

丛 书 序

我国化学肥料和农药过量施用严重，由此引起环境污染、农产品质量安全和生产成本较高等一系列问题。化肥和农药过量施用的主要原因：一是对不同区域不同种植体系肥料农药损失规律和高效利用机理缺乏深入的认识，无法建立肥料和农药的精准使用准则；二是化肥和农药的替代产品落后，施肥和施药装备差、肥料损失大，农药跑冒滴漏严重；三是缺乏针对不同种植体系肥料和农药减施增效的技术模式。因此，研究制定化肥和农药施用限量标准、发展肥料有机替代和病虫害绿色防控技术、创制新型肥料和农药产品、研发大型智能精准机具，以及加强技术集成创新与应用，对减少我国化肥和农药的使用量、促进农业绿色高质量发展意义重大。

按照 2015 年中央一号文件关于农业发展“转方式、调结构”的战略部署，根据国务院《关于深化中央财政科技计划（专项、基金等）管理改革的方案》的精神，科技部、国家发展改革委、财政部和农业部（现农业农村部）等部委联合组织实施了“十三五”国家重点研发计划试点专项“化学肥料和农药减施增效综合技术研发”（后简称“双减”专项）。

“双减”专项按照《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》《全国优势农产品区域布局规划（2008—2015 年）》《特色农产品区域布局规划（2013—2020 年）》，结合我国区域农业绿色发展的现实需求，综合考虑现阶段我国农业科研体系构架和资源分布情况，全面启动并实施了包括三大领域 12 项任务的 49 个项目，中央财政概算 23.97 亿元。项目涉及植物病理学、农业昆虫与害虫防治、农药学、植物检疫与农业生态健康、植物营养生理与遗传、植物根际营养、新型肥料与数字化施肥、养分资源再利用与污染控制、生态环境建设与资源高效利用等 18 个学科领域的 57 个国家重点实验室、236 个各类省部级重点实验室和 434 支课题层面的研究团队，形成了上中下游无缝对接、“政产学研推”一体化的高水平研发队伍。

自 2016 年项目启动以来，“双减”专项以突破减施途径、创新减施产品与技术装备为抓手，聚焦主要粮食作物、经济作物、蔬菜、果树等主要农产品的生产需求，边研究、边示范、边应用，取得了一系列科研成果，实现了项目目标。

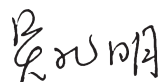
在基础研究方面，系统研究了微生物农药作用机理、天敌产品货架期调控机制及有害生物生态调控途径，建立了农药施用标准的原则和方法；初步阐明了我国不同区域和种植体系氮肥、磷肥损失规律和无效化阻控增效机理，提出了肥料养分推荐新技术体系和氮、磷施用标准；初步阐明了耕地地力与管理技术影响化肥、农药高效利用的机理，明确了不同耕地肥力下化肥、农药减施的调控途径与技术原理。

在关键技术创新方面，完善了我国新型肥药及配套智能化装备研发技术体系平台；打造了万亩方化肥减施 12%、利用率提高 6 个百分点的示范样本；实现了智能化装备减

施 10%、利用率提高 3 个百分点，其中智能化施肥效率达到人工施肥 10 倍以上的目标。农药减施关键技术亦取得了多项成果，万亩示范方农药减施 15%、新型施药技术田间效率大于 30 亩/h，节省劳动力成本 50%。

在作物生产全程减药减肥技术体系示范推广方面，分别在水稻、小麦和玉米等粮食主产区，蔬菜、水果和茶叶等园艺作物主产区，以及油菜、棉花等经济作物主产区，大面积推广应用化肥、农药减施增效技术集成模式，形成了“产学研”一体的纵向创新体系和分区协同实施的横向联合攻关格局。示范应用区涉及 28 个省（自治区、直辖市）1022 个县，总面积超过 2.2 亿亩次。项目区氮肥利用率由 33%提高到 43%、磷肥利用率由 24%提高到 34%，化肥氮磷减施 20%；化学农药利用率由 35%提高到 45%，化学农药减施 30%；农作物平均增产超过 3%，生产成本明显降低。试验示范区与产业部门划定和重点支持的示范区高度融合，平均覆盖率超过 90%，在提升区域农业科技水平和综合竞争力、保障主要农产品有效供给、推进农业绿色发展、支撑现代农业生产体系建设等方面已初显成效，为科技驱动产业发展提供了一个可参考、可复制、可推广的样板。

科学出版社始终关注和高度重视“双减”专项取得的研究成果。在他们的大力支持下，我们组织“双减”专项专家队伍，在系统梳理和总结我国“化肥和农药减施增效”研究领域所取得的基础理论、关键技术成果和示范推广经验的基础上，精心编撰了“化肥和农药减施增效理论与实践丛书”。这套丛书凝聚了“双减”专项广大科技人员的多年心血，反映了我国化肥和农药减施增效研究的最新进展，内容丰富、信息量大、学术性强。这套丛书的出版为我国农业资源利用、植物保护、作物学、园艺学和农业机械等相关学科的科研工作者、学生及农业技术推广人员提供了一套系统性强、学术水平高的专著，对于践行“绿水青山就是金山银山”的生态文明建设理念、助力乡村振兴战略有重要意义。



中国工程院院士

2020 年 12 月 30 日

前 言

2014 年底，农业部提出力争到 2020 年，实现主要农作物化肥、农药使用量零增长。而《全国农业可持续发展规划（2015—2030 年）》明确提出全国测土配方施肥技术推广覆盖率达到 90%以上，化肥利用率提高到 40%的目标。如何实现肥料的精准投放？如何降低施肥成本来实现农业的“减施增效”？为了实现化肥使用量零增长，可以通过“精、调、改、替”等技术途径来突破。“精”即推进精准施肥，“调”即调整化肥使用结构，“改”即改进施肥方式，“替”即有机肥替代化肥。

本书依托“十三五”国家重点研发计划“化学肥料和农药减施增效综合技术研发”专项“智能化精准施肥及肥料深施技术及其装备”项目研究成果，主要针对规模经营条件下粮食作物（小麦、水稻、玉米、马铃薯）和经济作物（棉花、油菜）生长与土壤养分的空间变异特点，面向黄淮海、东北、长江中下游、华南、西北、华东等区域，按照农机—农艺—信息融合的思路，突破了肥料定位、定量、分层、深施等关键技术，研制了适用于不同作物和不同生产条件的智能化精准施肥技术与装备，开展了新型精准施肥装备试验与规模化农田应用示范，构建了适合不同区域粮食作物和经济作物的化肥变量施用作业技术体系，为化肥精准施用提供了必要的技术与装备支撑，有效减少了化肥的使用量，提高了化肥施用的作业效率，提高了肥料利用率。

第 1 章为概述，包括精准施肥的概念、国内外精准施肥的研究现状、精准施肥存在的主要问题；第 2 章为黄淮海地区作物精准施肥技术与装备，包括冬小麦宽苗带撒播与基肥分层精量施用联合作业机、小麦种肥精准拟合施肥机、玉米空间分层施肥播种机；第 3 章为东北地区作物精准施肥技术与装备，包括风送式水稻侧深精准施肥机、大马力配套玉米智能中耕施肥机、无人自转旋翼机变量追肥装置、基于实时传感器的液态肥变量喷施系统；第 4 章为华北地区作物精准施肥技术与装备，包括玉米精量播种与变量施肥装置、小麦双轴旋耕灭茬智能播种机；第 5 章为长江中下游地区作物精准施肥技术与装备，包括基于水稻光谱信息的离心式变量撒肥机、油麦兼用气送式直播机及其智能化装备、多旋翼无人机遥感平台；第 6 章为华南地区水稻精准施肥技术与装备，包括同步侧深施肥水稻精量水穴直播机、水稻同步施肥精量旱穴直播机、水稻直播气流式分层施肥机；第 7 章为西北地区作物精准施肥技术与装备，包括棉花精准对行分层施肥机、基于 3S 技术的玉米基肥变量施肥机、马铃薯精量播种与分层施肥种植机。

本书由陈立平研究员负责构思和总体框架设计，并组织撰写。撰稿分工如下：第 1 章由陈立平、安晓飞撰写，第 2 章由安晓飞、武广伟、孟志军、赵学观、高娜娜、周利明、孙红、王庆杰、窦汉杰、祝清震、于丽敏、吴奇峰撰写，第 3 章由余山山、王熙、董守田、孙红、薛绪掌、李立伟撰写，第 4 章由周利明、胡建平撰写，第 5 章由汪小昆、丁幼春、

岑海燕、刘建立、李贺丽撰写，第6章由曾山、杨文武、王在满、付威撰写，第7章由汤智辉、何东健、杨然兵、刘进宝、孟祥金、黄玉祥、付作立、苏宝峰撰写。书稿初定，三易其稿，最后由陈立平研究员统稿。本书在撰写过程中，得到了华南农业大学罗锡文院士、国家农业信息化工程技术研究中心赵春江院士、新疆农垦科学院陈学庚院士、中国农业大学张福锁院士、中国科学院南京土壤研究所张佳宝院士、中国农业科学院作物科学研究所赵明研究员、中国农业大学陈阜教授、浙江大学何勇教授、中国农业大学李民赞教授的鼎力支持和帮助。在此，一并致以衷心的感谢！

智能化精准施肥技术与装备还在不断发展，有些内容还停留在研究阶段。限于著者研究水平，书中不足之处恐难避免，希望读者批评指正。

著 者

2025年8月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 精准施肥的概念	1
1.2 国内外精准施肥的研究现状	1
1.3 精准施肥存在的主要问题	2
第 2 章 黄淮海地区作物精准施肥技术与装备	3
2.1 冬小麦宽苗带撒播与基肥分层精量施用联合作业机	3
2.1.1 机具工作原理与适用种植模式	3
2.1.2 关键部件设计	5
2.1.3 精量排肥/排种控制系统	13
2.1.4 性能验证与田间试验	17
2.2 小麦种肥精准拟合施肥机	24
2.2.1 机具工作原理与适用种植模式	24
2.2.2 小麦种肥精准拟合施肥控制系统硬件总体结构设计	27
2.2.3 小麦种肥精准拟合变量施肥控制系统软件总体设计	37
2.2.4 机具性能验证与田间试验	43
2.3 玉米空间分层施肥播种机	50
2.3.1 机具整机结构与工作原理	51
2.3.2 关键部件设计及选型	53
2.3.3 关键部件仿真分析	58
2.3.4 田间试验	71
第 3 章 东北地区作物精准施肥技术与装备	77
3.1 风送式水稻侧深精准施肥机	77
3.1.1 施肥装置总体结构及工作原理	77
3.1.2 气力输送系统	78
3.1.3 施肥装置性能试验分析	82
3.2 大马力配套玉米智能中耕施肥机	85
3.2.1 机具工作原理与适用种植模式	85
3.2.2 施肥控制系统	86
3.2.3 控制系统台架试验	87

3.2.4 田间试验	89
3.3 无人自转旋翼机变量追肥装置	92
3.3.1 机具工作原理与仿真	93
3.3.2 变量追肥研究	98
3.4 基于实时传感器的液态肥变量喷施系统	102
3.4.1 光谱学诊断作物长势的机理研究	102
3.4.2 变量喷洒机施肥模型与喷洒策略	114
3.4.3 变量喷洒装备及其关键部件	116
3.4.4 变量喷洒控制系统设计	118
3.4.5 基于响应面分析法的喷杆系统喷雾参数优化	121
第4章 华北地区作物精准施肥技术与装备	131
4.1 玉米精量播种与变量施肥装置	131
4.1.1 精量播种装置设计	131
4.1.2 性能验证与田间试验	149
4.2 小麦双轴旋耕灭茬智能播种机	156
4.2.1 整机设计及工作原理	156
4.2.2 正反转双轴旋耕抛土理论分析	160
4.2.3 关键部件设计	165
4.2.4 播量控制系统及控制方法设计	168
4.2.5 整机性能仿真分析	173
4.2.6 样机性能试验研究	175
第5章 长江中下游地区作物精准施肥技术与装备	181
5.1 基于水稻光谱信息的离心式变量撒肥机	181
5.1.1 总体方案与整机结构设计	181
5.1.2 关键部件与控制系统设计	182
5.1.3 基于 EDEM 的撒肥参数优化与性能分析	190
5.1.4 施肥模型分析与撒肥策略研究	196
5.1.5 肥量调节机构系统响应分析	205
5.1.6 相关性能验证与田间试验	210
5.2 油麦兼用气送式直播机及其智能化装备	214
5.2.1 机具结构和工作原理	214
5.2.2 油麦兼用气送式集排器设计与分析	215

5.2.3	深施肥装置设计与试验	230
5.2.4	种子流传感装置及变量补种装置	235
5.2.5	辅助驾驶导航控制系统设计	259
5.2.6	油麦兼用气送式直播机性能分析与试验	265
5.3	多旋翼无人机遥感平台	267
5.3.1	多旋翼无人机系统开发及性能评估	267
5.3.2	机载多光谱图像采集系统及其方法设计	275
5.3.3	遥感图像预处理方法研究	284
5.3.4	无人机遥感平台性能验证与田间试验	302
第 6 章	华南地区水稻精准施肥技术与装备	317
6.1	同步侧深施肥水稻精量水穴直播机	317
6.1.1	同步侧深施肥水稻精量水穴直播技术原理	317
6.1.2	同步侧深施肥水稻精量水穴直播机关键部件	318
6.1.3	同步侧深施肥水稻精量水穴直播机整机结构及工作原理	323
6.1.4	同步侧深施肥水稻精量水穴直播机试验效果	324
6.2	水稻同步施肥精量旱穴直播机	327
6.2.1	水稻同步施肥精量旱穴直播技术与适用种植模式	328
6.2.2	水稻同步施肥精量旱穴直播机总体结构及工作原理	329
6.2.3	水稻同步施肥精量旱穴直播机同步深施肥系统设计	330
6.2.4	播种机单体设计及试验	335
6.2.5	水稻同步施肥精量旱穴直播机施肥试验	344
6.3	水稻直播气流式分层施肥机	347
6.3.1	水稻分层施肥技术模式	347
6.3.2	水稻直播气流式分层施肥机结构与工作原理	348
6.3.3	立式螺旋槽轮排肥系统设计与仿真研究	349
6.3.4	气流肥料混合器设计及试验	358
6.3.5	气流式分层施肥分配装置设计	363
6.3.6	气流式分层施肥系统试验	364
6.3.7	分层施肥开沟器设计及试验	367
6.3.8	水稻直播气流式分层施肥机田间性能试验	369
第 7 章	西北地区作物精准施肥技术与装备	371
7.1	棉花精准对行分层施肥机	371
7.1.1	机具工作原理与适用种植模式	371

7.1.2	关键部件结构及参数配置	373
7.1.3	施肥过程监控系统	386
7.1.4	分层施肥离散元仿真分析	389
7.1.5	棉花精准对行分层施肥机试验	393
7.2	基于 3S 技术的玉米基肥变量施肥机	398
7.2.1	机具工作原理与适用种植模式	398
7.2.2	主动覆土种肥分施装置设计与试验	401
7.2.3	被动覆土种肥分施装置设计与试验	406
7.2.4	变量施肥作业控制系统研究	413
7.2.5	玉米基肥变量施肥机性能验证与田间试验	417
7.3	马铃薯精量播种与分层施肥种植机	419
7.3.1	马铃薯种植模式和农艺要求	419
7.3.2	马铃薯精量播种与分层施肥种植机工作原理	421
7.3.3	分层施肥开沟器设计与试验	422
7.3.4	马铃薯漏播检测与自动补种装置设计和试验	436
7.3.5	马铃薯精量播种与分层施肥种植机田间试验	450
	参考文献	454

第 1 章 概 述

1.1 精准施肥的概念

精准施肥是将农田土壤进行空间网格单元划分，不同地块单元的土壤特性、作物生长状况及田间环境等因素有很大的不同，根据这些地块单元因素及历年产量等相关信息，形成资料齐全的土壤养分信息化管理系统，并决策生成作物施肥作业的变量处方图，利用装有田间计算机、定位信息接收器、电子变量控制器的农业机械装备，根据处方图的信息在田间有针对性、定时定量地进行精准的施肥作业。精准施肥技术体系主要由土壤数据与作物养分信息检测采集技术、施肥处方图生成与实时传感器技术、精准变量施肥控制技术 3 部分组成。

1.2 国内外精准施肥的研究现状

当前世界范围内，化肥施用是农作物生产过程中一个重要的作业环节，直接影响农作物的产量。许多农业生产者不断追求作物的高产，在农业生产中大量使用化肥，作物产量大幅度提高的同时，环境污染问题却日益严重，化肥的过量使用问题已经得到各国的重视。精准农业是现代农业发展的前沿，随着精准农业技术的应用发展，精准施肥技术开始在农业生产中得到应用，成为解决农作物化肥过量使用的一个重要技术手段。

在欧美等国外发达国家的农业生产中，不同作物施肥环节已经完全实现全程机械化作业，极大地提高了施肥作业的工作效率，并且随着精准农业的快速发展，施肥装备开始向智能化方向发展，美国 Ag-chen 仪器装备公司生产的“SOILECTION”施肥系统可进行固态或液态肥料的撒施，可以根据施肥处方图，分别对磷肥、钾肥和石灰的施用量进行调整，欧洲的 RDS 公司、HydroA 公司等，美洲的 Agtron 公司、Ag Leader 公司、Micro-Trak 公司、Mid-Tech 公司、Trimble 公司等先后推出了相应的施肥装备。目前，国外围绕精准施肥农田信息采集、变量施肥分析决策、精准施肥智能化作业装备等方面开展了系统研究，针对小麦、玉米、水稻等主要作物规模化生产过程中基肥、种肥和追肥等不同施肥阶段研发了配套的商品化精准施肥技术与装备，在农业生产中已经得到广泛的应用。

近年来，我国农业机械化事业取得了长足的进步，但是我国的农业机械化水平和农业装备技术水平同发达国家还有很大的差距，尤其在小麦、玉米、水稻、马铃薯等主要农作物施肥环节装备水平较低，施肥设备种类少，智能化程度低，在一些地区小麦基肥、玉米追肥、水稻追肥等作业过程中仍然采用人工施肥，造成化肥过量使用、化肥利用率明显偏低、作业效率低等一系列问题。20 世纪 90 年代以来，随着精准农业技术与装备研究应用的不断发展，国内的一些高校和科研院所相继在农田信息采集、变量施肥分析决策、精准施肥智能化作业装备等变量施肥技术方面开展了研究。

在精准施肥智能化作业装备方面，国内科研所在小麦、玉米、水稻等作物基肥变量深施、种肥同步变量条施及追肥变量施用技术方面开展了初步的研究工作和试验，并取得了一些成果。例如，北京农业信息技术研究中心研制了 2F-VRT1 变量施肥机、1G-VRT1 变量施肥机，通过设置施肥量或上位控制计算机处方施肥量，实时接收全球导航卫星系统（global navigation

satellite system, GNSS) 位置信号及作业行走速度信号, 自动调整排肥驱动系统的转速, 实现变量施肥; 吉林大学设计了以 AT89C52 单片机为中心的精准农业自动变量施肥机控制系统、手控变量施肥机等; 上海交通大学设计了智能变量处方、人工自适应变量处方及施肥量数字设定 3 种模式下的变量施肥作业系统; 黑龙江八一农垦大学对基于比例积分微分 (proportional integral derivative, PID) 控制算法的变量施肥控制系统的设计进行了研究; 北京农业智能装备技术研究中心研制了 2F-4000 型作物冠层信息在线测定变量施肥装备, 能够实现基于作物冠层信息进行精准变量施肥作业。

国内相关农业科研院所及高校紧跟国际前沿, 在精准施肥农田信息采集、变量施肥分析决策、精准施肥智能化作业装备等方面已经开展了大量的研究, 部分研究结果已处于国际领先水平, 并开发了一批适用于我国国情的精准施肥作业装备, 但是整体技术水平同国外发达国家还有较大的差距。

1.3 精准施肥存在的主要问题

国外主要农作物施肥技术与装备正在加速向精准化、智能化方向发展, 精准施肥农田信息采集、变量施肥分析决策、精准施肥智能化作业装备等方面的研究逐渐完善, 并逐步在农业生产中得到广泛的应用。但是由于国外设备价格昂贵, 且与我国大部分地区的施肥作业农艺不匹配, 不适合在我国农业生产中大规模应用。目前, 我国机械施肥方式仅占 30%, 不同区域农业生产存在较大差异, 小麦、玉米等主要农作物施肥农艺各有特点, 单一的技术与装备无法满足某一作物不同环节精准施肥的农艺需求; 精准施肥技术与装备自动化和智能化程度低, 所采用的配套传感器技术无法实时准确获取并分析土壤及作物信息, 作业性能和指标有待进一步提高; 综合作业成本高, 部分农民思想并未完全转变, 影响精准施肥技术与装备进一步的推广应用。

第2章 黄淮海地区作物精准施肥技术与装备

2.1 冬小麦宽苗带撒播与基肥分层精量施用联合作业机

播种和基肥施用是冬小麦生产作业管理过程中一个重要环节。我国黄淮海地区目前广泛采用传统的基肥撒施+条播的种植农艺模式，这种方式存在麦苗行间裸露、苗行株间拥挤、麦苗争水和争肥严重等缺点，基肥施用方法仍然沿用地表撒施+深翻或旋耕的深施或全层施用技术模式，容易造成化肥过量使用和利用率低的问题。农艺专家提出了小麦宽苗带种植和肥料分层施用的管理方式，相较传统条播技术，在增加小麦单位面积产量和提升植株群体生理特性方面表现出一定的优势。目前，能满足冬小麦宽苗带撒播+基肥分层施用农艺要求的机具相对较少。

本章按照农机农艺深度融合的原则，对小麦播种与基肥分层施用联合作业过程中所涉及的关键技术进行了研究，研制了冬小麦宽苗带撒播与基肥分层精量施用联合作业机，为我国黄淮海地区冬小麦宽苗带撒播、基肥分层施用提供了技术与装备支撑。

2.1.1 机具工作原理与适用种植模式

2.1.1.1 种植农艺要求

结合中国黄淮海地区冬小麦宽幅播种和基肥分层施用的农艺特点，经农艺专家研究表明：小麦宽幅撒播苗带宽度在 120mm，两个苗带之间宽度在 150mm，播种深度 30mm，浅层肥料施用于小麦种子下方 50mm 左右，深层肥料施用于种子下方 130mm 左右，属于较好的播种和施肥深度农艺管理方法，冬小麦宽幅播种和基肥分层施用农艺要求如图 2-1 所示。

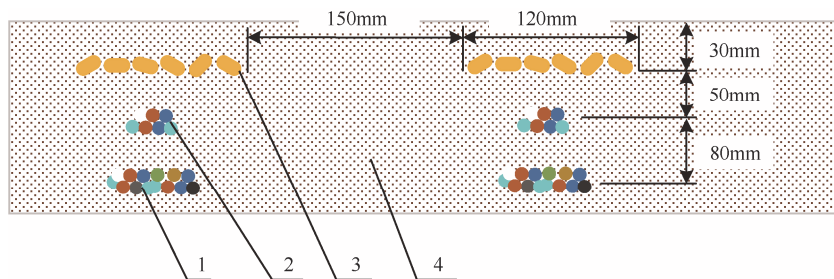


图 2-1 冬小麦宽幅播种和基肥分层施用农艺要求

1: 深层肥料; 2: 浅层肥料; 3: 小麦种子; 4: 土壤

2.1.1.2 总体结构

冬小麦宽苗带撒播与基肥分层精量施用联合作业机的总体架构如图 2-2 所示，主要由机架、旋耕机构、种肥分层投送机构、精量排肥/排种控制系统、深层肥箱、浅层肥箱、种箱、外槽轮凹槽有效工作长度调节机构、镇压机构、限深机构、三点悬挂机构等组成。该机具的主要技术参数如表 2-1 所示。

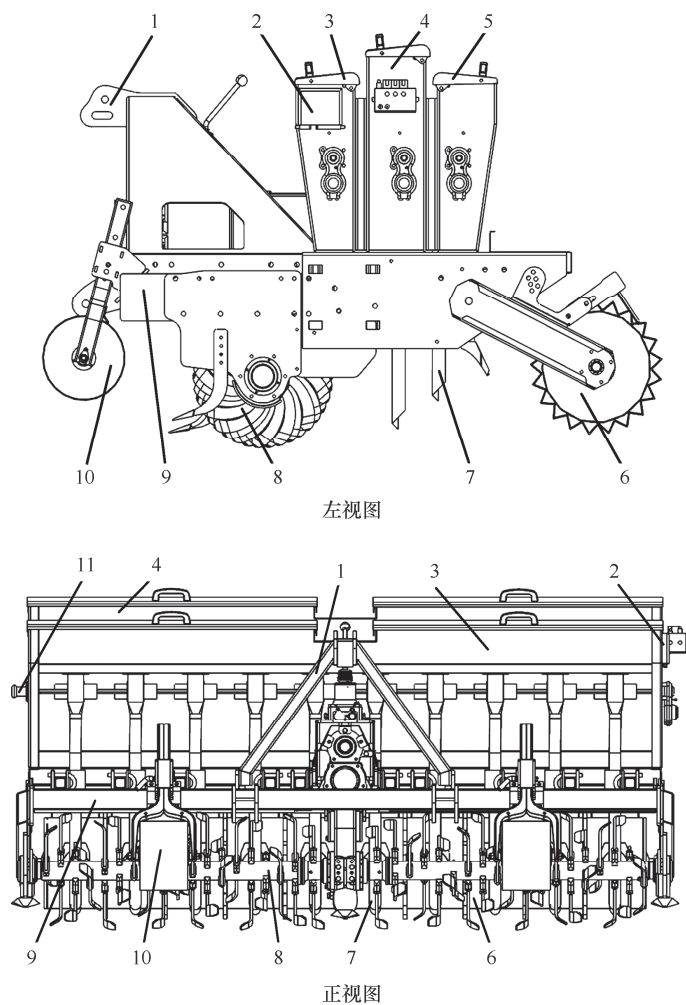


图 2-2 冬小麦宽苗带撒播与基肥分层精量施用联合作业机的总体架构

1: 三点悬挂机构; 2: 精量排肥/排种控制系统; 3: 深层肥箱; 4: 浅层肥箱; 5: 种箱; 6: 镇压机构;
7: 种肥分层投送机构; 8: 旋耕机构; 9: 机架; 10: 限深机构; 11: 外槽轮凹槽有效工作长度调节机构

表 2-1 冬小麦宽苗带撒播与基肥分层精量施用联合作业机的主要技术参数

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/mm	2225×2800×1450
作业行数	10
作业幅宽/mm	2550
配套动力/kW	66.2~88.2
旋耕深度/mm	80~200(可调)
种子撒播深度/mm	30~50(可调)
浅层肥料施用深度/mm	60~100(可调)
深层肥料施用深度/mm	130~180(可调)
刀轴额定转速/(r/min)	246-285-315
作业速度/(km/h)	3~7

2.1.1.3 工作原理

机具将种子宽苗带播种、肥料分层施用过程与传统的旋耕作业相结合，可以一次完成冬小麦的宽幅撒播、基肥分层精准定位投送。旋耕机构可以完成切垡、碎土和抛土作业，被旋耕刀切下的土垡依次向旋耕机构后侧抛撒；旋耕机构后侧安装固定的种肥分层投送机构在随旋耕机构做直线运动的同时，会持续排出深层肥料、浅层肥料和小麦种子，种子和肥料会被回落到旋耕沟底的土垡覆盖，由于空间位置不同，作业后会达到深层肥料、浅层肥料和小麦种子层叠分布的技术效果，工作原理及最终技术效果如图 2-3 所示。

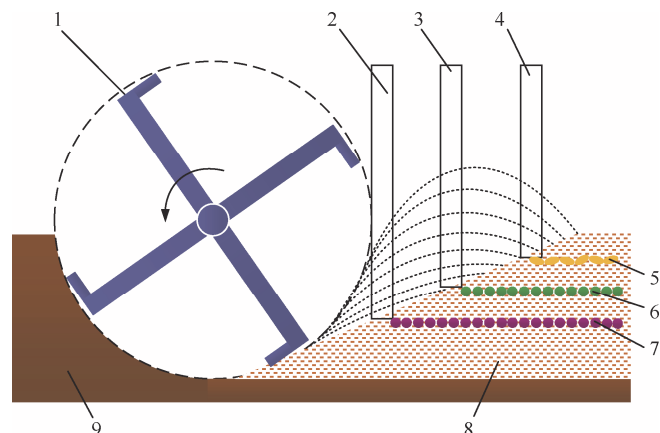


图 2-3 联合作业机的种肥分层投送工作原理与技术效果

1: 旋耕机构; 2: 深层肥料输送管; 3: 浅层肥料输送管; 4: 输种管; 5: 种子条带; 6: 浅层肥料条带;
7: 深层肥料条带; 8: 已耕土壤; 9: 未耕土壤

该机具利用基于电液控制技术的精量排肥/排种控制系统进行排种、排肥作业，解决了传统的地轮驱动排种量、排肥量不易调节和精度差的问题。通过车载控制终端设定目标排种量和排肥量，3 个液压马达独立控制深层肥箱、浅层肥箱和种箱的排量，采用拖拉机行驶速度与液压马达转速实时匹配的施肥控制方法，利用全球定位系统（GPS）数据计算得到拖拉机行进速度，采用作业状态传感器感知拖拉机工作状态，根据作业速度，实时控制排种和排肥量，以达到精确控制深层肥料、浅层肥料和小麦种子排量的要求。

2.1.2 关键部件设计

由总体架构和工作原理可知，在完成种肥精准分层投送的过程中，旋耕机构、宽苗带撒播器、种肥分层投送机构是机具的核心部分，本研究重点对这些关键组件进行参数分析和设计。

2.1.2.1 旋耕机构

1. 机构总成

由工作原理可知，旋耕机构必须具有较好的土壤抛撒特性，才能达到种肥分层覆盖的效果。其整体架构如图 2-4 所示，采用中间传动技术方案，刀轴按左右对称的方式安装在可变速齿轮传动箱下端两侧。

2. 可变速齿轮传动箱设计

为了满足不同工况下旋耕刀的高、中、低转速需求，机具采用了可变速齿轮传动箱。其整

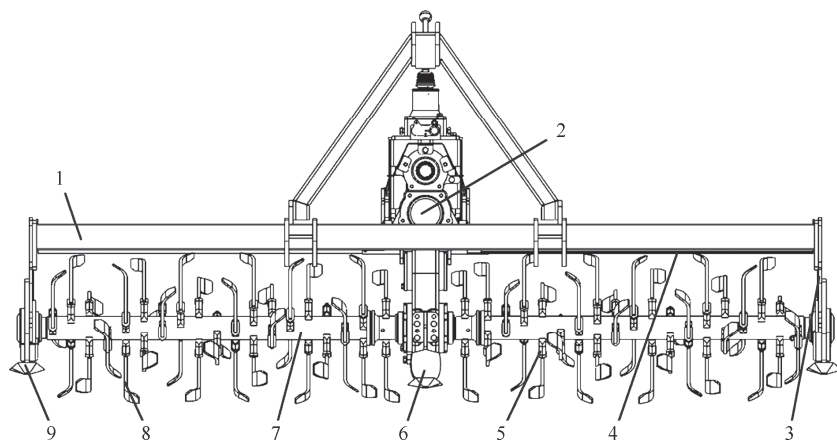


图 2-4 旋耕机构的结构组成

1: 机架前纵梁; 2: 齿轮传动箱; 3: 支撑侧板; 4: 罩壳; 5: 刀座; 6: 窄垄型犁刀; 7: 刀轴; 8: 旋耕刀; 9: 破茬小铲

体结构包括主齿轮箱、副齿轮箱两部分, 其中主齿轮箱的主要功能为变速, 副齿轮箱的主要功能为动力传输, 其扭矩传输方案如图 2-5 所示。

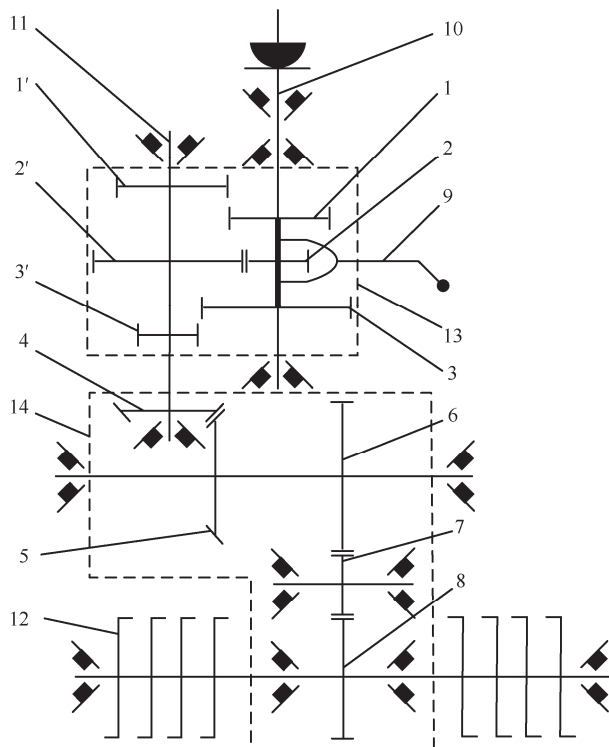


图 2-5 可变速动力传输方案示意图

1~3: 主动齿轮组; 1'~3': 从动齿轮组; 4: 小锥齿轮; 5: 大锥齿轮; 6: 三轴平齿轮; 7: 四轴平齿轮; 8: 刀辊齿轮;
9: 挡位拨叉; 10: 一轴; 11: 二轴; 12: 旋耕刀; 13: 主齿轮箱; 14: 副齿轮箱

以约翰迪尔 1204 中型拖拉机为旋耕机构提供配套动力为例, 查阅该型号拖拉机技术参数可知, 其后输出轴额定转速为 540r/min, 通过传动比计算得到旋耕机构刀轴的低、中、高 3 种实际转速分别为 246r/min、285r/min、315r/min。

3. 旋耕刀选型及其布置方案

选用国标 IT245 型号弯刀作为旋耕机构的旋耕刀, 其关键结构参数如图 2-6 所示, 刀具的作业幅宽为 50mm, 安装在旋耕机构刀轴上的回转作业半径为 245mm, 已知该型号弯刀的最大理论作业深度为 205mm。为了提高旋耕机构的碎土率, 相邻旋耕刀的纵向安装间距为 61mm。

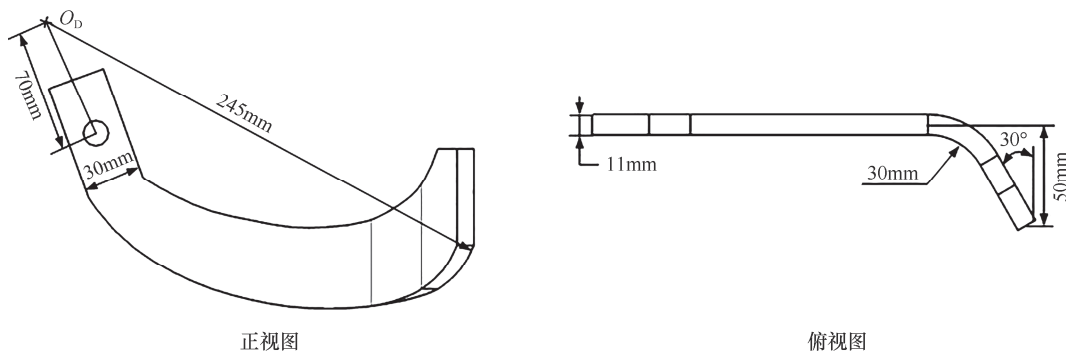


图 2-6 国标 IT245 型号弯刀部分关键结构参数

利用式 (2-1), 对旋耕机构刀轴上需要安装旋耕刀的总数进行计算。

$$Z' = (1000 \times 2 \times B \times Z) / b' \quad (2-1)$$

式中, Z' 为需要安装固定的旋耕刀数目; B 为旋耕机构一侧刀轴的有效长度 (m); Z 为每个切土单元内分布的刀片数; b' 为刀座轴向安装间距 (mm)。

通过查阅农业机械设计手册可知, 每个切土单元内一般安装 2 或 3 个旋耕刀; 机具的总幅宽为 2550mm, 可变速齿轮传动箱下端宽度为 145mm, 则两侧刀轴的作业幅宽应该为 1164mm, 根据式 (2-1) 应安装旋耕刀 76 个, 每侧刀轴安装 38 个。

为了避免旋耕刀切削土壤过程中附加多余的动载荷和减少土壤对刀轴的脉动冲击, 将 76 个旋耕刀按照对称螺旋排列的方式安装固定在刀轴上, 每个切土单元内两个旋耕刀安装夹角为 142° , 相邻同类型旋耕刀的安装夹角设置为 56.8° , 76 个旋耕刀在刀轴上的安装排列方法如图 2-7 所示。

2.1.2.2 宽苗带撒播器

宽苗带撒播器是小麦实现机械化宽苗带撒播种植的关键部件, 其中鸭掌型宽苗带撒播器的结构如图 2-8a 所示。为了满足宽苗带撒播农艺要求, 撒种口的宽度设置为 120mm。为了提高撒播均匀性, 本研究将弹籽板的结构由平面替换为球面, 如图 2-8b 所示。

1. 弹籽板的数学结构模型

弹籽板取球面的一部分, 其结构模型如图 2-9 所示, A 、 B 点分别表示宽苗带撒播器撒种口的 2 个边界点, C 点表示匀种板的最高点, 设 A 、 B 、 C 点的空间坐标分别为 $(x_A, 0, 0)$ 、 $(x_B, y_B, 0)$ 、 $(0, 0, z_C)$, 鉴于宽苗带撒播的宽度是固定的, 所以 A 、 B 点的空间距离保持不变, 取 120mm。

由图 2-9 可知, 设 A 点和 B 点的空间距离固定, 取 120mm, 同时 A 点和 B 点分别到 O 点的空间距离相等, 则 A 点和 B 点的坐标满足式 (2-2)。

$$\begin{cases} \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (-y_B)^2} = 120\text{mm} \\ \sqrt{x_B^2 + y_B^2} = x_A \end{cases} \quad (2-2)$$

式中, x_A 为 A 点在 x 轴方向上的坐标值 (mm); x_B 为 B 点投影在 x 轴方向上的坐标值 (mm); y_B 为 B 点投影在 y 轴方向上的坐标值 (mm)。

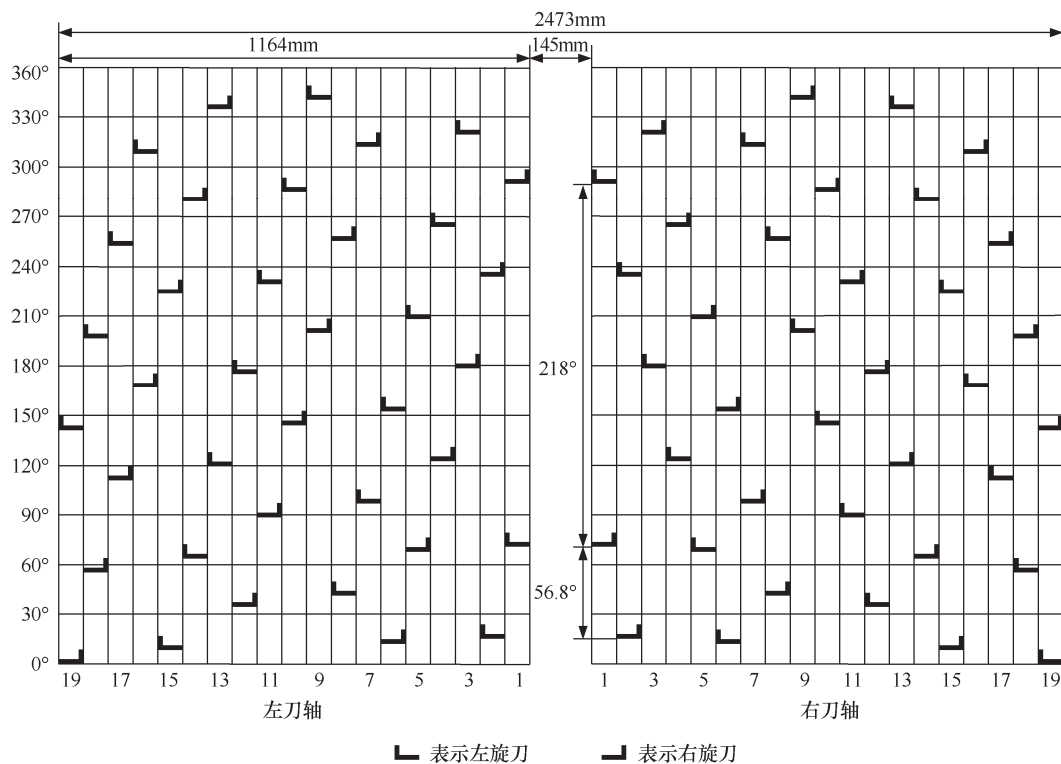


图 2-7 旋耕刀排列方式

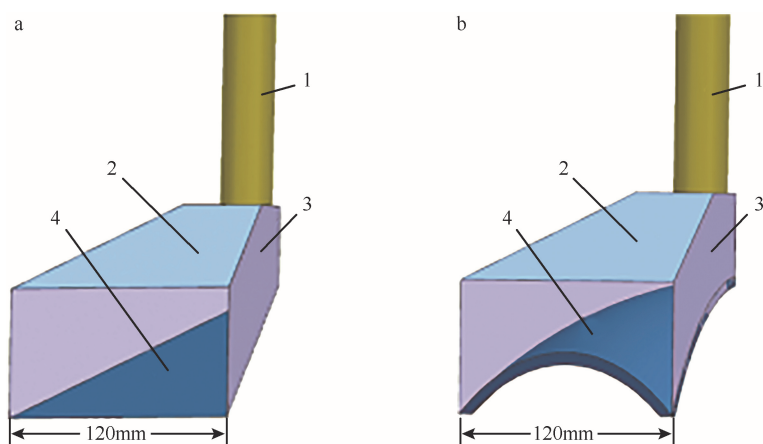


图 2-8 宽苗带撒播器结构示意图

a: 传统型; b: 改进型。1: 输种管; 2: 护种盖板; 3: 支撑侧板; 4: 弹籽板

设 D 点为 AB 直线的中点, 鉴于 D 点同样位于 Oxy 平面上, 则其空间坐标可以用 $(x_D, y_D, 0)$ 表示, 并满足式 (2-3)。

$$\begin{cases} x_A + x_B = 2x_D \\ y_B = 2y_D \end{cases} \quad (2-3)$$

式中, x_D 为 D 点投影在 x 轴方向上的坐标值(mm); y_D 为 D 点投影在 y 轴方向上的坐标值(mm)。

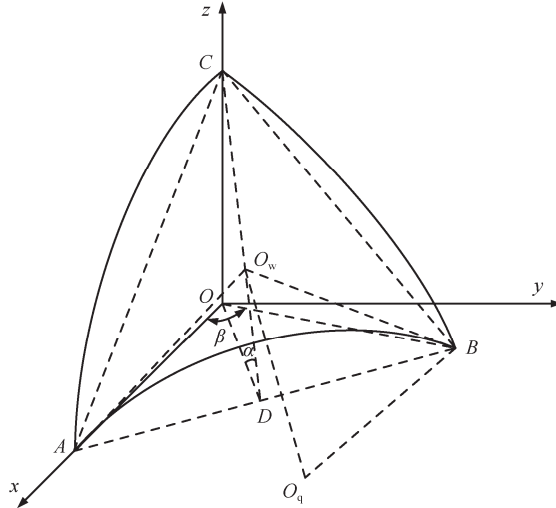


图 2-9 弹籽板的数学结构模型

$Oxyz$ 为空间坐标系, 其中 O 为坐标系的原点, A 、 B 、 C 分别表示匀种板的 3 个角点; D 点为 AB 直线的中点; O_w 表示三角形 ABC 的外接圆心; O_q 表示 A 、 B 、 C 点所在球面的球心; α 表示直线 CD 与 OD 的夹角 ($^\circ$); β 表示直线 OA 与 OB 的夹角 ($^\circ$)

为了减少匀种板结构模型的未知参量, 这里提出匀种板的安装倾角概念, 并将其定义为匀种板的 3 个边界点 (A 、 B 、 C 点) 所在平面 ABC 与水平面 Oxy 的夹角, 其中直线 AB 是两个平面的交线, 考虑到 D 点是直线 AB 的中点, 直线 OC 垂直于水平面 Oxy , 则匀种板的安装倾角可以用 $\angle ODC$ 表示 α , 此时匀种板的安装倾角与 C 点的空间坐标关系满足式 (2-4)。

$$\tan \alpha = \frac{|z_C|}{\sqrt{x_D^2 + y_D^2}} \quad (2-4)$$

式中, z_C 为 C 点投影在 z 轴方向上的坐标值 (mm); α 为直线 CD 与 OD 的夹角 ($^\circ$)。

宽苗带撒播器的支撑侧板是匀种板两侧的边界, 两个支撑侧板与水平面 Oxy 垂直, 交线分别为直线 OA 和直线 OB , 两个支撑侧板之间的交线为直线 OC , 因此两个支撑侧板的夹角可以用 $\angle AOB$ 表示 β , 看作匀种板的跨度, 鉴于点 D 为直线 AB 的中点, 同时直线 OD 垂直于直线 AB , 因此匀种板跨度与点 A 、 D 的空间坐标关系满足式 (2-5)。

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{\sqrt{(x_D - x_A)^2 + y_D^2}}{|x_A|} \quad (2-5)$$

式中, β 为匀种板的跨度 ($^\circ$)。

设点 A 、 B 、 C 所构成三角形的外接圆的圆心为 O_w , 匀种板所在球面的球心为 O_q , 那么过点 O_w 、 O_q 的直线一定垂直于平面 ABC , 那么点 O_q 、 O_w 、 B 的空间坐标关系应该满足式 (2-6)。

$$\begin{cases} d = \sqrt{(x_w - x_q)^2 + (y_w - y_q)^2 + (z_w - z_q)^2} \\ r = \sqrt{(x_w - x_B)^2 + (y_w - y_B)^2 + z_w^2} \\ (\sqrt{x_D^2 + y_D^2 + z_C^2} - r)^2 + (x_D - x_A)^2 + y_D^2 = r^2 \\ d^2 = r^2 + R^2 \end{cases} \quad (2-6)$$

式中, d 为点 O_q 、 O_w 的空间直线距离 (mm); r 为三角形 ABC 的外接圆半径 (mm); R 为匀种板所在球面的半径 (mm); x_w 为点 O_w 投影在 x 轴方向上的坐标值 (mm); y_w 为点 O_w 投影在 y 轴方向上的坐标值 (mm); z_w 为点 O_w 投影在 z 轴方向上的坐标值 (mm); x_q 为点 O_q 投影在 x 轴方向上的坐标值 (mm); y_q 为点 O_q 投影在 y 轴方向上的坐标值 (mm); z_q 为点 O_q 投影在 z 轴方向上的坐标值 (mm)。

由式 (2-2) ~ 式 (2-6) 可知, 对于特定苗带宽度撒播器, 匀种板的结构形式主要与安装倾角 α 、跨度 β 、球面半径 R 有关, 一旦确定这 3 个值, 就可以构造出唯一的匀种板结构, 同时可以确定目标宽苗带撒播器的结构形式。

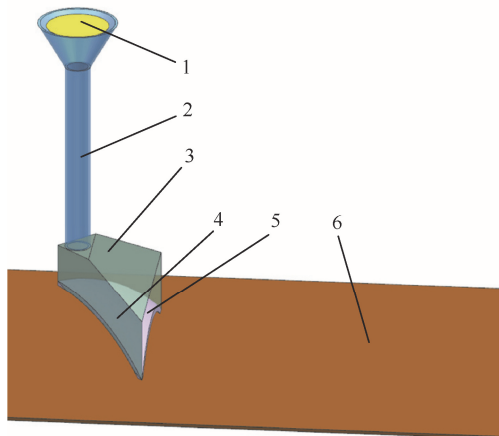


图 2-10 宽苗带撒播器仿真工作模型

1: 颗粒生成工厂; 2: 输种管; 3: 护种盖板;
4: 支撑侧板; 5: 匀种板; 6: 种床

2. 宽苗带撒播器设计

应用 Creo 软件构建完整的宽苗带撒播器工作模型, 然后利用 EDEM 仿真软件搭建可以模拟宽苗带撒播器工作过程的试验平台 (图 2-10), 以小麦籽粒横向均匀度变异系数作为作业效果的评价标准, 进行单因素仿真试验, 结果表明, 在球面半径 R 为 130~150mm、安装倾角 α 为 30°~40°、跨度 β 为 80°~100°时, 宽苗带撒播器具有较好的横向匀种效果。

通过二次回归正交旋转组合试验, 得到球面半径、安装倾角、跨度分别为 141.26mm、35.53°、90.72°时, 宽苗带撒播器具有较优的横向匀种效果, 此时理论计算、仿真试验的横向

均匀度变异系数分别为 10.58%、9.21%, 两者偏差为 1.37 个百分点。

2.1.2.3 种肥分层投送机构

1. 物料定深投送方法的数学模型

被旋耕刀切下的土块, 首先会随旋耕刀向后运动, 并在某一瞬间脱离旋耕刀的约束, 实际的旋耕机后侧配备刮土拖板, 脱离旋耕刀约束的土块与刮土拖板碰撞后, 最终回落到旋耕沟底。在不考虑土块之间的碰撞和空气阻力状况下, 将脱离旋耕刀约束的土块看作一个质点, 其将做斜上抛的自由运动, 运动轨迹如图 2-11 所示。

如图 2-11 所示, 土块在脱离旋耕刀约束的瞬间, 理论上其绝对速度应该和旋耕刀上约束点的绝对速度一致。以土块在端点 M 处脱离旋耕刀约束为例, 对土块进行运动学分析, 设旋耕刀的端点 M 转动到点 O' 时, 土块刚好脱离旋耕刀的约束, 此时 O' 点上土块的绝对速度可以用式 (2-7) 表示。