

基于 ARIZ 算法的方草捆收集车改进设计与试验

郝兴玉 贺刚 董佳佳 王强 高磊 孙文婷

(中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院, 呼和浩特 010020)

摘要: 针对方草捆收集车作业时草捆在喂入过程中发生歪斜严重影响其稳定性的问题,应用 ARIZ 算法对技术系统进行了优化设计,并完成了试验验证。根据分析造成草捆歪斜的主要原因,确定问题发生的技术系统,建立系统组件功能模型,并针对技术系统存在的问题,应用矛盾分析、物-场分析等方法进行了系统性分析,通过应用创新原理、分离原理、知识库查询及标准解等工具形成了一系列创新设计方案,通过使用 Pro/Innovator 软件对新产生的方案进行了综合评价,并从中得到最优方案。对改进后的方草捆收集车进行了试验,结果表明:改进后的草捆收集车收集效率高,稳定性好。

关键词: 方草捆收集车; ARIZ; TRIZ; 技术矛盾; 物-场分析

中图分类号: S222.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0254-07

Improved Design and Test on Collecting Wagon of Rectangular Bale Based on ARIZ Algorithm

Hao Xingyu He Gang Dong Jiajia Wang Qiang Gao Lei Sun Wenting

(Huhhot Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Huhhot 010020, China)

Abstract: Harvest bales in the field, including process of collecting, transportation, loading and stacking bale all need to consume a lot of time and labor, thus to improve the bale harvest efficient, it was needed to design collecting wagon of rectangular bale. Its structure was mainly composed of traction device, feeding device, bale thruster, unloading device, collection tank and the electro-hydraulic control system. Collecting wagon of rectangular bale was hooked up to the rear side of compression chamber of rectangular bale baler, bales were arranged to collect according to certain rules, and finally unloaded the bale group on the ground. When collection jobs of collecting wagon of rectangular bale were affected by terrain condition, bale shape, bale density and other factors, sometimes tilt of bale would happen in the process of feeding, which seriously affected the work efficiency and stability. According to problems that working stability was seriously impacted by bale tilt in the feeding process of collecting wagon of rectangular bale, ARIZ was used to analyze feeding device of critical component of collecting wagon of rectangular bale, and determine the cause of the problem. Through analyzing the system components function, it indicated that the main reason leading to bale tilt was insufficient feeding device to bale guidance function. Aiming at the problems existing in the technical system, technical contradictions, object-field analysis and other methods were used to do systematic analysis; totally 40 innovative principles, separation principle, knowledge base query and 76 standard solutions of the TRIZ were applied, and a series of innovative design was formed. By using Pro/Innovator software, the work efficiency, equipment reliability, production costs and complexity of equipment were comprehensively evaluated for the new solutions to get the optimal solution. Finally, through test of the improved machine, results showed that the improved

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-19

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项

作者简介: 郝兴玉(1979—),男,高级工程师,主要从事牧草收获机械化研究,E-mail: 112849599@qq.com

通信作者: 贺刚(1978—),男,研究员,主要从事牧草收获机械化研究,E-mail: hegang001@163.com

machine had advantages of high collecting efficiency and good working stability. Bale group neat rate was 100% , and the main performance indicators all met the requirements of relevant standards. Therefore , the results can provide reference for the relevant field of ARIZ innovative design products.

Key words: collecting wagon of rectangular bale; ARIZ; TRIZ; technical contradiction; object - field analysis

引言

草产业是畜牧业发展的基础和保障。牧草生产机械化的发展能促进畜牧业生产实现规模化、产业化,并向现代化畜牧业迈进。随着退耕还草和农牧业产业结构的调整,人工草场建设和牧草收获工艺已从传统的散草分段收获法向现代压缩收获法转变,这促进了适合我国国情的小方捆压捆机的发展。但是田间草捆的捡拾、运输、装垛等工序,作为饲草收获环节中费时费力的作业项目缺少与之配套的适用机具^[1],致使牧草不能及时高效收贮,造成经济损失的同时影响了优质牧草的生产和供给,制约了牧草产业的发展。

为此,中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院的研究人员设计了系列化的方草捆收集车与方草捆集垛机。该方草捆收集车直接与方捆机配套使用,挂接于方捆机压缩室后侧,将方捆机捆好的草捆按照一定规则进行排列收集,并将收集好的草捆组直接成组铺卸在地面上。方草捆收集车不需要额外配套动力(与方捆机使用同一台拖拉机的动力源),结构简单,维护方便,使用成本低,适合大面积种植的人工草场或天然草场^[2]。

方草捆收集车作业时受地形条件、草捆形状及草捆密度等因素影响,有时草捆在喂入过程中会发生歪斜,草捆歪斜严重影响着收集车的工作效率与稳定性。以草捆收集车作业时草捆发生歪斜为解决问题的入手点,本文通过运用 ARIZ 理论对方草捆收集车关键部件进行系统分析,并形成一系列改进设计方案,最后利用 Pro/Innovator 软件对得到的方案进行综合评价,确定最优方案,并对改进后的设备进行试验验证。

1 ARIZ 算法及 Pro/Innovator 平台

ARIZ 算法是解决发明问题的理论 (Theory of inventive problem solving, TRIZ)^[3-4],在实际使用中,尤其是解决复杂问题的情况下选择工具比较困难时,集成应用了 TRIZ 几乎所有工具而形成的解决发明问题的一整套完整算法^[5-8]。

ARIZ 理论是以解决发明问题为基本思路的一整套算法,以一整套连续过程程序,针对非标准问题

采用步步紧逼的方法,将一个状况模糊的原始发明问题转化为简单问题模型,并进一步构思理想解。主要目的是在 TRIZ 现有工具基础上组成系统化的问题解决流程。具体应用流程如图 1 所示。

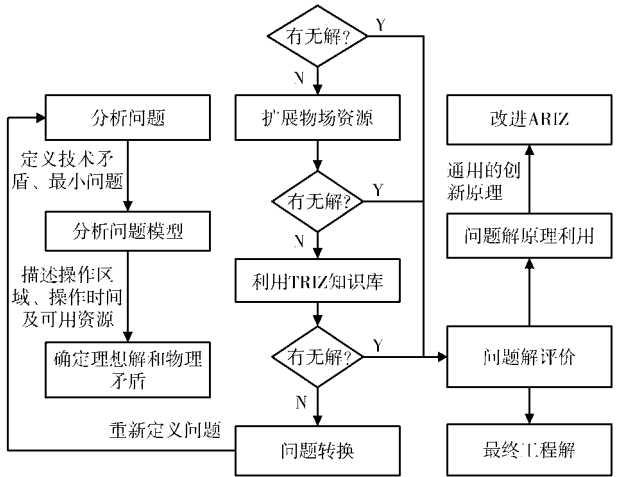


图 1 ARIZ 应用流程图
Fig. 1 Application flow chart of ARIZ

ARIZ 应用流程共分 9 个步骤,分别是:①将系统问题最小化。②图形化表示矛盾区域,评测系统内所有可用资源。③分析技术问题隐含的物理矛盾,通过定义理想解分析物理矛盾。④尝试采用系统资源解决物理矛盾。⑤利用引入物质资源、派生资源解决物理矛盾。⑥应用 TRIZ 知识库解决物理矛盾。⑦对问题解进行评价。⑧由问题解中抽取出具有典型意义的通用创新原理。⑨分析应用 ARIZ 解决问题的过程以改进 ARIZ 算法^[9-12]。

为了便于工程设计人员对创新方法的学习和使用,北京亿维讯公司设计了计算机辅助创新设计平台 Pro/Innovator,该平台主要包括问题描述、问题分解、专利查询、方案生成和方案评价等功能,借助其强大的综合分析工具和源于世界优秀专利而创建的创新知识库,不同工程领域的技术人员在面临技术难题时,可打破思维定势、拓宽思路,以全新的视角和思路分析问题,快速得到可操作的高效解决方案^[13]。

2 方草捆收集车结构及工作原理

2.1 方草捆收集车结构及主要技术参数

方草捆收集车^[14]主要由牵引装置、草捆喂入装置、草捆侧推装置、草捆铺卸装置、箱体及电液控制

系统等组成。其整体结构如图2所示。

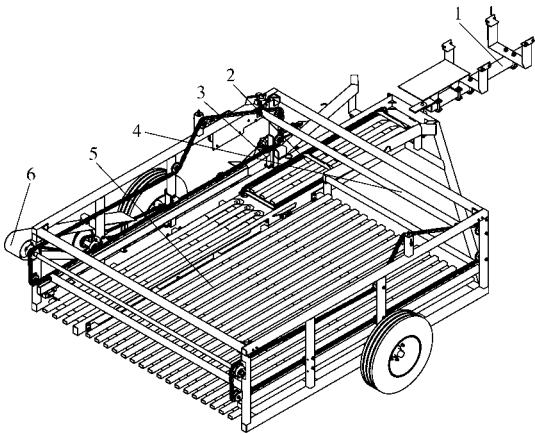


图2 方草捆收集车结构图

Fig.2 Structure of rectangular bale collecting wagon
1. 牵引装置 2. 草捆喂入装置 3. 草捆侧推装置 4. 草捆铺卸装置 5. 右侧箱体 6. 电液控制系统

方草捆收集车主要技术参数如表1所示。

表1 方草捆收集车主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters of rectangular bale collecting wagon

参数	数值
配套动力/kW	≥47
一次收集草捆数量/捆	15
生产率/(捆·h ⁻¹)	≥180
收集草捆尺寸/(mm×mm×mm)	(830~930)×460×360
铺放草捆组尺寸/(mm×mm×mm)	(2 500~2 800)×2 300×360
外形尺寸/(mm×mm×mm)	5 970×3 240×1 400
机器质量/kg	950
液压流量/(L·min ⁻¹)	≤30

2.2 工作原理

方草捆收集车直接挂接在打捆机压缩室后侧，草捆喂入和草捆侧推动力由拖拉机液压提供，卸草时动力由地轮驱动供给。工作时收集车的喂入装置把打捆机吐出的草捆向后推送，当草捆碰到位于收集车左后侧的行程开关后，侧推装置将喂入的草捆向右推一个草捆的宽度距离，然后进入下次侧推准备，当侧推压力达到设定值时电磁离合器结合，启动卸草装置，地轮驱动链条并带动卸草杆旋转，将草捆组从机器后侧推出，草捆组成组铺卸于地面上，当草捆组完全被推出机器箱体时另一个卸草杆触发卸草停止开关，离合器断开，卸草过程结束，然后开始下次收集工作。

3 应用 ARIZ 算法对方草捆收集车改进设计

3.1 分析问题

3.1.1 描述关键具体问题

草捆收集车作业时，当草捆进入喂入装置后由

于地形条件、草捆形状及草捆密度等因素影响，有时草捆会发生歪斜，无法触碰行程开关，导致草捆侧推无法完成。

经分析系统得出，问题焦点为：草捆发生歪斜、无法触碰行程开关。

3.1.2 系统组件功能分析

系统组件功能分析是一个对系统功能建模的过程，所建的模型应包括超系统、系统组件、作用对象等元素，通过系统组件功能分析可揭示整个技术系统所有组件之间的相互作用关系，以及如何实现系统功能，并从中找出解决问题入手点^[15]。

定义系统：草捆喂入装置，结构示意图见图3。系统功能：推动（移动）草捆位移。系统组件：机架、拨草板、底板、喂入装置入口、液压马达等。作用对象：草捆，工具为喂入装置入口。超系统：牵引装置、行程开关。

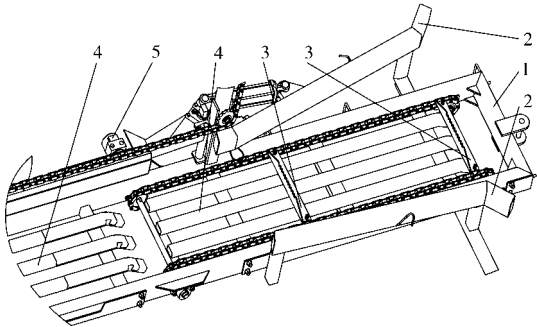


图3 草捆喂入装置结构示意图

Fig.3 Structure of collecting bale device
1. 机架 2. 喂入装置入口 3. 拨草板 4. 底板 5. 液压马达

经对系统组件分析，得出：导致草捆歪斜的主要原因为喂入装置入口对草捆导向功能不足。系统组件功能模型分析图如图4所示。

3.1.3 定义系统存在的技术矛盾 TC1 和 TC2

TC1：如果喂入装置入口宽度小，对草捆喂入导向性好，但是不利于草捆喂入，有时会导致堵塞入口。

TC2：如果喂入装置入口宽度大，有利于草捆喂入，但对草捆喂入的导向性不足。

用图示法表示技术矛盾，如图5所示。

3.1.4 选取主要技术矛盾进行激化并定义极限状态

选取主要技术矛盾的原则是朝着解决系统问题的方向进行，由于导致系统问题的原因主要是喂入装置入口对草捆导向功能不足，因此将 TC1 定为主要技术矛盾，当入口宽度减小时有利于解决该问题。

激化矛盾，有利于定义极限状态：喂入装置入口宽度足够小，草捆导向很好，不会导致草捆歪斜。

定义极限状态：喂入装置入口宽度足够小，小到与草捆宽度一样大时，草捆不会歪斜，但要保证草捆

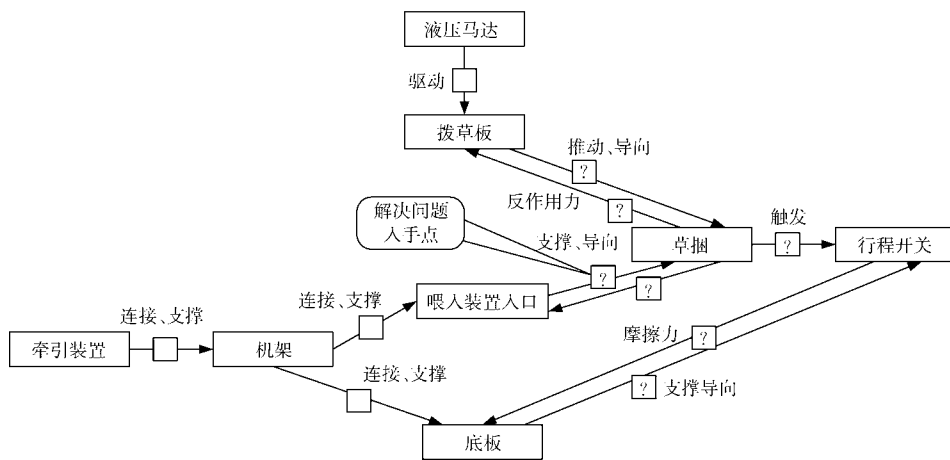


Fig. 4 Figure of function model



图 5 技术矛盾示意图

Fig. 5 Technical contradiction schematic diagram

的喂入。

3.1.5 引入 X 元件

为了解决系统问题,假定引入一个 X 元件,要求 X 元件具备以下功能:提高草捆喂入导向性、不影响草捆喂入,同时不能增加系统的复杂性。

3.1.6 应用标准解解决问题

根据系统组件功能分析,建立物-场模型图,如图6所示。经分析确定喂入装置入口对草捆的有用作用(导向功能)不足,在此可应用标准解2.1.1,即在系统的2个物质之间引入外部现成的物质以增加有用(导向)作用。

生成方案 1:在喂入装置入口右侧增加拱形弹性导向板,当草捆喂入时,通过挤压导向板提高入口导向作用,且不妨碍草捆喂入。

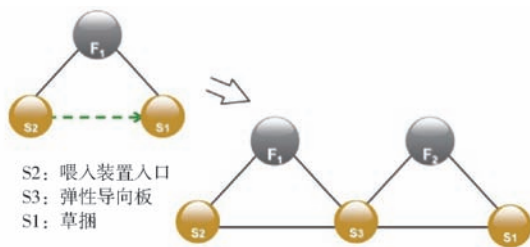


图 6 链式物-场模型

Fig. 6 Model of concatenate object – field

3.2 分析问题模型

3.2.1 定义操作区域及操作时间

正确定义操作区域与操作时间,有助于找到可利用的合适的物场资源。

操作区域定义为草捆从喂入装置入口到草捆侧

推之前的工作区域;操作时间定义为草捆从进入喂入装置入口直至草捆被侧推之前的时间段。

3.2.2 寻找物场资源

在系统发生问题的操作区域及操作时间段内寻找所有的可用资源,可以是工具资源、子系统资源、环境资源或超系统资源,也可以是以上资源的变形,或场资源。资源详细列表见表2。

表 2 可用资源

Tab.2 Available resources

可用资源	物质资源		场资源
	物质	物质变形	场
工具	喂入装置入口	变形的喂入装置入口	机械场、重力场
子系统	底板、拨草板、液压马达、机架、机械式行程开关	变形底板、变形拨草板、光电开关等	机械场、电磁场
环境	空气、粉尘、草中的水分等	氮气、氧气、二氧化碳气体等	地磁场、重力场
超系统	牵引装置、侧推装置、收集车、箱体	变形箱体、变形牵引装置	电场、声场

3.3 描述 IFR 和物理矛盾

3.3.1 描述理想化的最终结果并进行强化

引入一个组件 X,它的作用效果为:提高草捆喂入导向性、不会影响草捆的喂入,同时不会带来其他有害作用。X 组件可以是其他组件的第 2 种功能或系统组件的变形形成,也可以是组件和各种场的组合形成等形式。

理想化最终结果 IFR1:新加入的组件 X 由喂入装置入口通过变形形成,能起到很好的导向作用,并且不会影响草捆喂入,同时不增加系统的复杂性。

3.3.2 描述宏观的物理矛盾

物理矛盾:为使草捆喂入时导向性好,喂入装置入口宽度应该足够小,当入口宽度与草捆宽度相同

时草捆不会发生歪斜;同时为了草捆能顺利喂入,喂入装置入口宽度又应该足够大,当入口宽度达到草捆对角线长度时,草捆在喂入时不会发生堵塞。

生成方案 2:根据物理矛盾,确定草捆喂入和导向在空间上不存在交叉,因此可应用空间分离法,将喂入装置入口设计为前端大、后端小的形状,前端宽度设计为草捆对角线长度,即 997 mm,后端宽度设计为草捆宽度,即 360 mm,前端有利于完成草捆喂入功能,后端完成草捆导向功能。

3.3.3 描述微观的物理矛盾和理想化最终结果

微观物理矛盾:为了提高对草捆喂入时的导向性,应该存在某种粒子给草捆施加推力和摩擦力,同时为了不影响草捆顺利喂入,又不应该存在给草捆施加推力和摩擦力的粒子。

理想化最终结果 IFR2:草捆喂入时喂入装置入口宽度应该足够大,当草捆喂入后,系统自我可以实现草捆顺正,同时不增加系统复杂性。

3.3.4 尝试采用标准解系统解决通过 3.3.3 节得到的物理问题

应用标准解 1.1.3,在 S2 外部引入附加物,建立外部复合的物-场模型,如图 7 所示。

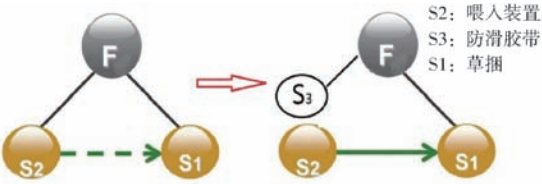


图 7 复合物-场模型
Fig. 7 Model of composite object - field

生成方案 3:在喂入装置底板粘贴防滑胶带增加摩擦力,当草捆在歪斜状态下喂入后,首先由草捆的一个角(A)先接触防滑胶带,导致这一角(A)的阻力增加,由于草捆喂入是由拨草板推动来完成,并且拨草板始终保持左右直线状态,因此当草捆歪斜时拨草板推动的是 A 角的对角,这样可促使草捆被迫顺正。

3.4 扩展物质-场资源利用

3.4.1 运用小人法

建立模型:使用不同形态、不同颜色的“智慧”小人来描述问题场景。其中,红色小人表示喂入装置入口,绿色小人表示草捆,黑色小人表示拨草板,灰色小人表示底板。问题模型图如图 8 所示。

问题描述:绿色小人队伍发生歪斜。

可能原因:左右两侧红色小人距离远;灰色小人无法校正绿色小人队伍;黑色小人分布不均。

建立目标模型:引入 X,保证绿色小人队伍不发生歪斜,只要满足以上 3 个原因之一即可。

寻找资源:利用表 2 中所列物质资源。
生成方案 4:将喂入装置入口进行变形,宽度减小,改为自适应调节入口,根据草捆宽度自动调节。

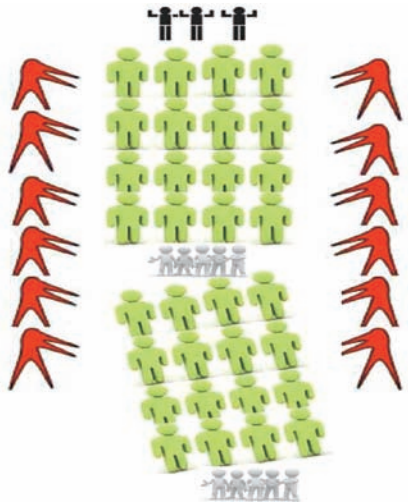


图 8 问题模型图
Fig. 8 Diagram of problem model

3.4.2 利用双物质组合资源

把 2 种或多种单物质进行组合形成双物质,以增加其功能。

生成方案 5:将拨草板增加导向装置,使草捆喂入时便进行顺正。

3.5 TRIZ 知识库利用

3.5.1 运用标准解

对系统中的其他问题点应用标准解进行寻找解决方案。根据分析图 4 功能模型图,其中草捆对行程开关有用作用不足,因此可应用标准解 2.2.1,利用更易控制的场替代,转变场控制模型如图 9 所示。



图 9 转变场控制模型
Fig. 9 Change control object - field model

生成方案 6:为提高可控性,将由机械控制的行程开关改为光电控制开关,当草捆接近开关时即可启动侧推装置。

3.5.2 运用类似问题解决方案

经过查询知识库,受飞机引擎罩上下不对称设计案例(顶部圆形、底部平面状),既可增加引擎进风口面积,又能保证引擎罩离地距离的启发,运用 40 个创新原理中的增加不对称性原理进行构思方案。

生成方案 7:将喂入装置入口设计为左右不对称形状,右侧保持前后直线状态,左侧前端向左偏,

有利于草捆喂入,且草捆喂入后始终保持与左侧紧靠,以方便触发左后侧的行程开关。

3.5.3 运用自然现象或效应解决物理矛盾

采用网络查询,查询类比方案。首先定义关键词“调整”,查询到案例《球形连接对准气缸内的活塞》得到启发。

生成方案 8:将喂入装置右侧梁后端设计为球头铰接型,前端设计为左右可调整,球头铰接型连接可提高灵活性,方便调整喂入装置入口宽度。

3.6 问题转换

当进行到第 1 节中步骤⑤后仍然未得到解时,可考虑转换问题,重新选择技术矛盾,再尝试新的构思。

选择 TC2,如果喂入装置入口大,有利于草捆喂入,但草捆喂入导向不足,即在喂入装置入口大的前提下增强草捆喂入导向功能。

根据 TC2,确定草捆喂入和导向在时间上不存在交叉,因此可应用时间分离原理中的预先作用原理来构思方案。

生成方案 9:在喂入装置入口右侧前方增加预作用挡板,当草捆在进入喂入装置后对草捆向左施加一预作用力,防止草捆歪斜。

3.7 问题解评价

考虑新产生的方案实施后的工作效率、机具的可靠性、制作成本及设备的复杂性等因素,并将以上因素作为主要评价指标,运用 Pro/Innovator 软件平台,对上述 8 个解决方案进行综合评价^[16],如图 10 所示。



图 10 方案评价模型图

Fig. 10 Diagram of scheme evaluation model

根据上述评价结果对新生成的所有方案进行汇总排序,排序结果为:方案 2→方案 7→方案 3→方案 6→方案 1 方案 4→方案 5→方案 8→方案 9,方案汇总排序如表 3 所示。

3.8 确定最佳方案

通过以上分析以及对方案的评价,最终确定方案 2、方案 3 及方案 7 容易实现,成本低廉,且不会引入新的问题。因此,将方案 2、方案 3 及方案 7 进

表 3 方案汇总排序
Tab. 3 Sorting of schemes summary

方案序号	方案描述	方案评价	排序
1	喂入装置入口增加弹性导向板,提高入口导向作用	易实现、成本低	5
2	将喂入装置入口设计为前端大后端小的形状	易实现、成本低	1
3	喂入装置底板粘贴防滑胶带,增加摩擦力,促使草捆顺正	易实现、成本低	3
4	将喂入装置入口进行变形,宽度减小,改为自适应调节入口,根据草捆宽度自动调节	成本稍高、相对复杂	6
5	将拨草板增加导向装置,使草捆喂入时顺正	易实现、成本低、引入新问题	7
6	将机械控制的行程开关改为光电控制开关	易实现、成本低、引入新问题	4
7	将喂入装置入口设计为左右不对称形状	易实现、成本低	2
8	将喂入装置右侧梁后端设计为球头铰接型,前端设计为左右可调整	易实现、成本稍高	8
9	在喂入装置入口右侧前方增加预作用挡板	易实现、成本低、引入新问题	9

行组合形成一个最优方案。

最终实施方案:将喂入装置入口设计为前端大、后端小的形状,前端完成草捆喂入功能,后端完成草捆导向功能(方案 2),并在喂入装置底板粘贴防滑胶带,增加摩擦力,促使草捆顺正(方案 3),同时将喂入装置入口设计为左右不对称形状,使草捆喂入时靠近左侧,以方便触发行程开关(方案 7)。

3.9 利用问题解原理对 ARIZ 算法进行改进

分析问题解所应用的原理是否可应用于其他工程问题,评价该方法是否具有普遍意义,将具有普遍意义的创新原理扩充到 TRIZ 知识库中。

4 试验验证

4.1 试验目的及要求

为了检验改进设计后的方草捆收集车的各项性能指标及设备稳定性,于 2015 年 9 月在呼和浩特市伊利第七牧场进行了为期 3 d 的田间试验。试验要求按照标准 DB 15/T 877—2015 规定进行。地块为 400 m×500 m 的苜蓿草地,苜蓿草为第 3 茬,配套捆草机为纽荷兰侧牵引打捆机,拖拉机为约翰迪尔 804,如图 11 所示。

4.2 试验数据计算

按照 DB 15/T 877—2015 要求,对设备主要性能指标进行了试验测试。



图 11 方草捆收集车试验情况

Fig. 11 Test of collecting wagon of rectangular bale on site

4.2.1 纯工作小时生产率

按照标准要求,共测试 3 次后求平均值,每次为 60 min,计算公式为

$$E_c = N/T_c \tag{1}$$

式中 E_c ——纯工作小时生产率,捆/h

N ——收集草捆数量,捆

T_c ——测试时间,h

测试及计算结果见表 4。

表 4 纯工作小时生产率

Tab. 4 Pure hours of work productivity

试验序号	测定时间/ min	草捆数量/ 捆	纯工作小时生产 率/(捆·h ⁻¹)
1	60	165	165
2	60	195	195
3	60	180	180
平均值			180

4.2.2 草捆组整齐率

按照标准要求,共测定 10 个铺卸在地面上的草捆组后求平均值,计算公式为

$$Z_z = I_z/I_q \times 100\% \tag{2}$$

式中 Z_z ——草捆组整齐率, %

I_z ——测定的整齐草捆组的数量,组
 I_q ——测定的全部草捆组的数量,组
测试及计算结果见表 5。

表 5 草捆组整齐率

Tab. 5 Percentage of neat bales

试验序号	边长差值/mm	长边均值/mm	是否整齐
1	242	2 550	是
2	256	2 542	是
3	244	2 536	是
4	251	2 540	是
5	248	2 558	是
6	286	2 543	是
7	248	2 556	是
8	264	2 550	是
9	231	2 564	是
10	253	2 567	是
草捆组整齐率/%			100

注:按标准规定,当边长差值不大于长边均值的 20% 时,应判为整齐草捆组。

4.3 试验结果

经田间试验检测,应用 ARIZ 算法创新设计的方草捆收集车作业顺畅,在规定时间内无故障发生,作业效率大大提高,纯工作小时生产率达到 180 捆/h,草捆组整齐率达到 100%,主要性能指标全部达到相关标准的要求。

5 结束语

基于 ARIZ 算法理论对方草捆收集车草捆喂入时导向功能不足导致草捆收集车稳定性差的问题,应用 ARIZ 算法的 9 个步骤进行系统分析,并进一步应用 TRIZ 工具,得到了一系列解决方案,使用 Pro/Innovator 软件平台对得到的解决方案进行综合评价,最终得到最优实施方案,并经过田间试验验证,证实了改进设计后的方草捆收集车作业效率高,主要性能指标达到了相关标准的要求。

参 考 文 献

1 杨世昆,苏正范. 饲草生产机械与设备[M]. 北京:中国农业出版社,2009:290 – 297.
2 王强,赵小娟,贺刚,等. 高品质饲草制备机械[J]. 农业工程,2015,5(3):21 – 23.
WANG Qiang, ZHAO Xiaojuan, HE Gang, et al. Preparation machinery of high quality forage[J]. Agricultural Engineering, 2015,5(3):21 – 23. (in Chinese)
3 ALTSHULLER G S. Andsuddenly the inventor appeared[M]. Worcester: Technical Innovation Center, Inc., 1996.
4 ALTSHULLER G S. Theinnovation algorithm, TRIZ, systematic innovation and technical creativity[M]. Worcester: Technical Innovation Center, Inc., 1996.
5 檀润华. 创新方法教程(高级)[M]. 北京:高等教育出版社,2012:111 – 134.
6 阿奇舒勒. 创新算法——TRIZ、系统创新和技术创造力[M]. 谭培波,译. 武汉:华中科技大学出版社,2008.
7 赵敏,史晓凌,段海波. TRIZ 入门及实践[M]. 北京:科学出版社,2009.
8 檀润华. 创新设计——TRIZ:发明问题解决理论[M]. 北京:机械工业出版社,2002.

- 6 HENDRIKS A T W M, ZEEMAN G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(1):10-18.
- 7 YI Z, JIA Z, XU F, et al. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production[J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2014, 42(1):35-53.
- 8 关倩, 蒋剑春, 徐俊明, 等. 木质纤维生物质热化学转化预处理技术研究进展[J]. *生物质化学工程*, 2014(6):56-61.
GUAN Qian, JIANG Jianchun, XU Junming, et al. Research progress of lignocellulosic biomass pretreatment methods for thermochemical conversion[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2014(6):56-61. (in Chinese)
- 9 CHANDRA R, TAKEUCHI H, HASEGAWA T, et al. Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments[J]. *Energy*, 2012, 43:273-282.
- 10 CHANDRA R, TAKEUCHI H, HASEGAWA T. Hydrothermal pretreatment of rice straw biomass: a potential and promising method for enhanced methane production[J]. *Applied Energy*, 2012, 94:129-140.
- 11 杨晴, 梅艳阳, 郝宏蒙, 等. 烘焙对生物质热解产物特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(20):214-219.
YANG Qing, MEI Yanyang, HAO Hongmeng, et al. Effect of torrefaction on characteristics of pyrolytic products of biomass[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(20):214-219. (in Chinese)
- 12 李连华, 马隆龙, 袁振宏, 等. 农作物秸秆的厌氧消化试验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1):335-338.
LI Lianhua, MA Longlong, YUAN Zhenhong, et al. Study on anaerobic digestion of straw stalk[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):335-338. (in Chinese)
- 13 APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 21st ed, Washington, DC: APHA, 2005.
- 14 FAITHFULL N T. Methods in agricultural chemical analysis: a practical handbook[M]. Wallingford: CABI Publishing, 2002.
- 15 ZWIETERING M H, JONGENBURGER I, ROMBOUTS F M, et al. Modeling of the bacterial growth curve[J]. *Applied Environmental Microbiology*, 1990, 56(6):1875-1881.
- 16 BISWAS A K, UMEKI K, YANG W, et al. Change of pyrolysis characteristics and structure of woody biomass due to steam explosion pretreatment[J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92(10):1849-1854.
- 17 李文哲, 丁清华, 魏东辉, 等. 稻秸好氧厌氧两相发酵工艺与产气特性研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(3):150-157.
LI Wenzhe, DING Qinghua, WEI Donghui, et al. Aerobic and anaerobic two-phase fermentation process and biogas production characteristic of rice straw[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3):150-157. (in Chinese)
- 18 王芳, 牛卫生, 罗冰, 等. 热化学预处理玉米秸秆厌氧消化产气特性研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(8):1965-1970.
WANG Fang, NIU Weisheng, LUO Bing, et al. Biogas production characteristics of anaerobic digestion of corn stalk after thermochemical pretreatment[J]. *ACTA Energetica Solaris Sinica*, 2015, 36(8):1965-1970. (in Chinese)

(上接第 260 页)

- 9 王昌, 魏闯. ARIZ 在注塑模具设计冲突问题中的应用研究[J]. *机械设计与制造*, 2009, 9(9):230-232.
WANG Chang, WEI Chuang. Application and research of ARIZ algorithm in the conflict questions of plastic injection mould design[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009, 9(9):230-232. (in Chinese)
- 10 韦子辉, 阎会强, 檀润华. TRIZ 理论中 ARIZ 算法研究与应用[J]. *机械设计*, 2008, 25(4):57-61.
- 11 SAVRANSKY S D. Engineering of creativity: introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving[M]. New York: RC Press, 2000.
- 12 VICTOR Fey, EUGENE Rivin. Innovation on demand[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- 13 闫晓林, 王望龙. 基于 TRIZ 和 Pro/Innovation 平台的产品创新设计[J]. *机床与液压*, 2009, 37(7):192-195.
YAN Xiaolin, WANG Wanglong. Innovation product design based on TRIZ and Pro/Innovator platform[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2009, 37(7):192-195. (in Chinese)
- 14 郝兴玉. 方草捆收集车: 中国, ZL201320429704.1[P]. 2013-07-11.
- 15 李彦. 创新方法教程(中级)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012:91-102.
- 16 张宁, 戴晓军, 郝兴玉, 等. 基于 TRIZ 的沙生灌木栽植机设计[J]. *农业工程*, 2016, 3(2):89-92.
ZHANG Ning, DAI Xiaojun, HAO Xingyu, et al. Design of desert shrub planting machine based on TRIZ theory[J]. *Agricultural Engineering*, 2016, 3(2):89-92. (in Chinese)