

基于 AHP/AD/TRIZ 的球形水果包装机设计

Design of spherical fruit packing machine based on AHP/AD/TRIZ

左 斌 王仁忠 王 敏

ZUO Bin WANG Renzhong WANG Min

(苏州市职业大学机电工程学院, 江苏 苏州 215104)

(College of Mechanical Engineering, Suzhou Vocational University, Suzhou, Jiangsu 215104, China)

摘要:目的:解决球形水果包装量大,发泡网兜包装时不易固定和成型等问题。方法:在以用户需求为驱动的前提下,提出了一种基于 AHP/AD/TRIZ 相融合的产品设计方法。运用 AHP 对用户需求进行权重计算并排序,将权重较高的设计元素转化为功能需求;借助 AD 公理设计完成设计要素的功能域与物理域的映射,得到锥齿轮包装机构、螺旋辅助机构、切刀分离机构和张力控制机构的设计参数集,并构建水果包装机的初始设计矩阵;结合 AD 独立性公理原则和 TRIZ 冲突原理的方法进行结构设计;最后运用正交试验进行方案可行性验证。结果:当开膜距离为 120 mm、前进速度为 65 mm/s、下果管角度为 40°时,包装效果最佳,此时的包装成功率为 92%。结论:该球形水果自动包装机能解决使用发泡网对球形水果自动包装现有问题,破损率低、效率高。

关键词:球形水果;包装机;AHP;AD;TRIZ;产品设计

Abstract: Objective: The paper aims to solve the large amount of packing for spherical fruit packing with unstable and unshapen with foam. **Methods:** A product design method based on AHP, AD and TRIZ integration was proposed in view of user demands. The weight and ranking of customer demands was obtained through AHP, the high-weights of design elements was converted to functional requirement. Then, the mapping between functional domain and physical domain of design elements was completed by means of AD axiomatic design. The design parameter sets of bevel gear packaging mechanism, spiral auxiliary mechanism, cutter mechanism and tension control mechanism were obtained, and the initial design matrix of fruit packaging machine was constructed. The structural design of fruit

基金项目:江苏省高校基础科学(自然科学)研究面上项目(编号:22KJB150038);江苏省 3C 产品智能制造工程技术研究中心项目(编号:苏教科[2018]10号);苏州市科技计划基金项目(编号:SNG2021036)

作者简介:左斌(1985—),男,苏州市职业大学讲师,硕士。

E-mail: 354637093@qq.com

收稿日期:2022-12-27 **改回日期:**2023-06-05

packaging machine was obtained by combining AD independent axiom and TRIZ conflict principle. Finally, the feasibility of scheme was verified by orthogonal experiment. The orthogonal test of packaging machine was carried out. **Results:** The test results showed that when the opening distance was 120 mm, the forward speed was 65 mm/s, and the Angle of the fruit tube is 40°, the packing effect of apple was the best, the success rate of packing machine was 92%. **Conclusion:** Automatic packaging for spherical fruit could be solved the existing problem of automatic packing by using foaming net, the test index met low damage rate and high efficiency.

Keywords: spherical fruit; packing machine; AHP; QFD; TRIZ; product design

随着中国苹果、柑橘等球形水果种植面积的扩大,球形水果产量也持续上升。为降低运输过程中受损率,采摘后需及时对水果进行包装,而针对此类水果的自动采摘包装机技术还不成熟,目前仍以手工采摘和手工包装为主,难以满足高效的作业要求。经调查^[1],市面上高档礼盒水果包装更多采用泡沫网兜,但泡沫网兜具有弹性大、网孔多的特点,在包装过程中不易固定和成型。

层次分析法(Analytic hierarchy process, AHP)是一种定性分析与定量分析相结合的多目标决策分析方法^[2],该方法可用于用户需求分析,通过将复杂问题分解量化从而获得用户需求权重;质量功能展开(Quality function deployment, QFD)是以用户需求为依据,通过用户需求和设计要素构建质量屋,以获得关键设计要素的设计方法;TRIZ 理论是通过大量专利和创新方案进行分析而得出的创新解决问题方法,常用于解决设计中的冲突问题。李小彤等^[3]运用 QFD 构建质量屋,实现了用户需求与设计要素间的转化,有效解决了筒纱包装生产线造型设计问题。张彩丽等^[4]利用 QFD/TRIZ 集成,使设计过程变得科学合理,最后形成了概念创新方案。李晓杰等^[5]通过 AHP 进行用户需求分析,满足了客户需求;运用 TRIZ

解决了设计过程中的矛盾冲突,提升了产品的高效与智能。苏建宁等^[6]运用 AHP/QFD/TRIZ 对玫瑰花蕾采摘机进行设计,提高了采摘机关键部件的可靠性,同时构建了产品优化设计流程。目前,将 AHP、QFD、TRIZ 3 种理论融合应用于产品设计中的研究较多,而采用 AHP、AD、TRIZ 3 种理论的产品设计应用较少。多学科理论方法的结合可精准掌握客户需求,使设计方法科学化,设计结果可行化。针对现有球形水果包装设备的现状,研究拟采用 AHP 对用户需求权重进行分析,获得重要设计要素,引入 AD 与 TRIZ 形成设计方案,以满足使用发泡网对球形水果进行自动包装的需求,以期为解决使用发泡网对球形水果自动包装问题提供依据。

1 融合 AHP/AD/TRIZ 的产品设计流程

公理化设计(Axiomatic design, AD)是一种改善现有设计或创新设计的逻辑性强的思维方法,以指导设计者作出更好的决策;其主要遵循信息公理和独立公理两个原则^[7]。设计者在设计过程中可通过 AD 公理作出科学的决策,使设计过程更优化。但 AD 公理在单独使用时还不够完善:① 在实施用户域、功能域映射过程中,AD 缺乏确切的指导原则和具体的分析工具,导致无法区分各项设计需求的重要程度。若将 AHP 分析得到的用户权重转化为功能需求,通过建立 AD 功能域与物理域的映射可得出设计参数集,因此将 AD 和 AHP 两者结合可以更明确客户各项需求。② 虽然 AD 的独立性原则在映射过程中能给出方案可行性的评判依据,但未提供理想且具体的解决方案^[8],而 TRIZ 发明问题解决理论能够给 AD 提供一系列分析问题、解决问题的方法,因此,在 AD 公理化设计中融入 TRIZ 发明问题解决理论,可优化初始设计方案并给出具体解决方案。

在 AHP 用户需求分析的基础上,融合 AD、TRIZ 理论,形成产品设计流程(见图 1)。

(1) AHP 确定用户需求。通过深度访谈、问卷调查等方式对用户需求进行调研,对调研结果进行筛选、组合,构建用户目标需求层次,建立用户需求关系矩阵,并通过几何平均法计算出用户需求权重值,权重高的即为关键设计要素。

(2) AD 构建初始设计矩阵。根据 AHP 的用户需求分析,选取权重高的关键设计要素定义为功能组,建立功能域,然后将功能域映射并求解出设计参数的物理域,构建出初始设计矩阵。利用 AD 独立公理原则判断初始矩阵是否为耦合矩阵,若为非耦合矩阵则满足独立公理,反之,则需进行解耦设计。

(3) 利用 TRIZ 解耦完善设计方案。若初始设计矩阵为耦合阵,则表明原始设计存在缺陷,此时需运用 TRIZ 工具^[9]进行解耦,获得新的设计参数矩阵,生成新设计方案。然后,通过软件构建三维模型,进行运动学仿

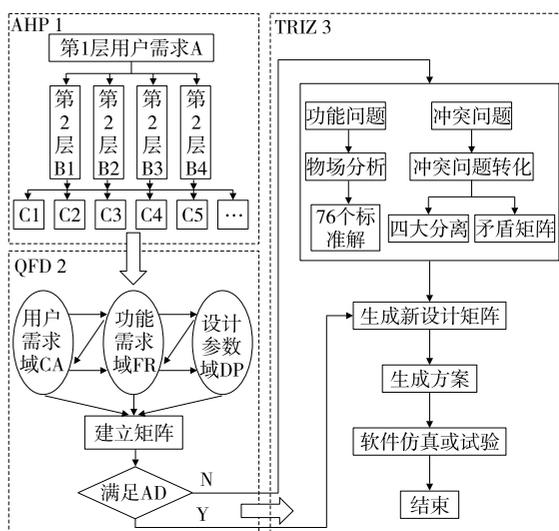


图 1 融合 AHP/AD/TRIZ 的产品设计流程

Figure 1 Design process based on AHP/AD/TRIZ integration

真,确定运动合理性。最后,通过科学的试验方法寻求最佳的试验参数,进行样机试验,验证方案可行性。

2 水果包装机设计

2.1 用户需求权重分析

通过对市场上球形水果包装需求的调查以及客户对现有水果包装机使用感受的访谈发现,用户对包装机的主要设计需求为自动包装、分离包装、安全可靠、效率高、人工劳动量低等。对用户需求进行筛选和分类,确定用户需求三层级目标:主要功能、次要功能、人机需求、外观需求。建立球形水果包装机用户需求模型如图 2 所示。

(1) 构建判断矩阵。根据用户需求层次模型,对 3 个

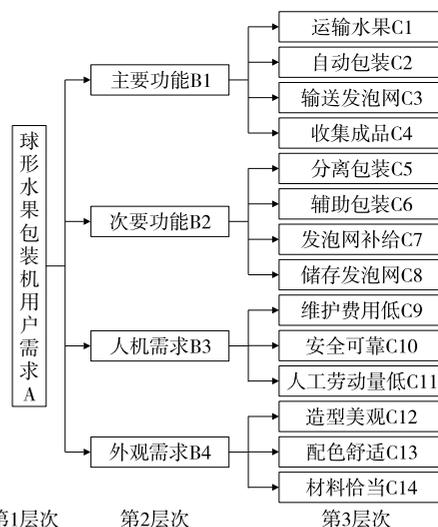


图 2 球形水果包装机需求层次模型

Figure 2 Demand model of spherical fruit packing machine

层次的需求目标两两间相互比较,按照 1~9 标度方式,一般取值为 1,3,5,7,9,1/3,1/5,1/7,1/9,也可取上述中间值,标度的大小体现了两两目标间的重要等级^[10]。试验邀请专家对需求目标进行评估打分给出具体的赋值,构建判断矩阵元素:

$$A = (a_{ij})_{m \times n}, \quad (1)$$

式中:

a_{ij} ——第 i 个元素与第 j 个元素重要度比较。

因此,第二层次用户需求 B 相对于第一层次用户需求 A 判断矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 \\ 1/2 & 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}。$$

(2) 计算各指标权重。用户需求层次判断矩阵构建后,利用几何平均法对各指标进行权重求解。

首先对判断矩阵每行数据乘积的 n 次方根求解:

$$\bar{\omega}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, \quad (2)$$

由于第 2 层次的元素共有 4 个,故 $n=4$,代入式(2),得到 $\bar{\omega}_1 = 2.340 4, \bar{\omega}_2 = 1.654 9, \bar{\omega}_3 = 0.759 8, \bar{\omega}_4 = 0.339 8$ 。

对式(2)进行归一化处理,得各指标权重:

$$\omega_i = \bar{\omega}_i / \sum_{i=1}^m \bar{\omega}_i。 \quad (3)$$

故, $\omega = (0.459 4, 0.324 8, 0.149 1, 0.066 7)^T$ 。

(3) 求解最大特征根。利用判断矩阵 A 与各指标权重 ω 构建特征方程,通过特征方程求出最大特征根 λ_{\max} 。

$$AW = \lambda_{\max} W。 \quad (4)$$

因此, $\lambda_{\max} = 4.104 1$ 。

(4) 一致性检验。为避免需求层次权重出现相对矛盾的情况,需进行判断矩阵一致性检验。当 $C_R < 0.1$ 时,表示各层次指标构造合理,通过一致性检验。若不满足,则需重新赋值调整判断矩阵。

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{R_1(n-1)}, \quad (5)$$

式中:

C_1 ——一致性检验指标;

C_R ——一致性指标比例;

R_1 ——随机一次性指标。

经计算, $C_1 = 0.034 7$,查平均随机一次性指标得 $R_1 = 0.90$ ^[11], $C_R = 0.038 6 < 0.100 0$,一致性检验通过。

同理,计算出第 3 层次用户需求 C 相对于第 2 层次用户需求 B 判断矩阵为:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 & 3 \\ 5 & 1 & 3 & 7 \\ 3 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/7 & 1/3 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 3 & 3 \\ 2 & 1 & 5 & 5 \\ 1/3 & 1/5 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 1/5 & 2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/5 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix}。$$

通过几何平均法对各子层次指标进行权重计算,得到所求的单排序权重,同时对判断矩阵进行一致性检验,确认构建的判断矩阵是否合理,如表 1 所示。

表 1 各层次需求权重及一致性检验

Table 1 Demand weight and consistency test of each layer

指标	单排序权重	综合权重	一致性检验	排序
C_1	0.120 7	0.055 4	$C_1 = 0.046 4, R_1 = 0.90$	6
C_2	0.577 7	0.265 4	$C_R = 0.051 6 < 0.1$	1
C_3	0.237 5	0.109 1		3
C_4	0.064 1	0.029 4		10
C_5	0.283 0	0.091 9	$C_1 = 0.021 5, R_1 = 0.90$	5
C_6	0.516 6	0.167 8	$C_R = 0.023 9 < 0.1$	2
C_7	0.083 0	0.027 0		11
C_8	0.117 4	0.038 1		9
C_9	0.258 3	0.038 5	$C_1 = 0.019 3, R_1 = 0.58$	8
C_{10}	0.637 0	0.095 0	$C_R = 0.033 2 < 0.1$	4
C_{11}	0.104 7	0.015 6		12
C_{12}	0.648 3	0.043 2	$C_1 = 0.001 8, R_1 = 0.58$	7
C_{13}	0.122 0	0.008 1	$C_R = 0.003 2 < 0.1$	14
C_{14}	0.229 7	0.015 3		13

表 1 中的每个子层次综合权重由用户总需求权重乘以对应的子需求权重获得,根据综合权重值对每个子层次元素进行排序,得到需求高的子层次元素为: B_1 下的自动包装 C_2 、输送发泡网 C_3 ; B_2 下的分离包装 C_5 、辅助包装 C_6 ; B_3 下的安全可靠 C_{10} 。因此,零部件设计参数主要从这些重点部件展开。

2.2 设计参数确定

2.2.1 建立功能需求集 FR 将 AHP 分析得到的权重较高的元素转化为功能域中的功能需求集,建立水果包装机的功能需求集:

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{自动包装} \\ \text{辅助包装} \\ \text{分离包装} \\ \text{输送发泡网} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2.2 建立设计参数集 DP

(1) 设计参数 DP1 求解。自动包装在整机中属于核心部件,要实现“自动包装 FR_1 ”功能,控制系统会控制导向板引导水果进入发泡网,可选择齿轮传动机构。为使发泡网包装均匀美观,可增加两套动力装置控制两个导向板,确保其调整角度相等,但两套控制装置会使机构操作性降低,此时“形状和操作性”产生冲突^[12-13]。因此,根据 TRIZ 的技术矛盾工具可归纳为:改善 No.12 形状参数和恶化 No.33 可操作性参数。通过查阅 TRIZ 矛盾矩阵表,初步得到 3 种可行解决思路:32 颜色改变,15 动态特性和 26 复制。再结合齿轮传动的实际情况,筛选出“发明原理 26 复制”来解决设计冲突,即将一个导向板中的锥齿轮复制至另一侧。故设计参数 DP1:锥齿轮包装机构(见图 3)。

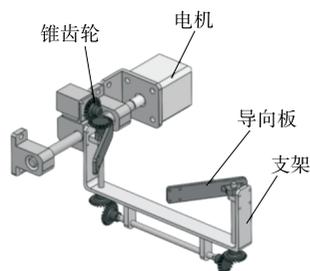


图 3 锥齿轮包装机构

Figure 3 Bevel gear packaging mechanism

(2) 设计参数 DP2 求解。爪头是将发泡网从原始的扁平状态变为张开状态的机构,是辅助水果包装的重要部件,爪头的动作是一个往复的直线移动,常选用带有移动副的连杆机构、直线气缸、螺旋机构等。由于连杆机构易产生动载荷且效率低,由此排除连杆机构。直线气缸适用于行程固定的场合,但水果大小不一故将其排除。螺旋传动不仅可实现爪头稳定工作,而且可完成不同行程的工作;将螺旋传动的螺杆两侧设计为相反螺纹时,还能实现爪头间的相对运动。故设计参数 DP2:螺旋辅助机构(见图 4)。

(3) 设计参数 DP3 求解。“分离包装 FR_3 ”功能的主要实现主要由切袋装置实现。常见的切袋装置是由切刀和刀砧做相对运动完成材料的切割,故切刀移动装置固定在竖板上,切刀通过丝杠螺母结构实现上下运动。设计参数 DP3:切刀分离机构(见图 5)。

(4) 设计参数 DP4 求解。“输送发泡网 FR_4 ”是发泡网平稳输送的关键功能。为满足发泡网在输送过程中稳定传输,常选用皮带传动,并通入负压将材料紧贴在皮带

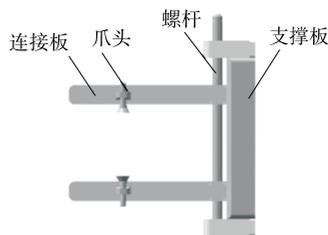


图 4 螺旋辅助机构

Figure 4 Spiral auxiliary mechanism

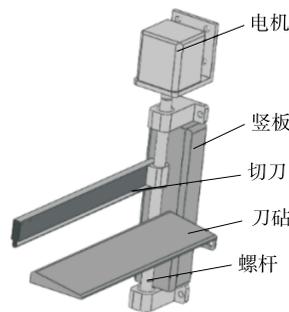


图 5 切刀分离机构

Figure 5 Cutter mechanism

上,但镂空透气的发泡网无法紧贴于传送皮带,不适用于负压传递。因此考虑采用张紧轮来增加摩擦力实现材料与皮带的紧贴。张紧轮压力过大,发泡网受摩擦力影响无法向前传输;张紧轮压力过小,摩擦力不够,无法使材料紧贴于传输皮带,此时“压力过大和过小”产生冲突。因此,根据 TRIZ 的物理矛盾:归纳物理冲突的参数是压力,既不能太大也不能小。应用“发明原理 16 未达到或超过的作用”来解决,具体可在张紧轮后方增设弹簧,依据材料特性自动调节弹簧的张力,从而很好地解决了张力不能过大也不能过小的冲突,即确定设计参数 DP4:张力控制机构(见图 6)。

2.2.3 构建原始设计矩阵 基于球形水果包装机的功能需求,将功能需求 FR 中的 4 个变量参数映射到设计参数 DP ,得到两者之间的表达式:

$$\begin{bmatrix} \text{自动包装 } FR_1 \\ \text{辅助包装 } FR_2 \\ \text{分离包装 } FR_3 \\ \text{输送发泡网 } FR_4 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \text{锥齿轮包装机构 } DP1 \\ \text{螺旋辅助机构 } DP2 \\ \text{切刀分离机构 } DP3 \\ \text{张力控制机构 } DP4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

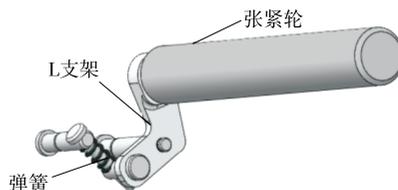


图 6 张力控制机构

Figure 6 Tension control mechanism

因包装机工作时,辅助包装与分离包装的运动相关联,则设计参数 DP2 和设计参数 DP3 是相关的。FR1 的功能实现需要设计参数 DP1 和设计参数 DP2 共同作用,两者有关联。故设计矩阵 A 见式(8),其中,元素表示 FR 到 DP 对应两元素间的关联程度, X 表示两元素关联紧密, 0 表示两元素弱关联或无关联。该矩阵是一个耦合矩阵,不满足 AD 要求,需进行解耦设计。

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & 0 & 0 \\ 0 & X & X & 0 \\ 0 & X & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.3 解耦设计

(1) 消除 A_{23} 和 A_{32} 间的关联。辅助包装是通过电机驱动螺杆,螺杆带动爪头完成发泡网的打开和闭合。分离水果的切刀也是通过丝杠螺母结构实现上下运动,为了消除 A_{23} 和 A_{32} 的影响,增加两套动力组件即可实现,但会使装置变得复杂且成本增加。因此,根据 TRIZ 的技术矛盾归纳为:改善 No.27 可靠性参数和恶化 No.36 设备复杂性参数。查阅 TRIZ 矛盾矩阵表,得到 1 分割,13 反向和 35 参数变化 3 种序号的发明原理解决方案。选择“发明原理 13 反向”来解决矛盾,即增加一对外啮合齿轮,通过一套动力组件即可分别实现水果包装与分离包装的功能要求(见图 7)。

(2) 消除 A_{12} 。根据 TRIZ 的物理矛盾可知,锥齿轮机构和反螺旋机构在时间上存在矛盾,可以采用分时段完成不同的动作,使得 $A_{12}=0$ 。

2.4 方案生成

原始矩阵中的 A_{12} 、 A_{23} 和 A_{32} 消除后,原始矩阵就变成非耦合矩阵 B 。由独立性公理可知,该方案可行,其球形水果包装机整体方案如图 8 所示。储料盘上的发泡网以 S 型轨迹绕过导向轮,进入传送带模块后,通过张紧轮整形发泡网,输送至爪头下方,当接近开关感应到发泡网时会驱动爪头拉开发泡网,同时驱动切刀分离发泡网;下果管中的传感器检测到水果下落时,电机驱动锥齿轮包装机构向发泡网方向前进,随后调整导向板角度,方便水果进入发泡网,直至水果完成包装。

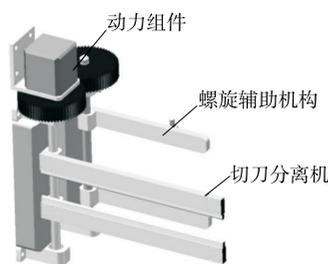


图 7 解耦设计方案

Figure 7 Design solution of decoupling

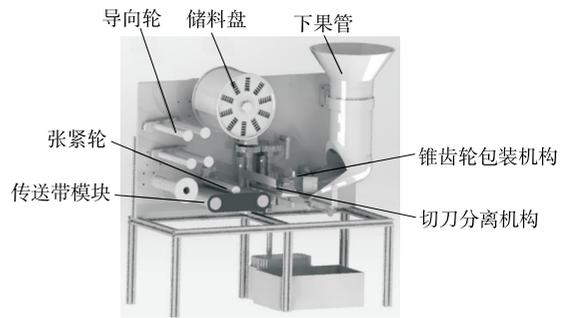


图 8 球形水果包装机整体方案

Figure 8 Overall scheme of spherical fruit packing machine

2.5 锥齿轮包装机构运动分析

为进一步验证设计方案可行性,拟建立锥齿轮包装机构的有向模型,并结合图论方法对包装机构进行运动学分析,求得各构件的速度表达式。为便于分析包装机构的位置关系,建立 OYZ 平面内的机构简图[图 9(a)],其中活动构件的编码为 1、2、3、4,低副编码为 a 、 b 、 c 、 d ,高副编码为 e 、 f 、 g ,两个导向板间距为 L ,单个导向板长度为 S 。根据图论学中的有向图构建方法对其包装机构进行有向图构建[图 9(b)]。

有向图模型中的节点表示构件,有向边表示两构件形成的运动副,其中低副用实线表示,高副用虚线表示,如果有向边的节点位于箭头处时,对应的参数设为 1,有向边的节点位于箭尾处时,对应的参数设为 -1 ,其他参数为 0,构建其边一节点矩阵 C 。

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(9)可知, C 矩阵中各行都是相互独立的,所以 C 矩阵可以分成实线边一节点矩阵 C^0 和虚线边一节点矩阵 C^1 ,即 $C = [C^0 | C^1]$ 。即 C^1 为:

$$C^1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

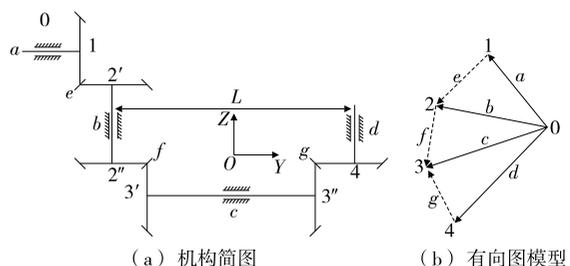


图 9 包装机构简图及有向图模型

Figure 9 Schematic diagram and directed graph model of packing mechanism

根据有向图中的实线边—节点生成树并构建路径矩阵 G , 矩阵 G 中的元素赋值规则: 有向边由节点 0 指向其他节点, 赋值 -1, 由其他节点指向节点 0, 赋值 -1, 其他有向边赋值 0。

$$G = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

因此, 树矩阵 T 可以通过矩阵 C^1 与路径矩阵 G 获得: $T = C^1 T G^T$ 。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据图 9(b) 可知, 有向边 e, a, b 构成了基本回路 M_e , 有向边 f, b, c 构成了基本回路 M_f , 有向边 g, c, d 构成了基本回路 M_g 。基本回路中的空间位置系数 P_{ij} 由各构件的基本直径确定, 若各构件的基本直径为 $d_i (i = 1, 2', 2'', 3', 3'', 4)$, 则构成的空间系数:

$$P_{ea} = -\frac{d_1}{2}, P_{eb} = \frac{d'_2}{2}, P_{ec} = 0;$$

$$P_{fb} = -\frac{d''_2}{2}, P_{fc} = \frac{d'_3}{2}, P_{fd} = 0;$$

$$P_{gc} = \frac{d''_3}{2}, P_{gd} = \frac{d_4}{2}, P_{gd} = 0。$$

由式(12)得出的树矩阵 T 与空间位置系数 P_{ij} 可求得机构中各构件的相对角速度:

$$[T^o P_{ij}] \dot{\theta} = 0, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{d_1}{2} & -\frac{d'_2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{d''_2}{2} & -\frac{d'_3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{d_3}{2} & -\frac{d_4}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(14)可得: $\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 = (\frac{d'_3}{d_4} + \frac{d'_3}{d''_2}) \dot{\theta}_3$ 。

进一步得出导向板的开膜位移

$$\Delta y = \frac{L}{2} - S \sin(\pi - \theta_4) \quad (15)$$

当导向板间距 $L = 240$ mm, 导向板长度 $S = 120$ mm, 得出 Δy 的曲线图(图 10), 当构件 4 转动角度越远离 90° 时, 开膜位移越大, 反之越小。当 $\theta_4 = 150^\circ$, L 与 S 同时变化时, 开膜位移 Δy 与 L 和 S 的曲面图, 如图 11 所示。

为保证水果顺利进入泡沫网兜, 可通过合理选择 S 与 L 值来控制开膜位移 Δy 大小; 当 $L = 240$ mm, $S = 120$ mm, $\theta_4 = 150^\circ$ 可满足水果直径为 100 mm 的包装要求。

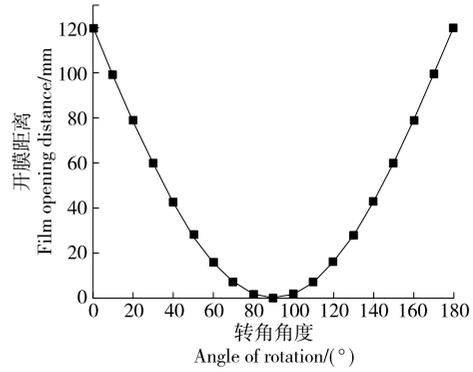


图 10 开膜位移曲线图

Figure 10 Displacement curve of open film mechanism

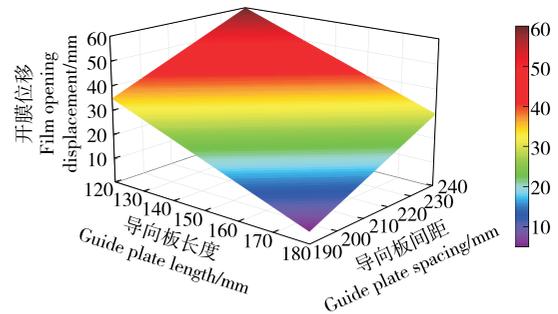


图 11 开膜位移曲面图

Figure 11 Displacement surface of open film mechanism

3 试验验证

3.1 试验指标及方法

为验证水果包装机的工作性能及可行性, 以包装成功率率为性能开展相应的样机试验, 试验对象为市面上采购的成熟度一致且表面无损伤的苹果, 经测试样品水果直径为 (100 ± 8) mm, 水果高度为 (85 ± 6) mm。采用正交试验, 选择包装前进速度、下果管角度、开膜距离为试验因素, 正交试验因素水平见表 2, 试验设计及结果见表 3。

3.2 结果及分析

由表 3 可知, 开膜距离对包装成功率的影响最大, 前进速度对包装成功率的影响最小; 最佳的因素组合为开膜距离 120 mm、下果管角度 40° 、前进速度 65 mm/s ($A_3 C_2 B_2$)。同时, 由 $F(\alpha = 0.05)$ 检验临界值^[14]及方差分

表 2 因素水平

Table 2 Factors and levels

水平	A 开膜距离/ mm	B 前进速度/ (mm · s ⁻¹)	C 下果管角 度/(°)
1	100	60	30
2	110	65	40
3	120	70	45

表 3 包装机试验方案及结果

Table 3 Test scheme and results of packing machine

试验号	A	B	C	K	成功率/%
1	1	1	1	1	82
2	1	2	2	2	92
3	1	3	3	3	80
4	2	1	2	3	90
5	2	2	3	1	87
6	2	3	1	2	85
7	3	1	3	2	93
8	3	2	1	3	94
9	3	3	2	1	96
k_1	84.67	88.33	87.00	88.00	
k_2	87.33	91.00	92.67	90.00	
k_3	94.33	87.00	86.67	88.00	
R	9.67	4.00	6.00	2.00	
S	149.56	24.89	68.22	6.89	
v	2	2	2	2	
V	74.78	12.44	34.11	3.44	
F	21.71	3.61	9.90		

析可知,A 对包装有显著影响。以最佳因素组合进行水果包装试验,每次包装 10 个水果,均能顺利完成水果包装($n=10$)。由于锥齿轮包装机构的导向板与水果直接接触,导致部分水果有轻微的损伤,其损伤率为 5%,脱落率为 3%,水果包装成功率为 92%。

4 结论

研究提出了一种以用户需求为驱动,基于 AHP/AD/TRIZ 的产品设计方法,构建了基于多方法融合的产品设计流程,运用多方法融合的产品设计流程对球形水果包装机进行设计,通过选取包装机构的开膜距离、前进速度、下果管角度为试验因素进行包装机正交试验,获得最佳试验组合为开膜距离 120 mm、下果管角度 40°、前进速度 65 mm/s。试验结果与运动分析结果一致,满足球形水果包装要求,进一步验证了包装机方案的可行性。由此证明,以用户需求为驱动的多方法融合的设计流程可为相关新产品开发提供参考,后续可将机器视觉技术运用到包装机中,增加对不同种类、不同形状水果的筛选功能,从而形成一套多品种水果智能包装机。

参考文献

[1] 郑志伟,张慧.球形水果气柱袋全自动包装机的设计方案[J].包装与食品机械,2021,39(6):60-63.
ZHENG Z W, ZHANG H. Design scheme of fully automatic

packaging of spherical fruits in air column bags[J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(6): 60-63.

[2] 李静,祖江颖,王依晨,等.基于 AHP 和模糊综合评价方法的儿童早教机设计[J].包装工程,2021,42(2):118-122,142.
LI J, ZU J Y, WANG Y C, et al. Design of early childhood instructor based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(2): 118-122, 142.

[3] 李小彤,胡昌格.基于 QFD-TRIZ 理论的筒纱包装生产线造型设计[J].包装工程,2022,43(8):92-100.
LI X T, HU C G. Modeling design of cheese packaging machinery based on QFD and TRIZ[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(8): 92-100.

[4] 张彩丽,杨帆,任工昌.产品创新设计方法中 TRIZ 和 QFD 的集成模式研究[J].机械设计与研究,2014,30(5):30-33,37.
ZHANG C L, YANG F, REN G C. Research on TRIZ and QFD-based integrated pattern for product innovation design method[J]. Machine Design & Research, 2014, 30(5): 30-33, 37.

[5] 李晓杰,梁健,李海泉.基于 AHP/QFD 与 TRIZ 的地震救援机器人设计[J].机械设计,2021,38(11):121-128.
LI X J, LIANG J, LI H Q. Design of earthquake rescue robot based on AHP/QFD and TRIZ[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(11): 121-128.

[6] 苏建宁,魏晋.基于 AHP/QFD/TRIZ 的玫瑰花蕾采摘机设计[J].机械设计,2020,37(8):121-126.
SU J N, WEI J. Design of rose buds picking machine based on AHP/QFD/TRIZ[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(8): 121-126.

[7] 钟诗胜,吴惠霞,王琳.基于 QFD 和公理化设计的模块划分方法研究[J].机械设计与制造,2013(1):98-100.
ZHONG S S, WU H X, WANG L. Research on modules partition based on QFD and AD[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(1): 98-100.

[8] 付晓莉,许桥,杨树峰,等.基于 AHP 与 TRIZ 的馒头机生产线设计[J].食品与机械,2021,37(11):81-86.
FU X L, XU Q, YANG S F, et al. Design of steamed bread machine production line based on AHP and TRIZ theory [J]. Food & Machinery, 2021, 37(11): 81-86.

[9] 檀润华. TRIZ 及应用:技术创新过程及方法[M].北京:高等教育出版社,2010:133-141.
TAN R H. TRIZ and applications: The process and methods of technological innovation[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 133-141.

[10] 郭弘凌,田怀文,柯小甜.基于层次分析法和相关性矩阵的先进设计技术分类方法[J].机械设计与研究,2016,32(1):1-5,13.
GUO H L, TIAN H W, KE X T. Advanced design technology classification based on AHP and correlation matrix[J]. Machine Design & Research, 2016, 32(1): 1-5, 13.

(下转第 161 页)

- fermentation conditions for production of antioxidant peptides from millet bran by *Bacillus natto*[J]. Food Science, 2017, 38(10): 66-73.
- [22] 伍蓉, 黄小兰, 何旭峰, 等. 地参发酵酒的挥发性成分分析和体外抗氧化活性研究[J]. 食品工业, 2023, 14(6): 118-123.
WU R, HUANG X L, HE X F, et al. Volatile components analysis and antioxidant activity in vitro of *Lycopus lucidus* var. *hirtus* regel fermented wine[J]. The Food Industry, 2023, 14(6): 118-123.
- [23] 孙晓明, 辛嘉英, 王艳, 等. 微生物发酵产阿魏酸酯酶及释放阿魏酸研究概述[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(1): 201-206.
SUN X M, XIN J Y, WANG Y, et al. Summary on the conditions offerulic acid esterase and ferulic acid production by microorganism fermentation[J]. Food Research and Development, 2019, 40(1): 201-206.
- [24] 陈如扬, 樊子依, 潘一玲, 等. 冠突散囊菌对植物酚类物质的生物转化及生物活性的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(8): 193-201.
CHEN R Y, PAN Z Y, PAN Y L, et al. *Eurotium cristatum* biotransformation plant phenolic compounds and affects their biological activities: A review[J]. Food Research and Development, 2022, 43(8): 193-201.
- [25] 曾亚桐, 张怡, 朱秋菊, 等. 枯草芽孢杆菌与产脲假丝酵母发酵豆粕的酶活力测定[J]. 天津科技, 2018, 45(6): 54-57, 62.
ZENG Y T, ZHANG Y, ZHU Q J, et al. Determination of enzyme activities from *Bacillus subtilis* and *Candida* Nguyen fermentation soybean meal[J]. Tianjin Science & Technology, 2018, 45(6): 54-57, 62.
- [26] 郑自强, 卫春会, 邓杰, 等. 一株产纤维素酶枯草芽孢杆菌的麸曲制作及其产酶特性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 12-17.
ZHENG Z Q, WEI C H, DENG J, et al. Study on the production of Fuqu and the characteristics of enzyme about a cellulase producing *Bacillus subtilis*[J]. Food & Machinery, 2021, 37(10): 12-17.
- [27] 金爽, 白雪, 任裕斌, 等. 固载微生物菌群发酵槐角对染料木素含量及抗氧化活性的影响[J]. 山西医科大学学报, 2023, 54(3): 370-376.
JIN S, BAI X, REN Y B, et al. Effect of *Fructus Sophorae* fermentation by immobilized microbial flora on genistein content and antioxidant activity[J]. Journal of Shanxi Medical University, 2023, 54(3): 370-376.
- [28] 冯海燕. 枯草芽孢杆菌 XZI125 改善米糠的功能活性成分并提高其营养价值的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012: 52.
FENG H Y. Using *Bacillus subtilis* XZI125 to improve functional components and nutritional value of rice bran[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012: 52.
- [29] LE B, ANH P T N, KIM J E, et al. Rice bran fermentation by lactic acid bacteria to enhance antioxidant activities and increase the ferulic acid, p -coumaric acid, and γ -oryzanol content[J]. Journal of Applied Biological Chemistry, 2019, 62(3): 257-264.
- [30] 刘燕. 双菌发酵燕麦改善多酚抗氧化活性及其体外消化特性[D]. 广州: 华南理工大学, 2023: 51-55.
LIU Y. Improving phenolic bioactivity in double-strain fermented oats and their characteristics in vitro digestion [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023: 51-55.

(上接第 109 页)

- [11] 武春龙, 朱天明, 张鹏, 等. 基于功能模型和层次分析法的智能产品服务系统概念方案构建[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 853-864, 870.
WU C L, ZHU T M, ZHANG P, et al. Conceptual scheme construction of smart PSS based on functional model and AHP[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 853-864, 870.
- [12] 王俊平, 徐刚. 机器视觉和电子鼻融合的番茄成熟度检测方法[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 148-152.
WANG J P, XU G. Research on tomato maturity detection method based on machine vision and electronic nose fusion[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 148-152.
- [13] CHEN J L, ZHANG M, XU B G, et al. Artificial intelligence assisted technologies for controlling the drying of fruits and vegetables using physical fields: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105: 251-260.
- [14] FAN S X, LI J B, ZHANG Y H, et al. On line detection of defective apples using computer vision system combined with deep learning methods[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 286: 1-10.

(上接第 133 页)

- [16] 熊俊涛, 梁翠晓, 林忠凯, 等. 基于支持向量机的柑橘表征缺陷荧光检测[C]// 2018 粤港澳大湾区智能检测与协同创新青年论坛论文集. 广州: 中国仪器仪表学会, 2018: 294-300.
XIONG J T, LIANG C X, LIN Z K, et al. Fluorescence detection of citrus characterization defects based on SVM[C]// Proceedings of 2018 Guangdong Hong Kong Macao Greater Bay Area Intelligent Detection and Collaborative Innovation Youth Forum. Guangzhou: China Instrument and Control Society, 2018: 294-300.
- [17] 赵玉清, 杨慧丽, 张悦, 等. 基于特征组合与 SVM 的小粒种咖啡缺陷生豆检测[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 295-302.
ZHAO Y Q, YANG H L, ZHANG Y, et al. Detection of defective Arabica green coffee beans based on feature combination and SVM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(14): 295-302.