西北林学院学报 2019,34(3):240-245
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2019.03.38

灌木建植装备设计与主要部件力学和功率分析

王欣悦[1,2],王　典[1,2*],刘晋浩[1,2],黄青青[1,2],王建利[3],王润成[4],胡德江[4]

(1.北京林业大学,北京 100083;2.林业装备与自动化国家林业和草原局重点实验室,北京 100083;
3.北京工商大学,北京 100048;4.张家口海特钢管有限责任公司,河北 张家口 075000)

摘　要:针对沙地机械化造林作业问题,设计了灌木建植装备,提出了起垄、栽植、覆土和送苗相结合的机械化造林作业方案。根据工况条件,确定了灌木建植装备的总体结构、工作原理和结构参数,并针对主要部件锥形鸭嘴植苗装置进行力学分析和灌木建植装备进行功率分析,进而为灌木建植装备的液压系统设计提供参考。结果表明,随着装置开启角度(0°～45°)和插土深度(0～100 mm)变化,活动鸭嘴尖端和中间位置受到的土壤压力变化明显,尖端和中间位置在插土深度为55 mm,开启角度为24°附近达到最大值80 N和138 N,随之分别稳定在72 N和124 N。分析土壤压力变化成因,前期的有限元仿真结果与试验结果变化趋势相近,数值相差15%。利用多项式方程拟合活动鸭嘴尖端和中间位置土壤压力曲线,决定系数>0.95。在ADAMS软件中分析灌木建植装备的功率情况,起垄覆土板阻力空载情况下,最大功率为50 kW。

关键词:灌木建植装备;锥形鸭嘴植苗装置;土壤压力;功率

中图分类号:S781.29　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2019)03-0240-06

Design of Shrub-planting Equipment and Mechanical Analysis and Power Analysis of Key Components

WANG Xin-yue[1,2], WANG Dian[1,2*], LIU Jin-hao[1,2], HUANG Qing-qing[1,2], WANG Jian-li[3], WANG Run-cheng[4], HU De-jiang[4]

(1. *Beijing Forestry University, Beijing* 100083. *China*; 2. *Key Laboratory of Forestry Equipment and Automation of State Forestry and Grassland Bureau, Beijing* 100083, *China*; 3. *Beijing Technology And Business University, Beijing* 100048, *China*; 4. *Zhangjiakou Hite Steel Pipe Co., Ltd., Zhangjiakou* 075000, *Hebei*, *China*)

Abstract: Aiming at solving the problem of mechanized forestation on difficult site, a shrub-planting equipment was designed, and a mechanized forestation scheme, including ridging, planting, covering soil and seedling feeding was put forward. According to the working conditions, the overall structure, working principle and structural parameters of the equipment were determined. The dynamic analysis of the main parts for the tapered-duckbill planting mechanism and the power analysis of the whole were carried out. The soil resistance test of tapered-duckbill planting mechanism indicated that with the change of opening angle from 0° to 45° and soil insertion depth from 0 mm to 100 mm, the soil pressure on the tip and middle position of the moving duckbill changed obviously, and the causes of soil pressure change were analyzed. The tip and middle reached the maximum values of 80 N and 138 N at the depth of 55 mm and the opening angle of 24°, and then they stabilized at 72 N and 124 N respectively. The former finite element simulation results were similar to the experimental results, and the difference was 15%. The polynomial equation was used to fit the soil pressure curve at the tip and middle of the moving duck, and the coefficient of determination was

收稿日期:2018-09-12　**修回日期**:2018-11-21
基金项目:中央高校基本科研项目(2016ZCQ08);国家科技支撑计划项目(2015BAD07B02)。
作者简介:王欣悦,男,硕士研究生,研究方向:林业工程装备及自动化。E-mail:wxy1303942249@163.com
* **通信作者**:王　典,男,博士,副教授,研究方向:林业工程装备及自动化。E-mail:wangdian@bjfu.edu.cn

greater than 0.95. The maximum power of the equipment that was analyzed by ADAMS software was 50 kW when the resistance of the ridging covering plate was empty, and it provided a reference for the design of the hydraulic system of the shrub-planting equipment.

Key words: shrub-planting equipment; tapered duckbill-planting mechanism; soil pressure; power

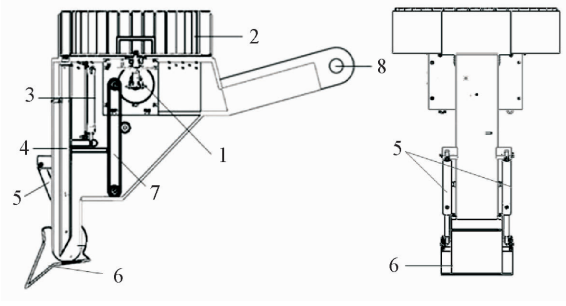
为了治理沙地,人们采用了很多有效的方法,如人工造林,飞播恢复等,栽植对象多为灌木-草本植物。随着人工成本的提高,作业环境的变化,沙地造林作业趋向于机械化。关于沙地造林装备的研究,国内学者研究较少。宋代平[1]研制了生态植树机,该装备适用于林区造林作业,由松土机构、供苗机构和栽植机构组成,其特点在于将运动机构横向布置,可以依次完成栽植作业,提高了栽植效率。由于植树机为小型拖拉机驱动,功率不高,作业安全性低,不适于困难立地作业。苗庆波[2]等在 ADAMS 中对一种鸭嘴植苗装置进行了运动仿真分析,得出运动速度过小或者过大对阻力的影响非常明显的结论。贺雨田[3]等引入铲板结构刃缘相近的概念,研究了相近刃缘条件下不同铲板结构的耕作阻力,发现采用简单铲板结构所受土壤阻力小于复杂铲板结构的结论。贾洪雷[4]等简述了农业机械触土部分的发展和现状,总结了近年来触土部件的阻力理论模型、性能特点、仿生设计以及制备材料工艺,并且对优化设计提出了展望。国外关于造林装备的研究比较多,实现了机械化信息化,可以适应于平原、山地和沙地造林作业,为我国沙地造林提供了参考。

本研究区位于民勤绿洲与腾格里沙漠结合区。为了防止沙漠的继续蔓延,需在此地区进行一定的造林作业。民勤绿洲与腾格里沙漠结合区的土壤类型多为风沙土,表层 20 cm 为干沙层,土壤贫瘠,不适合栽植作业,20 cm 以下的土壤环境基本能适合栽植要求。因此需要设计一种灌木建植装备,实现一次性完成起垄、栽植、覆土及送苗作业,适于沙地作业要求,并且对其中的栽植作业部分进行力学分析,对灌木建植装备进行功率分析,以确定液压驱动系统的参数。

1　总体结构和工作原理

灌木建植装备由起垄覆土部分、栽植部分和送苗部分组成[5-6],起垄覆土部分包括液压驱动装置 A 和起垄覆土板;栽植部分包括液压驱动装置 B、锥形鸭嘴植苗装置和链传动部件;送苗部分包括间歇转动机构和苗盘(图 1)。

装备由挖掘机提供动力。装备作业时,起垄覆土板在液压驱动装置 A 的作用下逆时针转动翻耕沙地,挖开干沙层,由于液压驱动装置 A 本身的行程限制,使得起垄覆土板运动路径有限,满足起垄和覆土的作业要求,形成土壤苗床;锥形鸭嘴植苗装置在土壤苗床上进行成穴和栽植作业,同样由于液压驱动装置 B 行程的限制,使得植苗装置的插土深度得到保证;随后装备上提,起垄覆土板回位,装备下压,实现覆土。另外苗盘在间歇转动机构的作用下实现送苗作业,送苗作业配合栽植作业进行,避免出现堵苗现象。



注:1. 间歇转动机构;2. 苗盘;3. 液压驱动装置 A;4. 锥形鸭嘴植苗装置;5. 液压驱动装置 B;6. 起垄覆土板;7. 链传动;8 挂接位置。

图 1　灌木建植装备结构示意

Fig. 1　Structural diagram of the shrub-planting equipment

2　总体结构参数

基于干沙层深度,起垄覆土部分最大起垄深度为 250 mm。参照灌木种植包尺寸,灌木建植包的土钵部分高度为 80～100 mm,锥形鸭嘴植苗装置的最大插土深度为 100 mm,灌木种植包承载部分和滑动部分最小内径为 60 mm。整机主要结构参数见表 1。

表 1　灌木建植装备主要结构参数

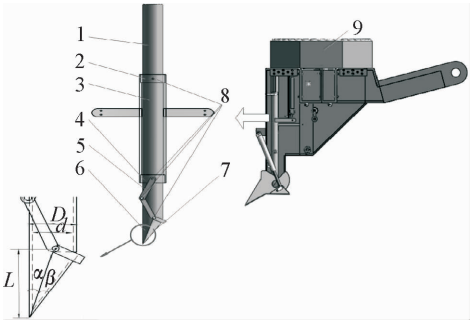
Table 1　The structural parameters of shrub-planting equipment

数值类型	参数
外形尺寸(长×宽×高)/mm	2 400×1 125×1 940
挂接方式	挖掘机
装备质量/kg	1 542
栽植频率/(棵·h^{-1})	240
最大插土深度/mm	100
最大起垄深度/mm	250

3　主要部件设计与分析

孙伟[7]等对鸭嘴成穴器的选型进行了研究,发现不论从入土难易程度还是从所成穴孔大小和动土量多少,锥形鸭嘴都要优于楔形鸭嘴,因此设计时植

苗装置的触土部分选择锥形鸭嘴。锥形鸭嘴植苗装置选择材料 65 Mn[8]，最大开启角度为 45°。外管(D=Φ68 mm)，内管(d=Φ60 mm)，上下衬套、连接小臂、固定鸭嘴(α=15°，L=110 mm 与内管固连)和活动鸭嘴(β=15°)。锥形鸭嘴植苗装置插土成穴作业时为了保证外管与内管保证同轴运动，在外管与内管接触部分设置铜套，作为滑动摩擦部件(图 2)。



注：1. 内管；2. 上衬套；3. 外管；4. 下衬套；5. 连接小臂；6. 固定鸭嘴(15°)；7. 活动鸭嘴(15°、20°、25°)；8. 连接螺栓；9. 灌木建植装备。

图 2 锥形鸭嘴植苗装置

Fig. 2 The tapered duckbill-planting mechanism

3.1 锥形鸭嘴植苗装置力学分析

锥形鸭嘴植苗装置插土成穴过程受力分析[9-11](图 3)。图 3 中 F 表示锥形鸭嘴植苗装置插土成穴时动力，由于匀速插土，即锥形鸭嘴植苗装置受到的土壤阻力等于动力，F_{N1} 表示固定鸭嘴受到的土壤压力，f_{N1} 表示固定鸭嘴受到的土壤摩擦力，F_{N2} 表示活动鸭嘴受到的土壤压力，f_{N2} 表示活动鸭嘴受到的土壤摩擦力，δ 表示活动鸭嘴的开启角度，β 表示活动鸭嘴的楔角。

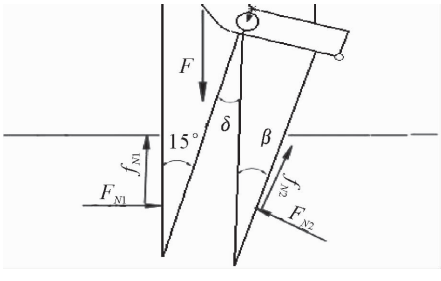


图 3 锥形鸭嘴植苗装置插土成穴过程受力分析

Fig. 3 The force analysis of the tapered duckbill-planting mechanism for the digging process

在软件 ANSYS LS-Dyna 分析[12-16]活动鸭嘴受到的土壤压力。采用的土壤材料为 MAT147[12-14](MAT_FHWA_S－OIL)。该材料采用的是基于广义 *von Mises* 屈服准则的 *Drucker-Prager*[18] 模型，其表达式为：

$$F=-P\sin\varphi+\sqrt{J_2K(\theta)^2+\gamma^2\sin^2\varphi}-c\cos\varphi \quad (1)$$

式中，P 为压力(N)；φ 为内摩擦角(°)；J_2 为应力偏张量的第二不变量；$K(\theta)$为应力罗德角函数；c 为粘聚力(N)；γ 为定义修正后屈服面和标准广义 *von Mises* 屈服面之间的贴合度参数。

环刀法采集研究地区干沙层下部土样，土壤材料模型的参数根据土壤物理性质测试方法进行测定，土壤类型为砂质土[17-18]，土样物理参数[19]见表 2。

根据测量得到的物理参数，在有限元软件中[19-21]编辑土壤材料类型。模型中锥形鸭嘴植苗装置-土壤的接触属性属于罚函数，采用有限滑移[14-15]，法向为硬接触。网格尺寸为 20 mm，尺寸功能为自适应，可以根据分析过程自动调整尺寸大小，总共划分出 13 464个节点和 21 458 个单元。在锥形鸭嘴植苗装置与土壤相互作用的部分采用了局部尺寸控制，细化了网格[16]，得出活动鸭嘴受到的土壤压力与插土深度和开启角度之间的关系(图 4)。

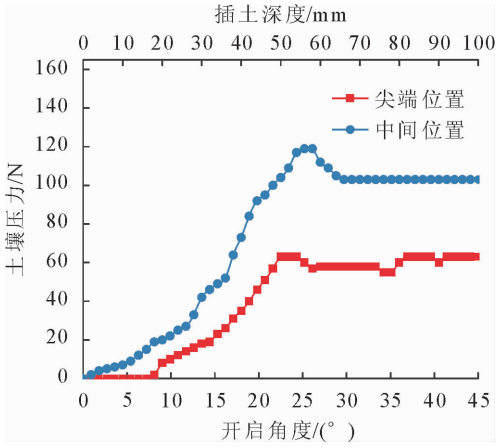


图 4 活动鸭嘴受到的土壤压力有限元分析结果

Fig. 4 The result of the finite element of the soil pressure on the active duckbill

3.2 锥形鸭嘴植苗装置力学试验

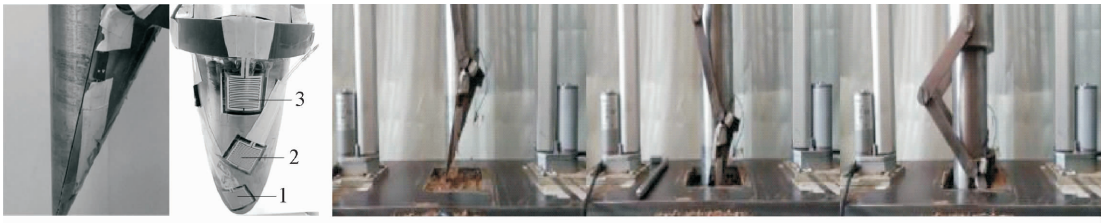
3.2.1 试验目的 分析锥形鸭嘴植苗装置活动鸭嘴不同位置受到的土壤压力变化情况，建立力学数学模型，为后续灌木建植装备功率分析提供土壤压力负载参考。

3.2.2 试验条件 试验地点选定在北京林业大学林业与环境特种装备研究中心。试验设备包括：电动推杆(推力为 1 260 N，行程为 300 mm，速度为 15 mm·s^{-1} 代替液压驱动装置 1)，锥形鸭嘴植苗装置，土槽，RFP 薄膜压力传感器(量程为 200 N)以及传感器测量系统[17-19]和笔记本电脑等。RFP 薄膜压力传感器粘贴活动鸭嘴的表面见图 5(a)，根据 RFP 薄膜压力传感器与活动鸭嘴的相对尺寸，将 RFP 薄膜压力传感器 1、2、3 粘贴在活动鸭嘴尖端、中间位置和末端。活动鸭嘴成穴过程见图 5(b)。

表 2　土样物理参数

Table 2　The physical parameters of soil sample

物理参数	土壤密度 /(g·cm^{-3})	土粒比重 /(g·cm^{-3})	含水率 /%	内聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa
数据	2.62	2.74	11	0.03	28.5	28	76.9

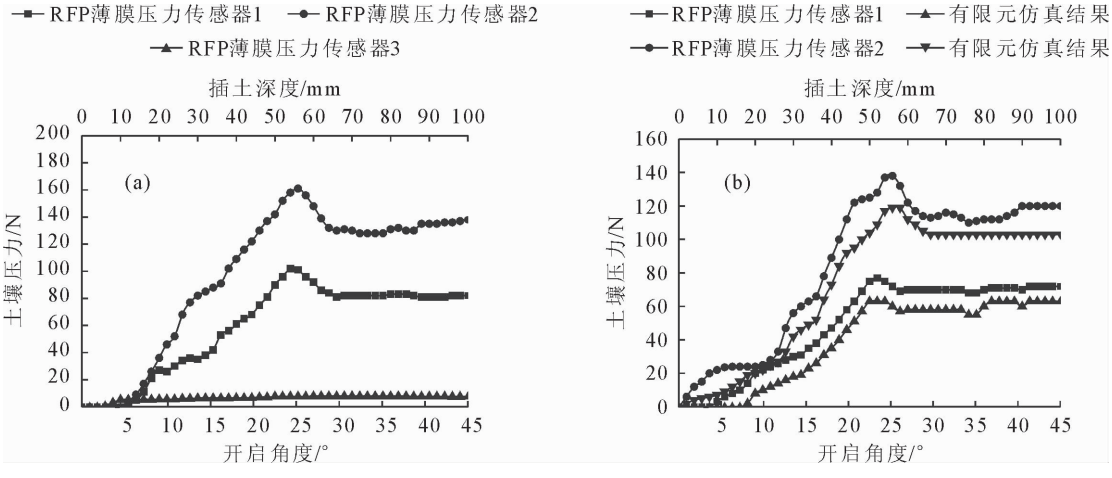


注:(a)RFP 薄膜压力传感器,1、2、3 的粘贴位置;(b)活动鸭嘴成穴过程。

图 5　锥形鸭嘴植苗装置试验

Fig. 5　Test of the tapered duckbill-planting mechanism

3.2.3　试验结果及分析　锥形鸭嘴植苗装置开启角度、插土深度-活动鸭嘴受到的土壤压力关系见图 6(a)。横坐标代表锥形鸭嘴植苗装置的开启角度(0°～45°)、插土深度(0～100 mm),纵坐标代表活动鸭嘴受到的土壤压力(N)[22-25]。图 6(b)为锥形鸭嘴植苗装置试验结果与有限元分析结果对比。选取 RFP1、RFP2 薄膜压力传感器受到的压力作为分析对象[19-20]。



注:(a)活动鸭嘴受到的土壤压力-开启角度、插土深度关系;(b)试验结果与有限元结果对比。

图 6　锥形鸭嘴植苗装置试验结果

Fig. 6　Test result of the tapered duckbill-planting mechanism

如图 6(a)所示,随着插土深度、开启角度的不断增加,受到的土壤压力逐渐变大。RFP 薄膜压力传感器 1 和 RFP 薄膜压力传感器 2 在插土深度为 55 mm,开启角度为 24°时达到最大值 80 N 和 138 N,因为活动鸭嘴在运动过程中,随着插土深度、开启角度的变大,土壤紧实度逐渐变大,活动鸭嘴表面受到的土壤压力不断变大,当插土深度达到 55 mm,开启角度达到 24°时,土壤由于土槽边界的限制,土壤紧实度达到最大;当插土深度＞55 mm,开启角度＞24°时,土壤表面的扰动量明显增加,土壤紧实度下降,活动鸭嘴受到的土壤压力也随之下降,随之稳定在 72 N 和 124 N。RFP 薄膜压力传感器 2 受到的土壤压力在插土成穴中始终保持最大,因为活动鸭嘴在运动过程中 RFP 薄膜压力传感器 2 的触土量始终大于 RFP 薄膜压力传感器 1 的触土量。RFP 薄膜压力传感器 3 受到的土壤压力始终保持最小,稳定在 6 N,因为末端位置触土量最少。图 6(b)为锥形鸭嘴植苗装置活动鸭嘴试验结果与有限元结果对比[27-30],试验结果[31-32]比有限元分析结果变化趋势相近,相差 15%。对活动鸭嘴尖端、中间位置受到的土壤压力采用多项式曲线拟合原理进行数学分析,得到的拟合曲线数学模型见表 3。

表 3 活动鸭嘴尖端和中间位置拟合曲线数学模型

Table 3 Mathematical model of the fitting curve of the tip and middle of the active duckbill

位置	拟合曲线方程	决定系数
尖端	$z=2.365e^{11}+6.862e^{14}\delta-6.862e^{14}x-6.081e^{14}\delta x+6.083e^{14}x^2$	0.954 1
中间位置	$z=-22.4+9.33e^{13}\delta-4.199e^{13}x-3.01e^{12}\delta x+1.354e^{12}x^2$	0.965 3

从拟合方程可以看出，决定系数均>0.95，拟合程度较高，可以表征活动鸭嘴尖端和中间位置受到的土壤压力的变化趋势。即表征 F_{N2} 与开启角度(δ)、插土深度(x)之间的函数关系表示为公式：

$$F_{N2}=[P_{00}+P_{01}\delta+P_{02}x+P_{03}\delta x+P_{04}x^2] \quad (2)$$

式中，P_{00}、P_{01}、P_{02}、P_{03}、P_{04} 为常数；x 为锥形鸭嘴植苗装置插土深度(mm)；δ 为锥形鸭嘴植苗装置开启角度(°)；F_{N2} 为锥形鸭嘴植苗装置活动鸭嘴受到的土壤压力(N)。

3.3 灌木建植装备功率分析

根据灌木建植装备主要结构参数、锥形鸭嘴植苗装置力学试验中的插土深度和活动鸭嘴受到的土壤压力的数学模型，在 ADAMS 软件中分析灌木建植装备的功率，为灌木建植装备液压系统设计提供参数依据。对虚拟样机施加固定副、移动副、转动副和位移驱动，实现虚拟样机起垄、栽植、覆土及送苗作业。针对移动副的位移驱动，编辑锥形鸭嘴植苗装置处液压驱动装置 A 和起垄覆土板处液压驱动装置 B 的位移函数见(3)、(4)。灌木建植装备功率分析见图 7。

$$function=step(time,0,0,5,150)+step(time,5,0,10,-140) \quad (3)$$

$$function=step(time,0,0,5,60)+step(time,5,0,10,-60) \quad (4)$$

按照上述得到的土壤压力数学模型编辑活动鸭嘴中间位置的力学函数为：

$$function=polynomial(\delta,x,-22.4,9.33e^{13},-4.199e^{13},-3.01e^{12},1.354e^{12}) \quad (5)$$

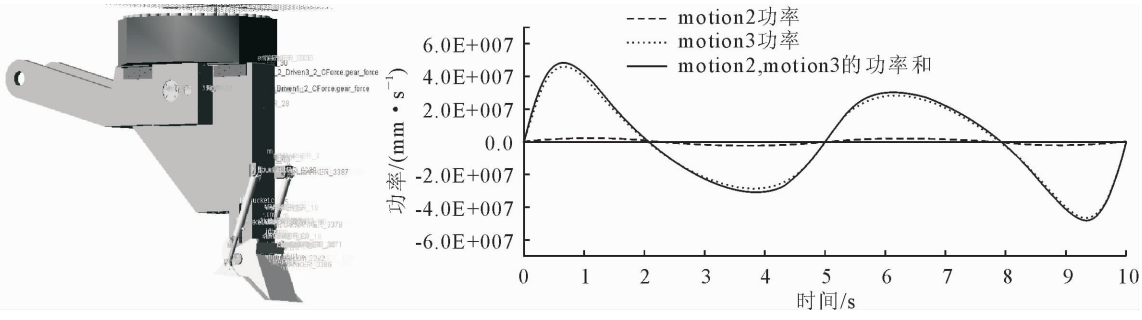


图 7 灌木建植装备功率分析

Fig. 7 Power analysis of the shrub-planting equipment

图 7 为 MOTION_2POWER_ConsumptionMag、MOTION_3POWER_ConsumptionMag 和 ADD(plot_1.curve_2)分别代表液压驱动装置 A、B 功率和总功率。在起垄覆土板推土阻力负载不计的条件下，灌木建植装备液压驱动装置总功率最大达到 50 kW，为灌木建植装备液压系统的设计提供参考。

4 结论

本研究设计了适用于沙地条件下的灌木建植装备，主要包括起垄覆土部分、栽植部分和送苗部分，实现一次性完成起垄、栽植、覆土及送苗作业。开展了栽植部分锥形鸭嘴植苗装置的力学分析，确定了活动鸭嘴受到的土壤压力变化曲线和最大土壤压力作用点，尖端和中间位置在插土深度为 55 mm，开启角度为 24°时达到最大值 80 N 和 138 N，随之分别稳定在 72 N 和 124 N。利用多项式拟合活动鸭嘴尖端和中间位置受到的土壤压力，拟合方程的决定系数>0.95，表明该类型多项式可以近似表征受到的土壤压力。

根据灌木建植装备的主要结构参数和锥形鸭嘴植苗装置的试验分析结果，基于 ADAMS 软件，分析灌木建植装备功率，最大功率达到 50 kW，为灌木建植装备的液压系统设计提供参考。

参考文献：

[1] 宋代平. 生态植树机动态性能的理论研究[D]. 哈尔滨：东北林业大学，2004.

[2] 苗庆波，张秀花. 一种鸭嘴式压穴和播种一体装置的设计与仿真研究[J]. 中国科技论文，2017，12(10)：1092-1096.
MIAO Q B，ZHANG X H. Design and modeling on the integrated device of duckbill punch and sowing [J]. Sci-Tech Papers in China，2017，12(10)：1092-1096. (in Chinese)

[3] 贺雨田，吕彭民. 相近刃缘条件下不同铲板结构的切削阻力研

究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2016,47(12):4056-4061.
HE Y T,LYU P M. Study on cutting resistance of different blade structures under similar edge conditions[J]. Journal of Central South University:Natural Science,2016,47(12):4056-4061. (in Chinese)

[4] 贾洪雷,王万鹏,陈志,等. 农业机械触土部件优化研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2017,48(7):1-13.
JIA H L,WANG W P,CHEN Z,*et al*. Research status and prospect of optimization of soil-end contact components in agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Machinery,2017,48(7):1-13. (in Chinese)

[5] 王典,王欣悦,尹崇,等. 一种植苗机的机械结构[P]. 中国专利:CN201720725735. X,2018-01-16.

[6] 王典,王欣悦,王栋,等. 起垄覆土装置[P]. 中国专利:CN201720725735. X,2018-03-06.

[7] 孙伟,吴建民. 鸭嘴式插土成穴器的选型与研究[J]. 甘肃农业大学学报,2009,44(5):140-142.

[8] 中国机械工业联合会. JB/T 10291-2013 中华人民共和国行业标准:旱地移栽机械[S]. 北京:机械工业出版社,2002:1-14.

[9] 高博. 重庆市典型成穴力学特性及深松性能研究[D]. 重庆:西南大学,2017.

[10] 方会敏,姬长英,张庆怡,等. 基于离散元法的旋耕刀受力分析[J]. 农业工程学报,2016,32(21):54-59.

[11] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 2 版. 杭州:浙江大学出版社,1997.

[12] 马云海,裴高院,王虎彪,等. 挖掘机獾爪趾仿生斗齿提高其插土性能仿真与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(18):67-72.

[13] 蒋建东,高洁,赵颖娣,等. 基于 ALE 有限元仿真的土壤切削振动减阻[J]. 农业工程学报,2012,28(supp. 1):33-38.

[14] 郭志军,杜干,李忠利,等. 触土曲面形式对推土板减阻性能影响的正交试验[J]. 农业机械学报,2015,46(7):372-378.

[15] 杨菊,王成武,王凤花,等. 土壤-耕具接触的有限元仿真分析[J]. 中国农业大学学报,2015,20(2):185-193.
YANG J,WANG C W,WANG F H,*et al*. Finite element analysis of soil-tillage contact[J]. Journal of China Agricultural University,2015,20(2):185-193. (in Chinese)

[16] 杨菊. 基于扩展有限元法和离散元法的土壤—耕具接触研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2014.

[17] 郭俊,张庆怡,Muhammad S M,等. 仿鼹鼠足趾排列的旋耕-秸秆粉碎锯齿刀片设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(6):43-50.
GUO J,ZHANG Q Y,MUHAMMAD S M,*et al*. Design and experiment of rotary plough-stalk comminution serrated blade with imitation of squirrel's toe arrangement[J]. Journal of Agricultural Engineering,2017,33(6):43-50. (in Chinese)

[18] 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等. 仿形滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(4):16-24.
JIA H L,ZHENG J X,YUAN H F,*et al*. Design and test of profile cutter blade opener[J]. Journal of Agricultural Engineering,2017,33(4):16-24. (in Chinese)

[19] 王巍,程玉龙,王博,等. 基于 ANSYS-DYNA 的松木座椅冲击仿真分析[J]. 西北林学院学报,2018,33(1):257-261.
WANG W,CHENG Y L,WANG B,*et al*. Impact simulation analysis of solid wood chair based on ANSYS-DYNA[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(1):257-261. (in Chinese)

[20] 欧阳益斌,李立君,汤刚车,等. 油茶林抚育机履带底盘设计与试验研究[J]. 西北林学院学报,2018,33(2):252-256.
OUYANG Y B,LI L J,TANG G C,*et al*. Crawler chassis design and experimental study of camellia oil forest tending machine[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(2):252-256. (in Chinese)

[21] 马岩,宋明亮,汪茜茜,等. 强化地板数控横向开榫机主轴的有限元分析[J]. 西北林学院学报,2018,33(2):257-262.
MA Y,SONG M L,WANG X X,*et al*. Finite element analysis of the spindle of reinforced floor CNC transverse tenoner[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(2):257-262. (in Chinese)

[22] 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]. 农业机械学报,2016,47(9):62-72.
ZHENG K,HE J,LI H W,*et al*. Research on deep soil loosening blade with broken line based on discrete element soil model[J]. Journal of Agricultural Machinery,2016,47(9):62-72. (in Chinese)

[23] 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]. 农业机械学报,2017,48(2):60-67.
LIU J A,WANG X Y,LI H W,*et al*. Optimization of deep loosening structure parameters based on soil disturbance and traction resistance[J]. Journal of Agricultural Machinery,2017,48(2):60-67. (in Chinese)

[24] 翟力欣. 犁体结构与工作参数对流变型插土成穴阻力的影响研究[D]. 南京:南京农业大学,2011.

[25] IBRAHMI A,BENTAHER H,HAMZA E,*et al*. 3D finite element simulation of the effect of mouldboard plough's design on both the energy consumption and the tillage quality[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2017,90(1/4):473-487.

[26] BLEDNYKH V V,SVECHNIKOV P G,TROYANOVSKAYA I P. Tractor plough with repeated cutting angle on working elements[J]. Procedia Engineering,2017,206:1577-1582.

[27] BOSIO F,BASSINI E,SALAZAR C G O,*et al*. The influence of microstructure on abrasive wear resistance of selected cemented carbide grades operating as cutting tools in dry and foam conditioned soil[J]. Wear,2017,394.

[28] 康建明,李树君,杨学军,等. 圆盘式开沟机作业功耗仿真分析及试验验证[J]. 农业工程学报,2016,32(13):8-15.
KANG J M,LI S J,YANG X J,*et al*. Simulation analysis and experimental verification of power consumption for disc type trencher[J]. Journal of Agricultural Engineering,2016,32(13):8-15. (in Chinese)

[29] 丁启朔,葛双洋,任骏,等. 水稻土深松阻力与土壤扰动效果研究[J]. 农业机械学报,2017,48(1):47-56.
DING Q S,GE S Y,REN J,*et al*. Study on the effect of deep loose soil resistance and soil disturbance in paddy soil[J]. Journal of Agricultural Machinery,2017,48(1):47-56. (in Chinese)

[30] 赵占军. 土壤机械阻力连续测量装置的设计与试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.

[31] 张琰,黄河,任露泉. 挖掘机仿生斗齿土壤切削试验与减阻机理研究[J]. 农业机械学报,2013,44(1):258-261.

[32] 丁为民. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2011.