

植树挖坑机坑形控制与挖坑阻力计算方法研究^{*}

马岩

(东北林业大学林业与木工机械工程中心, 哈尔滨 150040)

摘要 提出了利用钻头下钻时受到的阻力和挖坑连杆机构的固有频率控制生态植树机钻头运行轨迹的控制方法. 首先, 采用近似方法计算挖坑过程中钻头下钻时受到的阻力, 得到了分叉型尖入土阻力公式. 然后, 推导出了一般情况下弹性挖坑连杆机构的固有频率, 并给出了在其他条件不变的情况下, 只改变油缸推程速度控制钻尖轨迹的计算程序. 分析表明: 油缸推程 (下行) 速度越大, 坑形随之变小; 但是当推程速度增大时, 钻头的挖坑速度增加; 利用机构的运动控制来进行坑形的几何控制, 可以提高挖坑机构的运动特性和结构特性.

关键词 植树机, 挖坑, 动态控制, 机构, 坑形

引言

我国土地沙漠化非常严重, 根治沙尘暴是我国面临的严重问题^[1]. 因此, 提高森林覆盖率, 保护生态环境, 防风固沙, 必须从植树造林开始, 而且需要高速造林. 因而, 利用机械化高速植树造林, 实现植树的连续化作业, 在动态行走中控制挖出的坑形满足植树的最佳要求, 考虑挖土阻力对坑形的影响, 是植树机设计现代化的重要一环^[2]. 植树机坑形控制系统的输入是驱动力、油缸推力、苗盘转角、六杆机构主动杆转角, 输出是坑形、落入坑内的树苗和培土力. 本文将主要讨论输出坑形控制的结果与分析的结论.

1 生态植树机结构和性能设计简介

生态植树机 (Ecoplanter) 是连续植树的专用设备, 它对生态的适应性好, 对生态破坏极小^[3]. 该机用连续挖坑机构挖土, 土坑周围破坏小, 使树苗有更高的成活率和更高的植树速率. 而且可以有选择的在适宜的植树点挖坑和植树, 提高了机器的机动性、对不同地面的适应性和机械化程度. 这种植树机对土壤的破坏是最小的, 它避免了大多数植树机所采用的开沟器连续开沟植树, 减少了土地营养流失、土壤破坏及地表生态环境的破坏, 也降低了机器的损伤率^[4].

图 1 为生态植树机样机图, 其工作过程为: 种植时, 容器树苗先被置于植树机的转动苗盘的苗筒内,

当树苗转到投苗位置时, 靠重力落入植树头中准备种植. 挖坑机构在指定位置进行松土挖坑, 植树头在四杆机构的作用下下降, 插入土中以后, 植树头松开, 将树苗置于植树坑中, 植树头再抬起来, 最后由压实机构将树苗压实. 同时, 苗盘转动, 新的树苗又被送入植树头中以备下次使用. 如此, 完成一次种植过程^[5]. 在研究植树机挖坑机构的轨迹分析之前, 假设生态植树机挖坑机构可简化为等效六杆机构. 求解杆组最低点的位置就是坑形的轨迹分析和方程^[6-8]. 生态植树机的照片和六杆机构的照片将图 1, 杆组的机构简图如图 2 所示. 植树机由牵引拖拉机行走规定距离以后, 液压系统启动, 带动松土马达旋转, 六杆机构松土马达下移, 挖坑铲在松土中挖出规定的坑形, 插苗头将苗盘放入的苗插入土中. 苗盘转动一个角度, 准备下一次动作. 系统的动态方程见文献 [5].



图 1 生态植树机样机

Fig 1 Prototype of ecological planting tree machine

2006-5-15 收到第 1 稿, 2007-07-04 收到修改稿.

^{*} 国家计委产业化项目 "西部沙区大型深坑联合植树技术研究" 资助项目

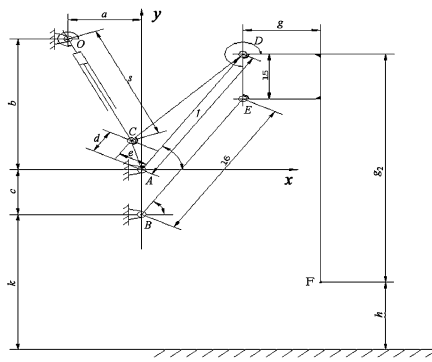


图2 生态植树机挖坑机构的等效六杆机构

Fig 2 Six equivalent mechanisms of the hangs system of the ecological planting tree machine organization for loosening the soil

2 挖坑阻力近似计算

由于挖坑过程太复杂,有很多影响因素.在此采用近似方法计算挖坑过程中钻头下钻时受到的阻力.钻头入土的土壤阻力 R_z 等于钻尖和刀片入土阻力可由在垂直轴上的投影之和^[4].

$$R_z = R_{尖z} + iR_{刀z} \quad (1)$$

式中, i 是刀片数, $R_{尖z}$ 是钻尖阻力, $R_{刀z}$ 是钻刀阻力.

钻头入土阻力与进给量成正比.经实验证明,分叉型钻尖入土阻力最小,锥形小螺旋型最大,三角型次之.分叉型尖入土阻力可由经验公式确定:

$$R_{尖z} = (q_3 + K_3 S) D_{尖} \quad (2)$$

式中, $D_{尖}$ 是钻尖直径,本设计中为 $0.06m$, S 是钻尖每转进给量,本设计中为 $0.07m/r$; q_3 、 K_3 是系数,对坚实土壤: $q_3 = 5.39kN/m$; $K_3 = 343kPa$ ^[5].

刀片上单元入土阻力在垂直轴上投影如图3所示.

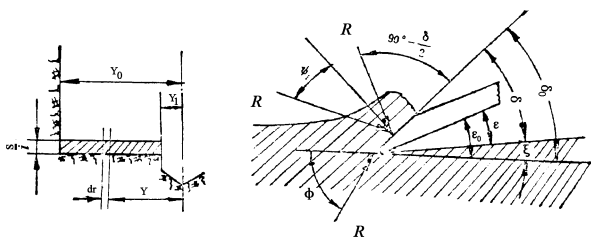


图3 挖坑阻力分析

Fig 3 Aanalysis on pitting resistance

$$R_{刀z} = (q \sin \alpha - K_2 \frac{S}{i} \cos(\alpha_0 + \alpha_1)) \int_{r_1}^{r_0} dr = (q \sin \alpha - K_2 \frac{S}{i} \cos(\alpha_0 + \alpha_1)) (r_0 - r_1) \quad (3)$$

$$dR_{刀z} = q dr \sin \alpha - K_2 \frac{S}{i} dr \cos(\alpha_0 + \alpha_1) \quad (4)$$

式中, α_0 是刀片的名义前角, r_0 是刀片的回转半径,

r_1 是刀尖半径, q 是土壤阻力比例系数, $q = 1.8 - 3.5kN/m$, K_2 是土壤变形阻力系数, $K_2 = 166.8 - 250kPa$,对于坚实土壤取大值,对于疏松土壤取小值, α 是土壤切削阻力与水平面的夹角, $\alpha = 30^\circ - 58^\circ$ 对于坚实土壤取大值,对于疏松土壤取小值, α_1 是土壤对钢的摩擦角.

将式(2)、式(3)代入式(1)中,则

$$R_z = (q_3 + K_3 S) D_{尖} + (iq \sin \alpha - K_2 S \cos(\alpha_0 + \alpha_1)) (r_0 - r_1) \quad (5)$$

3 油缸推力和固有频率计算

由液压原理:

$$F = p \cdot A = p \cdot \frac{D^2}{4} \quad (6)$$

式中, p 是油缸压力(Pa), A 是油缸活塞有效面积(m^2), D 是油缸活塞直径(m).

一般情况下弹性挖坑连杆机构有三种基本参量,即:结构参量、截面参量和材料参量,它们从本质上决定了机构的动力特性.机构的固有频率是评估其内在特性的一个重要指标,机构的基本参量与其特性指标之间存在着一定的内在联系,如下式^[11]

$$\omega_e = \sqrt{\frac{1}{Nl^2}} \times \sqrt{\frac{J}{NA}} \times \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (7)$$

式中, ω_e 是单元固有频率, l 是单元长度, A 是单元的截面积, J 是单元的惯性矩, ρ 是杆件材料的质量密度, E 是杆件材料的弹性模量.

机构的固有频率是由其上各单元的固有频率所直接决定的.当采用振型叠加法进行相应分析时,需要求出系统的固有频率和主振型,求解多自由度系统的固有频率和主振型归结为求解如下线性方程组:

$$K\phi = \omega^2 M\phi \quad (8)$$

式中, K 是实对称矩阵, M 是实对称正定矩阵, ω 是固有频率.求解这类问题也称为 K 和 M 的广义特征值问题.

4 植树机挖坑机构的轨迹分析

在其它条件不变的情况下,只改变油缸推程速度,观察其钻尖轨迹如下:当油缸速度 $v_{油缸} = 50mm/s$ (推程)时,在 $h = 0$ 时刻,在上下一个循环中,两点钻头绝对位置点 $F(0, 0)$ 和 $F''(212.7135, 0)$;油缸下行到极限位置($s = 470mm$)时,并可得钻头离地高度 $h = -292.2291mm$,得钻头绝对位置点

F''' (152 0364, - 292 2291); 及另一关键点 (217. 37, - 59 178), 即曲线最右点. 其坑形如图 4 所示.

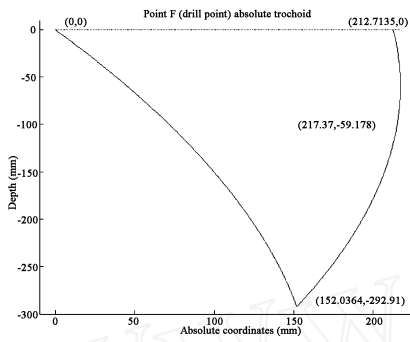


图 4 植树机坑形分析 ($v_{油缸} = 50\text{mm/s}$)
Fig 4 Analysis on pit-shape of the planting tree machine ($v_{oilcylinder} = 50\text{mm/s}$)

当油缸速度 $v_{油缸} = 80\text{mm/s}$ (推程) 时, 同理可得钻头离地高度 $h = - 292 2291\text{mm}$, 得钻头绝对位置点 F''' (98 858, - 292 2291); 及另一关键点 (144 2, - 95 131), 即曲线最右点. 其坑形如图 5 所示.

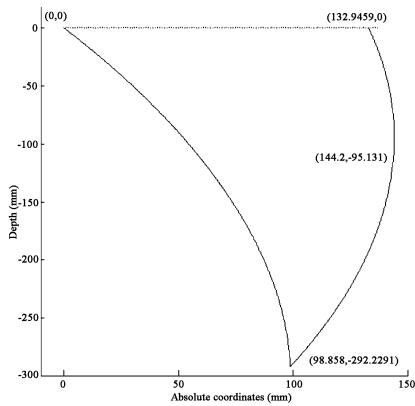


图 5 植树机坑形分析 ($v_{油缸} = 80\text{mm/s}$)
Fig 5 Analysis on pit-shape of the planting tree machine ($v_{oilcylinder} = 80\text{mm/s}$)

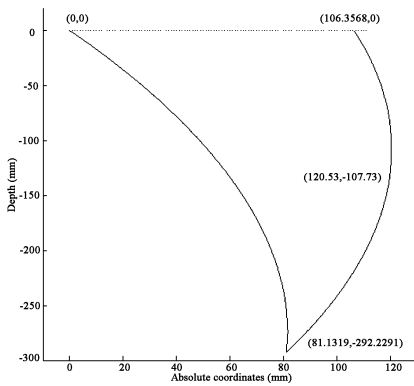


图 6 植树机坑形分析 ($v_{油缸} = 100\text{mm/s}$)
Fig 6 Analysis on pit-shape of the planting tree machine ($v_{oilcylinder} = 100\text{mm/s}$)

当油缸速度 $v_{油缸} = 100\text{mm/s}$ (推程) 时, 可得钻头离地高度 $h = - 292 2291\text{mm}$, 得钻头绝对位置点 F''' (81. 1319, - 292 2291); 及另一关键点 (120 53, - 107. 73), 即曲线最右点. 其坑形如图 6 所示.

由此可以看出, 当油缸推程 (下行) 速度越大, 坑形随之变小, 但是当推程速度增大时, 钻头的挖坑速度也增加, 所受的挖坑阻力随之增加^[5]. 对前面三种情况比较, 我们选取油缸推程为 80mm/s

当第二杆组 ADEB 采用非平行四杆机构时, 比较坑形和钻头的挖坑进给速度, 并考虑到结构设计和实现供苗等功能的难易程度, 仍采用平行四杆机构.

本论文所设计的生态植树机挖坑机构悬挂机构等效六杆机构各杆尺寸为: $a = 165. 5\text{mm}$, $b = 440\text{mm}$, $c = 150\text{mm}$, $d = 73\text{mm}$, $e = 70\text{mm}$, $f = 450\text{mm}$, $l5 = 150\text{mm}$, $l6 = 450\text{mm}$, $g1 = 175\text{mm}$, $g2 = 766\text{mm}$, $k = 455\text{mm}$, $370 \leq s \leq 470\text{mm}$. 当取 $s = 370$, 经过迭代, 便可得机构在此任意时刻的位置.

5 结论

1) 对生态植树挖坑机构进行了动态分析, 提出了机构位置及钻尖轨迹的相对位移、绝对位移的数值解, 这对下一步的动力优化分析作好了理论准备.

2) 采用动态位置计算得到了各构件的转角和位移, 并用数值仿真计算了各个点的结果.

3) 研究各个坑形曲线分析, 讨论不同参数时对杆组机构及油缸的推行速度和坑形的关系, 并应用到实际植树机的设计和制造中. 为实际植树挖坑机设计提供了关键参数.

4) 本文提出了对植树机挖坑机构的坑形轨迹分析的一种动态研究方法, 这也为今后对该类机构的改进设计、参数确定指明了方向.

参 考 文 献

- 姜爱林. 西部沙漠的开发、利用与保护. 国家行政学院学报, 2000, (4): 46 ~ 49 (Jiang Ailin Exploring, utilizing and protecting deserts in west areas *Journal of National School of Administration*, 2000, (4): 46 ~ 49 (in Chinese))
- 潘天丽, 王蓝. 在退耕还林中应大力发展林业机械. 陕西林业科技, 2000, (4): 1 ~ 3 (Pan Tianli, Wang Lan Developing forestry machinery during returning land for farming to forestry *Shanxi Forestry Science and Technology*, 2000,

- (4): 1~3 (in Chinese))
- 3 王玉霞,郭连生,邹受益等.科尔沁沙地杨树深松插干造林技术研究.内蒙古林学院学报(自然科学版),1999,21(3): 38~43 (Wang Yuxia, Guo Liansheng, Zou Shouyi Test and analysis on afforestation technology of poplar medial deep planting in Keerqin sand land *Journal of Neimenggu Forestry Forestry College*, 1999, 21(3): 38~43 (in Chinese))
 - 4 俞国胜,顾正平,钱桦等.半干旱沙地深栽造林钻孔机的性能试验与研究.林业科学,2001,37(3): 112~117 (Yu Guosheng, Gu Zhengping, Qian Hua The function and research of deep planting earth auger in semiarid sand *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(3): 112~117 (in Chinese))
 - 5 马岩.生态植树机松土机构运动特性分析.动力学与控制学报,2005,3(1): 90~95 (Ma Yan Analyse on the dynamic athletic characteristic of ecoplantter *Journal of Dynamic and Control*, 2005, 3(1): 90~95 (in Chinese))
 - 6 孟宪举,黄永强.具有刚性运动的弹性梁单元动力学微分方程的精确表达式.河北理工学院学报,1998,20(3): 34~41 (Meng Xianju, Huang Yongqiang The accurate equation of elastic beam element with rigid movement *Journal of Hebei Institute of Technology*, 1998, 20(3): 34~41 (in Chinese))
 - 7 冯志友,李晶,邢传波.含间隙机械系统 KED 分析的计算机仿真.佳木斯大学学报(自然科学版),2000,18(4): 333~334 (Feng Zhiyou, Li Jing, Xing Chuanbo KED Simulation of Mechanical System with Bearing Clearance. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 2000, 18(4): 333~334 (in Chinese))
 - 8 俞国胜,顾正平等.半干旱沙地机械化造林试验研究及其前景.林业机械与木工设备,2000,28(10): 9~11 (Yu Guosheng, Gu Zhengping Mechanized planting test research in semi-arid sand *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2000, 28(10): 9~11 (in Chinese))

STUDY ON PIT-SHAPING CONTROL OF TREE-PLANTING MACHINERY AND COMPUTATIONAL METHOD OF PIT-DIGGING RESISTANCE*

Ma Yan

(Forestry and Wood Mechanical Engineering Technology Center, Northeast Forestry University, Haerbin 150040, China)

Abstract This paper proposed a control method for ecoplantter machine, which used the resistance that the drilling bit encountered when drilling downward and the natural frequency of pit-digging link structure to control the movement path of the drilling bit. First, an approximate method was employed to compute the resistance that the drilling bit encountered when drilling downward, and the resistance formula of branching pointed to the earth was obtained. Then, the natural frequency of elastic pit-digging link structure in the common circumstance was inferred, and the computational programme of controlling drilling point path by only changing the regulation speed of oil cylinder with other invariable condition was presented. The analysis shows: (1) that the pit shape becomes small when increasing the regulation (downward) speed; (2) that the pit-digging speed of drilling bit increases when increasing the regulation speed; (3) that using the movement control of mechanism to carry on the geometry control of the pit shape can enhance the movement characteristic and structure characteristic of the mechanism.

Key words ecoplantter, pitting, dynamic control, mechanism, pit-shape

Received 15 May 2006, revised 4 July 2007.

* The project supported by the National Planning Commission Industrialization Program of China