

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.02.009

草地振动式间隔松土机设计与试验*

武广伟 宋建农 李永磊 王继承

(中国农业大学工学院,北京 100083)

【摘要】 针对我国草原长期超载放牧,造成土壤板结严重,导致草原退化的问题,设计了9ST-460型草地振动式间隔松土机。该机采用间隔配置的梯形框架式松土部件,利用曲轴连杆机构产生的向上激振力,对通过松土部件的土壤进行强制振动疏松,实现了在不破坏草原植被的条件下,对高坚实度草原土壤的松土作业。田间试验表明:机具在前进速度1 m/s、振动频率10.0 Hz情况下,作业稳定,松土效果明显。经检测,松土平均深度20.01 cm,松土比43.4%,植被破坏率1.6%,生产率0.85 hm²/h,达到了技术要求。作业后土壤容重密度和坚实度平均降低了30.0%和48.8%,可以获得适合牧草生长的虚实并存的耕作层,提高了土壤的蓄水保墒能力,天然草地和人工草地牧草产量分别增产73.99%和68.65%。

关键词: 松土机 振动 草原改良 虚实耕作 设计 试验

中图分类号: S222.12*9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)02-0042-05

Design and Experiment on Vibration Spacing Scarifier for Meadow

Wu Guangwei Song Jiannong Li Yonglei Wang Jicheng

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

Aimed to the serious problem of soil compaction and grassland degradation on account of long-term grazing overload, a 9ST-460 vibration spacing scarifier for meadow was designed. The loosening soil parts of interval ladder framework were adopted. By the exciting force produced by the vibration system which is composed of connecting rod and crankshaft to loose soil, the high-solid soil was achieved to loose on the condition without damage to grassland vegetation. Experimental results showed that the scarifier has the ideal loosen effect in the forward speed of 1 m/s and vibration frequency 10.0 Hz. The test showed that the rate of vegetation destruction is 1.6%, tillage depth is 20.01 cm, scarification ratio reaches 43.4%, and productivity reaches 0.85 hm²/h. The average soil bulk density and the average firmness reduce by 30.0% and 48.8%, respectively after loosening soil. The yield of natural grassland and artificial grassland increases by 73.99% and 68.65%, respectively. The tilled soil forms the spacing cultivated horizon adapting to the growth of grass. The effect is obvious to improve the grassland ecological environment and improve grass production.

Key words Scarifier, Vibration, Meadow improvement, Spacing tillage, Design, Experiment

引言

从20世纪70年代初开始,我国开始采用机械松土方法改良草场,并收到了一定的效果。在借鉴

旱地农田松土部件基础上,相继研制成了多种应用于草原的松土部件,主要有燕尾式、凿式、圆盘式和无壁犁式^[1]。这些松土部件对草场恢复有一定的作用,但是在高坚实度和耕作层草根密度较大的情

收稿日期:2009-02-21 修回日期:2009-06-20

*“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD28B0802)

作者简介:武广伟,博士生,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail:cauwgw@126.com

通讯作者:宋建农,教授,博士生导师,主要从事农业装备工程研究,E-mail:songjin@cau.edu.cn

况下,其作业效果不理想,对土壤有较大的扰动和较高的植被破坏率,甚至可能加剧草原的退化^[2]。

针对我国退化草原土壤板结严重,坚实度高的特点,结合草原改良农艺要求,设计了9ST-460型草地振动式间隔松土机,本文采用原地放垡间隔松土原理,提出曲轴连杆机构组成的振动系统驱动梯形框架式松土部件的振动松土机构,实现高坚实度条件下草原土壤的虚实耕作^[3]。

1 松土原理与整机结构

1.1 原地放垡间隔松土原理

草原土壤和农田土壤的性质有显著差异。多年生根茎型禾本科牧草,如羊草的根茎多分布于50~200 mm的土层中,形成了100~200 mm的坚实度较高的草皮层,因此草原土壤具有牧草根茎交错、上实下松的特点^[1]。草原机械松土改良农艺要求能够切断根茎型牧草的横走根系,实现间隔疏松,避免土壤翻垡,提高土壤透气性和草场蓄水能力,保持地表植被不被破坏,从而恢复草场生态,增加牧草产量^[2]。

结合草原机械松土改良农艺要求,提出了原地放垡间隔松土技术,其松土原理如图1所示。工作时利用切根装置切断牧草横走根系,同时切出规则的土壤垡条,后续的松土部件将土垡条铲起,依次通过松土部件,在松土部件的挤压和振动作用下,垡条形成剪切和弯曲拉伸破坏^[4]而被强制疏松,并原地铺放在垡沟内,在疏松过程中土垡没有被翻转和扭曲,土层的相互位置没有变化,因此草原的地表植被仍然铺放在地表。为防止土垡过于疏松和跑墒,在土垡铺放后由地表碎土和镇压装置进行镇压。松土部件采用间隔配置,实现间隔松土,符合虚实并存的耕作理论^[3]。

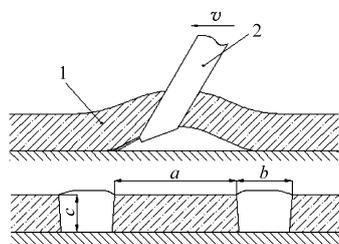


图1 松土原理示意图

Fig.1 Sketch of placing furrow slice in-situ and spacing scarification

1. 土垡条 2. 松土部件

草原土壤的草皮层一般为100~200 mm,所以松土深度 c 应控制在150~200 mm范围内^[1-2]。根据虚实并存的耕作理论,当松土宽度 b 与未松土部分宽度 a 的比值为0.69~1.45时,已松和未松土壤

的孔隙度差值将达到10%以上,创造出一种独特的土壤环境,促使牧草根茎和微生物发生一系列生理生态变化。虚实并存的耕作层能够提高草原土壤蓄水保墒能力和透气性,为牧草生长提供有利条件^[4]。

1.2 整机结构与技术参数

在原地放垡间隔松土原理的基础上,通过对关键工作部件的设计和田间试验,确定9ST-460型草地振动式间隔松土机的总体结构,其结构简图如图2所示。

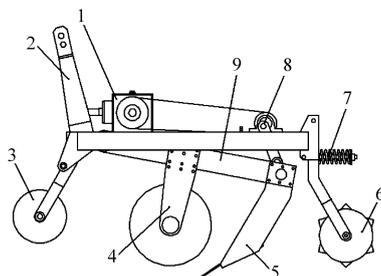


图2 9ST-460型草地振动式间隔松土机结构简图

Fig.2 Structure of 9ST-460 vibration spacing scarifier for meadow

1. 变速箱 2. 悬挂架 3. 限深轮 4. 圆盘式前导土垡切根装置 5. 松土部件 6. 镇压轮 7. 镇压轮调节机构 8. 曲柄连杆激励机构 9. 摆动安装架

松土机通过三点悬挂装置与拖拉机挂接,机具由圆盘式前导土垡切根装置、松土铲、摆动安装架、铲架、连杆、偏心曲轴等组成独立的工作部件,横向配置4组工作部件,每组间隔600 mm,单组松土部件工作幅宽280 mm。

该机主要技术参数为:外形尺寸(长×宽×高)1 800 mm×2 300 mm×1 400 mm;机具质量1 800 kg;工作幅宽2 400 mm;作业行数4行;松土深度150~200 mm;振动频率6~10 Hz;振幅20 mm;生产效率0.5~0.9 hm²/h;松土宽度和未松土部分宽度的比为0.875;配套动力50 kW以上轮式拖拉机。

2 关键部件的设计和分析

2.1 松土部件

松土部件是影响机具作业质量的一个关键部件^[5-6],其工作包括入土、挖掘切削土壤和振动疏松土垡条三个过程。松土部件主要由铲架和松土铲组成,如图3所示。采用梯形框架式结构,铲架两边侧板分别折弯5°,使铲架前端较后端略窄,上端较

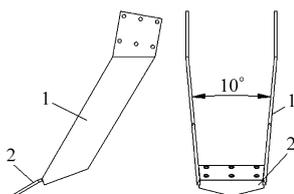


图3 松土部件

Fig.3 Loosing soil parts

1. 铲架 2. 松土铲

下端略宽。田间试验发现,土垡条在通过松土铲时,

由于振动产生向上窜袋,土袋条容易堵塞松土铲架,采用梯形框架式结构有效地解决了这一问题。

松土铲采用前端折弯的平板式铲型,前段为折弯 10° 带斜刃的三角形铲,具有挖掘功能,能够打破板结层,并且将土袋条铲起;后段为平板铲^[7]让土袋条有足够的时间通过松土铲面,利用振动作用对松土铲面上的土袋进行疏松,如图4所示。松土铲主要参数有:铲刃斜角 γ 、铲倾角 α 和 β 、铲的长度 L_1 和 L_2 、铲的宽度 B_1 和 B_2 。

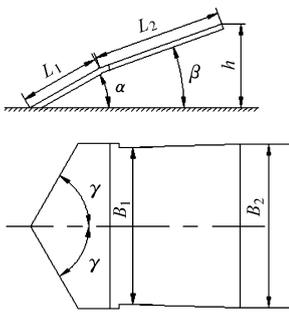


图4 松土铲

Fig.4 Break shovel

(1) 铲刃斜角 γ

为了保证铲刃的自动清理,铲刃斜角 γ 应满足 $\gamma < 90^\circ - \varphi$ (φ 为土壤内摩擦角)^[6-7],通过对草原土壤进行剪切试验,得出0~25 cm草原土壤的内摩擦角为 $19^\circ \sim 25^\circ$,因此松土铲在设计时,应取 $\gamma < 65^\circ$,本设计中 γ 取 60° 能够满足机具的作业要求。

(2) 铲倾角 α 和 β

铲倾角 β 为铲面与水平面之间的夹角, α 为松土铲实际入土角。铲倾角 β 应小于 24° ,一般 β 越小,铲的阻力越小^[6-7]。为了保证松土铲既容易将土袋铲起,提高其在高坚实度条件下的入土性能,又使铲后端离地高度 h 有足够的值,以达到理想的破碎效果,取前段倾角 $\alpha = 30^\circ$,后段倾角 $\beta = 20^\circ$ 。通过多次田间试验,发现折弯的松土铲有较好的入土性能, 10° 的折弯角能够满足作业要求。

(3) 铲的宽度 B_1 和 B_2

根据虚实并存的耕作理论^[3],推导出松土铲的宽度和机具作业幅宽应满足

$$0.69 < \frac{nB_1}{L - nB_1} < 1.45 \quad (1)$$

式中 L ——机具幅宽,mm n ——作业行数

设计幅宽 $L = 2400$ mm,作业行数为4行,代入式(1)得松土铲宽度应满足 $245 \text{ mm} < B_1 < 355 \text{ mm}$,为保证松土比例取 B_1 为260 mm, B_2 为280 mm。

2.2 圆盘式前导土袋切根装置

圆盘式前导土袋切根装置如图5所示,主要由切割圆盘、切割刀轴、切割支架等组成,配置在摆动安装架前端。作业时,在曲轴连杆驱动下随摆动安装架上下摆动砍切土壤,能切断牧草横走根茎。在牵引力的作用下,切割圆盘划切土壤,切出与松土铲架相配合的土袋条,两圆盘设计间距为260 mm。切割圆盘外缘采用全缘式无缺口圆盘,圆盘直径

由耕深来确定,切割圆盘的有效切入深度过小时,在耕作层可能存在过多未断草根,阻碍松土部件的松土作业,引起表层大的扰动。为保证耕深,圆盘直径选为500 mm较为合适。

2.3 振动机构及其运动分析

机具的振动系统采用强迫振动形式,由偏心曲轴和连杆组成激振机构,如图6所示。松土铲在激振机构的驱动下绕连接销轴摆动,使松土铲产生一定频率的振动。

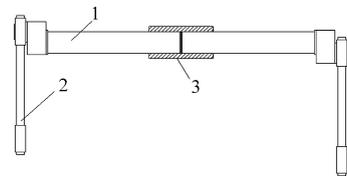


图6 曲柄连杆激振机构

Fig.6 Crank-connecting rod vibration mechanism

1. 偏心曲轴 2. 连杆 3. 联轴器

以摆动安装架连接销轴为原点建立固定坐标系,原点为 O , x 轴正向和松土机前进方向相反, y 轴正向垂直向上,偏心曲轴中心为 A 点,初始坐标值为 (x_{A0}, y_{A0}) 如图7所示。设前进速度为 v ,曲柄角速度为 ω_1 ,曲柄长度 l_1 ,连杆长度 l_2 , θ_{10} 和 θ_{20} 分别表示 θ_1 和 θ_2 角的初始值。采用解析法分析 A 、 B 和 O 点的位置方程,得到松土铲尖 E 点的运动轨迹方程。

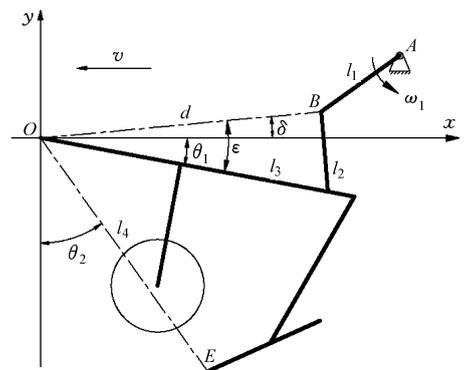


图7 松土部件运动分析图

Fig.7 Movement of loosening soil parts

A 点的位置方程为

$$\begin{cases} x_A = x_{A0} + vt \\ y_A = y_{A0} \end{cases} \quad (2)$$

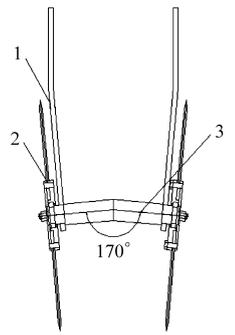


图5 圆盘式前导土袋切根装置

Fig.5 Disc-leading furrow slice root cutting device

1. 切割支架 2. 切割圆盘 3. 切割刀轴

原点 O 的位置方程为

$$\begin{cases} x_o = vt \\ y_o = 0 \end{cases} \quad (3)$$

B 点位置方程为

$$\begin{cases} x_B = x_A + l_1 \cos \omega_1 t \\ y_B = y_A + l_1 \sin \omega_1 t \end{cases} \quad (4)$$

松土铲尖 E 点的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_E = x_o + l_4 \sin \theta_2 \\ y_E = y_o - l_4 \cos \theta_2 \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\theta_2 = \theta_{20} - (\varepsilon - \delta - \theta_{10})$

$$\delta = \arctan \left(\frac{y_B - y_o}{x_B - x_o} \right)$$

$$\varepsilon = \arccos \left(\frac{l_3^2 + d^2 - l_2^2}{2dl_3} \right)$$

式中 δ —— BO 连线与水平方向夹角

ε —— BO 连线与工作架夹角

设机具前进速度 $v = 1 \text{ m/s}$, 振动频率 $f = 10 \text{ Hz}$, 将位置参数代入式(2)~(5), 通过 Matlab 编程, 得到松土铲尖的绝对运动轨迹为一锯齿形, 如图 8a 所示。由轨迹运动可知, 松土铲的工作过程包括切削土壤和抛起土堡两个阶段。铲的前进速度 v , 沿某一时刻振动方向的速度为 v_2 , 则铲的绝对速度 $v_1 = v + v_2$, 方向为轨迹线的切线方向^[7-8], 如图 8b 所示。当铲向下运动时, 松土铲入土方向为前斜下方, 此时松土铲切削土壤。当铲向上振动时绝对速度沿 v_1' 方向, 土堡沿铲面向上被抛起, 对土堡有较大的抬升作用, 增加了弯曲和剪切作用对土壤的破碎效果^[4,9-10]。在振动作用下, 松土铲抬升和下降运动交替进行, 土堡在振动过程中与铲面相互撞击, 加剧了土堡的破碎。

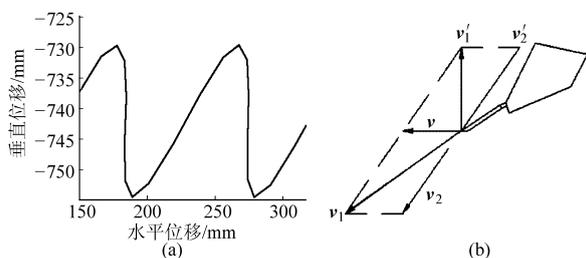


图 8 松土铲运动轨迹分析图

Fig. 8 Schematic diagram of trajectory analysis

(a) 松土铲运动轨迹图 (b) 松土铲运动分析图

从运动轨迹方程可知, 振幅一定时, 机具前进速度和振动频率影响着运动轨迹, 进而影响到土堡在松土铲上的运动。为保证松土效果, 应使土堡在松土铲有效长度 L_2 内多次受到振动冲击, 由松土铲运动轨迹得出, 当拖拉机前进速度为 v , 松土铲在一个振动周期内, 松土铲水平移动的距离应满足

$$s = \frac{v}{f} < L_2 \cos \beta \quad (6)$$

松土铲的设计长度为 $L_1 = 110 \text{ mm}$, $L_2 = 180 \text{ mm}$ ^[7,9], 松土铲与水平方向夹角 $\beta = 20^\circ$, 由式(6)得到松土铲的振动频率 f 设计值应大于 4 Hz , 通过传动链轮的更换该机具能获得 6.8 、 8.6 、 10.0 Hz 3 种振动频率, 通过田间试验来获得比较理想的作业频率。

3 田间试验与结果分析

2008 年 4 月, 在河北省沽源国家草地生态系统野外科学研究所进行了田间试验。

试验地状况: 土壤以栗钙土为主, 耕作层土壤质地为沙壤土, 坚实度为 27.20 kg/cm^2 , 土壤平均含水率 16.8% , 植被以羊草等多年生根茎型禾本科牧草为主, 机具配套动力为 TN-804 型拖拉机。

3.1 不同振动频率下松土效果对比

试验中拖拉机的前进速度为 1 m/s , 机具以 6.8 、 8.6 、 10.0 Hz 3 种振动频率进行松土作业, 通过作业前、后土壤容重密度和坚实度的变化来判断松土效果, 试验结果如表 1 所示。

表 1 松土作业效果对比

Tab. 1 Comparison of loosening operation

振动频率/Hz	土壤坚实度		变化率/%	土壤容重密度		变化率/%
	/ $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$			/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$		
	松土前	松土后	松土前	松土后		
0	26.95	21.83	18.9	1.63	1.46	10.3
6.8	25.64	18.64	27.3	1.56	1.21	22.4
8.6	23.47	14.00	40.3	1.46	1.06	27.4
10.0	24.56	12.54	48.9	1.59	1.10	30.8

试验表明, 9ST-460 型草地间隔式振动松土机能够实现原地放堡间隔松土的作业要求。通过对比试验表明, 松土机在不振动情况下松土作业效果不理想, 土堡条在松土铲上通过性差, 土堡条容易堵塞松土铲架且容易翻堡。振动频率为 10.0 Hz 时松土作业效果明显好于 6.8 Hz 和 8.6 Hz 的作业效果。松土铲在 10.0 Hz 振动频率下作业, 松土前、后坚实度和容重密度分别下降了 48.9% 和 30.8% 。在机具前进速度相同的情况下, 松土铲振动频率为 8.6 Hz 和 10.0 Hz 时, 土堡在松土铲上通过性较 6.8 Hz 效果好; 机具在前进速度 $v = 1 \text{ m/s}$, 振动频率 $f = 10.0 \text{ Hz}$ 情况下, 作业稳定, 松土效果明显。

3.2 机具性能检测

根据农业部农机试验鉴定总站制定的检测指标对机具进行了性能检测, 拖拉机前进速度 $v = 1 \text{ m/s}$, 振动频率 $f = 10.0 \text{ Hz}$, 检测结果如表 2 所示。

表2 田间作业性能检测结果

Tab.2 Measurement results of the working performance

检验项目	技术要求	测定值
纯小时生产率/ $\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$	0.6 ~ 1.0	0.85
松土深度/cm	15 ~ 20	20.01
松土深度标准差/cm		1.10
松土深度变异系数/%		5.52
松土比/%	≥ 40	43.4
断条率/%	≤ 10	2.78
植被破坏率/%	≤ 10	1.6
容积密度变化率/%	≥ 20	30.0
坚实度变化率/%	≥ 30	48.8

由测试结果可知,松土机作业质量良好,达到了各项农艺技术指标的要求,草场土壤经过松土机作业后土壤容积密度平均降低了30.0%,坚实度平均降低了48.8%,土壤疏松效果明显。松土作业后,天然草地和人工草地牧草产量分别增产73.99%和68.65%,改良效果显著。

表3 试验地草原土壤松土前后物理性质对比

Tab.3 Comparison of the soil physical properties

土层深度 /cm	土壤坚实度/ $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$			土壤容积密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$			含水率/%		
	松土前	松土后	6个月	松土前	松土后	6个月	松土前	3个月	6个月
0 ~ 5	25.64	10.61	18.33	1.56	1.10	1.21	10.09	12.13	12.22
5 ~ 10	26.95	5.52	10.83	1.63	1.08	1.13	10.93	15.89	13.75
10 ~ 15	21.83	14.00	15.36	1.52	1.15	1.19	12.81	18.13	17.56
15 ~ 20	23.47	20.03	21.54	1.46	1.06	1.26	11.21	16.32	16.70

4 结论

(1) 9ST-460型草地振动式间隔松土机采用振动松土原理对高坚实度草原土壤进行松土改良,能够满足草原改良的农艺要求。

(2) 通过对振动机构的运动分析,得到了松土铲

3.3 松土时效检测

9ST-460型草地间隔式振动松土机作业后能够满足原地放袋间隔松土技术要求。松土作业前后以及松土作业6个月时,分别对土壤坚实度、土壤容积密度、土壤含水率进行测定,各参数的变化如表3所示。

由表可以看出,松土后土壤的坚实度和容积密度明显降低。由于松土后,降水较多,土壤容易回实,因此松土6个月时的土壤坚实度和容积密度都有所增加,但坚实度还是比松土前降低了32.5%,土壤容积密度降低了22.4%。松土后土壤含水率有明显提高,3个月时土壤平均含水率为15.62%,比松土前增加了38.72%;由于雨水减少和水分蒸发的原因,6个月时土壤含水率略有降低,含水率为15.06%,表明原地放袋间隔松土技术有利于土壤透气,提高了草原土壤蓄水能力,保墒蓄水效果明显。原地放袋间隔松土技术可以作为一种草原改良新的松土方法。

的理论运动轨迹,分析了机具振动松土的工作原理。

(3) 田间试验表明,机具在前进速度 $v = 1 \text{ m/s}$,振动频率 $f = 10.0 \text{ Hz}$ 情况下,作业稳定,松土效果明显;经检测,松土平均深度20.01 cm,松土比43.4%,植被破坏率1.6%,生产率 $0.85 \text{ hm}^2/\text{h}$,达到了技术要求。

参 考 文 献

- 徐萌生. 草原改良刍议[J]. 农业机械学报, 1990, 21(1): 100 ~ 102.
- 保平. 我国羊草草场机械化改良发展现状及趋势[J]. 内蒙古农业大学学报, 2002, 23(4): 116 ~ 118.
Bao Ping. Situation and developing tendency leymus chircerese grassland mechanized improvement in China[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2002, 23(4): 116 ~ 118. (in Chinese)
- 迟仁立, 左淑珍. 虚实并存耕作分区技术规范[J]. 农村机械化, 1998(4): 37.
- 殷涌光, 程悦菽, 李俊明. 振动式二维切削土壤减小阻力机理[J]. 农业机械学报, 1992, 23(2): 11 ~ 16.
Yin Yongguang, Cheng Yuesun, Li Junming. The reasons of resistance reduction for vibratory cutting soil in two directions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1992, 23(2): 11 ~ 16. (in Chinese)
- 谷渴白, 刘向阳. 1SQ-250型全方位深松机的研制与试验[J]. 北京农业工程大学学报, 1994, 14(4): 42 ~ 48.
Gu Yebai, Liu Xiangyang. Development and experiment on 1SQ-250 model of bulk subsoiler[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1994, 14(4): 42 ~ 48. (in Chinese)

- Jia Honglei, Chen Zhongliang. The research and design on new type universal machine of rotary tillage and cutting up stubble [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(Sup.): 26 ~ 30. (in Chinese)
- 3 Jia Honglei, Ma Chenglin, Tong Jin. Study on universal blade rotor for rototilling and stubble-breaking machine [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(1): 201 ~ 208.
- 4 贾洪雷, 陈忠亮, 郭红, 等. 旋耕碎茬工作机理研究和通用刀辊的设计 [J]. 农业机械学报, 2000, 31(4): 29 ~ 32.
Jia Honglei, Chen Zhongliang, Guo Hong, et al. Study on working principle of rotary tillage and stubble cutting and design of universal knife roller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(4): 29 ~ 32. (in Chinese)
- 5 贾洪雷, 陈忠亮, 马成林, 等. 北方旱作农业区耕作体系关键技术的研究 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(11): 59 ~ 63.
Jia Honglei, Chen Zhongliang, Ma Chenglin, et al. Key technologies for the tillage system in area of dry farming of northern China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 59 ~ 63. (in Chinese)
- 6 贾洪雷, 汲文峰, 韩伟峰, 等. 旋耕-碎茬通用刀片结构参数的优化试验 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 45 ~ 50.
Jia Honglei, Ji Wenfeng, Han Weifeng, et al. Optimization experiment of structure parameters of rototilling and stubble breaking universal blade [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 45 ~ 50. (in Chinese)
- 7 韩伟峰. 仿生智能整地机通用刀辊设计与试验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Han Weifeng. Design and experimental research of universal blade rotor for bionic intelligent soil preparation machine [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- 8 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: 机械工业出版社, 1988.
- 9 江苏工学院. 农业机械学:上册 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1988.
- 10 北京农业工程大学. 农业机械学:上册 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- 11 陈翠英. 旋耕机速度参数的合理选择 [J]. 农业机械学报, 1985, 16(2): 30 ~ 37.
Chen Cuiying. Reasonable choice of speed parameters of tractor and rotary tiller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1985, 16(2): 30 ~ 37. (in Chinese)
- 12 薛伟, 周宏明, 李峰平. 旋耕机运动参数的优化设计方法 [J]. 中国制造业信息化, 2004, 33(4): 93 ~ 98.
Xue Wei, Zhou Hongming, Li Fengping. The optimization of the movement parameters in the furrowing machine [J]. Manufacture Information Engineering of China, 2004, 33(4): 93 ~ 98. (in Chinese)
- 13 高焕文, 李问盈. 保护性耕作技术与机具 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- 14 任露泉. 试验优化设计与分析 [M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001.
- 15 萧兵, 钟俊维. 农业多因素试验设计与统计分析 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1985.

(上接第 46 页)

- 6 刘俊峰, 杨欣, 马跃进. 4U-1A 型马铃薯收获机的设计 [J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 181 ~ 186.
Liu Junfeng, Yang Xin, Ma Yuejin. Design of 4U-1A potato harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 181 ~ 186. (in Chinese)
- 7 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- 8 文学洙, 廉哲满. 振动式挖掘机的设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 77 ~ 82.
Wen Xuezu, Lian Zheman. Design and experimental study on vibrating digger [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 77 ~ 82. (in Chinese)
- 9 李永磊. 草原振动松土机的研制 [D]. 北京: 中国农业大学, 2008.
Li Yonglei. The development of meadow vibration scarifier [D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 10 殷涌光, 李俊明, 王国强. 二维振动铲的试验研究 [J]. 农业机械学报, 1994, 25(2): 18 ~ 23.
Yin Yongguang, Li Junming, Wang Guoqiang. An experimental study on two-dimension vibratory cutting soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1994, 25(2): 18 ~ 23. (in Chinese)