

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.07.011

水田驱动叶轮轮叶下土壤流动特性与动力性能研究^{*}

陆华忠 罗锡文

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

【摘要】 在自制的小土槽试验装置上,进行了水田驱动叶轮轮叶下土壤流动的拍摄和轮叶上土壤反力的测试。在研究轮叶下土壤流动轨迹、流动模式和流动区大小变化规律的基础上,分析了轮叶产生的推进力和支承力,驱动效率的变化规律及其与土壤流动之间的关系。深入分析了有较大陷深和作旋轮线运动的轮叶的驱动效率较低的原因。

关键词: 水田驱动叶轮 轮叶 土壤流动 动力性能

中图分类号: S219.032.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0050-04

Soil Flow Rule and Dynamic Performance under a Paddy-field Wheel Lug

Lu Huazhong Luo Xiwen

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract

The lug is the basic element of a paddy-field lugged wheel. Soil flowed under the lug develops the pull and lift forces on the lug. In a set of specially designed soil box, the soil flow under the lug was photographed and the soil reaction forces on the lug were measured. Firstly, soil flow track, flow mode and flow zone under a lug were studied. The effects of the pull force, lift force and driving efficiency and their relationship with the soil flow in the interaction between the soil and lug were analyzed. The cause of low driving efficiency was further studied for the lug with slip and deep sinkage.

Key words Paddy-field lugged wheel, Lug, Soil flow, Dynamic performance

引言

水田拖拉机性能在很大程度上取决于直接与土壤发生作用的行走机构。由于水田土壤长期浸水、含水量高、强度低、粘性大,致使拖拉机装普通轮胎难于行走^[1]。目前,钢性叶轮是使用最广泛的水田拖拉机的驱动轮。水田叶轮在水田中行走时所产生的推进力和支承力主要是轮叶与土壤相互作用而形成的,因此,进行轮叶与土壤相互作用的研究,了解轮叶与土壤相互作用机理,为合理设计水田叶轮和提高水田拖拉机驱动轮的动力性能有很大的意义。

自20世纪50年代以来,在中国和日本等国进行了水田拖拉机行走机构的研究,先后研制出多种

水田轮,但大量的水田作业拖拉机仍采用开式叶轮,其牵引效率配双曲面叶轮时达50%~52%^[2],配直面膜式叶轮时只略高于40%。浆式叶轮和浮式叶片叶轮由于控制轮叶垂直出入土,大大地减少了挤压土壤的功率损失^[3-4],从而提高叶轮的驱动效率。但是,由于活动的轮叶使叶轮的结构复杂化,影响了推广应用,而且其可靠性、密封及成本等问题都尚需进一步研究探讨。具有仿生构形的水田叶轮叶片能够增加水田叶轮的驱动能力并提高其工作效率^[5]。

为了进一步研究轮叶与土壤的相互作用机理,本文通过轮叶下土壤流动拍摄和轮叶上土壤反力测试^[6-8],分析轮叶下土壤流动特性和土壤反力的变化规律。

收稿日期:2010-01-26 修回日期:2010-03-24

^{*} 广东省农业攻关项目(2008B021200008)

作者简介:陆华忠,教授,博士,主要从事车辆工程和农业机械化研究,E-mail: huazlu@scau.edu.cn

1 试验和方法

轮叶试验在装有玻璃视窗的土箱中进行,土箱尺寸为 $1200\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 125\text{ mm}$ (长 \times 高 \times 宽)。试验时,通过改变土层高度来改变轮叶的入土深度。模型叶轮的顶圆直径为 500 mm ,轮叶尺寸是 $120\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ (宽 \times 高 \times 厚),轮叶倾角 α 可分别调为 12.6° 、 20° 、 25° 、 30° 。利用普通机床驱动和控制模型叶轮运动,轮心水平运动,叶轮的转速为 1 r/min ,滑转率 S 可任意选择控制。

轮叶上土壤反力的法向力和切向力测定用八角环形传感器作为感应元件,轮上的驱动扭矩(T)通过贴应变片来测定。信号记录在磁带记录仪,经A/D转换由计算机采集和换算成推进力(F_p)、支承力(F_L)和驱动效率(E_d)。

为观察轮叶下的土壤流动,在土层的可视垂面上喷直径为 1.5 mm 、间隔是 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的白点,用可连续摄相的Minolta相机拍摄,曝光时间选用 1 s 。叶轮每转过 $5^\circ \sim 8^\circ$ 拍摄一次。

试验土壤是用筛去了粗沙粒和植物残根的水田土壤,含水率为 33% ,密度为 1.86 g/cm^3 ,液限为 35.4% ,塑限为 22.8% 。用剪切仪测得试验土壤的剪切力与剪切位移的关系曲线是呈渐近线型,其中内聚力为 2.75 kPa ,内摩擦角为 9° ,土壤与轮叶面的外摩擦角为 6.5° ,土壤与轮叶面的切向粘附力为 2.1 kPa 。

2 结果与分析

2.1 轮叶下土壤流动

图1为轮叶倾角 25° 和滑转率 20% 的轮叶下土壤流动照片。轮叶入土后,轮叶驱动面向下向后挤压土壤,使土壤产生塑性位移。随着轮叶的运动和轮叶挤压土壤,土壤的位移增大,轮叶尖下方的土壤被向下挤压和剪切,在土体中形成刺孔,同时原水平土表面上土壤隆起。

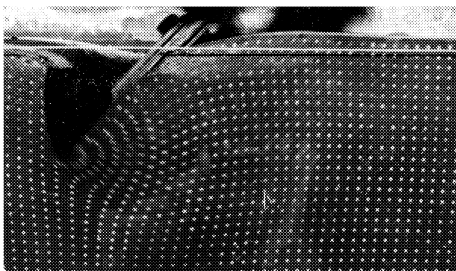


图1 轮叶下土壤流动照片

Fig. 1 Photograph of soil flow under a lug

图2分别为 35% 、 15% 滑转率和 25° 轮叶倾角的轮叶作用下轮叶面附近土壤的运动轨迹。滑转率

越大,轮叶旋轮线运动的刺孔越大,从而使土壤的变形量越大,轮叶尖附近土壤的剪切位移也越大,原水平面上隆起的土壤越多。如图2a,在轮叶面附近的一个区域内土壤的运动轨迹与轮叶的运动轨迹相同,该区域的土壤与轮叶面没有相对移动,也即形成了运动土楔。但是,在 15% 滑转率的轮叶作用下轮叶面附近的土壤与轮叶有相对移动,如图2b,也没有形成运动土楔。滑转率直接影响到轮叶和土壤的运动轨迹,当滑转率超过 20% ,在某一转角范围内存在土楔,滑转率越大土楔存在的轮叶转角范围越大。土楔的存在容易在轮叶面上产生积土。

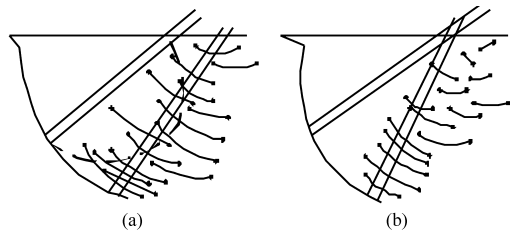


图2 轮叶面附件土壤的流动轨迹

Fig. 2 Flow track of soil adjacent to the lug

(a) $S=35\%$, $\alpha=25^\circ$ (b) $S=15\%$, $\alpha=25^\circ$

轮叶的旋轮线运动和轮叶的挤压土壤,使土壤的流动扩展成一个流动区。按照土力学的基本规律,土壤按最少阻力方向形成连续滑动面,并沿这些滑动面发生位移。土壤流动区内土壤的流线方向从轮叶触土面开始按曲线逐渐向后向上转变,始段呈曲线,后段为直线并与土表面相交,这与土力学中档土墙移向土体产生的土壤流动情况相似。但是,水田叶轮轮叶与土壤相互作用过程中土壤流动与平板的直压土和水平平移的土壤被动失效模式不同,这是由于轮叶上各点的运动方向及速度大小都不一致。图3为轮叶下土壤流动区的模式,边界线是土壤流动区的边界,最大速度线上的土壤的流动速度最大。当土楔存在时,最大速度线与土楔的下边界线基本重合。最大速度线与水平线的夹角要比流动区边界线与水平线的夹角大 10° 。

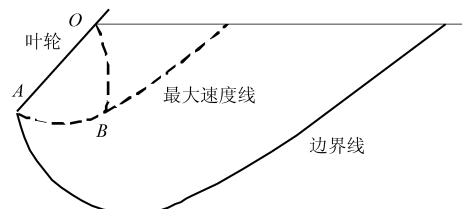


图3 轮叶作用下土壤流动区模式

Fig. 3 Mode of soil flow under a lug

轮叶在不同转角位置时土壤流动区的大小不同。图4为 20% 和 35% 的滑转率时,不同转角时轮叶下土壤流动区的长度。在轮叶入土后的开始阶段,随着轮叶的转动和轮叶触土面的增大,土壤流动

区迅速增大,轮叶转角(以水平轴线前方为零度起计算)到达70°左右土壤流动区长度最大,然后,随转角的增大土壤流动区缓慢减小,当转角接近90°后,土壤流动区随转角增大而迅速减小。在入土阶段,滑转率大,土壤流动区稍大,而在出土阶段,由于滑转率大时作旋轮线运动的轮叶产生的土壤刺孔大,土壤流动区明显较大。

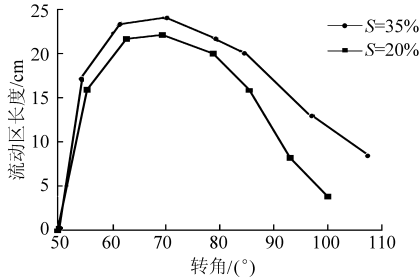


图4 轮叶下土壤流动区长度的变化

Fig.4 Length of soil flow zone

2.2 轮叶动力性能分析

由水田叶轮单轮叶动力性能的测试,可分析轮叶产生的推进力、支承力和驱动效率受轮叶倾角、陷深、滑转率的影响和随轮叶转角位置的变化规律。图5是滑转率20%、轮叶倾角20°、陷深60 mm时实测轮叶法向分力、切向分力及轮轴上的驱动扭矩换算后得到的轮叶推进力、支承力和驱动效率随轮叶转角变化曲线。

轮叶入土后,随着轮叶的运动和向下挤压土壤,土壤流动区迅速增大,又由于轮叶面与水平夹角较小,使支承力增大很快,在对应土壤流动区最大即70°转角附近时支承力达到最大值。随着轮叶继续运动,一方面由于土壤流动区减小,另一方面由于轮叶面与水平线的夹角增大,从而使支承力迅速减小,到达100°转角附近支承力为零,然后变为负值。推进力随轮叶入土后开始增大,但是由于轮叶面与水平夹角小,推进力的增大比支承力增大慢,而且在土壤流动区,轮叶上土壤反力的法向分力及驱动力矩到达最大时,推进力还未达到最大^[9],如图5,在88°轮叶转角时推进力达到最大值。然后,随轮叶转角的增大推进力逐渐减小,直至轮叶出土时为零。

轮叶的驱动效率开始随转角的增大而逐渐增大,在80°~110°转角范围内有相对较高的驱动效率,随转角的继续增大又逐渐减小,也即在支承力较小而推进力较大的转角范围驱动效率较高。在97°转角时驱动效率达到最大值,该转角对应支承力为零。

轮叶与土壤相互作用过程中,驱动轴的驱动扭矩(T)与轮叶上土壤反力对轮轴的转矩保持平衡,驱动效率(E_d)除与转矩平衡有关外还与滑转率(S)有关,如图6,可由下列公式表示

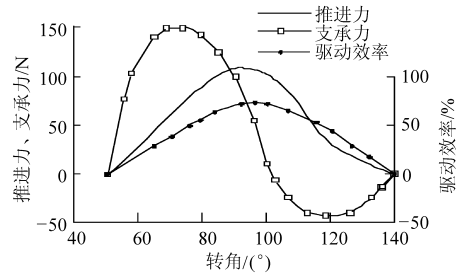


图5 轮叶上的推进力、支承力和驱动效率

Fig.5 Pull force, lift force and driving efficiency on a lug

$$T = F_p D_p + F_L D_L \quad (1)$$

$$E_d = F_p D_p (1 - S) / (F_p D_p + F_L D_L) \quad (2)$$

式中 D_p ——推进力 F_p 合力作用线到轮轴心距离
 D_L ——支承力 F_L 合力作用线到轮轴心距离

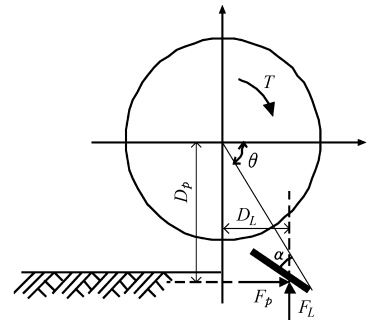


图6 轮叶上的土壤反作用力

Fig.6 Soil reaction forces on a lug

从式(1)、(2)可以看出,要使轮叶有较高的驱动效率,则希望滑转率和 $F_L D_L$ 越小越好。从推进力和支承力随转角的变化曲线可知,在轮叶入土后随着转角的增大, F_L 增大较快,到71°~75°转角时 F_L 达到最大。另外,刚开始入土阶段 D_L 值较大,因此, $F_L D_L$ 的值较大,驱动效率必然较低。随着转角的增大尤其超过75°后, F_L 开始减小而且 D_L 逐渐减小,而 $F_p D_p$ 逐渐增大,所以轮叶的驱动效率也逐渐提高,在支承力为零的转角附近驱动效率到达最高值。再随转角的增大,支承力开始出现负值,而且由于 $F_p D_p$ 减小, D_L 增大,因此驱动效率又逐渐变低。此外,轮叶的驱动效率还与轮叶倾角、陷深、滑转率有关^[9]。但无论如何,作旋轮线运动且有较大陷深的轮叶总是有较大一部分功率损失在向下挤压土壤和向上挑土以及滑转的运动损失,从而使驱动效率较低。

要提高水田叶轮轮叶的驱动效率,首先要有足够的推进力,以免滑转过大,然后设法减小 $F_L D_L$,也即要减小轮叶在刚开始入土阶段的支承力及出土阶段支承力的负值。轮叶出土时向上挖土产生的负值支承力可以靠采取一定的轮叶倾角加以避免,但这样又增加了轮叶入土时向下挤压土壤。因此,在轮

叶的出土和入土阶段若有不同的轮叶倾角,即在入土阶段轮叶的倾角小或者甚至负倾角,在轮叶出土阶段轮叶有较大的倾角,则可减小轮叶在入土和出土阶段的 $F_L D_L$ 值,从而提高驱动效率。浆式叶轮和浮式叶片叶轮实际上也是为了达到这个目的。

3 结论

(1) 在水田驱动叶轮轮叶旋轮线运动的作用下,轮叶驱动面挤压土壤,使土壤产生塑性位移而流动,土壤在轮叶上的反作用力使轮叶产生推进力和支承力。在刚入土阶段,轮叶向下向后挤压土壤,土壤流动区迅速扩大,在 70° 转角附近,土壤流动区及作用在轮叶上的支承力都达到最大值。但是,轮叶面的倾斜使推进力达到最大值来得较迟,而是在接近轮叶到达最低点即 90° 转角附近,推进力达到最大值,再随转角增大而逐渐减小。当轮叶转角超过

90° 后,轮叶开始出土,土壤流动区随转角增大而迅速减小,支承力也迅速减小,到达 100° 转角附近支撑力为零,然后变为负值。

(2) 轮叶的驱动效率变化与土壤流动、推进力和支承力的变化过程密切相关。在轮叶刚入土和出土阶段,由于轮叶向下挤压和向上挑土,支承力产生的阻力矩造成功率损失比例较大,从而使驱动效率较低。在 $80^\circ \sim 110^\circ$ 转角范围,轮叶的驱动效率较高,在对应支承力为零转角附近驱动效率达到最高。也就是说,要使单个轮叶的驱动效率提高,就需要减小轮叶的支承力。

(3) 在湿软的水田土壤中行驶的水田叶轮,由于轮叶需要承担产生支承力以免陷深过大,再加上滑转的运动损失,作旋轮线运动的轮叶总是会有较大的功率损失在向下压土和向上挑土,从而使其驱动效率较低。

参 考 文 献

- 邵耀坚. 叶轮运动学和轮叶设计原理的探讨[J]. 农业机械学报, 1964, 7(1): 1~18.
Shao Yaojian. On the kinematics of the blade-lugged wheels and the theory of design of blade-lugs for the paddy-field wheel tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1964, 7(1): 1~18. (in Chinese)
- 邵耀坚. 关于轮叶几何形状的分析及试验[J]. 华南农学院学报, 1980, 1(4): 49~73.
Shao Yaojian. Advanced analysis on the design of geometrical parameters of the blade-lug for the paddy-field wheel tractor [J]. Transactions of South China Agriculture Institute, 1980, 1(4): 49~73. (in Chinese)
- 陈秉聪, 赵玉璠. 浮式水田拖拉机驱动叶轮的研究[J]. 农业机械学报, 1983, 14(3): 1~12.
Chen Bingcong, Zhao Yufan. The research of the driving wheel with movable lugs of the floating paddy-field tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1983, 14(3): 1~12. (in Chinese)
- 王文隆, 朱永达. 浮式工作原理及其应用[J]. 农业机械学报, 1980, 11(2): 1~9.
Wang Wenlong, Zhu Yongda. Buoying principle of tractor and its applications [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1980, 11(2): 1~9. (in Chinese)
- 张永智, 左春桢, 孙少明, 等. 水田驱动叶轮仿生叶片机理数值模拟分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11): 176~179.
Zhang Yongzhi, Zuo Chunzheng, Sun Shaoming, et al. Numerical simulation on bionic blade of paddy impeller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 176~179. (in Chinese)
- 邵耀坚, 罗锡文, 陆华忠. 水田叶轮动力学研究[C]//中国力学学会, 中国农业工程学会. 力学与农业工程: 农业工程中的力学问题研讨会论文集. 北京: 科学出版社, 1994: 75~94.
- Salokhe V M, Gee-Clough D. Modes of wet clay soil behavior under a single cage wheel lug [J]. Journal of Terramechanics, 1988, 25(4): 273~285.
- Watyotha C, Salokhe V M. Pull, lift and side force characteristics of cage wheels with opposing circumferential blades [J]. Soil and Tillage Research, 2001, 60(3~4): 123~134.
- 陆华忠, 邵耀坚, 罗锡文. 水田叶轮单轮叶动力性能的试验研究[J]. 农业工程学报, 1995, 11(1): 65~70.
Lu Huazhong, Shao Yaojian, Luo Xiwen. Experiment research on the dynamic performance of a single lug [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1995, 11(1): 65~70. (in Chinese)