

复合切削式烟草中耕培土机设计与试验

张秀丽 全振伟 李连豪 李拥军 侯朝朋 夏云飞
(河南农业大学机电工程学院, 郑州 450002)

摘要: 为提高烟草大田中耕培土作业质量和效率,设计了复合切削式烟草中耕培土机。对样机关键部件进行了分析与设计,阐明了复合切削原理,确定了液压传动系统、垄距调节装置、垄形坡度调节装置、垄底宽调节装置结构及工作参数,同时分析了复合切削式培土总成进行培土作业的工作过程,得到满足培土作业的螺旋培土刀的最低转速和几何参数等。田间试验结果表明,当作业速度为 2.5 ~ 3.2 km/h 时,碎土率为 90%,培土厚度合格率为 95%,培土垄形坡度合格率为 93%,培土高度为 400 mm,沟面宽度为 750 mm,满足设计和实际作业要求。

关键词: 烟草; 中耕培土机; 复合切削
中图分类号: S224.1; S365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0073-09

Design and Experiment of Tobacco Hilling Machine for Compound Cutting

ZHANG Xiuli TONG Zhenwei LI Lianhao LI Yongjun HOU Chaopeng XIA Yunfei
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Cultivation can remove weeds between the ridges, improve the nutritional conditions of tobacco, and increase the ability of lodging resistance and yield of tobacco during the growth in field. In order to improve the quality and efficiency of field management and cultivation and hilling during tobacco's middle tillage, a tobacco hilling machine for compound cutting was designed. Based on the prototype, key parts were analyzed and designed, and the principle of compound cutting was clarified. The structure and operation parameters of adjustment device of ridge distance, ridge shape angle, ridge bottom width and hydraulic transmission system were determined. The oblique cutting of the plough and the milling of the spiral earth cutter were analyzed, and the positive milling and reverse milling of the spiral earth cutter were tested. The results showed that the working effect of the spiral earth cutter was better in the reverse milling. At the same time, the operation process of hilling of assembling for compound cutting was analyzed, and the necessary work conditions to make sure that the minimum speed and geometric parameter of spiral soil knife were obtained by analysis and calculation. For the relevant work performance test of prototype, the field experimental results showed that under the condition of operation speed of 2.5 ~ 3.2 km/h, the soil-breaking rate was 90%, the qualification rate of hilling thickness was 95%, the qualification rate of ridge shape angle was 93%, the hilling of height was 400 mm, the width of furrow was 750 mm. The test results met the design and practical requirements. The research conclusion had great theoretical value and practical significance to the design of machine which worked for tobacco hilling.

Key words: tobacco; cultivation and hilling machine; compound cutting

0 引言

烟草中耕作业可以除去垄间和株间杂草,减少杂草对土壤内营养的消耗,提高烟草在生长过程中

的营养条件;垄间松土可以切除土壤间的毛细管,减缓水分的蒸发,起到蓄水保墒、防止干旱的作用;还可以对土壤进行疏松,增加土壤中氧气的含量,加强植株作物的呼吸作用^[1-3];疏松的土壤加大了雨水

收稿日期: 2018-05-31 修回日期: 2018-07-02
基金项目: 河南省科技攻关项目(172102110058)、河南省高等学校重点科研项目(16A416006)、河南省科技厅产学研项目(152107000085)和河南省科技开放合作计划项目(172106000015)
作者简介: 张秀丽(1973—),女,副教授,主要从事现代农业装备技术研究,E-mail: zhangxiuli619@126.com

的渗透能力,有利于雨水渗入,能够减少水土流失,增加土壤含水量;中耕培土后,土壤疏松,土壤受光面积增大,吸收太阳辐射的能力增强,散热能力减弱,可以提高土壤温度;另外进行中耕培土作业可以抗倒伏,增加作物的产量^[4-6]。

目前,烟草中耕培土有人工中耕培土、机械中耕培土两种方法^[7]。其中人工中耕培土作业是利用锄头在烟垄周围进行松土和除草,然后将垄周围的土堆积到烟苗根部的周围,劳动工作量大,效率低,成本高,培土质量没有机械培土好,不利于田间管理;机械中耕培土作业是由中耕培土机在已经完成揭膜的烟田垄沟上行驶,驱动松土机具松动垄边上的土,实现破碎土壤和除草功能,随后培土机具将碎土翻转堆积到烟苗的根部周围。国外培土作业整机配合良好^[8],COLLINS^[9]发明的烟田培土机,作业时培土铲将土壤抛向作物行内形成垄,而压辊用于压紧行内侧及下侧土壤;日本研制的 V600 + 培土整形机,能够适应大面积的田间作业,但其价格昂贵,不适合国内生产状况。相比而言,国内主要是一些小型中耕培土机械^[10-12],目前国内所用培土机械多与手扶拖拉机配套使用,主要有螺旋式、圆盘式、铤盘式、铤式、犁刀式等类型^[13-15]。车刚等^[16]研究设计了全方位复式中耕机,能一次完成深松、施肥和除草等多项作业。吕金庆等^[17]、石林榕等^[18]对驱动式马铃薯中耕机关键部件进行了设计,确定了碎土刀的结构参数等。吕美巧等^[19]设计了新型甘蔗中耕培土机,用于浙江一带的窄行甘蔗中耕、起垄、培土施肥等作业,操作简单。张婷等^[20]对甘蔗中耕施肥培土机进行了设计优化,解决了机器易出现动力输出轴角度难控制、传动轴易断裂等问题。张松泓^[21]对电动旋耕培土机进行了设计研究,完成了电驱动系统的设计以及动力匹配。郑俊等^[22]对开沟式和盒式 1WG-6.3 型自走式小型起垄机进行了田间试验与研究。张阳光等^[23]对烤烟田间管理培土机进行了研究设计和田间性能分析。对于目前市场上的中耕培土机械来说,基本上都能完成作物的中耕培土,但大多数中耕机械培土高度较低,难以达到高培土^[24-26],起不到培土抗倒伏的作用;而且中耕机械上缺少土壤流向控制机构,土壤随意地撒,易造成作物幼苗的损伤;有的机器单垄培土工作效率低,而多垄培土机垄形难以控制,适应性差,难以满足大田作业要求。为此,本文设计复合切削式烟草中耕培土机。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

复合切削式烟草中耕培土机是由拖拉机作为牵

引机械,并由拖拉机提供动力作为液压传动系统动力源的多功能中耕培土机具,主要由螺旋培土总成、送分土犁刀装置、护叶装置、限深装置、送分土犁刀装置、护叶装置、限深装置、垄距调整装置、机架、液压传动系统等组成。结构如图 1 所示。

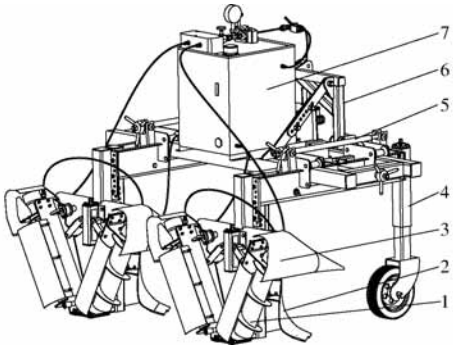


图 1 复合切削式烟草中耕培土机结构图

Fig. 1 Structure diagram of tobacco hilling machine for compound cutting

1. 螺旋培土总成 2. 送分土犁刀装置 3. 护叶装置 4. 限深装置 5. 垄距调整装置 6. 机架 7. 液压传动系统

其中垄距调整装置由模块化培土小车、调节丝杠、调节手柄、锁紧手柄等组成;螺旋培土总成由支架、垄形调节装置、锁紧固定装置、侧板、导向罩装置、螺旋培土刀、护叶装置、液压马达支架等组成;液压传动系统由液压油箱、液压泵、溢流阀、节流阀、分流阀、背压阀、液压马达等组成。

1.2 传动系统

复合切削式烟草中耕培土机传动系统如图 2 所示,机具以三点后悬挂方式与拖拉机连接,当拖拉机牵引机具作业时,由拖拉机的动力输出轴提供动力,带动后面的液压传动系统进行作业。拖拉机动力输

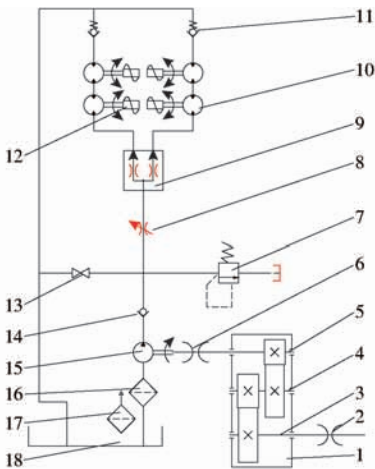


图 2 复合切削式烟草中耕培土机传动系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of transmission system of tobacco hilling machine for compound cutting

1. 变速箱 2. 万向联轴器 3. 动力轴 4. 中间轴 5. 输出轴 6. 联轴器 7. 溢流阀 8. 节流阀 9. 分流阀 10. 液压马达 11. 背压阀 12. 螺旋培土刀 13. 截止阀 14. 单向阀 15. 液压泵 16. 油液过滤器 17. 空气过滤器 18. 液压油箱

出轴输出动力通过万向联轴器传递到变速箱,变速箱输出轴通过联轴器与液压泵输入轴连接,液压泵工作带动液压马达转动,液压马达输出轴与螺旋培土刀连接,进而实现螺旋培土刀的转动。其中,螺旋培土刀的转速可通过节流阀控制液压油的流量来进行调节。

1.3 复合切削原理

机具田间工作时,在拖拉机牵引下向前运动。机具的前端安装有限深装置,根据土壤的湿度、硬度等条件,通过丝杠调节限深装置中限深轮高度,进而调节控制送分土犁刀装置的入土深度。随着机具的向前运动,送分土犁刀装置对垄底的土壤进行深松并进行送分,形成对土壤的斜向切削运动,螺旋培土总成成的螺旋培土刀转动形成对土壤的铣削运动,两种切削合成为复合切削。

1.3.1 斜向切削运动

如图3所示, v_m 为车行驶速度,送分土犁刀工作时,切削刃与切削速度方向不垂直,斜向相交,角度为 α ,土壤的流出方向不与送分土犁刀直线切削刃垂直,而是偏离直线切削刃法线方向一个流屑角 ψ_α ,即土壤在犁壁上不是垂直向上运动,而是沿犁壁向远离腔刃斜向上方向运动,形成送分土犁刀对土壤的斜向切削。由于土壤传动方向的偏离,土壤经受复杂的剪切扭转及弯曲等复合作用,之间的连接被破坏导致土壤被切碎,切削阻力减小,切削过程轻松。

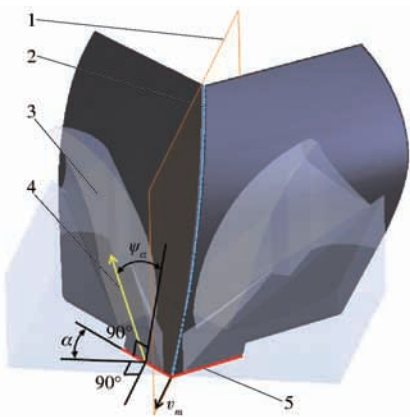


图3 斜向切削原理图

Fig. 3 Schematic diagram of oblique cutting

1. 腔刃面 2. 腔刃线 3. 土壤 4. 土壤流出方向 5. 切削刃

1.3.2 螺旋铣削运动

如图4a所示,螺旋培土刀一边以角速度 ω 旋转一边以 v_m 向前进给运动形成对土层铣削。所需要铣削的土层由松土层和实土层形成;送分土犁刀斜向切削使垄沟的土壤沿犁壁运动在垄坡形成松土层;实土层为由于雨水等冲刷而滑落的且送分土犁刀未切削到的部分垄坡土壤;松土层分布在实土层

表面。螺旋培土刀铣削时,对松土层实现二次破碎土壤,消耗功率较小;对实土层进行破碎、输送作业,相对消耗功率较大。

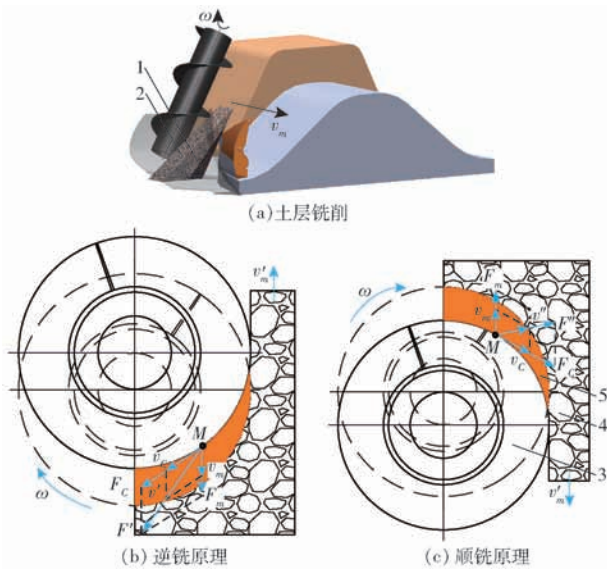


图4 铣削原理图

Fig. 4 Schematic diagram of milling principle

1. 实土层 2. 松土层 3. 螺旋培土刀 4. 垄体 5. 铣削层

螺旋培土刀在铣削作业时有逆铣和顺铣两种铣削作业方式。 v_c 表示螺旋培土刀在切削点 M 处的瞬时线速度; v'_m 表示垄体相对于螺旋培土刀的进给速度(与螺旋培土刀相对垄体移动速度 v_m 方向相反); M 表示土层任一切削点; v' 表示逆铣时 M 点土壤的合速度, v'' 表示顺铣时 M 点土壤所受的合速度,合速度为 v_m 与 v_c 的矢量之和; F' 表示逆铣时 M 点土壤所受的合力, F'' 表示顺铣时 M 点土壤所受的合力; F_c 表示螺旋培土刀对土壤合力在切削点切线方向分力; F_m 表示螺旋培土刀对土壤合力在进给方向分力;合力为 F_m 与 F_c 的矢量之和。当 v_c 与 v'_m 方向相反时为逆铣,螺旋培土刀对土壤的铣削层厚度从小到大,如图4b所示。当 v_c 与 v'_m 方向相同时为顺铣,螺旋培土刀对土壤的铣削层厚度是从大到小,如图4c所示。在螺旋培土刀旋转速度相同的情况下,逆铣时 F_m 与 F_c 、 v_m 与 v_c 的夹角小于 90° ;而顺铣时两者力与速度的夹角均大于 90° ,所以,逆铣时土壤所受合力大于顺铣,所产生的合速度大于顺铣;相对于顺铣,逆铣更易于对土壤进行铣削,能达到较好的培土效果。

在保持土壤物理性质、送进量和松土速度相同的条件下,进一步进行室内试验观察验证。采用人工浇水改变土壤含水率,并利用WYS-1型土壤水分测定仪测量土壤含水率,利用TYY-2型土壤硬度仪测量土壤硬度。所有数据测量3点,取平均值。土壤含水率为15.1%,土壤坚实度为 2.0×10^5 Pa。

试验条件接近于田间地况。试验时,调节螺旋培土刀转速为 265 r/min,利用输送带由螺旋培土刀侧面与底部进给土壤。图 5a、5b 是逆铣时土壤铣削情况,在逆铣时土壤经螺旋培土刀抛撒后,落地后呈“L”或“U”形,如图 5b 箭头所示,逆铣时向后方抛撒最大距离为 T_1 , $T_1 = 290$ mm。图 5c、5d 是顺铣时土壤铣削情况,在顺铣时土壤经螺旋培土刀抛撒后,落地后呈线形,如图 5d 箭头所示。顺铣时向后方抛撒距离为 T_2 , $T_2 = 150$ mm。结合试验分析可得,在铣削时土壤抛撒距离方面, $T_1 > T_2$,即逆铣大于顺铣;从土壤抛撒情况来看,逆铣时土壤向垄形上方抛撒,顺铣时土壤具有向垄沟抛撒的趋势。试验进一步验证了逆铣效果更优于顺铣。



图 5 铣削试验效果
Fig. 5 Test effects of milling principle

1.3.3 土壤复合运动

如图 6 所示,红色曲线为土壤颗粒的运动路线。通过送分土犁刀进行斜向切削,土壤由犁壁斜向上运动,输送到垄坡,或部分落到垄沟,然后螺旋培土刀对垄沟土壤与垄坡进行铣削、输送。通过送分土犁刀的切削、破碎与螺旋培土刀的铣削、二次破碎,实现对土壤的复合切削,土壤实现复合运动,达到培土的目的。

1.4 主要技术指标

复合切削式烟草中耕培土机对应的农艺栽培模

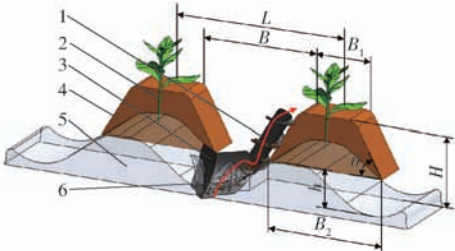


图 6 烟草垄形
Fig. 6 Tobacco ridge

1. 螺旋培土刀 2. 烟草植株 3. 送分土犁刀 4. 作业后垄形
5. 作业前垄形 6. 土壤流动方向

式如图 6 所示,培土前垄高 h 为 270 ~ 330 mm,培土高度 H 为 300 ~ 500 mm,垄顶宽 B_1 为 400 ~ 450 mm,垄底宽 B_2 为 800 ~ 900 mm,相邻两垄中心距 L 为 1 100 ~ 1 300 mm。考虑到本机器特点是通过调整单个螺旋培土总成的一对螺旋刀相互位置来调整沟面宽度 B 来保证垄顶宽 B_1 ,因此机器设计参数取 $B = L - B_1$,为 650 ~ 900 mm。垄形坡度 θ 根据以上数据可以推算出。复合切削式烟草中耕培土机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 复合切削式烟草中耕培土机主要技术参数
Tab. 1 Main technical parameters of tobacco hilling machine for compound cutting

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	1 570×2 160×1 440
挂接方式	后三点悬挂
培土行数	2
整机质量/kg	512
作业速度 $v_m/(km \cdot h^{-1})$	2.5~3.2
沟面宽度 B/mm	650~900(可调)
培土高度 H/mm	300~500(可调)
垄形坡度 $\theta/(^{\circ})$	50~65(可调)
垄距 L/mm	1 100~1 300(可调)

2 关键部件设计

模块化培土小车和垄距调整装置安装在机架上。机器采用模块式组合结构设计,其中螺旋培土总成、送分土犁刀装置与限深装置及护叶装置共同组成模块化培土小车,单独组成一个部件体系,在机器生产过程中部装以后再与机架组装,为机器工厂生产过程管理提供了方便,也利于为多垄机型的设计提供通用模块。

2.1 垄距调节装置

在利用垄距调整装置调节垄距时,模块化培土小车各装置实现联动以满足不同地况下垄距不同的需要。如图 7 所示,调节垄距时,可以通过锁紧手柄实现对培土小车的锁紧与固定。当锁紧手柄松开时,转动调节手柄,通过调节丝杠上的螺纹传动实现培土小车在机架上的左右移动。其中左右调节丝杠相连接,实现了左右两个培土小车同时联动,保证了垄距调节时的一致性,可在 L 为 1 100 ~ 1 300 mm 内调节。

2.2 螺旋培土总成

2.2.1 总体结构

如图 8 所示,螺旋培土总成由支架、垄形调节装置、锁紧固定装置、侧板、导向罩装置、螺旋培土刀、护叶装置、液压马达支架等组成。在进行培土作业

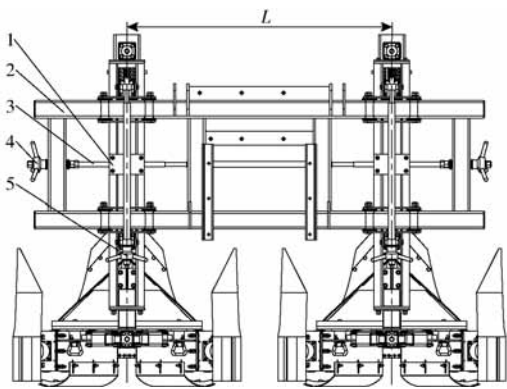


图7 垄距调整装置结构图

Fig. 7 Structure diagram of ridge distance adjustment device

1. 模块化培土小车 2. 机架 3. 调节丝杠 4. 调节手柄 5. 锁紧手柄

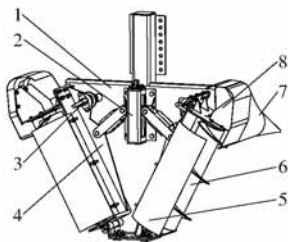


图8 螺旋培土总成结构图

Fig. 8 Structure diagram of spiral soil assembly

1. 支架 2. 垄形调节装置 3. 锁紧固定装置 4. 侧板 5. 导向罩装置 6. 螺旋培土刀 7. 护叶装置 8. 液压马达支架

时,根据不同烟叶的种植农艺要求,可以通过调整垄形调节装置以适应不同垄形的要求。螺旋培土刀在液压马达的带动下进行作业,土壤沿着螺旋培土刀的螺旋叶片向上输送,在外加导向罩的共同作用下,将土壤输送到植株根部,完成培土的过程。

2.2.2 垄形调节装置

如图9所示,在螺旋培土总成上安装有垄形调节装置(右侧表示螺旋培土刀最小倾角位置,左侧表示螺旋培土刀最大倾角位置)。垄形调节装置包括垄形坡度调节装置与垄底宽调节装置,实现对机器主要技术参数(垄的坡度和垄沟上口宽度)的调节。其中垄形坡度调节装置由调节丝杠、滑动座、螺纹套、拉杆、锁紧固定装置、侧板等组成。调节时,转动调节丝杠推动螺纹套上下移动,通过拉杆拉动侧板绕底部销轴转动进而实现垄的坡度调节。垄底宽调节装置由调节板、固定螺栓、固定弯板、销轴等组成。调节时,通过调节板与固定弯板之间不同螺栓孔之间的配合,实现垄底宽的调节。

结合机器设计参数 B 、 H 、 θ ,设计调节丝杠的运动范围为180 mm,可得到在螺纹套处于上下极限状态时,螺旋培土刀倾斜角的最小值 $\beta_1 = 50^\circ$,最大值 $\beta_2 = 70^\circ$,保证了垄形坡度调节的角度范围在 $50^\circ \sim 65^\circ$ 之间;在螺旋培土刀处于倾斜极限时,螺旋培土

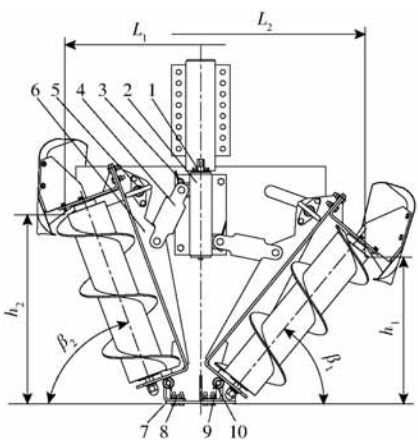


图9 垄形调节装置结构图

Fig. 9 Structure diagram of ridge shape adjustment device

1. 调节丝杠 2. 滑动座 3. 螺纹套 4. 拉杆 5. 锁紧固定装置 6. 侧板 7. 调节板 8. 固定螺栓 9. 固定弯板 10. 销轴

刀的垂直高度最小值为 $h_1 = 400$ mm,最大值为 $h_2 = 500$ mm。底部调节板上螺栓孔的间距为20 mm,有3种位置,使固定弯板处于左右极限状态时,能满足参数需要。两个调节装置相互配合,实现垄沟面宽度的调节范围在最小值 $L_1 = 650$ mm与最大值 $L_2 = 900$ mm之间变化。

2.3 螺旋培土刀

2.3.1 刀轴

螺旋培土刀是复合切削式烟草中耕培土机的核心工作部件。根据输送土壤的特性与输送土壤的目的,选用实体螺旋式的螺旋培土刀^[27]。如图10所示,螺旋培土刀的螺旋叶片用4 mm的薄钢板冲压而成,然后焊接到螺旋培土刀刀轴上。为提高刀轴的刚性和减轻样机的重量,将刀轴设计为空心轴,结合垄形沟底宽和刀轴的强度校核,确定轴的内径 d_1 为98 mm,外径 d_2 为108 mm,高度 A 为490 mm。

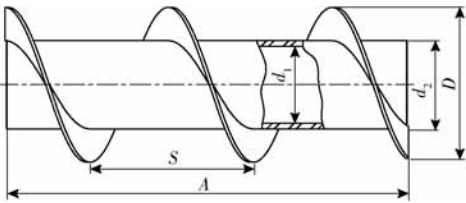


图10 螺旋培土刀结构图

Fig. 10 Structure diagram of spiral soil knife

2.3.2 螺旋叶片外径

螺旋培土刀外径是螺旋培土刀的重要设计参数。一般根据螺旋培土刀的输送能力、输送类型、结构和布置形式确定螺旋培土刀的外径^[28-29]。由图8可以看出,在螺旋培土总成中两侧螺旋培土刀采用“V”字形布置,考虑垄沟空间尺寸,螺旋培土刀螺旋叶片的外径尺寸受垄形沟底宽影响较大。所以,根据实际要求,设计螺旋叶片外径 D 为190 mm。

2.3.3 螺距

螺旋叶片的螺距 S 可根据螺旋培土刀的布置形式、输送物料的特性以及螺旋叶片直径来选取,通常采用推荐的标准值。

$$S = K_1 D \tag{1}$$

式中 K_1 为比例系数,取 $0.8 \sim 1.0^{[30-31]}$,结合土壤的特性以及对土壤松碎程度的要求,选择比例系数为 0.94 ,则螺距 S 为 178 mm 。

2.3.4 螺旋输送机土壤输送量中间值的理论计算

如图 11 所示,在机具向前运动时,螺旋培土刀将垄沟土壤与部分垄侧土壤(区域 II)输送至垄顶(区域 I),取培土垄形前后高度的中间值 $h' = 300\text{ mm}$ 、 $H' = 400\text{ mm}$ 与培土前后垄形坡度的中间值 $\theta_1 = 37^\circ$ 、 $\theta_2 = 58^\circ$ 进行计算。区域 II 的土壤是培土前压实的区域,区域 I 的土壤是培土后松软的区域,区域 I 的土壤和区域 II 的土壤在质量上相等,但在体积上有差别^[32]。在垄形截面上,区域 I 的面积为 S_I ,则需要进行培土的土壤输送量为

$$Q' = \gamma l S_I \tag{2}$$

其中
$$l = v_m t \tag{3}$$

式中 Q' ——所需培土量, kg/h
 γ ——土壤(褐土)容重,为 $1\,300\text{ kg/m}^3$
 l ——单位时间内培土长度, m
 S_I ——垄形横截面 I 的面积,为 0.032 m^2
 t ——培土单位时间,取 1 h

由式(2)计算得出 Q' 为 $104\,000 \sim 133\,120\text{ kg/h}$ 。

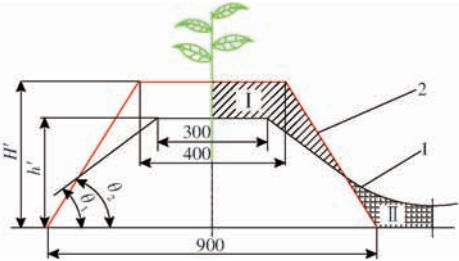


图 11 培土前后垄形横截面
Fig. 11 Cross section shape of ridge
1. 培土前垄形 2. 培土后垄形

根据耕作前后土壤质量不变原则,相同单位长度 S_I 区域的土壤质量应与 S_{II} 区域的土壤质量相等,但是由于土壤经送分土犁刀松土、螺旋培土后土壤疏松体积增大,土壤容重发生改变,需增加膨松系数 λ ,对培土前后实土与松土的体积进行测量,测得 $\lambda = 2.09$,有

$$S_I = \lambda S_{II} \tag{4}$$

式中 S_{II} ——垄形横截面 II 的面积

所以,单个螺旋培土刀在进行培土时,螺旋输送的土壤输送量 Q'' 为 $49\,760.77 \sim 63\,693.78\text{ kg/h}$ 。

2.3.5 螺旋培土刀土壤输送量中间值的理论计算

由于在螺旋培土刀的前方设置有送分土犁刀装置,送分土犁刀装置可以对沟底土壤进行深松,同时垄沟土壤会沿着犁壁向垄侧面运动,然后螺旋培土刀将垄侧面土壤向上输送,但向上输送的部分土壤会沿垄侧面滑落,这与螺旋输送机送料是有区别的。因此,在计算培土机的输送量时不能按照普通螺旋输送机工作环境进行计算,一个螺旋培土刀对土壤的输送量 Q 应该占螺旋输送器的输送量 Q_1 一定的比例,即

$$Q = C Q_1 \approx C Q'' \tag{5}$$

式中 C ——修正系数,由经验取 0.27
 Q_1 ——螺旋输送器的输送量, $Q_1 \approx Q''$

由式(5)计算可得 Q 为 $13\,435.41 \sim 17\,197.32\text{ kg/h}$ 。

2.3.6 螺旋培土刀的转速

由分析可得,螺旋刀具输送土量计算式为

$$Q = 3\,600 S' v_z \gamma \phi \tag{6}$$

其中
$$S' = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = 19\,191.99\text{ mm}^2 \tag{7}$$

$$v_z = \frac{n_{\min} S}{60} \tag{8}$$

式中 S' ——所送物料的横截面积, m^2
 v_z ——土壤轴向移动速度, m/s
 ϕ ——填充系数,取 $0.3^{[33]}$
 $n_{\min}$ ——螺旋培土刀最低转速, r/min

当螺旋培土刀的转速 $n \geq n_{\min}$ 时,且其垄形两侧的输送土壤量均达到 Q' 时,培土的高度才会满足相关农艺技术要求,通常在不考虑土壤轴向阻滞作用影响的情况下^[34],螺旋培土刀的最低转速由式(6)~(8)得出, $n_{\min}$ 为 $167.51 \sim 214.54\text{ r/min}$ 。

分析可得,当垄形参数取中间值时,考虑到行驶速度不同,螺旋培土刀最低转速应该在上述范围之内,在进行培土时,转速必须大于其最小值。在螺旋培土刀外侧安装有导向罩装置,当转速过高时,土壤在垄上抛撒距离会远一些,但不会超过导向罩装置控制的土壤流向的范围。为了节约能源,不宜使用较大转速。

3 田间试验与结果分析

3.1 试验条件与材料

2018 年 5 月,在河南省许昌市禹州市小吕乡罗庄全程机械化示范点试验田进行了复合切割式烟草中耕培土机的田间作业性能试验,如图 12 所示。试验地土壤为褐土,土壤绝对含水率为 14.2% ,土壤容重为 $1\,300\text{ kg/m}^3$,垄侧土壤坚实度为 $2.2 \times 10^5\text{ Pa}$,垄

沟土壤坚实度为 3.8×10^5 Pa。试验前对复合切削式烟草中耕培土机进行调试,调节送分土犁刀装置使其最下面与螺旋培土总成的最下面在铅垂方向上相差 20 mm,调节螺旋培土总成的最底部与限深装置的限深轮底部在同一平面,调节垄距调节装置,调整垄距为 1 200 mm,调节垄形调节装置,调整垄形坡度为 60° 。



图 12 田间试验
Fig. 12 Field test

3.2 试验方法

按照复合切削式烟草中耕培土机预期实现的设计功能,结合 DB50/T 686—2016《培土机》和 DB34/T 2672—2016《培土机 技术条件》规定的试验方法进行田间作业性能试验,选用拖拉机标定功率为 29.4 kW,拖拉机前进速度为 2.5 ~ 3.2 km/h。试验选取碎土率、垄形坡度、培土厚度、培土高度、沟面宽度等作为能够体现复合切削式烟草中耕培土机工作性能的测试指标;同时考察复合切削式烟草中耕培土机液压传动系统、限深装置、送分土犁刀装置、螺旋培土总成的工作运转情况。参考文献[35-36]规定的具体计算方法,测定各项作业性能指标。试验结果统计与计算中规定试验小区以 3 垄宽度(4 800 mm)为基准,试验准备区长度为 5 m,测定区长度为 20 m,试验小区在试验地中随机选取。

3.2.1 碎土率试验方法

在已培土的垄上测定 0.2 m × 0.2 m × 0.2 m 范围内的土壤,土块大小按其长边分为 0 ~ 4 cm、4 ~ 8 cm、大于 8 cm 3 级。并以 0 ~ 4 cm 的土块质量占总质量的百分比为碎土率,选择 10 个测量点。

3.2.2 培土厚度合格率试验方法

培土厚度合格率测定方法:沿机具前进方向每隔 2 m 左右两侧各取一点,测量 20 个点,在每个测定点上测定培土厚度,求平均值。

$$f = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \tag{9}$$

式中 f ——培土厚度合格率,%
 m_0 ——培土厚度总测定点数
 m_1 ——培土厚度合格点数,其中培土厚度达到 15 ~ 150 mm 为合格样本

3.2.3 培土高度和沟面宽度试验方法

沿机具前进方向每隔 2 m 测定一个点,测量 20 个点,在每个测定点测定培土高度与沟面宽度,求平均值

$$\psi = \frac{\sum_{i=1}^{20} \psi_i}{20} \tag{10}$$

式中 ψ ——培土高度或沟面宽度平均值,mm
 ψ_i ——培土高度或沟面宽度测定点数据,mm

3.3 试验结果与分析

复合切削式烟草中耕培土机田间试验结果如表 2 所示。

表 2 田间试验结果
Tab. 2 Results of field experiment

参数	设计要求	测试结果
土壤绝对含水率/%	10 ~ 33	14.2
碎土率/%	≥80	90
垄形坡度合格率/%	≥80	93
培土厚度合格率/%	≥80	95
培土高度 H/mm	300 ~ 500	400
沟面宽度 B/mm	650 ~ 900	750

由试验结果可得,复合切削式烟草中耕培土机试验指标均达到相关标准要求。

试验过程中发现,当复合切削式烟草中耕培土机前进的速度保持在 2.5 ~ 3.2 km/h 时,其各组成系统的作业性能较高且相对稳定。当前进速度进一步提高时,相应的螺旋培土刀的转速增大,此时土壤在随螺旋培土刀向上输送时,受到的离心力增大,土壤抛撒不易控制,易损伤烟苗;同时,当前进速度较快时,培土量不易控制,导致培土厚度不一致。因此,需要适当调整培土机前进速度,确保送分土犁刀装置与田间土壤的充分作用时间,以获取高质量的培土效果。

4 结论

- (1)根据烟草种植农艺要求和烟草种植中耕培土要求,对送分土犁刀与螺旋培土刀的作业方式进行分析,提出了复合切削的培土方式,为后续土壤流向分析计算、送分土犁刀与螺旋培土刀的相对位置关系,以及结构改进提供了理论依据。
- (2)确定了机具的液压传动系统,并对垄距调节装置、垄形调节装置和螺旋培土总成等重要部件进行了设计,完成关键部件螺旋培土刀的几何参数和最低转速分析计算,确定其最低转速范围为 167.51 ~ 214.54 r/min。
- (3)复合切削式烟草中耕培土机采用螺旋输送

的原理,将垄沟土壤与垄侧部分土壤沿螺旋培土刀向上输送,在外加导向罩装置的配合下能准确将土壤输送到烟苗根部,减少对作物的损伤;同时,垄距调节装置与垄形调节装置采用丝杠联动调节,调节方便,保证了垄沟两侧土壤的对称性。

(4)田间试验表明,复合切削式烟草中耕培土机工作后碎土率为90%,培土垄形坡度合格率为93%,培土厚度合格率为95%,培土高度为400 mm,沟面宽度为750 mm,试验结果满足设计要求,能够实现烟草中耕培土作业。

参 考 文 献

- 赵艳忠,王运兴,刘海涛,等. 带状深松灭茬机灭茬部件设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):94-103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180311&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.011.
- ZHAO Yanzhong, WANG Yunxing, LIU Haitao, et al. Design and test of stubble-breaking components on strip subsoiling and stubble-breaking machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):94-103. (in Chinese)
- 林静,王磊,李宝筏,等. 2ZZ-3型深松培垄施肥联合作业机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(24):9-17.
- LIN Jing, WANG Lei, LI Baofa, et al. Design and test of 2ZZ-3 type deep scarification-terrace ridge-fertilization combine intertill machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24):9-17. (in Chinese)
- MATIN M A, FIELKE J M, JACKY M A, et al. Furrow parameters in rotary strip-tillage: effect of blade geometry and rotary speed[J]. Biosystems Engineering, 2014, 118:7-15.
- 河南农业大学. 一种复合切削式中耕培土装置:201720660545.4[P]. 2017-06-08.
- BURTON M G, MORTENSEN D A, LINDQUSIT J L. Effect of cultivation and within-field differences in soil conditions on feral *helianthus annuus* growth in ridge-till maize[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 88(1-2):8-15.
- 刘亚锋. 中耕培土机拍打机构的设计与分析[D]. 杭州:浙江理工大学,2017.
- LIU Yafeng. Design and analysis on flapping mechanism of cultivator[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017. (in Chinese)
- 殷寿安,林选知,区焕财,等. 烟叶中耕培土及机械化作业技术分析[J]. 湖南农机,2012,39(11):30-32.
- YIN Shouan, LIN Xuanzhi, QU Huancai, et al. Tobacco cultivation and banking and analysis of its mechanical operation technology[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2012, 39(11):30-32. (in Chinese)
- MOLLAZADE K, JAFARI A, EBRAHIMI E. Application of dynamical analysis to choose best subsoiler's shape using ANSYS[J]. Institute of Technology, 2014, 23(12):1655-1658.
- COLLINS E G. Tobacco-hiller: US19190282618[P]. 1920-02-03.
- 毛鹏军,张松泓,丁月华,等. 电动旋耕培土机的设计研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(4):7-10.
- MAO Pengjun, ZHANG Songhong, DING Yuehua, et al. Design and research on electric rotary hillers[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(4):7-10. (in Chinese)
- 张绢,王芬娥,李小强. 基于UG的犁壁式马铃薯培土器设计及试验分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(6):230-234.
- ZHANG Juan, WANG Fene, LI Xiaoqiang. Design and test analysis of potato hiller's covering body based on unigraphics software[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2012, 40(6):230-234. (in Chinese)
- 张瑞,孙伟,石林榕,等. 全膜双垄沟中耕除草培土机的设计与试验[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(5):258-262.
- ZHANG Rui, SUN Wei, SHI Linrong, et al. Design and test of the weeding cultivator and hilling machine in double ridge furrow with whole film mulch[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(5):258-262. (in Chinese)
- 刘晓鹏,张青松,肖文立,等. 稻油轮作区驱动圆盘犁对置组合式耕整机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):33-41. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171204&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.004.
- LIU Xiaopeng, ZHANG Qingsong, XIAO Wenli, et al. Design and experiment on symmetrical driven disc plows combined tillage machine for rice-rape seed rotation area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):33-41. (in Chinese)
- 张阳光. 烟草培土机主要部件的设计及研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011.
- ZHANG Yangguang. The design and research of new tobacco hiller's main component[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
- 张瑞. 垄沟马铃薯膜际除草培土机的研制[D]. 兰州:甘肃农业大学,2016.
- ZHANG Rui. Development of weeding and banking machine between plastic-film for potato ridge-furrow planting[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 车刚,张伟,梁远,等. 3ZFC-7型全方位复式中耕机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2011,27(1):130-135.
- CHE Gang, ZHANG Wei, LIANG Yuan, et al. Design and experiment of the 3ZFC-7 omni-bearing duplex type cultivator[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1):130-135. (in Chinese)
- 吕金庆,王英博,兑瀚,等. 驱动式马铃薯中耕机关键部件设计与碎土效果试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10):49-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171006&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.006.
- LÜ Jinqing, WANG Yingbo, DUI Han, et al. Design of key components of driving-type potato cultivator and its soil-broken effect experiment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):49-58. (in Chinese)

- 18 石林榕,杨小平,赵武云,等.抛扬式膜际覆土马铃薯播种联合作业机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(6):129-137. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180615&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.015.
SHI Linrong, YANG Xiaoping, ZHAO Wuyun, et al. Design and test of potato combine seeder with throwing and covering soil on film edge[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6):129-137. (in Chinese)
- 19 吕美巧,刘云斌,刘丽敏.新型甘蔗窄行中耕培土机的研究设计[J].中国农机化学报,2015,36(2):47-48,55.
LÜ Meiqiao, LIU Yunbin, LIU Limin. Research on the design of the new narrow row sugarcane cultivators[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(2):47-48,55. (in Chinese)
- 20 张婷,李明,汪春,等.多功能甘蔗中耕施肥培土机传动装置的设计[J].广东农业科学,2015,42(20):140-144.
ZHANG Ting, LI Ming, WANG Chun, et al. Design on transmission system of a multi-functional sugarcane cultivator-cum-fertilizer-applicator[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(20):140-144. (in Chinese)
- 21 张松泓.电动旋耕培土机的设计研究[D].洛阳:河南科技大学,2015.
ZHANG Songhong. Design and research on electric rotary hillers[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- 22 郑俊,吴睿,徐阳,等.烟草田间起垄机作业适应性研究[J].农机化研究,2015,37(6):151-153.
ZHENG Jun, WU Rui, XU Yang, et al. The adaptability research on the operation quality of the tobacco ridging machines[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6):151-153. (in Chinese)
- 23 张阳光,卢博友,刘洪萍,等.新型烟草培土机培土器的设计[J].农机化研究,2011,33(3):81-83.
ZHANG Yangguang, LU Boyou, LIU Hongping, et al. The design of new tobacco hiller's covering body[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(3):81-83. (in Chinese)
- 24 REN Luquan. Progress in the bionic study on anti-adhesion and resistance reduction of terrain machines[J]. Science in China Series E-Technological Sciences, 2009, 52(2):273-284.
- 25 张志君,孙旭伟,金柱男,等.大豆播种机破碎式仿生覆土装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(2):34-40,73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.005.
ZHANG Zhijun, SUN Xuwei, JIN Zhunan, et al. Design and test of crushing bionic soil covering device of soybean seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):34-40,73. (in Chinese)
- 26 王金武,牛春亮,张春建,等.3ZS-150型水稻中耕除草机设计与试验[J].农业机械学报,2011,42(2):75-79.
WANG Jinwu, NIU Chunliang, ZHANG Chunjian, et al. Design and experiment of 3ZS-150 paddy weeding cultivating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2):75-79. (in Chinese)
- 27 李海同,万星宇,徐阳,等.油菜收获机割台螺旋输送机间隙自适应调节机构研究[J/OL].农业机械学报,2017,48(11):115-122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171114&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.014.
LI Haitong, WAN Xingyu, XU Yang, et al. Clearance adaptive adjusting mechanism for header screw conveyor of rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):115-122. (in Chinese)
- 28 李有志,郭俊先,张丽,等.4FY-0.8B型移动式生物质固化成型车螺旋输送系统的改进设计与仿真分析[J].中国农机化学报,2016,37(12):131-135.
LI Youzhi, GUO Junxian, ZHANG Li, et al. Improved design and simulation analysis of screw conveyor system for 4FY-0.8B mobile biomass densification briquetting vehicle[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(12):131-135. (in Chinese)
- 29 尹忠俊,孙洁,陈兵,等.开式螺旋输送机输送机理分析与参数设计[J].矿山机械,2010,38(11):66-71.
YIN Zhongjun, SUN Jie, CHEN Bing, et al. Study on transportation mechanism of open screw conveyors and design of parameters[J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(11):66-71. (in Chinese)
- 30 宫泽奇.青贮玉米秸秆螺旋致密成型工艺及压缩过程流变学试验研究[D].北京:中国农业大学,2017.
GONG Zeqi. The experimental study on rheology of silage-corn stalk in the mechanized spiral dense forming process[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 31 徐余伟.橡胶工业螺旋输送机设计参数的选择和确定[J].橡塑技术与装备,2008,34(10):52-58.
XU Yuwei. The choice and decision of design parameters for screw conveyor for rubber industry[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2008, 34(10):52-58. (in Chinese)
- 32 张秀丽,王栋,全振伟,等.高秆作物中耕培土机械化技术分析[J].河南农业科学,2016,45(5):157-160.
ZHANG Xiuli, WANG Dong, TONG Zhenwei, et al. Analysis on mechanization technology in cultivation and banking for high stalk crops[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(5):157-160. (in Chinese)
- 33 向冬枝,徐余伟.螺旋输送机设计参数的选择和确定[J].水泥技术,2010(1):29-33.
XIANG Dongzhi, XU Yuwei. Design parameter selection of spiral conveyor[J]. Cement Technology, 2010(1):29-33. (in Chinese)
- 34 戴飞,辛尚龙,赵武云,等.全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(3):76-83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170309&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.009.
DAI Fei, XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of combined potato planting machine for covering soil on top of full film surface[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):76-83. (in Chinese)
- 35 GB/T 5667—2008 农业机械 生产试验方法[S].2008.
- 36 DB34/T 2672—2016 培土机 技术条件[S].2016.