

分类号: S23
学 号: 20212009047

密 级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



犁耕土垡运动轨迹与犁体曲面关系研究

学 位 申 请 人	宋禹莹
指 导 教 师	郑炫 研究员
申请学位门类级别	工学硕士
学 科、专 业 名 称	农业工程
研 究 方 向	农业机械化工程
所 在 学 院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2024年07月

分类号: S23
学号: 20212009047

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



犁耕土垡运动轨迹与犁体曲面关系研究

学位申请人	宋禹莹
指导教师	郑炫 研究员
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	农业工程
研究方向	农业机械化工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子

2024年07月

**Study on the relationship between the trajectory of ploughing soil and
the surface of the plough body**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Song yu-ying

(Agricultural Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Zheng Xuan

July, 2024

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：原禹莹

时间：2024年7月9日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：原禹莹

时间：2024年7月9日

导师签名：郑生斌

时间：2024年7月9日

摘要

犁体曲面参数是影响土垡运动轨迹和耕后土壤分布的重要因素，目前犁体的研究主要集中于作业阻力及部件的磨损，犁体曲面结构参数与耕后土垡的分布研究较少。本文针对犁耕过程中犁体曲面结构参数与耕后土壤空间分布规律间关系不清晰的问题，采用离散元仿真分析，结合磁性示踪剂法，探寻犁体曲面结构参数对土垡运动轨迹的影响规律，建立耕作过程中土垡抛落位置预测模型，为犁体曲面设计提供理论支撑。本文主要研究内容如下：

(1) 针对犁耕过程中土垡运移的运动学和动力学特性，将土垡运移轨迹分成土垡与犁体碰撞阶段、沿犁体运移阶段和离开犁体后运移阶段，建立土垡运动轨迹的数学模型，分析犁体曲面结构参数对土垡运动轨迹的影响因素。

(2) 通过离散元仿真分析，探索犁耕过程中土壤的运移变化趋势，研究结果表明：土壤与犁体的相对运动过程中，抛离时土壤的高度与土壤离铧刃线的距离成反比，横向位置与土壤离铧刃线的距离成正比；通过单因素仿真试验，开展犁体曲面不同结构参数下土垡运动轨迹变化趋势仿真研究。结果表明：迹线侧移量对土壤深度方向的分布情况影响最大，翻土角沿犁胸变化的系数对土壤深度方向的分布情况影响最小，其余结构参数都仅对铲尖区域的土壤深度方向的位移有影响。

(3) 基于量纲分析法结合白金汉 π 定理建立土垡抛落位置预测模型，以土壤初始坐标、迹线侧移量、犁体推土角、翻土角及翻土曲线为自变量，土壤前进方向位移 X 、横向位移 Y 和深度方向位移 Z 为因变量，分别建立了土垡抛落位置的预测模型，其决定系数 R^2 均大于 0.80。

(4) 为验证土垡抛落位置预测模型的精准性，开展了土壤坐标极值试验，对实测值与预测值进行相关性分析， X 预测模型的决定系数 R^2 为 0.98、 Y 预测模型的决定系数 R^2 为 0.94、 Z 预测模型的决定系数 R^2 为 0.94，拟合度精度较高，该预测模型可较为准确的预测出犁耕土壤的前进方向位移、横向位移和深度方向位移。

关键词：土壤；铧式犁；土垡运动轨迹；离散元法；预测模型

Abstract

Plow surface parameters are important factors affecting the trajectory of soil and the distribution of soil after tillage. At present, the research of plow mainly focuses on the working resistance and the wear of components. There are few studies on the structure parameters of plow surface and the distribution of soil after tillage. In this paper, aiming at the problem that the relationship between the structural parameters of the plow surface and the spatial distribution of the soil after tillage is not clear in the process of plowing, the discrete element simulation analysis is used, combined with the magnetic tracer method, to explore the influence of the structural parameters of the plow surface on the trajectory of the soil, and the prediction model of the position of the soil in the process of tillage is established, which provides theoretical support for the design of the plow surface. The main research contents of this paper are as follows :

(1) Aiming at the kinematic and dynamic characteristics of soil migration during ploughing, the soil migration trajectory is divided into the collision stage between soil and plough, the migration stage along the plough and the migration stage after leaving the plough. The mathematical model of the soil movement trajectory is established, and the influence factors of the surface structure parameters of the plough on the soil movement trajectory are analyzed.

(2) Through discrete element simulation analysis, the trend of soil migration during ploughing is explored. The results show that during the relative movement of soil and plough body, the height of soil is inversely proportional to the distance from soil to shin blade line, and the horizontal position is proportional to the distance from soil to shin blade line. Through the single factor simulation test, the simulation study on the change trend of soil movement trajectory under different structures of plough body surface is carried out. The results show that the lateral displacement of the trace line has the greatest influence on the distribution of the soil depth direction, the coefficient of the change of the turning angle along the plow chest has the least influence on the distribution of the soil depth direction, and the other structural parameters only affect the displacement of the soil depth direction in the shovel tip area.

(3) Based on the dimensional analysis method combined with Buckingham 's π theorem, a prediction model for the throwing position of the soil was established. Taking the initial coordinates of the soil, the lateral displacement of the trace line, the pushing angle of the plow body, the turning angle and the turning curve as the independent variables, and the forward direction displacement of the soil X , the lateral displacement Y and the depth direction displacement Z as the dependent variables, the prediction models of the position of soil flaking were established respectively, and the determination coefficient R^2 was greater than 0.80.

(4) In order to verify the accuracy of the prediction model of soil falling position, the soil coordinate extreme value test was carried out, and the correlation between the measured value and the predicted value was analyzed. The determination coefficient R^2 of the X prediction model was 0.97, the determination coefficient R^2 of the Y prediction model was 0.93, and the determination coefficient R^2 of the Z prediction model was 0.91. The fitting accuracy was high. The prediction model can accurately predict the forward displacement, lateral displacement and depth displacement of ploughed soil.

Key words: Soil ; mulch plough ; trajectory of soil slice movement ; discrete element method ; prediction model

目录

摘要.....	I
Abstract	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 犁体设计方法国外研究现状.....	2
1.2.2 犁体设计方法国内研究现状.....	3
1.2.3 离散元法在土壤位移方面的应用.....	5
1.2.4 示踪剂法在土壤位移方面的应用.....	6
1.3 研究目的及内容.....	8
1.3.1 研究目的.....	8
1.3.2 研究内容.....	8
1.4 研究方法及技术路线.....	9
第 2 章 土袋运动分析及犁体曲面结构参数的确定.....	10
2.1 土袋与犁体碰撞阶段.....	10
2.2 土袋沿犁体运移阶段.....	12
2.3 土袋离开犁体后运移阶段.....	16
2.4 犁体曲面结构参数的确定.....	17
2.5 本章小结.....	18
第 3 章 不同犁体曲面结构参数下土袋运动轨迹的仿真分析.....	19
3.1 离散元模型建立.....	19
3.1.1 土壤参数测定.....	19
3.1.2 离散元仿真模型的建立.....	20
3.1.3 离散元仿真模型的验证.....	21
3.2 土袋运动轨迹分析.....	22
3.3 犁体曲面结构参数对土袋运动轨迹的影响.....	27
3.3.1 迹线侧移量对土袋运动轨迹的影响.....	28
3.3.2 推土角对土袋运动轨迹的影响.....	31
3.3.3 翻土角对土袋运动轨迹的影响.....	34

3.3.4 翻土曲线对土袋运动轨迹的影响	40
3.4 本章小结	51
第 4 章 不同犁体曲面结构参数下耕后土袋分布的仿真研究	53
4.1 理论模型	53
4.2 仿真结果与分析	56
4.3 土袋抛落位置预测模型建立	66
4.4 本章小结	72
第 5 章 田间试验	74
5.1 试验条件及设备	74
5.2 试验方案	76
5.3 试验结果与预测结果对比分析	78
5.4 本章小结	82
第 6 章 结论与展望	84
6.1 结论	84
6.2 展望	85
参考文献	86
致谢	91
作者简介	92

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

截至 2022 年 12 月 31 日, 由我国自然资源开展的全国国土变更调查的成果显示, 全国耕地面积 19.14 亿亩, 其中新疆耕地面积 10632 万亩, 占全国耕地总面积的 5.55%^[1]。新疆的农耕地机械化率达到 85% 以上, 随着拖拉机技术的迅猛发展, 拖拉机功率也在不断增大, 使得犁耕作业朝着高效、节约的要求发展^[2]。在现代农业中约有七成的田间作业消耗是花费在了犁地项目上, 高速犁是实现高效耕深作业的重要耕地机械, 目前高速犁的耕速为 8km/h~10km/h。当拖拉机以 10km/h 的速度进行犁耕作业时, 拖拉机的作业效果更佳且燃油经济效益高^[3]。

随着农业生产规模不断扩大, 农业机械化水平不断提高, 犁耕作业的作用愈发显著, 可以有效改善土壤的物理性质, 增加土壤的透水、透气性, 消灭杂草、减少病虫害, 加速土壤养分分解与积累, 增加土壤中有利微生物的活力, 促进土质熟化, 提高土壤蓄水保墒、保肥的能力, 进一步提高农田土壤的质量^[4-6]。犁耕作业方式为土壤耕翻, 通过犁体曲面将农田中的表层土壤, 包括杂草、残茬、肥料等翻埋到犁沟底, 并将深层的土壤疏松并翻至上层, 实现对耕层土壤之间进行置换, 具有很好的土壤翻垡和覆盖性能^[7-9]。依据 GB/T 14225-2008《铧式犁》要求耕后地表 8cm 深度内的植被和残茬覆盖率大于 85% 以及 8cm 以下耕层内的植被和残茬覆盖率大于 60%^[10], 土壤翻垡不达预期时如图 1-1 所示, 往往会导致耕作效果降低, 为后续平整土地等工序增加成本, 降低生产效率, 因此应根据作业需要科学合理地设计犁体曲面^[11-12]。目前, 土壤-耕作工具的研究大多都集中于耕作过程中犁体的阻力、磨损及能量消耗等^[13-24], 对于犁体曲面结构参数与耕后土垡分布的研究较少。

犁体直接影响犁耕过程中土垡从抬起到抛落的运动轨迹, 犁体曲面的科学设计是提高犁耕作业的关键。因此本研究建立犁体与土壤互作离散元模型, 探索代表性颗粒在犁耕过程中的实时位移, 寻找不同犁体曲面结构参数下土垡运动轨迹的变化规律。在此基础上建立土垡抛落位置预测模型, 用于直接预测不同初始位置、不同犁体曲面结构参数下土壤的横向位移、前进方向位移和深度方向位移。实现依据翻垡要求确定犁体曲面结构参数, 为犁体曲面设计提供理论支撑。



图 1-1 土壤耕作效果

Fig 1-1 Effectiveness of soil tillage

1.2 国内外研究现状

1.2.1 犁体设计方法国外研究现状

国外研究高速犁已经有 80 多年的历史，从对现有的常速犁体进行高速耕作试验，综合考虑阻力、碎土、覆盖和土垡的侧抛距离以及耕后犁沟断面等情况，综合分析比较，从中选出适应高速作业的犁体的经验设计方法，到将犁体曲面设计与犁耕工艺过程、土垡运动特点与犁体曲面构成原理结合下进行犁体曲面的研究与设计的理论研究设计方法。

Shone^[25]对比 25 种常速犁体在高速作业的耕作效果，将犁体分为通用型、翻垡型和熟地型，并通过减缓曲面的陡度，减小犁翼处侧向角以及减缓犁翼的扭曲程度来增加犁体的长度，增大样板曲线的开度和高度设计适于高速作业的犁体，如图 1-2 所示。戈里亚奇金院士推导了土垡相对运动和绝对运动轨迹的微分方程，又基于土壤力学特性、犁耕的深度、速度和犁体曲面的形状推导出的牵引阻力公式 $P=fg+kab+\epsilon abv^2$ ，并指出三项中每一个都可以发展和替换成更复杂的函数。格亚捷夫^[26]建立了土垡中点相对可展曲面的运动微分方程，并提出当土垡刚度或犁耕速度趋于无穷大以及土垡在犁壁上摩擦力的力矩趋于零时，土垡的上极限轨迹就是测地线。随着犁耕作业速度和土垡凝聚性的增大，土迹线会逐渐趋于稳定，此时土迹线与犁体曲面几何形状有关，而与土壤性质、犁耕作业速度无关。Vasilenko^[27]为了确定质点在惯性运动下的路径，提出不去求一个点运动的解，而使用测地线微分方程的解，曲面上的测地线由二阶微分方程描述，需要应用数值方法。Yachev^[28]依据土垡与犁壁相互作用过程中产生的力，创建出了土垡中点沿犁壁运动路径的微分方程，在方程中还将土垡的尺寸、重量、弹

性和耕作速度等参数与法线曲率和测地曲率及路径长度联系起来，得出结果当土垡路径的测地曲率随土垡沿犁壁运动的速度增大而减少，也就是土垡的极限路径为曲面的测地线。Gill^[29]建立最初土壤状态、最终土壤状态、犁体运动工况、犁体曲面几何形状、实现土壤最终状态所需能量之间的数学模型。Bulgakov^[30-32]将牵引阻力公式中的耕作速度项替换为测地线角度为自变量的函数，通过数值方法确定土垡沿犁壁的路径引起动态分量对犁体阻力有影响，把测地线作为土垡在犁壁上运动的极限路径可以将寻找犁体阻力的问题转化为寻找测地线角度对应值的问题，通过设定土壤路径展开的表面设计犁体曲面，而无需考虑力相互作用。

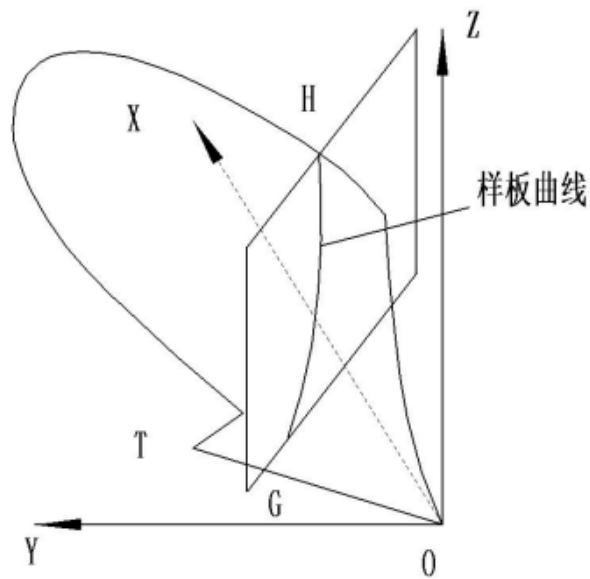


图 1-2 样板曲线

Fig 1-2 Sample curve

1.2.2 犁体设计方法国内研究现状

我国高速犁的发展起步较晚，相对于国外有着较大的差距，我国科研人员长期以来都是采用依据已有的犁体曲面，进行试验和改进，需要前期大量的经验积累数据的经验法，或是从长期经验设计实践中总结出犁体曲面的几何形成规律，从图解法发展到解析法，在耕作过程中设立一定的假设条件，通过建立假定条件下的计算模型的半经验法来设计铧式犁曲面结构，这严重限制了相关领域的技术发展。近些年来，随着三维设计软件的发展成熟，犁铧曲面的设计开始向着理论创新方向发展，理论创新设计是将犁体曲面设计与犁耕作业工艺过程相结合，研究土垡在犁体曲面的动力学模型，将土壤耕作动力学、土壤参数与犁体曲面参数相结合的设计过程，基于犁耕作业工艺过程建立了犁体曲面的数学设计模型。

曹沅和王侃昌^[33-34]等人以 CBF-25 型犁体曲面为基础, 采用 B 样条曲线构造连续的犁体曲线, 增加了犁体曲面的光滑性。陈翠英^[35]提出一种基于 MDT 的犁壁曲面双样板曲线近似展开法, 采用直线投影法求样板曲线, 为犁体设计减少工作量。经验设计基本依靠长期积累的大量经验数据, 只能在已有技术基础上进行改进优化, 多用在已定型、成熟犁体曲面技术的优化和改进方面。丛明墉^[36]提出水平直元线法中的导曲线可为抛物线、圆弧、椭圆和对数螺线等如图 1-3 所示, 并建立犁体曲面的双曲线方程。胡中^[37]使用二次曲线方程推导出导曲线为抛物线的犁体曲面方程。袁业峻^[38]发现水平直元线法设计的犁体曲面作业效果主要由导曲线和元线角影响, 并建立犁体曲面与导曲线和元线角的方程。杜家瑶^[39]等人将犁体曲面看做由犁翼、犁胸、犁铧组合形成的直纹面, 建立螺旋面犁体曲面。后之明^[40]建立以土袋抛置、残茬覆盖、土袋破碎为自变量, 能量消耗为因变量的犁体曲面模型, 由于土壤物理模型不确定, 无法确定公式中的每一个参数值。曾德超^[41]提出将土壤特性、土壤最终状态以及犁耕阻力等工况与犁体曲面几何参数联系起来的翻土曲线法如图 1-4 所示, 建立了犁体曲面泛函数解析式和土粒运动轨迹方程, 通过对土粒运动轨迹线微分几何分析, 为设计犁体曲面选择合理的参数。犁体曲面设计与犁耕作业工艺过程相结合, 是深入研究犁耕作业的趋势, 通过将土壤耕作动力学、土壤参数与犁体曲面参数相结合的方法能更好的从犁耕作业全过程来进行分析。

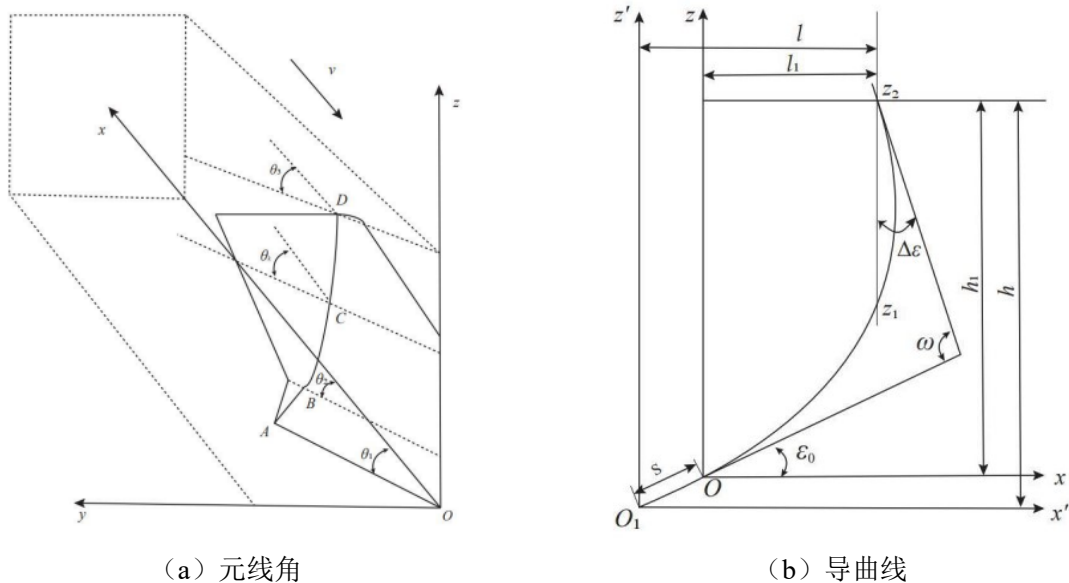


图 1-3 水平直元线法

Fig 1-3 Horizontal straight line method

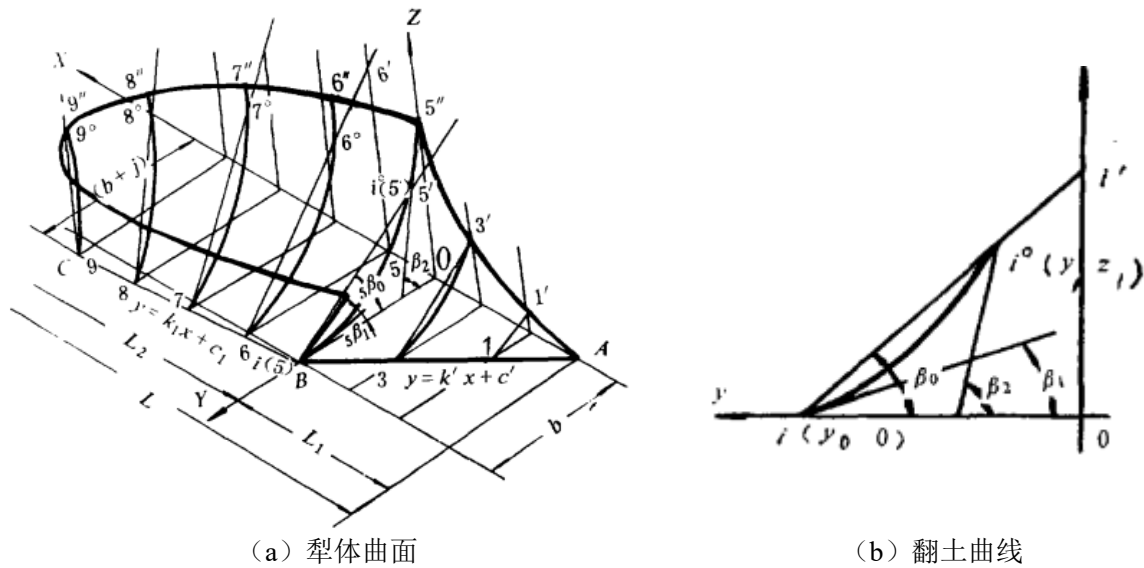


图 1-4 翻土曲线法

Fig 1-4 Soil-turning curve method

高速犁体曲面主要成形方法的优缺点如表 1-1 所示。

表 1-1 高速犁体曲面主要成形方法的优缺点

Table 1-1 The advantages and disadvantages of the main forming methods of high-speed plough surface

类型	犁面构成			优点	缺点
	名称	元线	准线		
经验法	样板曲线法			方法简单易操作	设计周期长，效率较低
半经验法	水平直元线	直线	抛物线、圆弧、椭圆、对数螺线	方法快捷直观，缩短了设计周期	需要进行反复试验、修改
	翻土曲线法	抛物线	直线		
理论创新设计法	土迹线法			将犁体曲面与耕作业过程结合	难以获取数据

1.2.3 离散元法在土壤位移方面的应用

离散元法(discrete element method,DEM)是一种网格数值间断方法，最早被用于岩石力学。离散元法可以模拟土壤耕作力和土壤耕作过程中的扰动等宏观和微观特征，也可以显示由于工具与土壤的相互作用而导致的土壤单元的大位移以及土壤的不均匀性。在犁耕作业过程中，耕作部件与土壤相互作用，使得土壤发生破碎、挤压和翻转，土壤的运动比较复杂，与有限元相比离散元法在模拟土壤等散粒体运动行为上优势显著，可以对每个颗粒的行为状态进行计算，研究其与相邻粒子和几何体的相互作用^[42]。

Saengprachatanarug^[43]将土壤位移分为与车轮接触前、与车轮接触期间和与车轮分离后三部分，构建土壤颗粒在地面接触面的运动模型，与土层模型结合建立了一个可用方程描述土壤垂直和水平方向位移的增量的扩展模型。Gursoy^[44]基于离散元采用三维粒子流代码对土壤建模，使用测量的耕作阻力和垂直力对模型校准，分析土壤水平、向前和垂直方向的位移，通过将单个土壤颗粒作为模型示踪剂分析土壤位移。Hang^[45]使用离散元模拟深松机的工作过程，研究耕作下土壤的微观运动和宏观扰动行为，发现浅层土壤扰动范围最大，且土壤可以的运动速度随土壤颗粒与深松机之间的距离增大而减小。Milkevych^[46]基于离散元开发一种考虑相似性标准的建模方法，标准根据土壤-工具相互作用期间工具表面上的潜在接触载荷制定，该方法提高了模拟土壤中由工具引起的土壤位移准确度。Murray^[47]基于离散元采用三维粒子流代码对耕作工具建模，并在模型中进行虚拟土壤剪切测试，通过实际测量的剪切扭矩进行校验，但是该模型仅通过土壤抛掷进行验证，并未在模型验证中考虑其他土壤动态属性。Qi^[48]基于离散元采用三维粒子流代码开发一个模拟土壤流动模型研究土壤流动过程的动态特性，通过实验测量的土壤休止角进行验证，可以捕捉土壤颗粒流动的瞬间动态属性，在微观上对土壤颗粒的位移进行研究，但是此模型只适用于无粘性的土壤。Zhao^[49]基于离散元模拟分析刀片对土壤运动的影响，研究不同角度下三种边缘曲线类型的刀片与土壤位移的关系，发现角度越大土壤位移越小。孙景彬等^[50]基于离散元模拟分析旋耕机对土壤的运动规律，得出土壤水平向后的位移随土壤深度增加而减少，深层土壤距离旋耕刀回转中心越近位移越大，并进行实地旋耕单因素试验，得出土壤位移随刀轴转速增大而增大，随耕作速度增大而减小。Ucgul^[51-52]等建立离散元模型，用于预测表层土壤埋藏过程中，在土壤剖面中的深度、方向、位置及前进方向和横向的位置。王学振^[53-56]等基于离散元探究深松铲结构参数对土壤扰动位移的影响。

应用离散元法可以得到触土部件与土壤互作关系中土壤的宏观扰动和微观位移，探寻触土部件工作参数与土壤位移之间的关系，因此可以通过离散元法建立犁体与土壤互作离散元模型并开展相关研究。

1.2.4 示踪剂法在土壤位移方面的应用

多年来，多种示踪剂（包括样地示踪剂和点示踪剂）已被用于通过耕作工具测量土壤的运动^[57]。物理示踪法主要是通过耕作后物理示踪剂的重新分布来计算土壤位移值，物理示踪剂种类繁多，只要区别于土壤即可，常用物理示踪剂主要有铝示踪剂和木块示踪剂等。Haas^[58]提出了一种空心微粒铝金属示踪剂方法来评估土壤运动，并对比铝、铁、铜和铅作为示踪剂测量土壤运动的准确性，结果表明铝作为示踪剂的测量值准确性更高，可准确检测到 15-20 厘米的深度。Rahman^[59]对不同示踪剂试验发现

PVC 示踪剂和铝示踪剂适合土箱中土壤运动的研究, 木材示踪剂适合田间粘土运动的研究。Liu^[60]采用 1 cm^3 铝示踪剂以及垂直和平行耕作工具的涂色秸秆作为示踪剂测量土壤和秸秆的运动, 结果表明土壤向前位移随耕作速度增加而增加。郭俊^[61-62]等采用标记的铝块前后坐标值和同位素示踪法测量土壤的位移变化, 并使用最小二乘法对土壤位移变化进行了非线性的描述。方会敏^[63]等在实验中采用示踪块的方法测量土壤位移, 离散元追踪表层土壤颗粒的运动获得仿真位移。Zhao^[64]采用白色碎石屑作为示踪剂测量土壤侵蚀对土壤分布情况的影响, 示踪剂通过具有 5 mm 开口的筛子进行筛分, 无需任何预处理即可获得。

磁性示踪技术是利用土壤本身磁性与磁性示踪剂之间的差异, 通过磁化率仪等磁性测量工具测定耕作前后磁化率的变化来确定土壤位移。Zhang^[65]采用利用磁性示踪剂标记土壤, 测定土壤在耕作方向上的运移, 表明磁示踪法是一种有效的测量耕作流失量的方法, 可用于估算耕作侵蚀速率。张建辉^[66]通过示踪法定量研究了耕作侵蚀中土壤位移距离和耕作侵蚀速率与坡度、坡长的关系。刘静^[67]通过将磁性物质混入示踪小区的土壤作为示踪剂测量土壤位移, 分析了不同种植模式下的土壤位移量的差异和土壤-根系复合体对耕作位移量的影响。黎晓^[68]采用磁性示踪剂方法测量土壤位移, 通过向土壤中掺入铁粉作磁性示踪剂, 土壤磁化率随示踪剂移动而发生变化, 研究耕作前后磁性示踪剂的空间分布, 分析了土壤位移与土壤坡度的关系。李富程等^[69-73]采用磁性示踪法测量耕作土壤位移量, 探究旋耕机工作参数对土壤位移情况的影响。Yu^[74]进一步验证土壤运动与磁化率之间的联系, 发现使用磁化率来跟踪土壤重新分布和土壤流失是可行的。

相比于物理示踪剂需要破坏耕后土壤翻找测量, 磁性示踪剂直接利用磁化率仪从土壤表面测得磁性强度, 不会破坏性的扰动土壤, 不造成污染, 而且操作简便、迅速。

综上所述: 虽然国内对于高速犁的研究也有很多, 但是主要集中在利用计算机技术对犁体曲面进行优化设计上, 而对于高速犁体结构的研究也很少, 也没有考虑犁体的结构参数等因素对耕作质量的影响。因此, 通过研究犁体对土袋运动轨迹的影响, 进而探究高速犁犁体结构参数(迹线侧移量、推土角、翻土角和翻土曲线)对土壤耕后位置的影响, 建立土袋抛落位置预测模型, 达到增加表层土壤覆盖的目的, 提高耕作质量, 对我国农业机械化生产起到积极的推动作用。

1.3 研究目的及内容

1.3.1 研究目的

犁体曲面是影响土壤翻垡的运动的关键，土壤翻垡深度及侧向距离都会影响耕地质量，后续需增加平整土地的工序，增加成本且降低效率。目前，对犁体的设计及优化更多是以减阻为目的设计犁体曲面，缺少以达到翻垡要求为目的设计犁体曲面的方法。本研究通过理论和离散元仿真分析方法，研究土垡在犁耕过程中的运动，寻找土垡运动轨迹与犁体曲面结构参数之间的规律，通过土垡运动轨迹的落点与犁体曲面结构参数之间的规律，建立土垡抛落位置预测模型，为设计符合翻垡要求的犁体曲面提供理论支撑。

1.3.2 研究内容

本文针对犁耕过程中的土垡运动轨迹分析不足和缺少依据翻垡要求设计犁体曲面的方法等问题，开展的具体研究内容如下：

(1) 土垡运动理论分析

通过动力学分析，将土垡运动分为土垡与犁体碰撞阶段、沿犁体运移阶段和离开犁体后运移阶段，建立土垡运动过程动力学模型。以动力学模型为基础，分析影响土垡运动过程的因素，确定犁体曲面的结构参数。

(2) 不同犁体曲面结构参数下土垡运动轨迹的仿真分析

建立犁体与土壤互作离散元模型，对土垡运动轨迹仿真分析，揭示代表性颗粒的实时位移，明确不同犁体曲面结构参数下土垡运动轨迹和耕后土壤分布的变化规律。

(3) 不同犁体曲面结构参数下耕后土垡分布的仿真研究

建立土垡抛落位置预测模型，预测不同犁体曲面结构参数下土壤横向位移、前进方向位移、深度方向位移，可依据设定土垡抛落位置的要求通过模型确定犁体曲面结构参数并设计相应犁体曲面，为犁体曲面设计提供理论支撑。

(4) 土垡抛落位置预测模型试验验证

依据钛铁矿粉的特性采用以钛铁矿粉作为磁性示踪剂的磁性示踪法，利用土壤磁性与示踪剂磁性的差异来开展土壤位移极值试验，将实测值与预测模型值对比，判断预测模型的准确性。