doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.001

农业机械触土部件优化研究现状与展望

贾洪雷[1,2]　王万鹏[1,2]　陈　志[2,3]　郑铁志[4]　张　鹏[5]　庄　健[1,2]

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025;
3. 中国农业机械工业协会, 北京 100083; 4. 吉林省农业机械化管理中心, 长春 130022;
5. 雷沃重工股份有限公司, 潍坊 261206)

摘要: 简述了农业机械触土部件的发展及现状,归纳了可提升触土部件减阻降耗、减粘脱附和耐磨延寿等性能的诸多优化设计方法,明确了土壤性状与触土部件结构或材料之间的互作关系,提出触土部件材料的优化制造工艺,分析了仿生等先进设计方法在触土部件上的应用前景,最后总结了触土部件设计、加工等方法对现代农业机械性能的保障性作用,并对未来触土部件的研究趋势和发展方向进行了展望。

关键词: 农业机械; 触土部件; 优化设计

中图分类号: S222　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)07-0001-13

Research Status and Prospect of Soil-engaging Components Optimization for Agricultural Machinery

JIA Honglei[1,2]　WANG Wanpeng[1,2]　CHEN Zhi[2,3]　ZHENG Tiezhi[4]　ZHANG Peng[5]　ZHUANG Jian[1,2]

(1. *Key Laboratory of Bionic Engineering*, *Ministry of Education*, *Jilin University*, *Changchun* 130025, *China*
2. *College of Biological and Agricultural Engineering*, *Jilin University*, *Changchun* 130025, *China*
3. *China Association of Agricultural Machinery Manufacturers*, *Beijing* 100083, *China*
4. *Jilin Agricultural Mechanization Management Center*, *Changchun* 130022, *China*
5. *Lovol Heavy Industry Co.*, *Ltd.*, *Weifang* 261206, *China*)

Abstract: The foundation and guarantee role of the modern agriculture mechanical properties of soil-engaging components was analyzed and the primary performance parameters of soil-engaging components that need optimization at present was also summarized, which mainly included drag reduction and consumption reduction, anti-adhesion and desorption, wear resistance and life extensional and the satisfying requirements of agronomy. The main research methods to optimize the structure and properties of soil-engaging components were summarized, which mainly included clearing the interaction between soil and soil-engaging components, optimizing material composition and machining process technology, aiming at the structure function design of agronomy. And the developing orientation of agricultural machinery soil-engaging components in China was prospected, which mainly included strengthening the basic theory research, overcoming the high-performance material processing bottleneck, designing soil-engaging components by using comprehensive and advanced approach.

Key words: agricultural machinery; soil-engaging components; optimal design

引言

农业生产工具的发明、改进、发展与人类社会的发展有着密切的关系,如犁耕技术的传播与应用极大地促进了人类的迁徙、社会的发展和人口的增加[1-2],而农业机械的出现和发展极大地推动了农业的发展和人类文明的进步。农业机械在不同的作业过程中需构建不同的土壤结构,其中土壤耕作部件起到了至关重要的作用。

土壤耕作部件是指通过特定的触土部件与土壤

收稿日期: 2017-06-19　修回日期: 2017-07-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700701)

作者简介: 贾洪雷(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事机械化保护性耕作技术及仿生智能机械研究,E-mail: jiahl@vip.163.com

通信作者: 庄健(1981—),男,高级工程师,博士,主要从事农业机械仿生优化设计研究,E-mail: zhuangjian_2001@163.com

发生机械作用,使与其接触的土壤产生破碎、切削、翻转或移动等效果,统称各类触土部件为土壤耕作部件[3-5],农业机械在作业过程中会产生大量能耗,而大部分能耗来自于克服土壤耕作部件作业时产生的阻力[6-7],作业时,土壤耕作部件受土壤颗粒的冲击将导致磨损和断裂失效,使土壤耕作部件的使用寿命缩短,将直接使农业机械的生产成本变高[3,8-10]。而随着现代农业机械向着大型化、复合化方向发展,对触土部件的各项性能提出了越来越高的要求,这使得农业机械触土部件的优化设计技术和方法成为该领域研究的重要前沿和热点之一。

随着现代农业机械的专业化程度进一步提升,触土部件种类不断增多,但在实际作业过程中普遍存在阻力大、能耗高、粘附和磨损严重、作业效果与农艺要求不匹配等问题[3,10-11],如土壤粘附使犁耕阻力增加 30% 以上[12-13],耕整机械能耗增加 30% ~ 50%[14-15],播种机械出苗率降低 5% ~ 10%,而不同部件对于性能优化的需求各不相同,因此,本文分析触土部件的种类和性能需求,总结不同性能的优化设计方法,展望触土部件研究发展趋势,为提高我国触土部件研究水平、提高现代农业装备性能和效益提供参考。

1 触土部件分类与性能优化需求

现代农业的机械化作业过程中,作物的种植一般包括播前耕整地、播种、田间管理和收获等环节,而大部分的触土部件应用于其中前 3 个作业环节中,如播前耕整地用犁、耙、旋耕和镇压等部件,播种作业用开沟、覆土整形和镇压等部件,田间管理用深松、培土等部件[16]。不同部件的结构、作业方式各不相同,因此对其进行性能优化的方向也不相同,如犁和深松铲等部件作业阻力大、能耗高[6,17-19],减阻降耗就成为其重要的优化研究方向[20-23],表 1 所示为几种主要触土部件的性能特点及其对性能优化的要求。

目前,发达国家在农机触土部件的设计过程中,均充分考虑到机具的结构、功能和农艺要求、土壤性状等因素,并通过结合材料成分与优化加工工艺,来保证触土部件的各项性能指标符合作业要求,同时也实现了部件生产企业的专业化生产,产生了许多国际知名的专业触土部件生产商,如西班牙贝洛塔公司,其生产的耙片、犁尖、犁壁、圆盘开沟器等部件,为雷肯、库恩、约翰-迪尔、格兰等企业生产的机具配套,显著提高了产品的附加值[30]。

而我国目前农机触土部件生产企业大多数规模较小,产业集中度低,技术实力和加工能力相对薄弱,在高精度成型、高强耐磨材料热处理等方面存在问题[32],因而导致我国农机触土部件性能、使用寿命和作业质量与国际先进水平仍存在差距,难以满足我国现代农业机械发展的需要。

2 部件-土壤相互作用研究与减阻减粘结构设计方法

由于触土部件作业产生的阻力消耗了大量的动力和能源,因此减阻始终是土壤耕作部件设计领域的首要目标。研究表明,在耕作过程中,土壤对触土部件产生的作用力主要有土壤变形所产生的反作用力和摩擦力,同时受土壤剪切强度、土壤内聚力、土壤内摩擦角和外摩擦角等因素影响[33-36]。此外土壤与部件之间的粘附作用显著影响着部件的作业阻力、功耗和质量,由于影响土壤粘附的因素众多,许多科研工作者从不同角度提出了不同的理论和学说以解释和说明土壤粘附的现象与规律,如毛细管理论[12,37-38]、五层界面理论[39]、合力理论[12,40]、分子电荷理论以及粘附界面的分子模型理论[41],但大多数为基于 Fountaine 的水膜张力理论,这是因为在耕作过程中,土壤和触土部件表面的粘附与界面水膜的状况呈现出密切的关系[42]。

土壤存在着成分复杂、内部成分和结构不均匀、不同成分与部件接触特性存在显著差异、不同水分温度条件对土壤特性影响显著等问题[43-45],同时现有土壤-部件作用关系理论依然存在着制约因素多,计算过程繁复,而导致模拟仿真计算量大、结果可靠性较差等问题[46-50]。因此需要针对不同的部件和作业条件,建立更为简洁和准确的计算模型,借助快速提升的超级计算机的运算能力,提高部件-土壤关系分析的效率和准确性,为部件的优化设计提供基础。

国内外研究者对触土耕作部件与土壤的相互作用关系进行了相关研究,并建立了相关的模型,同时利用模型对触土耕作部件的结构参数进行分析和优化,如圆盘犁的牵引力和功率计算预测模型[51-52];铧式犁牵引力预测模型[53];犁体结构参数优化方法[54];利用有限元非线性分析法对碎土辊耙齿进行强度和刚度分析,并进行结构优化设计[55];基于切土、抛土和转运对动力消耗影响的旋耕刀分析模型及优化设计方法[56];采用离散元法研究开沟器的工作过程及工作阻力,为开沟器的研究和优化设计提供了一种新方法[57];分析深松铲翼张角、刃角、翼倾角与观测指标牵引阻力之间的数学模型,为深松铲的优化设计提供参考依据[58];通过建立立柱式深松铲受力数学模型进行深松铲结构优化设计[59]。在上述研究的基础上,国内外研究者对触土部件进行了有针对性的结构优化设计。

表 1　主要触土部件的性能特点及其对性能优化的要求

Tab. 1　Performance characteristics of soil-engaging components and requirement for performance optimization

作业环节		部件图片	功能结构特点	性能优化要求
播前耕整地	耕地	铧式犁	铧式犁通过犁体曲面完成对土壤的松碎和扣翻，是农业生产中应用最广泛的耕地机械，图中为河北农哈哈机械有限公司生产的 1LF－535 型液压翻转犁，单铧幅宽 35 cm，总幅宽 175 cm，耕深范围 22～30 cm[24]	减阻降耗、减粘脱附、耐磨延寿
		旋耕机	旋耕机通过动力驱动刀辊旋转，对田间土壤实施耕、耙作业，碎土充分、耕后地表平整，图中为雷沃重工股份有限公司生产的 GA3040 型旋耕机，幅宽 200 cm，安装总刀数 60，耕深 12～16 cm[25]	减阻降耗、耐磨延寿
	整地	圆盘耙	圆盘耙用于旱地犁耕后的碎土以及播种前的松土、除草，也可用于收获后的浅耕灭茬作业，图中为红日机械制造有限公司生产的 1BJX－1.7 中型对置圆盘耙，工作宽度 170 cm，工作深度 18～22 cm，耙片直径 610 mm[26]；钉齿耙采用钉齿松土、碎土和破坏土壤板结层，同时对土壤产生下压，镇压器对耕过的土地进行镇压，粉碎土块，使土地平整，保水防风蚀，图中为黑龙江省泰禾机械有限责任公司生产的 1ZY－6.3 型镇压器，工作幅宽 6 300 mm，镇压轮组数为 3[27]	减阻降耗、耐磨延寿
		镇压器		
播种	开沟	锐角开沟器　 钝角开沟器	开沟器按入土角不同可分为锐角和钝角开沟器，开沟器的功用主要是在播种机工作时开出种沟，引导种子和肥料进入沟内，并使湿土覆盖种子和肥料	减阻降耗、减粘脱附、耐磨延寿、满足农艺要求
	覆土整型	覆土器　 起垄铲	种子落入沟底时，用覆土器进行覆土，使其达到一定的覆土深度；起垄铲起垄可以增温、保水、保肥、改善土壤理化性质；窄型镇压轮广泛应用在免耕播种机上，对苗带进行镇压；宽型镇压轮多用于中耕作物精密播种机上，通过滚动来镇压土壤	减粘脱附、满足农艺要求
		窄型镇压轮　 宽型镇压轮		
田间管理	深松	深松铲	深松铲深松土壤、调节土壤的固液气态比、改善土壤结构和提高蓄水保墒能力，图中为马斯奇奥 TERREMOTO3 型中耕式深松机，工作宽度 230 cm，工作深度 25 cm[28]	减阻降耗、减粘脱附、耐磨延寿
	培土	培土器	培土增加垄培土量，调节土壤水分，减少作物垄上水分的蒸发，图中为山东希成农业机械科技有限公司生产的 3ZMP－180 型悬挂式马铃薯中耕培土施肥机，其作业幅宽 1 800 mm，培土器适用垄距 900 mm[29]	

随着数值模拟技术和方法的发展,国内外研究者针对不同作业环节和土壤条件,进行了触土部件结构的优化设计与分析,如应用 EDEM 软件进行深松铲性能分析,检验了破土刃切削刃角 θ 与滑切角 φ 最优效果设计的折线破土刃深松铲[17],以及采用 ANSYS/LS-DYNA 分析和优化设计得到的复合形态深松铲[60];运用 DEM 分析土壤和旋耕刀作用下秸秆的微观运动行为,为秸秆处理机械中旋耕刀的设计与优化提供理论依据[61];在 ANSYS/LS-DYNA 软件中完成犁体耕作过程的动力学模拟仿真,表明在与土体-犁体接触点垂直的平面内,体位移以与犁体接触点为中心呈环带状向四周逐渐减小[62];采用 ANSYS 软件对免耕播种机缺口圆盘刀进行了有限元静强度分析,得到刀片的应力分布图,为缺口圆盘刀的设计和优化提供了理论依据[63]。

在模拟仿真研究的基础上,国内外研究者通过理论分析、结构设计和试验验证的方法,进行了不同触土部件的减阻减粘结构设计,如经检验振动法减粘降阻的装置试验,当土壤含水率为 38.7%,振动率在 60~100 Hz 之间时,板上土壤分离的效果最明显[64];如由驱动圆盘犁和铧式犁组合而成的组合式左翻驱动圆盘犁,入土力矩显著增大,实现了减阻的效果[65];通过田间试验,对深松铲受力数学模型进行试验验证,实现了对深松铲结构参数的优化,降低了作业阻力[59];综合深松铲对土壤扰动疏松效果、牵引阻力及沟形面积比阻分析,入土角 α 为 21°的凿形铲是相对最优的铲形[66];基于星形耙片的曲面和星齿刃口曲线的几何参数对作业质量及作用力的影响关系,对耙片结构参数进行优化[67];利用 TRIZ 冲突矩阵建立的犁壁减粘脱附结构优化设计方法[68]等,均能够有效降低触土部件在特定条件下的作业阻力或土壤粘附,提高部件的作业质量和效率,优化性能指标。

研究者通过对触土部件与土壤之间关系的研究及对现有触土部件机构的不断优化,使得触土部件在减阻减粘结构的设计方面取得了显著的效果,与此同时研究者也开始将仿生结构设计等新型设计方法应用于触土部件的结构设计,同样取得了良好的效果。

3 触土部件仿生设计方法

土壤动物是土壤中生存的各种动物的总称,土壤动物在亿万年的进化过程中,进化出大量适应地下生活,能够降低挖掘阻力、土壤粘附和运动磨损的多尺度结构,为与土壤作用的触土部件的减阻、减粘和耐磨结构设计提供了天然的摹本和高效的优化设计途径,如基于蜣螂体表结构设计的仿生犁壁,能够实现减粘脱附性能[69-70],通过方鼹鼠爪趾结构曲线连接碎茬刀和旋耕刀刃口曲线研制的仿生旋耕碎茬通用刀片[71],在作业时刀片扭矩和机器振动显著降低;通过模仿蚯蚓结构和运动行为设计的仿生开沟器[72]和镇压辊仿生减粘脱附结构[73],均可减少触土部件表面土壤粘附;基于黄鼠、小家鼠爪趾结构设计的可降低深松作业阻力的仿生深松铲柄[74]和铲柄破土刃口结构[75]等,在减阻、减粘脱附等性能优化方面取得了良好的应用效果。

表 2 是一些具有代表性的触土部件仿生结构设计实例。

我国触土部件的仿生结构设计已取得一系列创新性成果,成为国际仿生学研究的重要分支之一。但目前随着农业机械化作业速度、精度的快速提升,单纯依靠对土壤动物器官分析和模仿进行触土部件结构优化设计的方法也已经不能完全满足实际应用的需求,因此,在之后的研究中需要针对触土部件的使用环境进行生物原型的选择和分析,以提高仿生结构设计的可靠性;在仿生结构设计的同时,对土壤动物的运动学特性进行深入的分析,研究其运动对减阻、耐磨、减粘等特性的影响规律和作用机理,并将这些运动特征引入触土部件机构设计中,实现触土部件性能的动态优化,进一步提高部件性能。

4 触土部件新材料与新工艺应用技术

触土部件在耕作过程中,会受到土壤颗粒的冲击,导致磨损、断裂等形式的失效,为了提高耕作部件的性能和寿命,研究人员一直在努力优化触土部件的材料性能和加工工艺,如采用白口铸铁加工的阳城犁镜就是其中的杰出代表[81-82]。但随着现代农业装备作业速度和强度的快速提升,对触土部件的硬度、强度和韧性均提出了更高的要求,而同步提高的硬度和韧性也正是材料学领域的重大难题之一,为此国内外研究人员分别从材料自身和工艺方法等方面开展研究,提高了触土部件的性能。

绝大部分的触土部件是由钢铁材料制造的,而面对触土部件对硬度、强度和韧性的较高要求,生产触土部件所采用的钢铁材料也逐步由铸铁材料向合金钢材料发展,其中应用最为广泛的是 65Mn 钢,通过采用合理的热处理工艺,可以在保证其强度和韧性的前提下,有效提高其应变硬化指数,使部件表面在作业过程中形成硬化层,有效提高耐磨性[83-85]。近年来随着冶炼、加工和热处理技术的发展,硼钢越来越多地应用在触土部件的生产领域,如西班牙贝洛塔公司采用 28MnB5 钢加工的触土部件,表面硬度可达 48~52 HRC,兼具优良的韧性和硬度[86-88]。表 3 是 65Mn 钢和 28MnB5 钢的主要成分、热处理工艺和主要性能。

表 2　触土部件仿生结构设计实例

Tab. 2　Structural bionic design examples of soil-engaging components

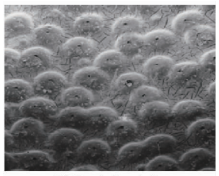
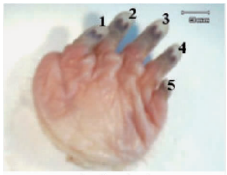
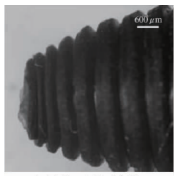
序号	部件名称	仿生原型	部件图片	优化性能
1	非光滑犁壁	 蜣螂头部凸起		以蜣螂头部凸起为仿生原型设计的犁壁仿生结构，可显著降低土壤粘附，减阻率 11% ~20%，犁壁耕翻的碎垡率高，作业质量良好[69-70,76]
2	仿生旋耕碎茬通用刀片	 鼹鼠爪趾		通过鼹鼠爪趾曲线连接旋耕刀和碎茬刀刃口曲线设计的仿生旋耕碎茬刀片在作业时扭矩降低 1.62% ~3.91%，作业振动显著降低[71,77]
3	仿生波纹形开沟器	 蚯蚓环节结构		结合蚯蚓环节结构和超高分子量聚乙烯设计加工的仿生开沟器可降低作业阻力 9%，减少土壤粘附，提高作业质量[72]
4	仿生减阻深松铲柄	家鼠爪趾		基于家鼠爪趾设计的铲柄破土刃口为指数函数曲线型减阻深松铲，比传统深松铲的耕作阻力减小了 8.5% ~39.5%，平均减小 19%，减阻效果明显[74,78]
5	仿生非光滑耐磨涂层	金龟子非光滑表面	涂层微观组织	在 45 号钢表面制备非光滑的复合耐磨涂层，物体的耐磨性能分别为淬火 45 号钢和高铬铸铁的 12.4 倍和 4.9 倍[79-80]

表 3　65Mn 钢和 28MnB5 钢

Tab. 3　Comparative of 65Mn and 28MnB5

名称	主要成分	热处理工艺	性能
65Mn 钢	碳 C：0.62% ~0.70% 锰 Mn：0.90% ~1.20%	淬火：(850 ± 20)℃，油淬；(150 ± 10)℃ 回火 120 min	抗拉强度大于等于 980 MPa 屈服强度大于等于 784 MPa
28MnB5 钢	碳 C：0.25% ~0.32% 锰 Mn：0.10% ~0.15% 硼 B：0.05% ~0.08%	淬火：(870 ± 20)℃，油淬；(240 ± 10)℃ 回火 120 min	抗拉强度大于等于 1 550 MPa 屈服强度大于等于 1 286 MPa

但具有较高强度的硼钢材料在生产、加工和热处理等环节还存在较大技术难度，尤其是目前我国企业尚无法保证硼钢材料加工的触土部件在热处理后的结构精度，这也成为制约这些材料应用的瓶颈。

为了保证触土部件耐磨、减粘等性能，同时保证其结构强度和韧性，研究者采用多种工艺方法在韧性材料表面构建具有不同结构的功能性结构，成为触土部件优化性能和提高使用寿命的重要途径，如在触土部件表面通过熔覆、粘接等方式添加高硬度的合金或陶瓷涂层，以提高部件的耐磨性和使用寿命，同时保证部件的机械强度和韧性[89-93]；通过合理的热处理或铸造方法，形成材料结构和性能的梯度分布，提高部件表面的硬度和耐磨性，保证部件的结构强度和韧性[94]，通过涂覆高分子涂层减少土壤在触土部件表面的粘附，提高材料微观粗糙度与接触角等方法，提高作业质量[79,95-97]。这些方法的应用显著提高了部件的性能、作业质量和作业效率，降低了部件的使用成本。

如犁壁表面的仿生涂层结构可降低土壤的粘附[80,98-99]；通过研究犁壁表面磨损特性研发的激光

表面雕刻方法,可降低犁壁磨损造成的损失[100-101];在旋耕片表面采用高速氧燃料喷涂 WC/Co 复合涂层、采用等离子喷涂 Al_2O_3 涂层,旋耕刀片磨损速率显著降低,而等离子喷涂 Al_2O_3 刀片的磨损速率几乎未变[102];利用热喷涂技术在旋耕刀具表面喷涂 WC-Co-Cr、Cr3C2NiCr 和 Stellite-21 3 种涂层,喷涂涂层对刀具的磨损率有明显的改观,WC-Co-Cr 涂层具有优异的耐磨性能[103];在 30MnB5 钢制成的犁头表面分别电镀 20 μm 硬铬层、化学镀 20 μm 的镍涂层以及物理气相沉积 4 μm 的 TiN 涂层,并在砂质粘壤土中进行耐磨损试验,结果表明,TiN 涂层的耐磨性能优于硬铬层和镍涂层[104];采用火焰熔覆[105-106]或激光熔覆[107-109]在 65Mn 等钢基体上制备了金属基或陶瓷基耐磨涂层结构,可有效提高犁体耐磨性和使用寿命。几种触土部件表面处理方法及应用如表 4 所示。

表 4 触土部件表面处理方法

Tab. 4 Surface pre-treatments of soil-engaging components

序号	表面处理方法	表面应用材料	应用触土部件	主要技术指标
1	喷涂	WC/Co 复合涂层和 Al_2O_3 涂层	旋耕刀	喷涂 WC/Co 比喷涂 Al_2O_3 材料的旋耕刀片磨损速率显著降低,由 0.86 cm^3/hm^2 降至 0.02 cm^3/hm^2
2	电镀	硬铬层、化学镀镍涂层以及 TiN 涂层	犁尖	在砂质粘壤土中进行耐磨损试验,TiN 涂层的耐磨性能优于硬铬层和化学镍涂层
3	熔覆	镍基/铸造碳化钨合金	犁铧	熔覆犁铧未发现有明显的划痕,熔覆犁铧比未熔覆犁铧的磨损量显著降低 26 g/(10 hm^2)

5 触土部件与农艺融合设计方法

现代农业对农机装备的要求已不仅局限于高效低耗地完成各个作业环节,还需要作业后的地表环境与农艺要求相匹配,这就需要农机触土部件结构和作业方式与农艺要求实现紧密的融合,同时,我国种植农业存在多区域、多熟制和多品种的特点,这也要求触土部件在实现基本功能的前提下,需要针对不同的环境条件实现一定的适应性。

以耕整地用镇压装置为例,不同的土壤条件、作物品种和种植模式,对播前种床土壤的要求各不相同,需要具有不同结构和功能的镇压装置进行作业,镇压器有 V 型镇压器、网环形结构镇压器、圆筒形镇压器等,而针对不同的工作环境、土壤构成、地表平整度,有不同类型的镇压器,如防风喷雾镇压器、双面牙嵌型镇压器、直面风扇型镇压器、菊型镇压器、Aqueel Ⅱ型镇压器和仿形镇压器等[110-112],表 5 为几种常用镇压器主要适用耕作环境或与之配套用的机具。

此外,国内外研究者还针对不同作物和不同农艺要求开展了如开沟、镇压、覆土整形、松土等部件的针对性结构设计与优化,如针对大豆种子结构和种植模式设计的双 V 型筑沟器[113-114]和仿形弹性

表 5 镇压装置

Tab. 5 Press-device

序号	镇压器名称	部件图片	主要特点	配套农艺
1	V 型镇压器		适用于直径在 50 mm 以下的土块,压碎效果好,压后地表呈细小波纹	整地或与播种机、中耕机联合作业使用
2	Aqueel Ⅱ型镇压器		工作时在土壤表面压出凹坑,凹坑可以储存水,延缓水分蒸发,增加土壤表面积,提高土壤温度	用于土壤侵蚀严重、水资源短缺地区
3	仿形镇压器		适用于旱作整地的深层镇压和仿形镇压,能形成凹凸不平的地表,可减少水分的蒸发和防止表土风蚀	用于整地镇压或者改装用于播种后或苗期镇压

镇压辊[115-117]，针对不同作物、种植模式和土壤条件设计的镇压装置可保证播种作业过程中的镇压效果[118]；针对免耕条件下开沟作业易缠绕堵塞等问题设计的组合式开沟器、缺口圆盘开沟器[119-124]等，保证了免耕播种等保护性耕作技术的发展和推广；为改善种床质量、提高播种分布直线性及播深一致性，设计了仿形滑刀式开沟器[125-127]；为使覆土器能够较好地完成覆土作业，达到理想的覆土效果，同时尽量减少种子触土后的位移而设计双圆盘式覆土器[128]；根据土壤墒情和不同作物镇压力需求不同的农艺要求随时调节镇压力的可变力苗带镇压器等[129]；针对保护性工作时秸秆粉碎效果的农艺要求设计的 V-L 型秸秆粉碎还田刀片，延长了刀片的使用寿命、提高了秸秆粉碎效果和作业效率[130]；在固定垄保护性耕作农艺要求条件下，对松垄割刀理论受力、作业油耗、土壤体积含水率增量性能指标进行评价，确定使用 V 型松垄割刀作业的综合效益最高[131]。表 6 为与农艺相配套设计的触土部件。

表 6　与农艺相配套的触土部件结构设计

Tab. 6　Structural design of soil-engaging components match the agronomy

序号	部件名称	部件照片	整机应用照片	农艺相配套性能
1	变曲率破茬松土装置		行间耕播机	可切断苗带上的残留根茬，破茬率为 93%，并对土壤产生撬动和挤推作用，满足行间播种对土壤的农艺要求[132-134]，在行间耕播机上应用
2	仿形仿生镇压辊		大豆变量施肥播种机	镇压后土壤容积密度为 1.0 ~ 1.3 g/cm^3，满足种植农艺要求，同时能满足双行种植农艺对镇压均匀性要求[115-117,135]，在黑龙江勃农兴达公司制造的大豆变量施肥播种机上应用
3	组合式施肥开沟器		玉米免耕播种机	在秸秆覆盖地块上既能有效切断残茬，又能保证入土深度，残茬切断率 91% 以上，满足玉米保护性耕作农艺要求[121-122,136]，在吉林康达免耕播种机上应用
4	可变力苗带镇压器		玉米播种机镇压装置	可变力苗带镇压器将镇压、调节、测试、显示、记录功能集于一体，镇压力可根据不同的农艺要求通过拖拉机液压系统随时调节[129,137]，满足不同作物对镇压力不同的农艺要求
5	仿形滑刀式开沟器		大豆耕播机	可开出紧实种沟，满足大豆种植农艺要求，应用于大豆播种机上[126]，在黑龙江勃农兴达公司制造的大豆变量施肥播种机上应用
6	V-L 型秸秆粉碎还田刀		玉米收获机	减少整机作业振动，提高秸秆粉碎效果，秸秆粉碎率达 87.5%，满足保护性耕作农艺要求[130,138]，在中收机械公司生产的玉米收获机上应用

6 展望

综上可见,随着科技的进步和工业的发展,农业生产需要功能更多、效率更高、生产成本更低的农业机械,而触土部件在保证和提升农业机械性能方面发挥着极为重要的作用,研究者通过研究土壤-部件相互作用关系,采用计算机模拟仿真、材料优化设计、仿生设计等方法,对触土部件进行了多方面的优化设计,降低了部件的作业阻力、磨损、粘附和作业成本,提升了部件的作业效率、作业质量和使用寿命,满足了农艺对农机和触土部件的需求。

但同时,触土部件的优化并没有完全满足农机发展的需求,尤其在我国存在着多地域、多作物和多熟制的农业生产国情,触土部件的优化设计面临更大的难度和挑战,因此对我国农机触土部件优化设计提出以下展望:

(1)针对我国不同地区土壤特性、作物品种、种植模式等差异,研究明确不同土壤-作物-部件间的互作关系,为触土部件针对性优化设计提供理论基础。

(2)充分发挥多学科交叉研究优势,依靠具有技术优势的龙头企业和院校,攻克硼钢等关键材料的冶炼、加工和热处理工艺等技术瓶颈,保证触土部件材料性能。

(3)在传统优化设计方法基础上,充分发挥计算机模拟仿真、仿生结构设计和表面处理技术等研究设计和加工方法的优势,开展农机触土部件高效优化设计和加工。

(4)针对不同地域、作物和农艺要求开展触土部件优化设计,通过农机与农艺的紧密融合,进一步提高触土部件作业质量和效益。

参 考 文 献

1 高亨注. 诗经今注[M]. 上海: 上海古籍出版社, 1980.

2 沈昌蒲, 王秋华, 温锦涛. 从犁的工作部件看中国和西欧设计思想的差异[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 178 - 183.
SHEN Changpu, WANG Qiuhua, WEN Jintao. Difference of design idea of plow share between Chinese and west European[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 178 - 183. (in Chinese)

3 李庆达, 郭建永, 胡军, 等. 土壤耕作部件耐磨减阻处理的研究现状[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 119 - 126.
LI Qingda, GUO Jianyong, HU Jun, et al. Research status of wear resistance and drag reduction treatment of soil cultivation components[J]. Surface Technology, 2017, 46(2): 119 - 126. (in Chinese)

4 郭志军, 杜干, 周志立, 等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 47 - 52.
GUO Zhijun, DU Gan, ZHOU Zhili, et al. Actuality analysis of resistance-reducing properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 47 - 52. (in Chinese)

5 郭志军, 周志立, 张毅, 等. 土壤耕作部件仿生优化设计研究[J]. 中国科学(E 辑:技术科学), 2009(4): 720 - 728.
GUO Zhijun, ZHOU Zhili, ZHANG Yi, et al. Bionic optimization design of soil tillage parts[J]. Science in China(Series E: Technological Sciences), 2009(4): 720 - 728. (in Chinese)

6 翟力欣. 犁体结构与工作参数对流变型土壤耕作阻力的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
ZHAI Lixin. Study on the effects of plough's working and structure parameters on its resistance under rheological soil[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)

7 杨国欣, 邓云泽, 陈婷, 等. 土壤耕作部件力学综述[J]. 农业与技术, 1996(4): 40 - 41.

8 杨丰, 陈晓微, 周长奎. 耐磨材料在土壤耕作部件中的应用[J]. 农机化研究, 2000,22(3): 111 - 112.

9 吴万盛, 王浩. 土壤耕作部件的耐磨性初探[J]. 吉林农业大学学报, 1987,9(4): 98 - 101.

10 王隆基, 张玉福. 土壤耕作部件磨损过程的模拟[J]. 粮油加工与食品机械, 1980(3): 53 - 55.

11 王路, 王成武, 戈振扬. 土壤 - 耕作部件相互作用的研究进展[J]. 农机化研究, 2012,34(12): 7 - 11,20.

12 GILL W R, VANDEN Berg G E. Soil dynamics in tillage and traction[J]. Soil Science Society of America, 1968,32(3):4.

13 孙一源, 高行方, 余登苑. 农业土壤力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1985.

14 REN L Q, WANG Y P, LI J Q, et al. Flexible unsmoothed cuticles of soil animals and their characteristics of reducing adhesion and resistance[J]. Chinese Sci. Bull., 1998, 43(2):166 - 169.

15 CONG Q, REN L Q, CHEN B C, et al. Using characteristics of burrowing animals to reduce soil - tool adhesion[J]. TASAE, 1999, 42(6): 1549 - 1556.

16 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2007.

17 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62 - 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62 - 72. (in Chinese)

18 张强, 张璐, 于海业, 等. 复合形态深松铲耕作阻力有限元分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 61 - 65.

http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20120812&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.012.
ZHANG Qiang, ZHANG Lu, YU Haiye, et al. Finite element analysis and experiment of soil resistance of multiplex-modality subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 61 - 65. (in Chinese)

19 马守锋. 深松铲工作状态受力分析与计算机模拟[D]. 郑州：河南农业大学, 2004.
MA Shoufeng. Force analysis and computer simulation of the subsoiler in working state[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2004. (in Chinese)

20 田丽梅, 任露泉, 韩志武, 等. 仿生非光滑表面脱附与减阻技术在工程上的应用[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 138 - 142.
TIAN Limei, REN Luquan, HAN Zhiwu, et al. Applications of anti-adhesion and anti-resistance of biomimetic non-smooth surface in engineering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 138 - 142. (in Chinese)

21 SHAHGOLI G, FIELKE J, DESBIOLLES J, et al. Optimising oscillation frequency in oscillatory tillage [J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106(2): 202 - 210.

22 REN L Q, CONG Q, TONG J, et al. Reducing adhesion of soil against loading shovel using bionic electro-osmosis method [J]. Journal of Terramechanics, 2001, 38(4): 211 - 219.

23 REN L Q, HAN Z W, LI J J, et al. Effects of non-smooth characteristics on bionic bulldozer blades in resistance reduction against soil [J]. Journal of Terramechanics, 2003, 39(4): 221 - 230.

24 https://www.nongjitong.com/product/nonghaha_1lf-535_plough.html[EB/OL].

25 http://am.lovol.com.cn/farm/ga3040.htm[EB/OL].

26 http://www.chinahongri.cn/products_detail/productId=255.html[EB/OL].

27 https://www.nongjitong.com/company/32905.html[EB/OL].

28 https://www.nongjitong.com/product/6693.html[EB/OL].

29 https://www.nongjitong.com/company/tiancheng[EB/OL].

30 方宪法, 陈志, 苏文凤. 我国农业装备制造业自主创新战略研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 69 - 73.
FANG Xianfa, CHEN Zhi, SU Wenfeng. Research on indigenous innovation strategy of Chinese agricultural equipment industry[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 69 - 73. (in Chinese)

31 陈双坤, 吴刚. 仿生耐磨设计的研究现状及展望[J]. 机械工程师, 2012(9): 45 - 48.

32 白学峰, 鲁植雄, 常江雪, 等. 中国农业机械化现状与发展模式研究[J]. 农机化研究, 2017,39(10): 256 - 262.

33 REN Luquan, TONG Jin, LI Qianqiao, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components:a review[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,2001, 9(3): 239 - 263.

34 TONG Jin, GUO Zhijun, REN Luquan. Curvature features of three soil-burrowing animal claws and their potential applications in soil-engaging components[J]. International Agricultural Engineering Journal,12(3&4): 119 - 130.

35 HENDRICK J G, BAILEY A C. Determining components of soil - metal sliding resistance[J]. TASAE, 1982, 25(4): 845 - 849.

36 ROBBINS D H, JOHNSON C E, SCHAFER R L. Modeling soil - metal sliding resistance[J]. ASAE, 1987, 87:1580.

37 贝佛尔 L D. 土壤物理学[M]. 周传槐,译. 北京：中国农业出版社, 1983.

38 秋山丰, 横井肇. 土壤粘着性的研究(第 2 报)[J]. 日本土壤肥料学杂志, 1972, 43(8): 271 - 277.

39 秋山丰, 横井肇. 土壤粘着性的研究(第 3 报)[J]. 日本土壤肥料学杂志, 1972, 43(9): 315 - 320.

40 钱定华, 张际先. 土壤对金属材料粘附和摩擦研究状况概述[J]. 农业机械学报, 1984, 15(1): 69 - 78.

41 张际先, 桑正中, 高良润. 土壤对固体材料粘附和摩擦性能的研究[J]. 农业机械学报, 1986, 17(1): 32 - 40.

42 FOUNTAINE E R. Investigation into mechanism of soil adhesion[J]. Journal of Soil Science, 1954, 5(2): 251 - 263.

43 丁启朔. 耕作力学研究的土壤结构及其评价方法[D]. 南京：南京农业大学, 2006.
DING Qishuo. Soil structure and its assessment for soil tillage research[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006. (in Chinese)

44 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J]. 土壤学报, 2002,39(2): 221 - 226.
ZHANG Shirong, DENG Liangji, ZHOU Qian, et al. Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationships with main soil properties[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(2): 221 - 226. (in Chinese)

45 丁启朔, 丁为民, 孟为国, 等. 耕作力学研究中的土壤结构表现与评价[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 62 - 66.

46 李伟,张帅磊,黄玉祥,等. 深松深度对土壤扰动影响的仿真与试验研究[J]. 农机化研究, 2017,39(11): 153 - 157.

47 黄玉祥,杭程光,苑梦婵,等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80 - 88.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160712&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80 - 88. (in Chinese)

48 方会敏，姬长英，FARMAN Ali Chandio，等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(3)：22－28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160304&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.004.
FANG Huimin, JI Changying, FARMAN Ali Chandio, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22－28. (in Chinese)

49 刘国敏，邹猛，徐涛，等. 波纹表面接触土壤颗粒动态响应仿真分析[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(1)：85－89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130117&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.017.
LIU Guomin, ZOU Meng, XU Tao, et al. Simulation on dynamic behavior of soil particle contact with wavy surface[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 85－89. (in Chinese)

50 钟江，蒋建东，姜涛，等. 基于光滑粒子流体动力学仿真的板结土壤深旋耕技术[J]. 机械工程学报，2010，46(19)：63－69.
ZHONG Jiang, JIANG Jiandong, JIANG Tao, et al. Deep-tillage rotavator technology based on smoothed particle hydrodynamics simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 63－69. (in Chinese)

51 AHMADI I. Development and assessment of a draft force calculator for disk plow using the laws of classical mechanics[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 163: 32－40.

52 GODWIN R J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 97(2): 331－340.

53 SAUNDERS C, GODWIN R J, O'DOGHERTY M J. Prediction of soil forces acting on mouldboard ploughs[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Soil Dynamics, Adelaide, 2000.

54 翟力欣，姬长英，丁启朔，等. 犁体结构参数与工作参数优化设计[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(8)：57－62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130810&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.010.
ZHAI Lixin, JI Changying, DING Qishuo, et al. Optimized design of plough body structural and working parameters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 57－62. (in Chinese)

55 王旭峰，张学军，马少辉，等. 清田整地机碎土辊耙齿有限元分析[J]. 农业机械学报，2011，42(4)：58－61.
WANG Xufeng, ZHANG Xuejun, MA Shaohui, et al. Finite element analysis of clod crushing rake tooth in field cleaning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 58－61. (in Chinese)

56 MAO P J, XING Q Q, HU C Y. The establishment and analysis on mathematical model of rotary cultivator power consumption [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 159: 366－370.

57 于建群，钱立彬，于文静，等. 开沟器工作阻力的离散元法仿真分析[J]. 农业机械学报，2009，40(6)：53－57.
YU Jianqun, QIAN Libin, YU Wenjing, et al. DEM analysis of the resistances applied on furrow openers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 53－57. (in Chinese)

58 周桂霞，汪春，张伟，等. 基于二次正交旋转回归试验的深松铲关键参数建模[J]. 农业机械学报，2006，27(10)：86－89.
ZHOU Guixia, WANG Chun, ZHANG Wei, et al. Mathematic model of deep-shovel with critical structure parameter based on two times orthogonal rotational regressive tests[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 27(10): 86－89. (in Chinese)

59 余泳昌，刘文艺，赵迎芳，等. 立柱式深松铲受力数学模型及试验分析[J]. 农业工程学报，2007，23(6)：109－113.
YU Yongchang, LIU Wenyi, ZHAO Yingfang, et al. Force mathematical model and examination analysis of the column subsoiler [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 109－113. (in Chinese)

60 张强，张璐，刘宪军，等. 基于有限元法的仿生钩形深松铲耕作阻力[J]. 吉林大学学报:工学版，2012，42(增刊1)：117－121.

61 方会敏，姬长英，AHMED Ali Tagar，等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(1)：60－67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160109&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60－67. (in Chinese)

62 翟力欣，姬长英，丁启朔，等. 犁面前部土体表层位移场分布有限元分析[J]. 农业机械学报，2011，42(10)：45－50.
ZHAI Lixin, JI Changying, DING Qishuo, et al. Analysis of distribution of displacement on soil surface in front of plow with FEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 45－50. (in Chinese)

63 杨帆，李问盈，李洪文，等. 免耕播种机缺口圆盘刀有限元静强度分析[J]. 农业机械学报，2010，41(6)：53－55,80.
YANG Fan, LI Wenying, LI Hongwen, et al. Finite element analysis for gap disc of no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 53－55,80. (in Chinese)

64 WANG X L, ITO N, KITO K, et al. Study on use of vibration to reduce soil adhesion[J]. Journal of Terramechanics, 1998(3): 87－101.

65 朱亨银，文熙. 组合式左翻驱动圆盘犁的入土及平衡性能计算分析[J]. 农业工程学报，2011，27(12)：29－32.

66 刘俊安，王晓燕，李洪文，等. 基于土壤扰动与牵引阻力的深松铲结构参数优化[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(2)：

60 – 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx? file_no = 20170208&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.008.
LIU Jun'an, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Optimization of structural parameters of subsoiler based on soil disturbance and traction resistance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 60 – 67. (in Chinese)
67 张才权. 水田耙星形耙片几何参数的研究[J]. 农业机械学报, 1979,10(2): 88 – 98.
68 李青. 基于 TRIZ 理论和仿生原理的犁技术进化的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
LI Qing. Research on the technology system evolution of the plough based on TRIZ and bionics[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
69 金俊, 李建桥, 张广权, 等. 仿生非光滑水田犁壁的设计及田间应用试验[J]. 农机化研究, 2015, 37(12): 160 – 165.
70 李建桥, 任露泉, 刘朝宗, 等. 减粘降阻仿生犁壁的研究[J]. 农业机械学报, 1996, 27(6): 1 – 4.
71 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. 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)
72 马云海, 马圣胜, 贾洪雷, 等. 仿生波纹形开沟器减黏降阻性能测试与分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 36 – 41.
MA Yunhai, MA Shengsheng, JIA Honglei, et al. Measurement and analysis on reducing adhesion and resistance of bionic ripple opener[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 36 – 41. (in Chinese)
73 贾洪雷, 王文君, 庄健, 等. 仿形弹性镇压辊减粘防滑结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 20 – 27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150604&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.004.
JIA Honglei, WANG Wenjun, ZHUANG Jian, et al. Design and experiment on reducing soil adhesion and anti-slip structure of profiling elastic press roller[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 20 – 27. (in Chinese)
74 张金波. 深松铲减阻耐磨仿生理论与技术[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
ZHANG Jinbo. Bionic drag reduction and wear-resistant theory and techniques of subsoiler[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
75 张金波, 佟金, 马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 141 – 145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20140422&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.022.
ZHANG Jinbo, TONG Jin, MA Yunhai. Design and experiment of bionic anti-drag subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 141 – 145. (in Chinese)
76 吉林工业大学. 仿生减粘脱附非光滑表面部件:中国, 00134950.3[P]. 2001 – 12 – 26.
77 吉林大学. 仿生旋耕碎茬通用刀片:中国, 200610163206.1[P]. 2007 – 05 – 30.
78 吉林大学. 仿生减阻深松铲柄:中国, 200410010902.X[P]. 2005 – 02 – 23.
79 徐德生. 仿生非光滑耐磨复合涂层的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
80 徐德生, 任露泉, 邱小明, 等. WC/Co 基仿生非光滑耐磨复合涂层的研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 148 – 151.
XU Desheng, REN Luquan, QIU Xiaoming, et al. Study on WC/Co based bionic bon-smoothed and composite coating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 148 – 151. (in Chinese)
81 陈秉聪, 李建桥, 任露泉. 传统犁壁材料脱土性分析研究[J]. 农业机械学报, 1995,26(4): 46 – 49.
82 钱定华. 传统犁壁材料–白口铁对重粘土粘附特性的研究[J]. 农业机械学报, 1965, 8(2): 47 – 52.
83 赵玉凤, 王宏宇, 王荣, 等. 旋耕刀用 65Mn 钢表面渗铬工艺优化及其耐磨性研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(10): 156 – 160.
84 冯旭东, 杨刚, 崔琳珠. 淬火工艺参数对 65Mn 钢组织及硬度的影响[J]. 热处理技术与装备, 2009(3): 70 – 73.
85 杜忠泽,黄俊霞,符寒光,等. 65Mn 钢大塑性变形后的组织与力学性能[J]. 吉林大学学报:工学版, 2006, 36(2): 143 – 147.
86 董占武, 魏世忠, 张国赏, 等. 变质高碳硼钢的冲击磨料磨损行为研究[J]. 润滑与密封, 2008(12): 52 – 54,91.
87 杨军, 王晋华, 符寒光, 等. 热处理对高硼铸钢耐磨性的影响研究[J]. 铸造技术, 2006(10): 1079 – 1081.
88 谢从新. 硼铝共渗钢与单元渗硼钢的磨损特性比较[C]. 中国机械工程学会摩擦学分会. 第五届全国摩擦学学术会议论文集(上册). 中国机械工程学会摩擦学分会, 1992.
89 郑英, 王成磊, 高原, 等. 铝合金表面激光熔覆稀土 CeO_2 + Ni60 组织及摩擦磨损性能[J]. 稀有金属, 2014(5): 800 – 806.
90 周圣丰, 戴晓琴, 郑海忠. 激光熔覆与激光–感应复合熔覆 WC – Ni60A 涂层的结构与性能特征[J]. 机械工程学报, 2012, 48(7): 113 – 118.
91 徐德生,任露泉,邱小明,等. 高频钎焊 WC/Co 仿生非光滑耐磨复合涂层的研究[C]. 中国农业机械学会. 中国农业机械学会成立 40 周年庆典暨 2003 年学术年会论文集. 中国农业机械学会,2003.
92 辛存良, 何世安. 耐磨高分子材料/钛合金的粘接性能研究[J]. 粘接, 2015(4): 72 – 74.
93 张毅, 周志立. 仿生圆盘犁犁体设计与制作[J]. 河南科技大学学报:自然科学版, 2002, 23(3): 1 – 3.
94 朱琳. 磁控共溅射制备农机触土部件材料表面耐磨复合涂层研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
ZHU Lin. Investigation of wear resistant composite coatings deposited on touching soil parts of agricultural machinery by magnetron

co-sputtering[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
95 VILASECA M, PUJANTE J, RAMIREZ G, et al. Investigation into adhesive wear of PVD coated and uncoated hot stamping production tools [J]. Wear, 2013, 308: 148 - 154.
96 STELLA J, GERKE L, POHL M. Study of cavitation erosion and adhesive wear in Cu Sn Ni alloys produced by different casting processes [J]. Wear, 2013, 303: 541 - 545.
97 ROUX S L, BOHER C, PENAZZI L, et al. A methodology and new criteria to quantify the adhesive and abrasive wear damage on a die radius using white light profilometry [J]. Tribology International, 2012, 52: 40 - 49.
98 王兆亮. 起垄铲仿生设计及其降阻特性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
WANG Zhaoliang. Design and analysis of bionic ridger with tillage resistance reduction characteristics[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
99 贾贤, 任露泉, 陈秉聪. 土壤动物体表及仿生复合涂层的润湿性[J]. 材料研究学报, 1996, 10(5): 556 - 560.
100 邓石桥. 仿生犁壁的减粘机理及其仿生设计[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
DENG Shiqiao. The mechanism of reducing soil adhesion and the design of bionic plow[D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)
101 FILIPEK J. Abrasive wear of heat-treated steel under soil conditions [J]. Research in Agricultural Engineering. 2000, 6: 1 - 5.
102 ZHOU H, SUN N, SHAN N, et al. Bio-inspired wearable characteristic surface: wear behavior of cast iron with bio-mimetic units processed by laser[J]. Applied Surface Science, 2007, 53(24): 9513 - 9520.
103 KAROONBOONYANAN S, SALOKHE V M, NIRANATLUMPONG P. Wear resistance of thermally sprayed rotary tiller blades [J]. Wear, 2007, 263: 604 - 608.
104 KANG A S, GREWAL J S, JAIN D, et al. Wear behavior of thermal spray coatings on rotavator blades [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21: 355 - 359.
105 NALBANT M, PALALI A T. Effects of different material coatings on the wearing of plowshares in soil tillage [J]. Turk J. Agric., 2011, 35: 215 - 223.
106 郝建军, 马跃进, 杨欣, 等. 火焰熔覆镍基/铸造碳化钨熔覆层在犁铧上的应用[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 139 - 142.
HAO Jianjun, MA Yuejin, YANG Xin, et al. Experimental investigation on plowshare coated by flame cladding Ni-base cast WC [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 139 - 142. (in Chinese)
107 ROUX S L, BOHER C, PENAZZI L, et al. A methodology and new criteria to quantify the adhesive and abrasive wear damage on a die radius using white light profilometry [J]. Tribology International, 2012, 52: 40 - 49.
108 HORVAT Z, FILIPOVIC D, KOSUTI S, et al. Reduction of mould board plough share wear by a combination technique of hard facing[J]. Tribology International, 2008, 41: 778 - 782.
109 FIELK J M. Interaction of the cutting edge of tillage implements with soil[J]. J. Agric. Eng. Res., 1996, 63(1): 61 - 72.
110 MORRISON Jr J E. Compatibility among three tillage systems and types of plant press wheels and furrow openers for vertisol clay soils[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2002, 18(3): 293 - 295.
111 MARISOLT B, BURTONL J, ROBERTA H. Seeding depth and soil packing affect pure live seed emergence of cuphea[J]. Industrial Crops & Products, 2008, 27(3):272 - 278.
112 BAYHAN Y, KAYISOGLU B, GONULOL E, et al. Possibilities of direct drilling and reduced tillage in second crop silage corn [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 88(1): 1 - 7.
113 贾洪雷, 郑嘉鑫, 袁洪方, 等. 大豆播种机双 V 型筑沟器设计与试验[J]. 吉林大学学报:工学版, 2017, 47(1): 323 - 331.
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of a double-V-shaped furrow opener of soybean seeder[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2017, 47(1): 323 - 331. (in Chinese)
114 吉林大学. 双 V 型筑沟器:中国, 201510063904.3[P]. 2015 - 05 - 06.
115 贾洪雷, 王文君, 庄健, 等. 仿形弹性镇压辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 28 - 34,83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150605&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.005.
JIA Honglei, WANG Wenjun, ZHUANG Jian, et al. Design and experiment of profiling elastic press roller[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(6): 28 - 34,83. (in Chinese)
116 JIA H, WANG W, LUO X, et al. Effects of profiling elastic press roller on seedbed properties and soybean emergence under double row ridge cultivation[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 162: 34 - 40.
117 王文君. 大豆精密播种机仿形仿生镇压装置[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
WANG Wenjun. Bionic press device with profiling mechanism for soybean precision planter[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
118 郭慧. 行间耕播机弹性镇压装置研究与试验[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
GUO Hui. Research and experiment of elastic press device for inter-row till-planter[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
119 ADUL Shakoor Khan. Slection of seed-cum-fertullizer drill: technical considerations[J]. AMA, 1990, 21(1): 35 - 39.

120 贾铭钰. 免耕播种机镇压装置的的实验研究与计算机辅助设计[D]. 北京：中国农业大学，2000.

121 庄健，贾洪雷，马云海，等. 具有滑刀式缺口的圆盘开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(增刊 1)：83－88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2013s116&flag=1&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.016.
ZHUANG Jian，JIA Honglei，MA Yunhai，et al. Design and experiment of sliding-knife-type disc opener[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(Supp.1)：83－88.（in Chinese）

122 狄英凯. 滑刀式缺口圆盘开沟器的设计与试验研究[D]. 长春：吉林大学，2013.
DI Yingkai. Design and experiment of sliding-knife notched disc opener[D]. Changchun：Jilin University，2013.（in Chinese）

123 王庆杰，姚宗路，高焕文，等. 楔刀型免耕开沟器设计与试验[J]. 机械工程学报，2008，44(9)：177－182.
WANG Qingjie，YAO Zonglu，GAO Huanwen，et al. Design and experiment on a wedge shaped no-tillage opener[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering，2008，44(9)：177－182.（in Chinese）

124 刘忠军，刘立晶，杨学军，等. 指夹式玉米免耕精密播种机的设计与试验[J/OL]. 农业工程学报，2016，32(增刊 2)：1－6. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2016z201&flag=1. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z2.001.
LIU Zhongjun，LIU Lijing，YANG Xuejun，et al. Design and experiment of no-till precision planter for corn[J/OL]. Transactions of the CSAE，2016，32(Supp.2)：1－6.（in Chinese）

125 贾洪雷，姜鑫铭，郭明卓，等. 2BH－3 型玉米行间播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2015，46(3)：83－89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20150312&flag=1&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.012.
JIA Honglei，JIANG Xinming，GUO Mingzhuo，et al. Design and experiment of type 2BH－3 inter-row seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(3)：83－89.（in Chinese）

126 贾洪雷，郑嘉鑫，袁洪方，等. 仿形滑刀式开沟器设计与试验[J/OL]. 农业工程学报，2017，33(4)：16－24. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170403&flag=1. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.003.
JIA Honglei，ZHENG Jiaxin，YUAN Hongfang，et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener[J/OL]. Transactions of the CSAE，2017，33(4)：16－24.（in Chinese）

127 吴俊，汤庆，袁文胜，等. 油菜毯状苗移栽机开沟镇压部件设计与参数优化[J/OL]. 农业工程学报，2016，32(21)：46－53. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20162106&flag=1. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.21.006.
WU Jun，TANG Qing，YUAN Wensheng，et al. Design and parameter optimization of ditching and compacting parts of rapeseed carpet seedling transplanter[J/OL]. Transactions of the CSAE，2016，32(21)：46－53.（in Chinese）

128 王景立，刘选伟，韩明月，等. 双圆盘式覆土器的优化设计[J]. 中国农机化学报，2016，37(1)：37－39.

129 王景立. 精密播种机覆土与镇压过程对种子触土后位置控制的研究[D]. 长春：吉林大学，2012.
WANG Jingli. The research of position control after seed contacting soil in the process of soil covering and rolling with precision seeder[D]. Changchun：Jilin University，2012.（in Chinese）

130 贾洪雷，姜鑫铭，郭明卓，等. V－L 型秸秆粉碎还田刀片设计与试验[J/OL]. 农业工程学报，2015，31(1)：28－33. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20150104&flag=1. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2015.01.004.
JIA Honglei，JIANG Xinming，GUO Mingzhuo，et al. Design and experiment of V－L shaped smashed straw blade[J/OL]. Transactions of the CSAE，2015，31(1)：28－33.（in Chinese）

131 蔡国华，何进，李洪文，等. 固定垄保护性耕作条件下松垄割刀性能对比分析[J]. 农业机械学报，2010，41(12)：22－28.
CAI Guohua，HE Jin，LI Hongwen，et al. Comparative analysis of three ridge-loosing cutters based on permanent raised bed conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2010，41(12)：22－28.（in Chinese）

132 赵佳乐. 留茬行间交替耕作模式配套播种机关键技术研究[D]. 长春：吉林大学，2015.
ZHAO Jiale. Research of key technology of no-tillage seeder for stubble retain with alternating tillage[D]. Changchun：Jilin University，2015.（in Chinese）

133 吉林大学. 变曲率轮齿式破茬松土器：中国，102918945A[P]. 2013－02－13.

134 姜铁军. 免耕播种机轮齿式破茬机构设计与试验研究[D]. 长春：吉林大学，2013.
JIANG Tiejun. Design and experimental study on gear-tooth stubble cutting mechanism of no-tillage seeder[D]. Changchun：Jilin University，2013.（in Chinese）

135 吉林大学. 一种仿形仿生镇压辊：中国，201410177756.3[P]. 2014－07－16.

136 吉林大学. 组合式播种施肥开沟器：中国，201210450701.6[P]. 2013－03－06.

137 吉林农业大学. 可变力苗带镇压器：中国，200920093853.9[P]. 2010－07－14.

138 吉林大学. V－L 型秸秆粉碎还田刀片：中国，201110115590.9[P]. 2011－08－31.