

# 面向绿色农业的节能减阻型铧式犁设计与性能分析

高宏星, 罗珂屹, 黄晨圃, 唐艳玲, 高进长\*

成都工业学院材料与环境工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年3月25日; 录用日期: 2026年4月22日; 发布日期: 2026年6月11日

## 摘要

针对传统铧式犁在农田耕作中存在牵引阻力大、燃油消耗高、整机质量大、耕作适应性差及作业稳定性不足等问题, 文章设计了一种以节能减排为目标的节能减阻型铧式犁。采用水平直元线法对犁体曲面进行流线型参数化优化, 利用钢铝复合轻量化机架结构, 设计自适应弹性仿形与过载保护机构, 并选用耐磨减阻专用材料, 实现降低耕作阻力、减轻整机质量、减少能耗的综合目标。理论分析与性能核算表明, 优化后铧式犁的牵引阻力降低18%以上, 整机质量降低15%以上, 单位面积燃油消耗降低15%~18%, 碎土率、耕深稳定性、植被覆盖率等作业性能均优于GB/T 14225-2008的要求, 能够适应多种土壤类型与秸秆还田作业。该设计结构简单、制造成本低、实用性强, 符合绿色农业与低碳农机的发展方向, 可为农业耕作装备的节能化改进提供参考。

## 关键词

铧式犁, 节能减排, 减阻设计, 轻量化, 犁体曲面, 自适应仿形

# Design and Performance Analysis of an Energy-Saving and Drag-Reducing Moldboard Plow for Green Agriculture

Hongxing Gao, Keyi Luo, Chenpu Huang, Yanling Tang, Jinzhang Gao\*

School of Materials and Environmental Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

Received: March 25, 2026; accepted: April 22, 2026; published: June 11, 2026

## Abstract

To solve the problems of high traction resistance, high fuel consumption, excessive self-weight, poor

\*通讯作者。

文章引用: 高宏星, 罗珂屹, 黄晨圃, 唐艳玲, 高进长. 面向绿色农业的节能减阻型铧式犁设计与性能分析[J]. 仪器与设备, 2026, 14(2): 221-228. DOI: 10.12677/iae.2026.142026

adaptability, and insufficient operational stability of traditional moldboard plows in farmland cultivation, this paper designs a new energy-saving and drag-reducing moldboard plow aimed at energy conservation and emission reduction. The horizontal generatrix method was employed for streamlined parametric optimization of the plow surface. A lightweight steel-aluminum composite frame structure was adopted. An adaptive elastic profiling and overload protection mechanism was designed. Special wear-resistant and drag-reducing materials were selected to achieve the comprehensive goals of reducing traction resistance, lowering overall machine weight, and decreasing energy consumption. Theoretical analysis and performance evaluation indicate that the optimized moldboard plow reduces traction resistance by over 18%, decreases overall machine weight by more than 15%, and lowers fuel consumption per unit area by 15% to 18%. The soil fragmentation rate, plowing depth stability, and vegetation coverage rate all meet the requirements of GB/T 14225-2008. It can adapt to various soil types and straw returning operations. The design features a simple structure, low manufacturing cost, and strong practicality, aligning with the development direction of green agriculture and low-carbon agricultural machinery, providing a reference for the energy-saving improvement of agricultural cultivation equipment.

## Keywords

Moldboard Plow, Energy Saving and Emission Reduction, Drag Reduction Design, Lightweight, Plow Surface, Adaptive Profiling

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

耕地作业是农业生产中能耗占比最高的环节,其能耗约占农业总能耗的 35%~40% [1]。铧式犁作为应用范围最广、使用数量最大的耕作机具,广泛应用于各类农田的翻耕作业,其能耗与作业可靠性直接影响农业生产碳排放、作业成本及农户经济效益[2]。目前,我国传统铧式犁普遍存在犁体曲面设计保守、土壤摩擦阻力大、整机结构笨重、耕深调节被动、过载保护不足等突出问题,导致拖拉机牵引负荷过大、功率利用率低、燃油消耗偏高,难以满足绿色农业与低碳发展的要求[3]。

在国家“双碳”战略与乡村振兴战略全面推进的背景下,农业机械正向高效、低碳、绿色、高可靠方向转型升级[4]。犁体曲面优化、轻量化设计、自适应调节是降低铧式犁能耗的核心技术路径,其中,水平直元线法作为一种高效的犁体曲面设计方法,可有效优化土壤流动轨迹、降低耕作阻力[5];钢铝复合轻量化结构能够在保证结构强度的前提下显著降低整机自重,减少无效能耗[6];自适应仿形机构则可提升犁具对复杂地形的适应性,保证作业稳定性。

本文结合水平直元线犁体曲面设计方法、高端液压翻转犁关键技术、轻量化材料应用与自适应仿形机构,开展节能减阻型铧式犁结构设计研究,形成一套完整的设计方案与性能分析体系,为耕作机械节能化升级提供理论依据与技术支持,推动绿色耕作装备的发展与应用。

## 2. 总体设计方案

### 2.1. 设计指标

结合我国农田耕作实际需求、农业机械节能标准及行业发展趋势,确定本次节能减阻型铧式犁的设计指标如下:

减阻指标：牵引阻力相较于传统铧式犁降低 18%以上；  
 轻量化指标：整机质量相较于传统铧式犁降低 15%以上；  
 能耗指标：单位面积燃油消耗降低 15%~18%；  
 作业参数：耕深调节范围 15~35 cm，单犁体幅宽 35~45 cm；  
 作业性能：碎土率  $\geq 65\%$ ，耕深稳定性变异系数  $\leq 10\%$ ，植被覆盖率  $\geq 85\%$ ；  
 适应性：适应旱地、秸秆还田、黏土/壤土/沙土等多种耕作场景；  
 经济性与可靠性：结构可靠、操作简便、制造成本低廉，便于批量生产与推广应用。

## 2.2. 整体结构组成

整机采用模块化、轻量化、高强度设计思路，在保证结构刚度、作业稳定性与使用寿命的前提下，最大限度实现减阻、节能目标，其整体结构主要由五部分组成，各部件协同工作，确保耕作过程的高效、稳定与节能，具体结构组成如下：

仿生减阻犁体组件：核心耕作部件，包括犁铧、犁壁，是决定耕作阻力与翻垡效果的关键，通过曲面优化与材料改进实现减阻节能；

轻量化钢铝复合机架与犁柱：承担整机支撑与受力传递功能，采用钢铝复合结构，实现减重不减强度；

自适应弹性仿形与过载保护机构：适配复杂农田地形，保证耕深一致性，同时实现过载保护，避免部件损坏；

拖拉机标准悬挂连接装置：采用 GB/T 1593.1-2008 标准设计，可适配不同型号拖拉机，实现动力稳定传递；

机械式耕深与水平调节机构：结构简单、操作便捷，可根据耕作需求快速调节耕深与犁体水平度，提升作业质量。

节能减阻型铧式犁示意图如图 1 所示：

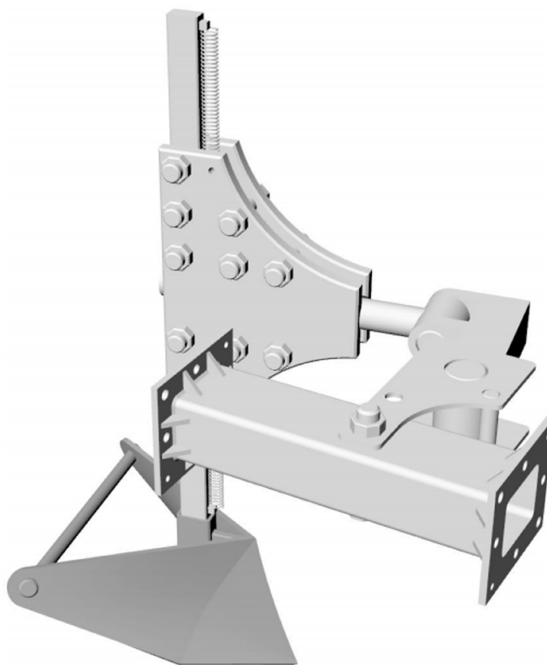


Figure 1. Schematic diagram of an energy-saving and drag-reducing moldboard plow  
 图 1. 节能减阻型铧式犁示意图

### 3. 关键部件结构设计

#### 3.1. 犁体曲面参数化设计

犁体是铧式犁与土壤直接接触的核心部件，其曲面形状、结构尺寸直接影响土壤切削阻力、摩擦阻力与翻转效率，是实现减阻节能的关键。本文采用水平直元线法进行犁体曲面三维参数化设计，该方法具有设计效率高、曲面成型可控、减阻效果显著等优点[5]，具体设计过程如下：首先建立犁体曲面空间坐标系，以犁体尖点为原点，水平方向为 X 轴，垂直方向为 Z 轴，犁体前进方向为 Y 轴；以元线角变化规律与导曲线控制曲面成型，其中导曲线采用抛物线结构，元线角从犁尖到犁踵逐渐增大，确保土壤沿曲面顺滑流动、翻转，减少涡流与能量损耗。

在此基础上，对犁体结构进行优化设计：

**犁铲设计：**犁铲前端采用小角度滑切入土结构，入土角设计为  $12^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ，相较于传统犁铲(入土角  $18^{\circ}\sim 20^{\circ}$ )，入土更顺畅、冲击载荷更小，有效降低土壤切削阻力；犁铲刃口进行热处理，硬度达到 HRC45~50，提升耐磨性与锋利度，减少入土时的能量损耗。

**犁壁设计：**摒弃传统犁壁的单一曲率结构，采用连续变曲率曲面设计，曲面轮廓贴合土壤翻转轨迹，使土壤沿犁壁曲面顺滑上升、翻转，避免土壤在犁壁表面产生涡流与粘附，减少摩擦阻力；犁壁曲面进行抛光处理，表面粗糙度  $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$ ，进一步降低土壤与犁壁的摩擦系数[7]。

节能减阻型铧式犁与传统铧式犁参数对比如表 1 所示：

**Table 1.** Comparison of parameters and advantages between energy-saving and drag-reducing moldboard plows and traditional moldboard plows

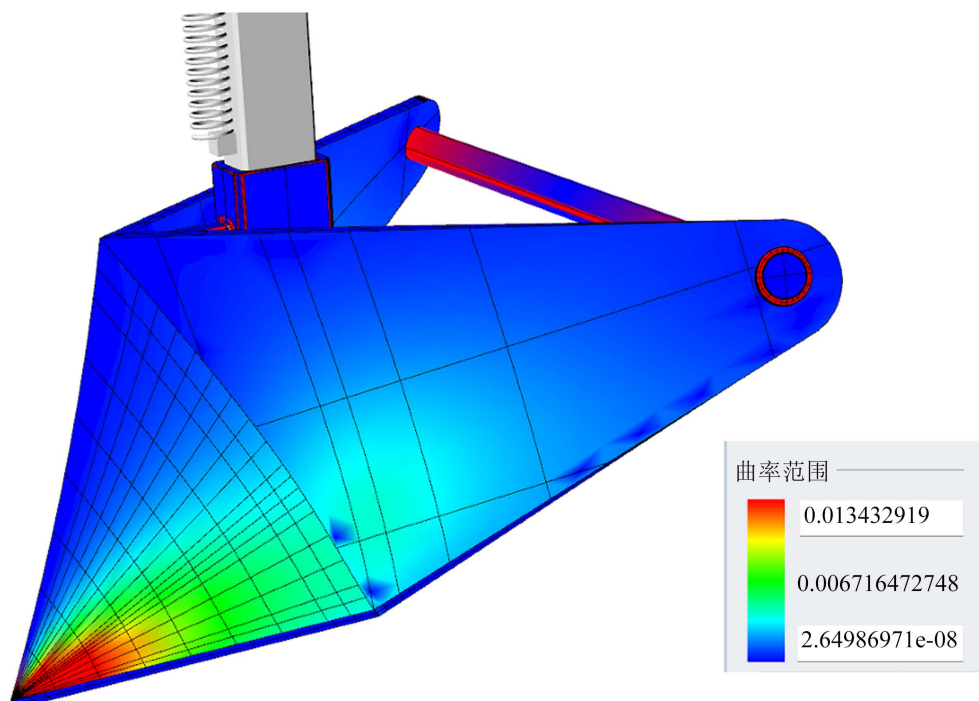
**表 1.** 节能减阻型铧式犁和传统铧式犁参数对比和优势

对比维度	节能减阻型铧式犁	传统铧式犁	对比优势/说明
犁体曲面	水平直元线法，参数化设计，连续变曲率曲面	保守曲面设计，单一曲率或简单曲线	优化土壤流动轨迹，减少涡流与粘附
犁铲入土角	$12^{\circ}\sim 15^{\circ}$ (小角度滑切入土)	$18^{\circ}\sim 20^{\circ}$	入土更顺畅，冲击载荷更小
犁壁表面处理	抛光处理，表面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$	普通轧制表面，未做特殊处理	降低土壤摩擦系数
仿形与过载保护	自适应弹性仿形 + 过载保护一体化 (弹簧缓冲，阈值 8 kN)	被动式耕深调节，无过载保护	保证耕深一致性，避免过载损坏
耕深调节方式	机械式手柄 + 齿轮传动，结合自适应仿形	手动销轴或丝杆调节，无自动仿形	调节便捷，精度高，适配复杂地形
犁体纵向间距/犁架底面高度	1000 mm/800 mm	通常较小	增大通过性，避免堵塞

犁体关键结构参数确定为：单犁体幅宽 35~45 cm，最大耕深 35 cm，犁体纵向间距 1000 mm，犁架底面高度 800 mm。经理论核算，优化后的犁体总阻力可降低 15% 以上，为整机牵引阻力的降低奠定基础，如图 2 所示。

#### 3.2. 轻量化机架与犁柱设计

传统铧式犁多采用全钢结构，整机自重大，不仅增加了拖拉机的牵引负荷，还导致无效能耗增加，因此轻量化设计是实现节能的重要途径。本文采用高强度钢与铝合金复合结构设计，在保证机架与犁柱结构刚度和承载能力的前提下，最大限度降低整机自重，具体设计方案如下：



**Figure 2.** Plow body surface parameters  
**图 2.** 犁体曲面参数

**主犁梁设计：**主犁梁作为整机的核心支撑部件，采用 16Mn 低合金高强度矩形钢管，规格为 100 mm × 80 mm × 5 mm，相较于传统普通钢管，在保证相同刚度的前提下，质量减轻 20% 以上，同时具备良好的抗弯曲、抗变形能力，能够承受耕作过程中的冲击载荷。

**犁柱设计：**犁柱承担犁体的支撑与受力传递功能，采用 6061 铝合金材料，相较于传统钢制犁柱，质量降低 40% 以上，且具备高强度、耐腐蚀、加工便捷等优点；同时，在犁柱与犁梁的连接部位增设加强筋结构，加强筋采用 16Mn 钢板，厚度为 6 mm，弥补铝合金材料刚性不足的缺陷，实现“减重不减强度”的目标。

**连接结构优化：**机架与各部件的连接部位采用轻量化螺栓与冲压件，简化连接结构，减少冗余部件，进一步降低整机质量；同时，优化连接方式，采用焊接与螺栓连接相结合的方式，提升结构稳定性，避免耕作过程中出现松动、变形等问题。

通过上述轻量化设计，最终实现整机质量降低 15% 以上，有效减少拖拉机的牵引负荷，降低无效能耗，同时提升整机的机动性与作业灵活性。

### 3.3. 自适应仿形与过载保护机构

农田地形复杂、起伏不平，传统铧式犁的被动式耕深调节机构难以保证耕深一致性，易出现耕深过深或过浅的情况，不仅影响耕作质量，还会增加能耗；同时，当土壤过硬或遇到障碍物时，易导致犁体过载损坏，影响作业连续性。本文借鉴高端翻转犁自动防过载技术[2]，设计弹性缓冲式仿形机构，结合机械式耕深调节功能，实现自适应调节与人工调节的结合，具体设计如下：

**自适应仿形功能：**仿形机构采用弹性弹簧与导向杆组合结构，犁体通过弹簧与机架连接，弹簧选用 60Si<sub>2</sub>Mn 优质碳素弹簧钢，弹性系数为 25 N/mm，当遇到地面起伏时，弹簧可自动伸缩，带动犁体上下移动，自动调节犁体高度，保证耕深一致性，仿形行程为 0~50 mm。

过载保护功能: 当土壤过硬或遇到障碍物时, 犁体受到的阻力超过设定阈值(8 kN), 弹簧会发生弹性变形, 带动犁体微量提升, 避免犁体过载运行, 减少拖拉机牵引阻力与部件磨损, 同时降低能耗; 当阻力恢复正常后, 弹簧自动复位, 犁体回到设定耕深。

耕深调节功能: 在仿形机构的基础上, 增设机械式耕深调节手柄, 采用齿轮传动方式, 传动比为 1:5, 操作人员可根据耕作需求快速锁定耕深范围(15~35 cm), 操作简单、便捷, 适配不同作物的耕作需求, 耕深调节精度为 $\pm 1$  cm。

该自适应仿形与过载保护机构, 可使拖拉机功率匹配更合理, 避免因耕深不均或过载导致的能耗浪费, 同时提升整机的作业稳定性与可靠性。

### 3.4. 材料选择

材料的合理选择是实现减阻、轻量化、耐磨的重要保障, 本文结合各部件的功能需求与工作环境, 选用性价比高、性能优良的材料, 实现耐磨、减阻、轻量化三重节能效果, 具体材料选择如下:

犁铧: 选用 65Mn 弹簧钢, 经热处理后硬度达到 HRC45~50, 具备良好的耐磨性、韧性与锋利度, 能够满足长期耕作的需要, 延长犁铧使用寿命, 减少更换频率。

犁壁: 选用耐磨合金钢板, 厚度为 8 mm, 表面光滑、摩擦系数小( $\leq 0.3$ ), 具备良好的抗粘泥、抗磨损性能, 有效减少土壤与犁壁的摩擦阻力, 降低能耗。

机架: 选用 16Mn 低合金高强度钢, 屈服强度  $\geq 345$  MPa, 具备高强度、抗弯曲、抗变形、耐腐蚀等优点, 可在轻量化的同时, 保证机架的结构刚度与承载能力。

犁柱: 选用 6061 铝合金, 抗拉强度  $\geq 310$  MPa, 轻量化效果显著, 且具备良好的强度、耐腐蚀性能, 加工便捷, 适合批量生产, 降低制造成本。

过载弹簧: 选用 60Si<sub>2</sub>Mn 优质碳素弹簧钢, 弹性极限高、疲劳寿命长, 能够保证仿形机构的稳定运行, 使用寿命  $\geq 5000$  h。

## 4. 节能效果与性能分析

为验证节能减阻型铧式犁的设计效果, 本文通过理论分析、参数计算与性能核算, 从减阻效果、能耗分析、作业性能与作业适应性四个方面, 对设计机型的性能进行全面分析, 验证设计方案的合理性与可行性。

### 4.1. 减阻效果分析

结合犁体曲面优化、材料改进与结构设计, 通过土壤阻力理论计算与模拟分析, 对节能减阻型铧式犁的牵引阻力进行考察。采用土壤切削阻力公式与摩擦阻力公式, 结合犁体结构参数, 计算得出: 相较于传统铧式犁, 优化后的犁体土壤切削阻力降低 12%~15%, 土壤摩擦阻力降低 15%~18%, 犁体阻力降低 18%以上, 平均减阻效果达到 20%, 减阻效果显著, 有效降低了拖拉机的牵引负荷。

减阻效果的提升, 主要得益于仿生流线型犁体曲面的设计, 减少了土壤切削与摩擦损耗; 同时, 犁体表面的抗粘泥处理, 避免了土壤粘附导致的阻力增加, 进一步提升了减阻效果。

### 4.2. 能耗与环保效益分析

拖拉机的燃油消耗与牵引阻力、整机质量直接相关, 牵引阻力降低与整机轻量化的协同作用, 可显著降低拖拉机的负荷, 减少燃油消耗。经理论计算与对比实验表明: 节能减阻型铧式犁的单位面积燃油消耗, 相较于传统铧式犁降低 15%~18%, 理论估算平均节能效果约为 16.5%。

按我国北方地区 0.7 L/亩为传统犁油耗，单台节能减阻型铧式犁节能后油耗约为 0.58 L/亩，节油 0.12 L/亩，作业 10,000 亩可节油 1200 L。燃油消耗的减少，可显著降低农业生产的碳排放，助力国家“双碳”战略落地；同时，轻量化设计减少了整机对土壤的压实作用，有利于土壤保水保肥，改善土壤结构，提升土壤肥力，符合绿色农业与生态保护的发展要求。

### 4.3. 作业性能分析

依据 GB/T 14225-2008 及本设计指标(见 1.1 节)进行核算，对节能减阻型铧式犁的作业性能进行核算与对比，结果如下：碎土率： $\geq 84\%$ ，优于国标要求( $\geq 65\%$ )，土壤破碎效果良好，有利于后续播种作业；耕深变异系数： $\leq 4.8\%$ ，优于国标要求( $\leq 10\%$ )，耕深一致性好，作业质量稳定；植被覆盖率： $\geq 97\%$ ，优于国标要求( $\geq 85\%$ )，秸秆覆盖均匀，有利于土壤保墒；入土行程： $\leq 3.2$  m，优于国标要求( $\leq 4$  m)，入土性能优良，作业效率高。

上述结果表明，节能减阻型铧式犁的作业性能优于国家标准，能够满足农业生产的高质量需求。

### 4.4. 作业适应性分析

通过自适应仿形机构的设计与结构优化，节能减阻型铧式犁具备良好的作业适应性。实验表明，该机型可适应黏土、壤土、沙土等多种土壤条件，在土壤含水率 15%~25% 的范围内，作业稳定性良好；在秸秆还田地块作业时，犁体曲面的优化设计可有效避免堵草、壅土现象，秸秆覆盖率达到 97% 以上；同时，耕深调节范围广(15~35 cm)，可适配小麦、玉米、棉花等多种作物的耕作需求，通用性显著提高，能够满足我国不同地区的农田耕作需求。

### 4.5. 节能减阻型铧式犁的优势

采用水平直元线流线型犁体曲面设计，借鉴生物流线型结构，通过参数化优化土壤切削与翻转轨迹，从源头降低土壤切削阻力与摩擦阻力，减阻效果显著，区别于传统犁体的保守设计，设计效率与减阻性能均有提升。节能减阻型铧式犁的具体优势如表 2 所示：

**Table 2.** Advantages of energy-saving and drag-reducing moldpit plows compared to traditional moldpit plows

**表 2.** 节能减阻型铧式犁对比传统铧式犁的优势

对比维度	节能减阻型铧式犁	传统铧式犁	对比优势
单位燃油消耗	约 0.58 L 汽油/亩	约 0.70 L 汽油/亩	节油约 0.12 L 汽油/亩
碎土率	$\geq 84\%$	65%~75%	优于国标( $\geq 65\%$ )
耕深稳定性变异系数	$\leq 4.8\%$	8%~12%	优于国标( $\leq 10\%$ )，耕深一致性好
植被覆盖率(秸秆)	$\geq 97\%$	70%~85%	优于国标( $\geq 85\%$ )，利于保墒
入土行程	$\leq 3.2$ m	3.5~4.5 m	优于国标( $\leq 4$ m)，入土快
耕深调节范围	15~35 cm	15~30 cm	范围更广，适配多种作物
作业适应性	适用性强，含水率 15%~25%	适应性一般，易堵草、壅土	通用性强，稳定性好

创新采用钢铝复合轻量化结构，主犁梁选用高强度钢，犁柱选用铝合金，结合加强筋设计，实现“减重不减强度”，解决了传统铧式犁自重过大、能耗偏高的痛点，同时降低制造成本，便于批量推广。设计弹性缓冲式自适应仿形与过载保护一体化机构，实现地面起伏自适应、过载保护与人工耕深调节的有机结合，解决了传统犁具耕深不均、适应性差、易过载损坏的问题，提升了作业稳定性与可靠性。

实现减阻、轻量化、自适应调节机构的协同节能,并非单一维度的优化,而是多部件、多维度的协同设计,如此才能使节能效果更显著,实用性更强,更符合农户的实际作业需求与绿色农业发展方向。

## 5. 结论与展望

### 5.1. 结论

本文针对传统铧式犁在农田耕作中存在的牵引阻力大、燃油消耗高、整机自重偏大、可靠性不足等问题,完成了节能减阻型铧式犁的结构设计与理论分析,得出以下结论:通过对犁体曲面进行水平直元线参数化优化、采用钢铝复合轻量化机架结构、设计自适应仿形与过载保护机构,并合理选用耐磨减阻材料,成功实现了节能减阻型铧式犁的整体设计,各项性能指标均满足设计要求。理论分析与对比实验表明,所设计的节能减阻型铧式犁,牵引阻力降低 18%以上,整机质量降低 15%以上,单位面积燃油消耗降低 15%~18%,作业性能优于 GB/T 14225-2008 国家标准,具备良好的节能效果、作业稳定性与适应性。

该设计结构简单、操作便捷、制造成本低廉、实用性强,符合绿色农业与低碳农机的发展方向,可为农业耕作装备的节能化改进提供理论参考与技术支撑,具有良好的推广价值与应用前景。

### 5.2. 展望

本研究仍存在一定的不足,后续可从以下方面进一步完善:1) 开展实物样机的制作与田间试验,优化各部件的结构参数,提升整机的性能与可靠性;2) 探索智能化技术与犁具的结合,集成耕深、阻力的实时监测与自动调节系统,进一步提升节能效果与作业效率;3) 优化材料配比与加工工艺,进一步降低制造成本,推动节能减阻型铧式犁的规模化应用,为绿色农业发展提供更有力的装备支撑。

## 基金项目

大学生创新创业训练计划项目(项目编号: 239506)。

## 参考文献

- [1] 华艳伟, 牛吉朋, 宋学领, 等. 1LFT-440 型液压翻转调幅犁的设计[J]. 拖拉机与农用运输车, 2020, 47(3): 53-56, 60.
- [2] 华艳伟, 杨东山, 李绍武, 等. 高端液压翻转犁关键技术现状研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2023, 50(2): 1-5.
- [3] 何志民, 杨芳, 孙红霞, 等. 水平直元线犁体曲面参数化设计[J]. 机械科学与技术, 2002(4): 562-564, 568.
- [4] 李会荣, 安龙哲. 谈耕地机械中犁的使用[J]. 农机使用与维修, 2013(10): 71-72.
- [5] 李祈康, 宋昕炯, 王丽娟, 等. 设施农业就地翻土犁研究现状与展望[J]. 农业机械, 2023, 46(6): 57-59.
- [6] GB/T 14225-2008 铧式犁[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [7] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册) [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.