

基于 AMESim 的柠条收获机割台系统的 液压系统设计与仿真研究

魏翔宇 王琳 刘晋浩*

北京林业大学工学院 北京 100083

摘要: 柠条作为一种天然且具有良好饲用价值的植物, 不仅在畜牧业发展中有特殊价值, 还在防风固沙保持水土方面具有重要意义。目前已经设计出的柠条联合收获设备在平茬作业方面有着漏割率高, 平茬高度不一致且容易堵塞的问题, 本文在基于柠条自身生物学特性的基础上, 对柠条收获机割台的液压系统进行了设计, 并且基于 AMESim 仿真平台构建液压系统数值模型, 通过多工况仿真与结果对比分析, 验证系统设计方案在动态特性与稳态精度方面的工程可行性。

关键词: 柠条收获机; 液压系统仿真; AMESim

引言

柠条是一种豆科锦鸡儿属植物, 为多年生长灌木。近年来, 因柠条本身具有的耐寒耐旱等特性, 已经成为了防风固沙的首选植物之一。为了提高柠条的生长效率需要对柠条进行平茬作业, 柠条平茬时要求茬口断面平整, 而且需要根系保持完整, 严格杜绝撕裂、毛刺等损伤, 否则会对柠条来年平茬复壮有影响。而目前我国柠条收获平茬的方式主要有三种: 手持机械剪人工修剪, 采用锯盘切割器切割人工收捡, 以及自走式收获机械进行平茬作业^[1-4]。其中前两种方式效率较低且没法进行大范围推广作业, 因此对柠条联合收获机进行研制, 对于推动柠条相关产业发展具有重要意义。

当前自走式柠条收获机大多数参考青贮机等机械设备进行设计, 由于柠条相较于玉米秸秆本身木质化程度高, 因此平茬效果不太理想, 在进行平茬作业时会导致收获机械堵塞等问题^[5]。本文基于这一问题, 利用 AMESim 仿真软件建立柠条收获机割台系统的液压仿真模型, 对液压系统进行仿真模拟并分析其动态性能, 对于自走式柠条收获设备的研发具有重要意义。

1 柠条收获机割台总体结构

1.1 柠条收获机主要参数

(1) 外形尺寸(长 × 宽 × 高): 8800mm × 2600mm × 3000mm

(2) 整机重量: 15000kg

(3) 发动机功率: 600kW

(4) 作业速度: 0~10km/h

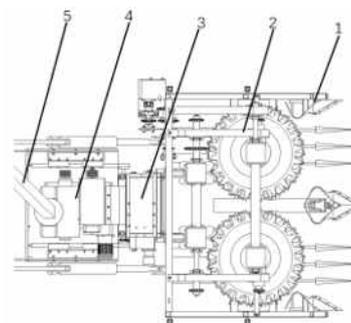
(5) 割台工作宽度: 2000mm



图 1 柠条收获机整机虚拟样机图

1.2 柠条收获机割台系统结构及工作流程

柠条收获机割台主要结构如图所示, 主要由犁式扶禾装置、割台装置、输送装置、粉碎装置组成, 在进行工作时首先由扶禾装置对柠条进行收拢处理, 以保证平茬高度的一致性, 之后圆盘锯割装置对柠条进行切割, 再通过输送装置将切割后的柠条输送到粉碎装置中, 经粉碎装置对柠条进行压缩粉碎处理, 最后经出料口送出。



1. 犁式扶禾机构 2. 割台装置 3. 输送进料装置 4. 粉碎装置
5. 抛料口

图 2 柠条收获机割台系统的结构

柠条收获机割台的主要工作流程为：

- (1) 柠条收获机到达作业位置
- (2) 犁式扶禾装置将作业位置的柠条扶起聚拢
- (3) 锯切机构将柠条锯断
- (4) 锯断的柠条经强制进料装置运送到粉碎装置
- (5) 粉碎装置将柠条粉碎并从抛料口抛出
- (6) 重复上述作业步骤

2 柠条收获机割台液压系统的建模与仿真

2.1 负载敏感液压回路设计

负载敏感技术 (Load-sensitive technology) 通常指的是在不同负载条件下, 能够动态调整性能、资源分配或处理方式的技术。这种技术主要目的是在系统面临不同的工作负载时, 保证系统能够高效运作、节约资源或优化性能。因此负载敏感技术被广泛应用在液压系统中, 以割台双圆盘锯的液压回路为例搭建的负载敏感回路的液压原理图如下图所示：

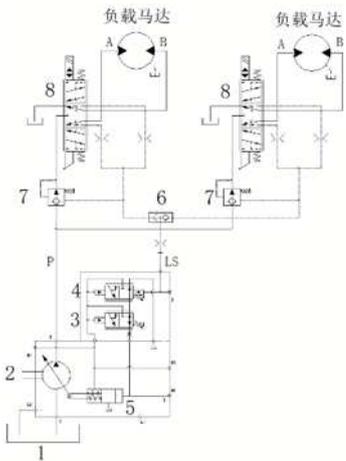


图3 柠条收获机割台回路负载敏感回路液压原理图

如图中所示, 负载敏感系统通过调整液压泵开口的角度来控制液压泵泵出液压油的流量, 负载增加时泵处油量会增大, 负载减少时会减少泵油量, 从而达到节省系统耗能的效果。

考虑到实际工作状况中, 在切削柠条时, 柠条收获机割台往往会出现堵塞的情况, 因此在设计液压回路时, 可以采用分动控制的回路, 来解决堵塞的问题。

2.2 柠条收获机割台整体液压系统回路设计

柠条收获机割台液压系统主要由粉碎回路、割台锯切回路、输送回路以及负载敏感回路组成, 并增加溢流装置对整个回路提供保护作用。设计出的液压回路图如图所示。

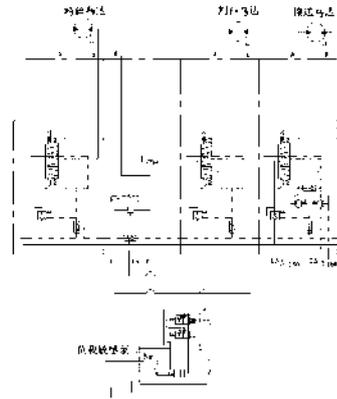


图4 柠条收获机割台整体液压原理图

本文研究涉及的柠条联合收割装备属特种农业机械范畴, 其典型戈壁荒漠作业工况, 设计时候需要考虑机构整体强度与抗疲劳特性。当前主流机型采用柴油机-机械传动架构, 而本研究引入液压传动系统, 相较于传统机械传动系统, 液压传动系统具有传动平稳性高、抗过载能力强的特点, 而且对比传统机械传动系统, 液压传动系统所需的安装空间更小, 而且还可以实现能量回收的功能, 大大提高了柠条联合收获设备的工作效率。

2.3 AMESim 仿真分析模型的搭建

AMESim (Advanced Modeling Environment for performing Simulation of engineering systems) 是一种工程系统高级建模和仿真平台。Amesim 的建模方法是基于功率键合图, 与键合图相比, 它具有直观图形的界面, 可实现面向原理图建模, 在整个仿真过程中, 仿真系统都是通过直观的图形界面展现出来的^[6]。因此使用该软件进行建模时, 可以调用元件库的模型, 并且对每个元器件进行赋值, 将液压回路进行搭建仿真。

首先根据负载敏感回路的液压原理图搭建系统仿真模型如下图所示：

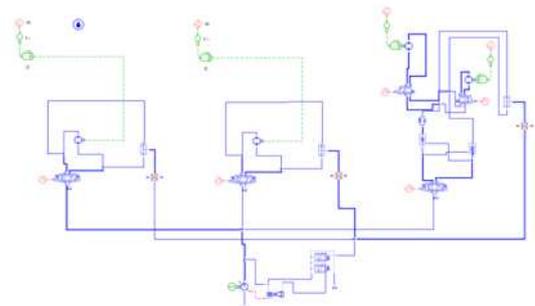


图5 柠条收割机割台液压系统仿真模型

2.4 工作参数确定

柠条收获机割台液压系统需要确定的参数主要有，圆盘锯割装置需要转速和流量、强制进料装置需要的转速以及输出扭矩。

首先对圆盘锯割装置进行设计分析，按照切割方式可以分为正切以及滑切两种类型^[7]，其中正切是切割刀具运动方向垂直于刀具切入材料的一种切割方式，滑切是指割刀运动方向与切入刀具刀口既不垂直也不平行的一种切割方式。在设计柠条收割机割台时根据柠条的生物学特性，采取的是圆盘式切割器的方式对柠条进行切割。

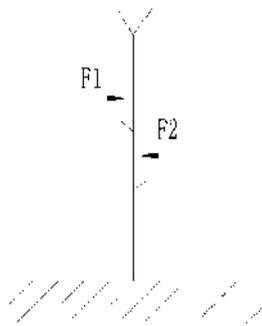


图 6 柠条切割过程受力简图

根据受力分析可知，在柠条切割过程中，圆盘锯切装置行进方向与柠条垂直，因此需要扭矩为：

$$T = F \times r \times \sin \theta$$

圆盘锯线速度公式为：

$$v = \frac{2\pi \times r \times n}{60}$$

其中圆盘锯线速度为 80m/s，圆盘锯半径为 400mm，可得转速为 1909.86r/min。考虑到实际工作状况，这里取 2000r/min。

根据液压马达扭矩计算公式：

$$C = \eta \times \frac{disp \times \Delta p}{20\pi}$$

带入各项参数后，计算后选择 Sauer-Danfoss 公司柱塞马达 M 系列 32 规格马达作为驱动马达。

其中各项参数如图

表 1 Sauer-Danfoss M 系列 32 型马达具体参数

项目	参数
马达型号	M32
几何排量 (cc)	32
持续转速 ()	6300
工作扭矩 ()	155
工作压力 (bar)	310
重量 (kg)	11.5
最大流量 ()	202

强制进料装置主要动力元件为螺旋式输送辊，其外形设计如下图所示

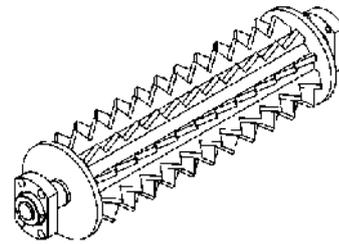


图 8 螺旋式输送辊设计图

由输送辊外径计算公式：

$$D = \frac{h(1 - \tau)}{2(1 - \cos \phi)}$$

式中：h 为输送柠条枝条的厚度，取 60mm；τ 为柠条输送压缩系数，取 0.7；φ 为柠条和输送辊之间的摩擦角，取 18°，带入后计算可得 D=183.86mm，考虑到实际加工生产情况，取输送辊外径为 200mm。

在工作过程中，强制进料装置的线速度应与柠条收获机整机的线速度保持一致，取工作速度为 1.25m/s，由此可得强制进料辊的转速为：

$$n = \frac{60 \times v}{2\pi r}$$

计算可得强制进料辊的转速应为 117.84r/min。

根据液扭矩计算公式：

$$T = \frac{9550P}{n}$$

可得 T=273N · m

同时在设计液压回路时，应考虑会有在进料过程中进料辊堵塞的情况，因此设计出两个液压马达可以独立运转的液压回路，以保证在进料过程中的稳定性。

根据上述条件，最终选择采用强制进料装置的输送马达可选择 Sauer-Danfoss 公司摆线马达 OMP 系列 400 型马达。

其参数如下

表 2 输送马达具体参数

项目	参数
排量 ()	389.2
转速 ()	155
扭矩 ()	360
输出功率 (kW)	5.0
持续压力降 (bar)	70
最大流量 ()	60

在本文中, 柠条收获机的割台液压回路的执行元件将根据工作流程的要求依次启动并完成各项任务。割台的主要工作装置包括圆盘锯、强制进料辊和粉碎刀辊, 这三个装置协同工作, 以确保作业的顺利进行。每个装置均配备相应的液压执行元件, 其中圆盘锯依靠圆盘锯马达驱动进行切割作业, 强制进料辊通过强制进料辊马达提供动力以输送物料, 而粉碎刀辊则由粉碎马达驱动用于粉碎作物残茬。为了确保设备高效稳定运行, 需对各个装置的工作状态进行详细分析, 并明确其具体的工作要求。以下将分别介绍每个装置的运行特点、性能要求以及对液压系统的需求, 以便优化作业效率和设备稳定性

(1) 圆盘锯转动

圆盘锯是割台中重要的工作装置之一, 其主要功能是对柠条进行初步切割。为了避免在输送过程中出现柠条堵塞等问题, 圆盘锯的转动必须具有较高的灵活性, 能够实现正反向的转动。考虑到在实际的工作过程中, 柠条的进料速率会有波动, 割台的作业速度可能会受到影响, 因此圆盘锯的转速需要具备调节功能, 以适应不同的工作条件。根据前文的计算, 圆盘锯的转速应设定为 2000r/min。工作时, 要求圆盘锯具备稳定的旋转性能, 尤其是在输送过程中可能出现的进料量波动下, 转速应能够保持稳定。此外, 尽管负载的变化会影响圆盘锯的切割过程, 但其转速应不受负载变动的直接影响, 而是通过输出扭矩的调节来适应进料量的增加, 从而确保整个进料过程的平稳性和有效性。

(2) 强制进料辊转动

强制进料辊用于将前端圆盘锯锯切下的柠条段进行压缩和强制运输到后面粉碎机进行粉碎, 其安装位置位于割台与粉碎机之间, 强制进料辊设计位于与前端的输送装置相比, 强制进料辊需要具备更强的输送能力, 因此需要能够实现正反向转动, 并且可以根据需要调节转速。强制进料辊的线速度应略高于前部输送装置的线速度, 以确保物料能够顺

利进入后续工序, 但其速度必须低于粉碎刀辊的线速度, 以避免对粉碎装置造成过大负荷。根据前文的计算, 强制进料辊的转速应为 120r/min。此外, 系统需要具备负载敏感功能, 以确保在不同负载条件下, 强制进料辊能够平稳运行, 并且转速能够及时调整, 以应对负载变化带来的影响。

(3) 粉碎刀辊转动

粉碎装置是整个系统中功率消耗最大的部分, 且其刀辊的转速高达 2000r/min。粉碎刀辊的转速相对较高, 但在实际工作过程中, 其转速较为稳定, 不需要频繁的正反转操作, 也不需要复杂的转速调节。粉碎装置的设计重点在于提供稳定的切割能力, 确保对柠条的粉碎效果。然而, 由于其功率消耗较大且系统负荷较重, 液压回路设计时需要考虑负载敏感功能, 以便在不同负载条件下自动调节系统压力和流量, 从而保证粉碎刀辊的平稳工作。

本文中的液压系统在执行上述工作任务时, 需考虑到作业环境的恶劣性、工作强度的大和系统需要实现的转速闭环控制。因此, 液压传动与控制系统需要满足以下技术要求:

(1) 高效、灵敏、节能: 液压系统应能够快速响应工作需求, 在保证效率的同时尽量减少能耗, 提高系统的整体性能。

(2) 负载敏感功能: 系统必须具备负载敏感功能, 能够根据工作负载的变化自动调节油压和流量。这种调节机制能够确保各执行机构在不同工况下都能够正常工作, 避免因负载变化导致系统的不稳定。

(3) 压力稳定性: 液压系统的压力应保持稳定, 以适应不同负载条件下的变化, 特别是在负载冲击较大的情况下, 系统应能承受这些变化并保持稳定的运行。

(4) 转速调节独立性: 各个执行机构的转速应能独立调节, 且转速应不受负载变化的影响。这意味着, 每个执行元件能够根据工作要求自如调节转速, 确保各个装置的工作效率与稳定性。

(5) 闭环控制: 由于工作环境较为复杂, 液压系统还应实现转速闭环控制, 确保即使在负载变化较大时, 系统的输出转速仍能保持在设定范围内, 从而保证整个系统的协调性和作业效率。

3 仿真结果分析

首先对圆盘锯割装置进行仿真, 仿真过程中, 将时间设置为 10s, 步长为 0.1s。随后启动模型进行仿真, 液压泵

的输出压力和转速对比结果曲线，图 a 为圆盘锯割装置液压回路中液压马达输出转速的曲线图，从图中可以看出，经过系统调整过后，圆盘锯割马达输出的转速稳定在 2000r/min 左右，图 b 为圆盘锯割马达进口口的压力以及流量曲线，图中显示系统流量稳定在 220L/min，符合圆盘锯割装置工作时候的需要。

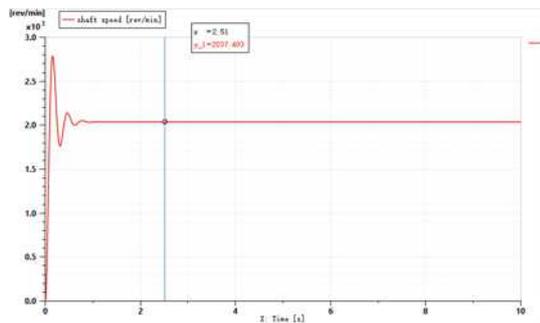


图 a

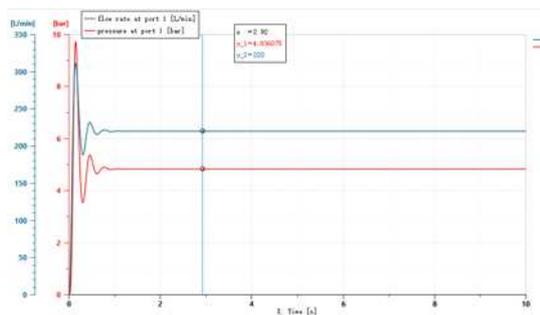


图 b

对输送回路进行仿真设计分析，仿真过程中，将时间设置为 10s，步长为 0.1s。随后启动模型进行仿真，其中图 c 为输送回路中两个液压马达同时工作的情况，由图中可以看出，液压马达的输出转速稳定在 120r/min，符合输送装置正常工作时需要的转速。图 d 为发生堵塞时，可以让其中一个马达保持转动，另一个停止转动，来解决柠条收获机工作时，进料系统可能发生的堵塞的问题。

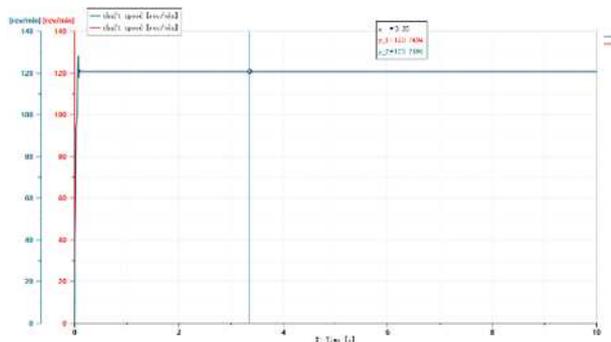


图 c

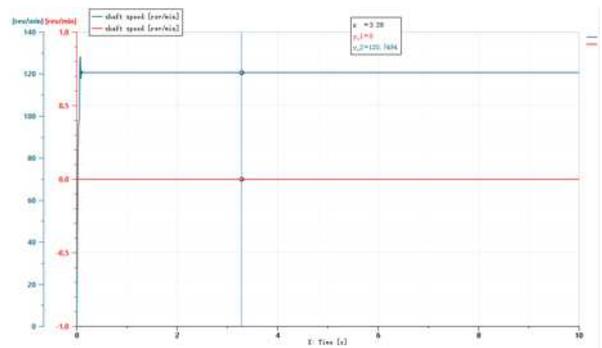


图 d

4 结论

本文以柠条收获机割台为研究对象，首先根据柠条生长状况确定了柠条收获机割台的主要尺寸和工作参数。通过在 SolidWorks 中建立了柠条收获机的虚拟样机，再根据实际收获过程中，确定柠条收获割台的圆盘锯切装置以及强制进料装置需要的各项参数，并且确定了液压元件的型号，建立了 Amesim 的仿真模型，模拟了液压回路中马达的工作状况，仿真说明，柠条收获机割台可以正常工作运行，为柠条收获机割台系统的设计提供了一个方案，具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 包攀峰, 吕江南, 王加跃, 刘佳杰, 马兰. 青贮饲料收获机械的发展现状与对策 [J]. 粮食与饲料工业, 2018(1):42-45.
- [2] 陈月锋, 董世平, 邢东伦, 高威, 李君晓, 李杨, 贾红建. 柠条平茬收获现状及发展建议 [J]. 农业工程, 2020,10(7):30-34.
- [3] 韩葆颖. 山西省柠条机械化平茬及综合利用现状分析 [J]. 农产品加工, 2016(18):36-38.
- [4] 韩葆颖. 柠条智能收获制粒装备技术现状及发展趋势 [J]. 农产品加工, 2020(13):79-81.
- [5] 韩江, 周宏平, 王金鹏. 柠条收获机械的发展现状及建议 [J]. 林业机械与木工设备, 2015,43(07):4-7.
- [6] 梁全, 苏齐莹. 液压系统 AMESim 计算机仿真指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [7] 李宁. 灌木收割切削性能与刀具参数的研究 [D]. 北京林业大学, 2010.

作者简介: 魏翔宇, 硕士研究生, 研究方向为防风固沙设备的研制。

通讯作者: 刘晋浩, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为林业抚育机械与防风固沙机械。