触面积是指采摘端口与水果的接触面积，二者无关，故排除；同理，元件“卷线盒”包含属性容积，但指储存拉线的装置，与期望属性中的接触面积无关，故排除。因此潜在资源集合 $U_E = \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_7\} = \{\text{手柄, 伸缩杆, 固定装置, 锁紧装置, 拉线, 活动刀刃固定端, 固定刀刃固定座}\}$ 。

表 6 相似属性资源及相关属性资源列表

资源类型	资源编号	资源	物质属性	共同属性	是否相关
理想资源	X	—	力、位移、质量(小)、接触面积(大)、操作方便性(易)	—	—
相似属性资源	S_1	手柄	力、角度、操作方便性(易)	力、操作方便性(易)	
	S_2	伸缩杆	长度、质量(小)、可伸缩性、操作方便性(易)	质量(小)、操作方便性(易)	
	S_3	固定装置	力、操作方便性(易)	力、操作方便性(易)	
	S_4	锁紧装置	力、操作方便性(易)	力、操作方便性(易)	—
	S_5	拉线	力、长度、位移	力、位移	
	S_6	活动刀刃固定端	力、角度、位移、质量(小)、操作方便性(易)	力、位移、质量(小)、操作方便性(易)	
	S_7	固定刀刃固定座	力、稳度、质量(小)	力、质量(小)	
相关属性资源	R_1	转动端	角度、半径/直径	半径/直径	否
	R_2	卷线盒	容积、空心	容积	否

(2) 资源相似度计算

由上表获得属性集 $U_a = \{\text{力, 位移, 角度, 稳度, 质量(小), 长度, 接触面积(大), 可伸缩性, 操作方便性(易)}\}$, 记为 $U_a = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9\}$, 由此获得潜在资源的属性向量如表 7 所示。

表 7 潜在资源的属性向量

潜在资源	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
E_1	1	0	1	0	0	0	0	0	1
E_2	0	0	0	0	1	1	0	1	1
E_3	1	0	0	0	0	0	0	0	1
E_4	1	0	0	0	0	0	0	0	1
E_5	1	1	0	0	0	1	0	0	0
E_6	1	1	1	0	1	0	0	0	1
E_7	1	0	0	1	1	0	0	0	0

基于层次分析法, 得到各潜在资源的属性权重, 如表 8 所示。

表 8 潜在资源的属性权重

属性权重	X	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7
ω_{a_1}	0.428	0.619	0	0.857	0.857	0.164	0.296	0.221
ω_{a_2}	0.155	0	0	0	0	0.539	0.296	0
ω_{a_3}	0	0.284	0	0	0	0	0.296	0
ω_{a_4}	0	0	0	0	0	0	0	0.685
ω_{a_5}	0.089	0	0.149	0	0	0	0.069	0.093
ω_{a_6}	0	0	0.466	0	0	0.297	0	0
ω_{a_7}	0.273	0	0	0	0	0	0	0
ω_{a_8}	0	0	0.343	0	0	0	0	0
ω_{a_9}	0.055	0.096	0.042	0.143	0.143	0	0.044	0

结合上述属性权重, 应用式(1)、(2)分别计算潜

在资源 E_i 与理想资源 X 属性对比时的各属性权重, 应用式(3)计算潜在资源 E_i 与理想资源 X 的属性相似度数值并归一, 资源的属性相似度越高, 则资源可用度越高; 应用式(4)计算潜在资源 E_i 与被裁剪元件 O 的距离, 距离越近, 资源可用度越高; 将属性相似度 $S_{E_i, X}$ 与位置优先权 $\lambda_{E_i, O}$ 的数值综合, 获得潜在资源与理想资源的相似度 Sim_{E_i} , 计算结果如表 9 所示。

表 9 潜在资源的位置优先权

相似度	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7
属性相似度 $S_{E_i, X}$	0.912	0.165	0.964	0.964	0.552	0.859	0.529
位置优先权 $\lambda_{E_i, O}$	0.075	0.094	0.075	0.063	0.126	0.377	0.189
资源相似度 Sim_{E_i}	0.987	0.260	1.039	1.027	0.677	1.236	0.718

由此可知资源可用度最高的资源为 S_6 活动刀刃固定端, 系统裁剪后利用活动刀刃固定端执行被裁剪元件的有用功能, 即采摘果实且不损伤果实。同理, 裁剪固定刀刃, 得到与理想资源相似度最高的资源为固定刀刃固定座, 利用固定刀刃固定座执行被裁剪元件的有用功能, 固定果实并辅助活动刀刃固定端摘下果实。

4.4 标准解辅助可用资源衍生

建立裁剪后采摘杆物质-场模型, 如图 7 所示。由于元件刀刃被裁剪, 活动刀刃固定端及固定刀刃固定座代替被裁剪元件执行采摘水果的过程为先夹持水果、通过人力扭转采摘杆摘下水果, 该过程虽然能够执行夹持水果的功能, 但由于扭转功能不足不可直接摘下水果, 而且消耗人力, 不满足设计目标, 故需要进一步改造。由于“活动刀刃固定端”及“固定刀刃固定座”执行夹持功能, 以下分别简称为“活动夹爪”及“固定夹爪座”。

图 7 裁剪后采摘杆物质-场模型

通过问题物质-场模型检索相应标准解, 经过筛选得到可用标准解 2.7 分割物质改变工具 S_2 、标准解 6.2 改变双系统或多系统之间的连接。由标准解“2.7 分割物质”获得启发, 可以将固定夹爪座分割为固定夹爪、套筒两部分。基于标准解“6.2 改变双系统或多系统之间的连接”启发, 改变夹爪与套筒之间的连

接方式，将分割后的夹爪与套筒构成螺旋副结构，以实现夹爪的扭转功能，即手柄牵动拉线，活动夹爪靠近固定夹爪并接触水果，继续施力，拉线牵动固定夹爪及活动夹爪沿套筒螺纹旋转，将水果摘下。

此时，经标准解对活动夹爪和固定夹爪部分的资源衍生，夹爪虽然能扭转摘下水果，但活动夹爪扭转后不能自动复位，需要人力参与，不能实现水果的连续采摘作业，影响采摘效率，故仍不能完全达到扭转功能实现效果，如图 8 所示，需利用标准解的属性进行二次相似度对比搜索资源并重构。

图 8 标准解辅助衍生后的采摘杆物质-场模型

4.5 标准解辅助可用资源重构

针对衍生后的夹爪复位功能不足这一问题，检索并筛选标准解 2.3 利用动态物质，由标准解获得启发，在套筒与夹爪之间利用动态元件使夹爪复位。

由标准解 2.3 的属性结合期望属性可得，此时标准解属性为动态性、弹性、位移，标准解属性的资源列表如表 10 所示。将标准解属性与资源属性进行二次属性相似度对比，潜在外加资源的属性相似度如表 11 所示。由属性相似度可知，外加资源为弹簧，故需要引入外部弹簧元件与活动夹爪、固定夹爪结合，基于相应标准解进行资源重构。

表 10 标准解属性的资源列表

标准解属性	资源
动态性	—
弹性	弹簧、…
位移	弹簧、拉线、…

表 11 潜在外加资源的属性相似度

	弹簧	拉线
属性相似度 $S_{E,Y}$	0.839	0.408

基于以上分析，根据标准解 2.7、6.2 将固定夹爪座分为套筒和固定夹爪两部分，结合标准解 2.3 所挖掘的外加资源弹簧，提出利用螺旋副结构实现活动夹爪与固定夹爪的扭转功能，并利用外加副弹

簧使夹爪复位。其中，伸缩杆与套筒固定连接，为完成夹爪扭转运动，套筒为螺纹套筒，固定夹爪及副弹簧嵌套在套筒内，当人按压手柄时，手柄带动转动端垂直向上运动，牵动拉线，拉线拉动活动夹爪，活动夹爪与果实表面接触，果实被夹紧时，即爪头的力克服弹簧预紧力后，活动夹爪带动固定夹爪将沿螺纹套筒旋转下降，果实在扭转的作用下与树枝脱离，完成采摘后，夹爪在弹簧力的作用下复位。改进后的采摘杆结构如图 9 所示，改进后采摘杆运动示意图如图 10 所示。

图 9 改进后的采摘杆方案

图 10 改进后采摘杆运动示意图

4.6 方案评价

建立有用功能重组后的系统功能模型，如图 11 所示。

该方案裁剪了原采摘杆的刀刃元件，消除了损伤水果的有害作用，在未引入新元件的基础上使原系统得到简化；将识别果蒂位置、切断果蒂的采摘方式变为夹持果实、扭转果蒂。由活动夹爪、固定夹爪执行夹持功能，利用螺纹套筒通过旋转的方式

实现扭转果蒂功能,可以有效避免损伤果实,并且没有引入新的有害作用;一次按压把手,顺次实现夹紧、旋转扭下果实动作,提高了操作效率;同时,元件简化及操作效率提高可以降低生产成本,提高原系统理想性。原判断果蒂式采摘杆与裁剪后的采摘杆方案评价如表 12 所示。

图 11 裁剪后的采摘杆系统功能模型

表 12 方案评价表

评价指标	裁剪前	裁剪后
伤果率	利用刀刃剪切果蒂,且果实易滑动,伤果率约为 45%。	去除刀具,触果面为弹性软面,经多次试验不损伤苹果科类果实。果皮柔软水果的伤果率大幅降低,约为 5%。
可操作性	目标对象为果蒂,需要将刀刃对准果蒂,接触面积小;购买的剪切式采摘杆实际重约 1.6 kg,可操作性低,采摘难度大、采摘效率低。	爪头采摘果实,目标对象为果实,捕捉面积大幅增大,采摘难度降低;改进后样品总重约 1.2 kg,重量降低约 25%,可操作性提高,采摘效率提高。
成本	样品 150 元(网购标识价 100~270 元不等)。	裁剪刀刃元件,成本降低,样品单件制造成本约为 100 元,预计量产产成本低于 60~70 元。

5 结论

(1) 以物质属性为约束,通过资源相似度对比方式搜索可用资源,弥补了传统裁剪方法引导下主观搜索可用资源的局限性,提高了资源搜索效率。

(2) 基于裁剪本质及功能作用类型对标准解重新归类,利用标准解衍生可用资源,进而通过标准解属性与资源属性相似度对比导入资源进行资源重构,为资源搜索提供了客观知识启发,并为优化系统创造性地提出了问题解决方案,提高了有用功能重新分配的可操作性。在此基础上,提出了可直接利用资源、衍生资源及重构资源三个层次的资源挖掘并衍生过程,构建了标准解辅助的多层次系统资源衍生模型。

(3) 以割断果蒂式采摘杆为实例,验证了该方法获得可用资源及有用功能重新分配的可行性。

(4) 本文提出的资源相似度对比计算能有效得到可用资源,但计算过程较为复杂,可以进一步通过算法软件化方式减少人工计算量,提高计算效率。

参 考 文 献

- [1] SHEU D, HOU C. TRIZ-based systematic device trimming: theory and application[J]. Procedia Engineering, 2015, 131(1): 237-258.
- [2] YEOH T. TRIZ: systematic innovation in manufacturing[M]. Malaysia: Firstfruits Sdn Bhd, 2009.
- [3] MANN D. Hands on systematic innovation[M]. Belgium: CREAX Press, 2007.
- [4] 陈幸志. 基于萃智理论的流程分析与修减方法[D]. 中国台湾: 台湾清华大学, 2012.
CHEN Xingzhi. TRIZ-based process analysis and trimming method[D]. Taiwan, China: Tsinghua University, 2012.
- [5] 林芸蔓. 基于萃智的计算机辅助之修剪流程与工具[D]. 中国台湾: 台湾清华大学, 2010.
LIN Yunman. TRIZ-based computer-aided trimming process and tool[D]. Taiwan, China: Tsinghua University, 2010.
- [6] 江屏, 罗平亚, 孙建广, 等. 基于功能裁剪的专利规避设计[J]. 机械工程学报, 2012, 48(11): 46-54.
JIANG Ping, LUO Pingya, SUN Jianguang, et al. Method about patent design around based on function trimming[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(11): 46-54.
- [7] 于菲, 刘芳, 檀润华, 等. TRIZ 辅助多层次裁剪方法集构建[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 156-164.
YU Fei, LIU Fang, TAN Runhua, et al. Construction of multi-level trimming method set based on TRIZ[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 156-164.
- [8] 于菲, 檀润华, 曹国忠, 等. 基于系统功能模型的元件裁剪优先权研究[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(2): 338-347.
YU Fei, TAN Runhua, CAO Guozhong, et al. Study on trimming priority based on system functional model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(2): 338-347.
- [9] 朱晏樟. 整合 TRIZ 与功能分析之设计方法研究[D]. 中国台湾: 台湾成功大学, 2003.
ZHU Yanzhang. A study on integrating TRIZ method with functional analysis[D]. Taiwan, China: Taiwan Cheng Kung University, 2003.

- [10] SHEU D, HOU C. TRIZ-based trimming for process-machine improvements: slit-valve innovative redesign[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, 66: 555-566.
- [11] RAHIM Z A, NOOH A B. Complexity planning for product design using TRIZ[C]// *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications, 2014, 903: 396-401.
- [12] LI M, MING X, HE L, et al. A TRIZ-based trimming method for patent design around[J]. *Computer-Aided Design*, 2015, 62(1): 20-30.
- [13] 杨伯军, 冯雁霞, 孙群. 基于激进式裁剪的产品突破性创新设计过程[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(9): 1025-1030.
- YANG Bojun, FENG Yanxia, SUN Qun. Product radical innovation design processes based on radical trimming[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(9): 1025-1030.
- [14] 石卫刚, 杨伯军, 于菲, 等. 基于技术进化趋势的裁剪方法研究[J]. *工程设计学报*, 2016, 23(4): 301-308.
- SHI Weigang, YANG Bojun, YU Fei, et al. Study of trimming method based on technology evolution trends[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2016, 23(4): 301-308.
- [15] 张二甲, 于菲, 杨伯军, 等. 面向设计需求的知识启发裁剪方法研究[J]. *机械设计*, 2018, 35(4): 40-46.
- ZHANG Erjia, YU Fei, YANG Bojun, et al. Research on trimming aroused by knowledge oriented for design requirements[J]. *Journal of Machine Design*, 2018, 35(4): 40-46.
- [16] ZLOTIN B, ZUSMAN A. The concept of resources in TRIZ: Past, present and future[EB/OL]. [2012-01-02]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.117.7056&rep=rep1&type=pdf>.
- [17] 檀润华. TRIZ 及应用-技术创新过程与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- TAN Runhua. TRIZ and applications-the process and methods of technological innovation[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [18] 赵敏, 张武城, 王冠殊. TRIZ 进阶及实战[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- ZHAO Min, ZHANG Wucheng, WANG Guanshu. TRIZ enhancement and practical applications[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [19] 邱圣家. 使用相似性指标辨识萃智解答模型: 以相关趋势辨识为例[D]. 中国台湾: 台湾清华大学, 2013.
- QIU Shengjia. Using similarity measures to identify TRIZ model of solutions: Examples of relevant trends identification[D]. Taiwan, China: Tsinghua University, 2013.
- [20] 张家玮. 功能-属性-效应知识库之研究[D]. 中国台湾: 台湾清华大学, 2012.
- ZHANG Jiawei. A study on function-attribute-effect knowledge base[D]. Taiwan, China: Tsinghua University, 2012.
- [21] 黄钰婷. 以功能属性关系辨识相关技术演化趋势[D]. 中国台湾: 台湾清华大学, 2010.
- HUANG Yuting. Identification of relevant technical trends based on function-attribute relationships[D]. Taiwan, China: Tsinghua University, 2010.
- [22] TERNINKO J. The seventy-six standard solutions, with examples section one[EB/OL]. [2000-02-26]. <https://triz-journal.com/seventy-six-standard-solutions-example-s-section-one/>.
- [23] HAINES-GADD L. TRIZ for dummies[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2016.
- [24] 陈矿俊. 系统化解题的新物场分析与标准解[D]. 中国台湾: 台湾清华大学, 2016.
- CHEN Kuangjun. A new systematic substance-field analysis and standard solutions[D]. Taiwan, China: Tsinghua University, 2016.
- [25] MAO X, ZHANG X, ABOURIZK S. Generalized solutions for Su-field analysis[EB/OL]. [2007-08-06]. <https://triz-journal.com/generalized-solutions-for-su-field-analysis/>.
- [26] 王秋月, 杨伯军, 段秀玲. 基于物质-场模型及相似性的标准解重新分类研究[J]. *工程设计学报*, 2015(6): 520-527.
- WANG Qiuyue, YANG Bojun, DUAN Xiuling. Reclassification of standard solutions based on Su-field model and similarity[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2015(6): 520-527.
- [27] KIM S. Innovative design of substance-field notations for reformulating the seventy-six standard solutions in TRIZ[J]. *International Journal of Systematic Innovation*, 2012, 1(4): 19-26.
- [28] RUSSO D, DUCI S. From Altshuller's 76 standard solutions to a new set of 111 standards[C]// *Procedia Engineering*. TRIZ Future Conference, Paris, France, 2015, 131: 747-756.
- [29] 宋健. 茄子采摘机器人结构参数的优化设计与仿真机械设计制造[J]. *机械设计与制造*, 2008, 46(6): 166-168.
- SONG Jian. Optimization design and simulation on

structure parameter of eggplant picking robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008, 46(6): 166-168.

作者简介: 白仲航, 男, 1978 年出生, 博士后, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为创新设计、功能设计。

E-mail: baizhonghang@hebut.edu.cn

张珊, 女, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为产品设计。

E-mail: zleandlxy@163.com

于菲(通信作者), 女, 1986 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为裁剪创新设计方法, 突破性创新方法。

mail: fyu@hebut.edu.cn

檀润华, 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为创新设计、TRIZ 理论及应用、技术创新过程管理等。

E-mail: rhtan@hebut.edu.cn

第 9 届上银优秀机械博士论文奖——特别奖

光学位感条纹动态测量理论及实验研究

作 者: 钟剑锋

毕业学校: 福州大学

指导教师: 钟舜聪

论文针对现有单目视觉测量技术不易实现结构三维振动同步测量及转动测量的问题, 结合光学相干层析成像技术中通过干涉条纹获取结构三维信息的原理, 提出一系列新型光学位感条纹(即对位移变化敏感的条纹)作为振动位移或旋转角位移传感器, 以单台高速相机作为探测器, 实现结构三维振动位移、转轴三维振动位移、旋转角位移及转速等多维度、多参数的非接触式同步动态测量, 形成了光学位感条纹动态测量新方法、理论及系统。主要研究内容及创新点如下。

在系统研究静态光学相干层析成像技术的基础上, 提出一维和二维光学干涉位感条纹测量原理及系统, 实现纳米级位移分辨率的单点振动测量或线焦点探测范围内多点动态位移的同步测量。根据光学干涉位感条纹密度随振动位移变化的特点, 提出单密度位感条纹和二次变密度位感条纹作为位移传感器, 采用单台高速相机对结构表面的位感条纹进行连续成像, 并应用提出的算法对采集的位感条纹序列进行处理, 实现厘米量级位移量程内微米级分辨率的结构三维位移同步测量。位感条纹几乎无附加质量, 故可避免如加速度传感器自重影响结构模态参数的问题, 因此可精确获得结构多阶模态参数用于缺陷检测与故障诊断。

转轴三维振动及转动参数的同时测量通常需要多个不同种类的传感器, 如三个电涡流传感器和一个角位移传感器。为了简化该测量系统, 本论文系统建立了单密度和变密度位感条纹组成的单个复合位感条纹实现转轴三维振动位移、转动角位移和瞬时转速等多动态参数同步测量的理论和方法; 根据丝杆自身固有螺纹与位感条纹相似的特点, 应用所提出的位感条纹测量理论实现丝杆运转过程中三维振动位移和角位移信号的同步测量, 为转轴、丝杆等旋转结构的轴心轨迹分析、阶次分析等提供了有效测量手段。通过一系列实验验证了提出的光学位感条纹测量理论和系统的实用性、便捷性、准确性及可靠性, 为结构状态监测和设备故障诊断提供了新的测量理论和方法, 展现了其潜在的工程应用价值。