

丘陵茶园开沟施肥覆土一体机的设计与试验

段 凯¹ 黄 超¹ 蔡克桐¹ 王 朕¹ 刘国庆²

1. 咸宁市农业科学院, 湖北 咸宁 437000

2. 咸宁香城特色农业技术研究有限公司, 湖北 咸宁 437000

摘要:针对丘陵茶园施肥环节“无好机用”的生产难题,设计了一种适用于丘陵茶园的开沟施肥覆土一体机。对整机动力传动系统、工作功耗及旋耕开沟刀具、施肥装置等关键部件进行了研究分析,设计了满足丘陵茶园施肥农艺要求的开沟施肥覆土一体化机具。现场试验表明,该机的旋耕开沟深度为 28.47~28.62 cm,平均旋耕开沟深度为 28.61 cm,旋耕开沟深度稳定性系数为 97.71%~98.8%,平均旋耕开沟深度稳定性系数为 98.2%。整机设计方案合理,作业省时高效,能满足丘陵茶园施肥的农艺要求。

关键词:丘陵;茶园;开沟;施肥;覆土;一体机;茶园机械

中图分类号:S222

DOI: 10.3969/j.issn.2097-065X.2023.11.006

0 引言

施肥是茶园生产的重要环节,是提高茶叶产量和品质的关键举措^[1-2]。发达国家茶园生产的机械化水平较高,且大多覆盖施肥、耕作、植保、采摘等农艺过程^[3-4],但机械装备体积大,不适合我国的丘陵茶园^[5]。目前,我国茶园普遍采用多功能管理机进行施肥作业,大型装备机动性不高、操作复杂,日常维护成本较高,在丘陵茶园的应用较少^[6-7]。小型茶园管理机普遍存在动力低、施肥深度不合格等问题,无法大规模推广应用^[8-9]。

当前,我国的茶园开沟施肥机械依据施肥机构的不同,分为离心式撒施和行间条施;根据作业方式的不同,分为跨行施肥和单行施肥。撒施机械方面,南京农机所研发的 KM2F-3 茶园施肥机结构紧凑、操作简便;胡永光等^[10]结合试验得出茶园单圆盘式撒肥机的最佳结构参数。行间条施机械方面,王文明等^[11]研制的自走式螺旋施肥机采用立式螺旋机构开沟,施肥深度达 35 cm;李明等^[12]设计的遥控自走型茶园静电喷药施肥机可同时进行开沟、施肥和覆土作业,且施肥精确。高地隙跨行机械方面,戴有华等^[13]研发的牵引式深松施肥机可一次性完成开四条沟、施肥及覆土作业;肖宏儒等^[14-15]研发的 2 种自走式高地隙茶园管理机可根据茶园的不同种植参数,匹配整机跨行作业高度。低地隙单行作业机械方面,肖宏儒等^[14-15]研发的履带乘坐式茶园管理机能一机多用,可悬挂不同机具进行耕作、施肥等

作业,且运行平稳,适应坡度性能好;代红朝^[16]研制的茶园翻耕机作业性能较好,碎土率超过 70%,耕深稳定性系数超过 90%。

综上所述,我国学者自主研发的茶园施肥机械装备种类较多,但均存在适用性低、推广难的问题^[17]。茶园撒肥机械省工省时,但施肥效果较差;高地隙跨行机械可同时进行多行作业,生产效率高,但日常维护成本较高,且在丘陵茶园适用性较差;低地隙单行机械结构轻巧、操作简便,但施肥效果不好,开沟深度不合格。因此,急需研制一种作业高效、满足施肥农艺要求的丘陵茶园机械装备。

1 茶园机械开沟施肥的技术要求^[18]

主要针对成龄茶园,以施肥作业后的地表不见肥料为标准。冬、夏两季宜深施基肥,施肥深度为 15~30 cm;春、秋两季宜进行追肥,开沟深度为 5~10 cm。开沟施肥作业过程中,应保证施肥均匀且施肥量可调。施肥后,覆土掩盖严密,无漏施、重施、肥料堵塞等现象。

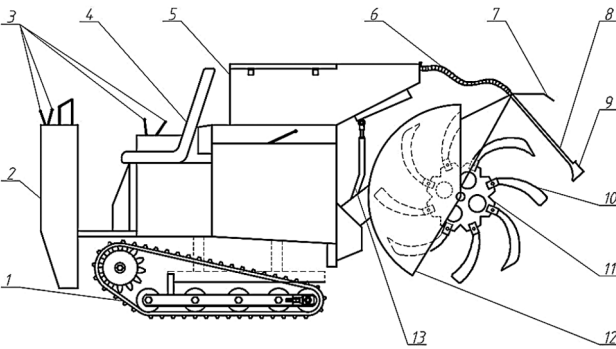
2 整机结构及工作原理

2.1 整机结构

整机主要由 V 形双缸汽油发动机、履带底盘、操作系统、动力传动装置、旋耕开沟机构、同步施肥机构、液压升降装置、覆土装置等组成。动力传动装置主要由发动机动力输出轴、摩擦式离合器、液压无级变速箱、V 形皮带传动装置、链条传动装置、传动轴等组成。旋耕开沟机构由高强度耐磨旋耕刀、焊接刀座、自制刀盘、传动轴等组成。同步施肥机构由

基金项目:咸宁市科技计划项目“丘陵山区履带式茶园多功能管理机研制与示范”(2023NYYP073)

肥箱、输肥软管、排肥管、鞋形施肥器等组成。覆土装置包括刀具罩壳、覆土板等。整机结构见图 1。



1.履带 2.罩壳 3.操纵杆 4.座椅 5.肥箱
6.输肥软管 7.覆土板 8.排肥管 9.鞋形施肥器
10.旋耕刀 11.刀盘 12.刀具罩壳 13.支撑杆

图 1 整机结构示意图

2.2 整机工作原理

整机进行开沟施肥作业时,发动机将动力经输出轴、V 形皮带传动装置、摩擦式离合器、链传动装置传递给旋耕刀传动轴,驱动旋耕刀切削土壤实现开沟作业。发动机输出轴通过皮带传动,将部分动力经液压无极变速箱传递到履带底盘驱动轮,驱动整机行走。

通过操作液压升降系统控制手柄,驱动旋耕刀具下降入土作业。随着旋耕刀具下降,肥箱与刀具总成之间的连接装置带动肥箱向后倾倒。重力作用下,肥箱以肥箱安装连接装置为圆心,沿圆周切线方向下降;随着肥箱向后倾倒下,肥箱中的肥料在重力作用下,经排肥口、导肥软管、排肥管、鞋形施肥器自动播施到旋耕切开的深沟中,最后在覆土装置作用下,实现肥料与土壤的混合掩埋覆盖。随着旋耕刀具上升,肥箱在刀具总成与肥箱之间的支撑装置作用下推动上升,带动导肥软管弯曲而停止下肥。肥箱随旋耕刀具动作同时升降,同时实现整机开沟与施肥作业。整机作业过程中,机手通过操控液压升降手柄来调节开沟深度,通过操作液压变速控制手柄、挡位控制手柄调整整机前进速度。

2.3 主要技术参数

结合咸宁市不同丘陵地形成熟茶园的实地测量数据,设计整机的最大宽度为 700 mm,履带底盘选用宽度 180 mm 的橡胶履带。结合前期研究及茶园开沟施肥试验情况,选用最大输出功率为 22 kW 的隆鑫 LC2V90F 型发动机。整机结构紧凑,可满足丘陵茶园狭窄茶行、强劲动力的作业需求。整机关

键技术参数如表 1 所示。

表 1 丘陵茶园开沟施肥覆土一体机主要参数

技术参数	数值
最大输出功率(kW)	22
整机尺寸(mm×mm×mm)	2200×700×1500
发动机标定转速(r/min)	3600
最大开沟深度(mm)	300
开沟幅宽(mm)	200
肥箱容量(kg)	100
整机行走速度(km/h)	1.2~3.6
刀具转速(r/min)	200~260
整机满载质量(kg)	300

3 关键部件设计

3.1 整机动力传动方案

丘陵茶园尤其是成龄茶园的茶行间土壤坚硬,咸宁茶园土质大多为红黄壤,含水率高、黏性大,旋耕刀具开沟作业时需承受较大载荷。发动机输出的动力通过皮带传动,经离合器传递到链轮组合,再将动力传递给旋耕刀轴,驱动旋耕刀具旋转开沟作业。发动机输出的动力经皮带传动机构、液压无极变速箱传到履带地盘,驱动整机行走。整机行走、作业动力传动方案如图 2 所示。

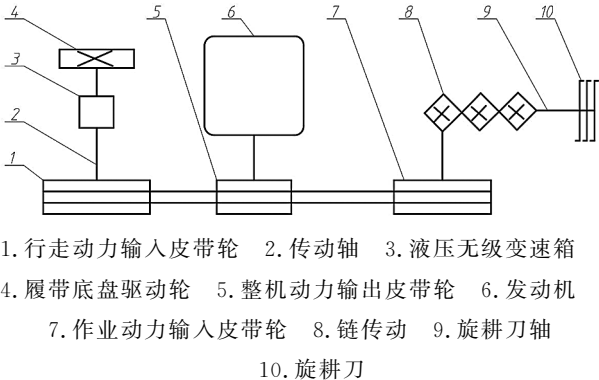


图 2 整机动力传动方案图

3.2 功率消耗分析

微耕机消耗的功率为^[19]:

$$P = P_q + P_p + P_t + P_f + P_n$$

式中, P 为总功率; P_q 为旋耕刀切削土壤消耗的功率; P_p 为抛土消耗的功率; P_t 为驱动整机前进的功率; P_f 为传动装置内部摩擦损耗的功率; P_n 为克服土层水平反力消耗的功率。

与整机行走及旋耕作业相比,动力传动及部件摩擦的损耗功率相对较小,可以忽略不计。旋耕刀正向转动时,土壤水平反力与机器作业行走方向相同,所以 P_n 取负号;反向转动时, P_n 取正号^[20]。因

此,总功率由驱动机器行走消耗的功率和旋耕松土作业消耗的功率组成。

(1)土壤旋耕作业消耗功率。旋耕机功耗计算经验公式^[21]:

$$P_1 = K_\lambda d v_m B$$

式中, K_λ 为旋耕比损耗, N/cm^2 ; d 为耕深, cm ; v_m 为整机前进的速度, m/s ; B 为耕幅, m 。

通过查询相关参考资料,计算得出 $K_\lambda = 12.9504$ 。根据表 1 所示参数,计算得切削土壤与抛土功耗 P_1 为 7770.2 W。

(2)整机行走消耗的功率。整机开沟施肥作业时,消耗的功率主要来源于地表阻力及传动机构的摩擦阻力。相比摩擦阻力,空气阻力较小,可忽略不计。土壤耕作阻力大,通过查询资料,取橡胶履带摩擦因数 μ 为 3.0,整机行走速度 v_m 为 1.2~3.6 km/h,整机满载质量为 300 kg。整机行走消耗的功率

$$P_2 = F v_m = \mu m g v_m$$

式中, μ 为履带摩擦因数; m 为整机质量。

整机开沟作业和前进时消耗的总功率 $P = P_1 + P_2$ 。查询资料^[22]可得滚动轴承的工作效率 $\eta_1 = 0.98$,皮带传动的工作效率 $\eta_2 = 0.96$,离合器(压带轮)的工作效率 $\eta_3 = 0.98$,链传动(滚子链)的工作效率 $\eta_4 = 0.96$,液压无极变速箱的工作效率 $\eta_5 = 0.94$,则发动机输出的总功率

$$P_0 = P_1' + P_2' = \frac{P_1}{\eta_1^6 \eta_2 \eta_3 \eta_4^2 \eta_5} + \frac{P_2}{\eta_2 \eta_1^4 \eta_5}$$

计算可得整机工作时所需的实际功率为 21.0531 kW。结合茶园旋耕开沟过程中土壤坚硬板结的实际工况,选用结构紧凑、动力充足、作业振动小、性能高、使用寿命长的 LC2V90F 型汽油发动机。

3.3 旋耕刀具设计选型

茶树种植密集,大型机械装备的适用性较低。铧式和链式开沟机具的耕作阻力较大,对整机动力需求较高,不予选用;旋耕刀具结构简单,旋转切削土壤、破土开沟能力较强,能满足丘陵茶园作业要求。根据 GB/T 5669—2017 选用 II T 245 型旋耕刀(材料为 65 Mn 钢)。旋耕刀为堆焊耐磨型,刀刃采用高耐磨碳化钨堆焊焊条加工。旋耕刀与刀座通过螺栓螺母连接,配套刀座焊接在自制刀盘上,通过自制刀盘(焊接在旋耕刀轴上)增大旋耕刀回转半径,满足开沟深度要求。自制刀盘式旋耕刀回转半径为 300 mm,刀片厚度为 3 mm。理想状态下,旋

耕刀具左右对称分布,刀轴受到的轴向力很小且能抵消,在切削土壤的过程中,会产生扭矩 T ,轴向力 F_y 及径向力 F_x 、 F_z ,如图 3 所示。

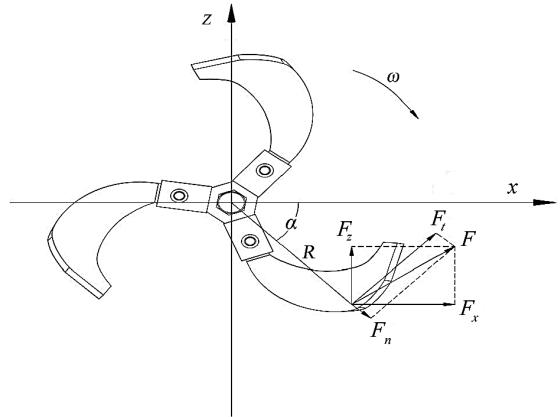


图 3 旋耕刀具受力分析图

整机旋耕作业过程中,旋耕刀切削土壤,同时随整机向前行走。因此,旋耕刀上各点的绝对运动应为这两种运动的合成运动,旋耕刀运动分析如图 4 所示^[17]。以旋耕刀端点处为例,分析其运动。

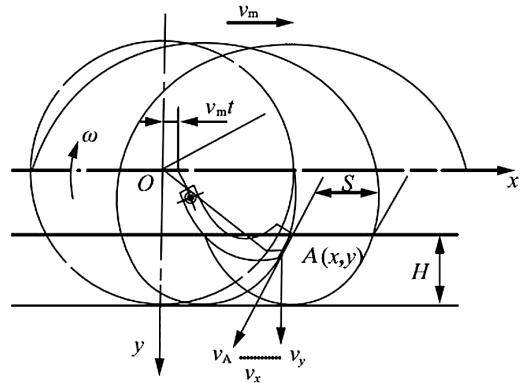


图 4 旋耕刀运动分析示意图

旋耕刀正转时,旋耕刀上各点的运动轨迹均为余摆线^[23],其旋转运动过程如图 4 所示,对应计算公式为:

$$\begin{cases} x = R \cos \omega t + v_m t \\ y = R \sin \omega t \end{cases}$$

式中, R 为旋耕刀盘整体回转半径; ω 为旋耕刀具角速度; ωt 为旋耕刀转角。

由旋耕刀运动方程可得旋耕刀端点处的速度:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_m^2 + R^2 \omega^2 - 2 v_m R \omega \sin \omega t}$$

旋耕刀端点处于最高位置时,绝对速度最大;旋耕刀端点处于最低位置时,绝对速度最小^[24]。旋耕速比即旋耕刀端点的回转线速度与整机前进速度之比^[23]

$$\lambda = R \omega / v_m$$

正转旋耕刀的旋耕速比 λ 必须大于 1 即 $R \omega > v_m$,整机才能正常工作。旋耕刀作业过程中,一定

会出现 $v_x < 0$ 的情况,使旋耕刀顶点绝对速度的水平分量与整机运动方向相反,使旋耕刀能向后切削土壤。

根据整机关键技术参数,通过计算得出旋耕速比最小值 $\lambda_{\min} = 6.28 > 1$,设计选型的旋耕刀满足整机开沟作业要求。

3.4 施肥装置

常规施肥机多采用外槽轮或绞龙装置,结合茶园施肥工作实际,本机采用自动施肥装置。施肥与旋耕开沟同步进行,开沟达到最大深度时,开始平稳施肥。具体的施肥装置如图 5 所示。

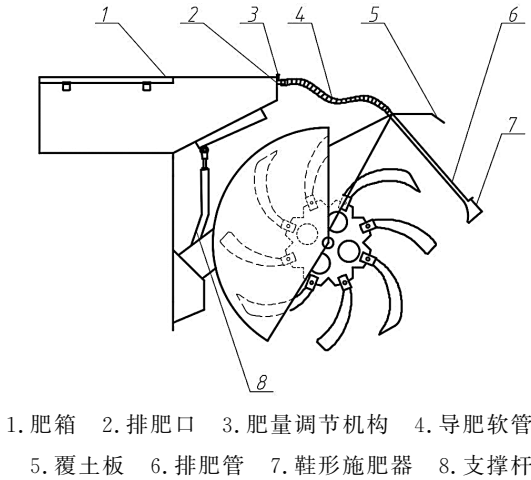


图 5 自动施肥装置结构示意图

旋耕刀具下降进行旋耕开沟作业时,满载肥箱在重力作用下,向后倾斜;旋耕开沟达到最大深度时,肥箱右斜边与地面平行,排肥口垂直于地面,肥箱中的肥料在重力作用下,自动播施到开好的深沟内。通过调控排肥口的肥量条件螺栓,可自主调节排肥量。

4 田间试验

4.1 试验茶园情况

参照 GB/T 5668—2017《旋耕机》^[25] 与 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件:测定方法的一般规定》^[26],进行实际茶园旋耕开沟、施肥作业试验及性能检测。试验在咸宁市崇阳县石山村茶园基地进行,试验茶园行间杂草较少,近期无松土施肥作业,

土层较为平整,无明显极端的沟壑,土壤含水率为 12.2%~18.4%,试验茶园具体情况如表 2 所示。

表 2 试验茶园具体情况表

树龄(年)	20		
茶树栽培方式	双行条栽		
坡度(°)	10		
测点	1	2	3
茶树高度(cm)	108	105	112
茶树幅宽(cm)	121	119	118
茶行宽度(cm)	36	38	39
测试茶行长度(m)	30	30	30

4.2 试验内容

4.2.1 旋耕开沟试验

在尚未耕作茶园地表与试验茶行交线处,垂直放置 50 cm 的钢直尺,测量试验茶行沟底最低处到钢直尺的垂直距离即旋耕开沟深度。沿整机行走方向,间隔 1 m 测量一次数据,随机选测 3 条试验茶行,每个茶行至少测量 10 次数据。本机施肥与开沟同步进行,肥料被播施到沟底最深处,施肥量无法从地表顺利测量,因此待样机成熟定型后,再开展肥量测量试验。

4.2.2 结果分析

旋耕开沟深度及稳定性的衡定指标为平均开沟深度与开沟深度稳定性指标,其中,开沟深度稳定性指标包括标准差、开沟深度变异系数、开沟深度稳定性系数:

$$h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i$$
$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (h_i - h)^2}$$
$$U = 1 - V = 1 - S/h$$

式中, h 为平均开沟深度; h_i 为第 i 点的旋耕开沟深度; n 为测量点数量; S 为旋耕开沟深度标准差; V 为旋耕开沟深度变异系数; U 为开沟深度稳定性系数。

旋耕开沟深度结果如表 3 所示,旋耕开沟深度为 28.47~28.62 cm,平均开沟深度为 28.61 cm,开沟深度稳定性系数为 97.71%~98.8%,平均耕深稳定性系数为 98.2%。

表 3 旋耕开沟深度试验结果表

项目	开沟深度(cm)	标准差(cm)	开沟深度变异系数(%)	开沟深度稳定性系数(%)
茶行 1	28.74	0.5739	1.20	98.8
茶行 2	28.47	0.6516	2.29	97.71
茶行 3	28.62	0.544	1.90	98.1
平均值	28.61	0.5898	1.7967	98.20

5 结论

(1)针对丘陵山区茶园施肥环节“无好机用”的难题,研制了一种同时完成茶行开沟、深施、覆土作业的丘陵茶园机械。该机械的施肥装置无需动力驱动,旋耕开沟到达最深时,肥料在自身重力的作用下,自动播施到深沟内。对整机、旋耕刀工作过程进行了受力分析,并对旋耕刀运动过程进行了理论分析,结合前期研究与理论计算,确定了整机各关键部件的技术参数。

(2)茶园试验表明,丘陵茶园开沟施肥覆土一体机性能可靠,作业效果较好,开沟深度为 28.47~28.62 cm,平均开沟深度为 28.61 cm,开沟深度稳定性系数为 97.71%~98.8%,平均耕深稳定性系数为 98.2%,各关键技术参数均满足茶园施肥作业要求,整机设计方案合理。

参考文献:

- [1] 王金陵,闻禄,陈平,等.长期不同施肥对茶园土壤 pH、茶叶产量可持续性和品质的影响[J].中国农学通报,2021,37(8):84-88.
- [2] Sugirbay A M,Zhao J,Nukeshev S O,et al. Determination of pin-roller parameters and evaluation of the uniformity of granular fertilizer application metering devices in precision farming[J].Computers and Electronics in Agriculture,2020,179(5):105835.
- [3] 宋月鹏,张紫涵,范国强,等.我国果园开沟施肥机械研究现状及发展趋势[J].中国农机化学报,2019,40(3):7-12.
- [4] 刘素惠,金心怡,郝志龙,等.我国茶叶生产全程机械化发展及茶机标准化建设探析[J].福建茶叶,2011,33(6):39-42.
- [5] 王文明,宋志禹,赵映,等.我国茶园中耕管理机械研究现状与发展分析[J].中国农机化学报,2021,42(1):52-58.
- [6] 肖宏儒,权启爱.茶园作业机械化技术及装备研究[M].北京:中国农业科学技术出版社,2012.
- [7] 韩余,肖宏儒,秦广明,等.我国茶园机械研究新动态[J].中国农机化学报,2013,34(3):13-16.
- [8] 易文裕,余满江,姚金霞,等.四川茶园机械化生产现状分析与对策研究[J].中国农机化学报,2014,35(5):292-295.
- [9] 肖宏儒,李建国,秦广明,等.高地隙自走式多功能茶园管理机田间试验研究[J].中国农机化,2010,(6):41-44.
- [10] 胡永光,杨叶成,肖宏儒,等.茶园施肥机离心撒肥过程仿真与参数优化[J].农业机械学报,2016,47(5):77-82.
- [11] 王文明,肖宏儒,宋志禹,等.茶叶生产全程机械化技术研究现状与展望[J].中国农机化学报,2020,41(5):226-236.
- [12] 李明,刘仲华.茶园遥控式静电喷药施肥试验机[J].茶叶科学,2012,32(6):552-558.
- [13] 戴有华,史修坤.茶园深松施肥机的设计与分析[J].中国农机化学报,2018,39(3):26-30.
- [14] 肖宏儒,李建国,秦广明,等.高地隙自走式多功能茶园管理机田间试验研究[J].中国农机化,2010,(6):41-44.
- [15] 肖宏儒,梅松,丁文芹,等.多功能茶园管理机节能高效作业技术研究[J].中国农机化学报,2013,34(6):211-215.
- [16] 代红朝.茶田翻耕机主要部件设计与试验研究[D].北京:中国农业科学院,2017.
- [17] 张海鹏,林聪,陈凌霄,等.茶园开沟施肥覆土一体机的设计与试验[J].中国农机化学报,2022,3(43):28-35.
- [18] DB42/T 1798—2022.茶园绿色高效施肥技术规范[S].
- [19] 贺小伟.高茬秸秆旋耕翻埋功耗检测系统设计与试验研究[D].武汉:华中农业大学,2014.
- [20] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003.
- [21] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [22] 成大先.机械设计手册[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [23] 丁为民,王耀华,彭高植.正、反转旋耕不同耕作性能的比较[J].南京农业大学学报,2003,26(3):106-109.
- [24] 孙红.基于 SPH 算法的果园开沟刀具土壤切削过程仿真及试验[J].中国农机化学报,2019,40(3):190-194.
- [25] GB/T 5668.3—1995,旋耕机械试验方法[S].
- [26] GB/T 5262—2008,农业机械试验条件测定方法的一般规定[S].

作者简介:段 凯,男,1989 年生,硕士,助理研究员。研究方向为农业机械装备。