

谷物联合收割机的 设计与分析

Design and Analysis of
Grain Combine Harvester

李耀明 等著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

谷物联合收割机的 设计与分析

李耀明 等著



本书以水稻、油菜以及机械化密切相关的主要力学特性研究为基础,以联合收割机的作业流程为主线,对各主要工作部件进行了系统研究。阐述了全喂入式谷物联合收割机割台、脱粒分离、清选、损失监测、作业速度智能控制及作业流程故障诊断等关键技术及整机系统集成研究成果。本书为丰富我国收获机械行业学术专著稀少的局面提供了新的思路,对于培养从事收获机械研究的专业人才、指导联合收割机产品设计等均具有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

谷物联合收割机的设计与分析/李耀明等著. —北京:机械工业出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-111-45426-7

I. ①谷… II. ①李… III. ①联合收获机-研究
IV. ①S225.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 005056 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张敬柱 王晓洁 责任编辑:王晓洁 张振勇

版式设计:霍永明

责任校对:佟瑞鑫

封面设计:张静

责任印制:杨岚

北京富生印刷厂印刷

2014 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

148mm×210mm·8.375 印张·244 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-45426-7

定价:35.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

序 言

本书是一本收获机械研究方面的专著，是李耀明教授领导的科研团队自本世纪初至今十三年内在水稻和油菜机械化收获方面开展大量的理论与试验研究后，通过归纳、提炼形成的一本比较系统的专著。专著既包含了切割、脱粒分离和清选等联合收割机典型工作部件的研究工作，也包含了近年来同行们较为关切的收获机械自动化监测、控制技术等方面的探索研究工作，主要内容包括：①油菜割台设计与试验；②脱粒分离装置设计与试验；③清选装置的颗粒运动与透筛的理论、模拟和试验研究；④籽粒夹带与清选损失监测技术研究；⑤作业速度智能控制及作业流程故障诊断技术研究；⑥典型轮式切纵流多滚筒和履带式切纵流双滚筒联合收割机的设计。全书的内容丰富，对农机科研、教学人员和生产一线的工程技术人员都具有实用意义。

回顾我国的农机发展过程可以清晰地看到，最初对农机装备需求最迫切的是耕作机械化。至20世纪末，耕作机械的使用率已有了大幅提升。随后，对农机装备迫切需求之一是收获作业的机械化，尤其是主要粮食作物收获的机械化，而收获机械的研究所面临的复杂程度和难度很高。对此，我自20世纪70年代开始就在东北地区开展“割前脱粒”收获技术及机械系统的探索与研制工作，多年来对此有些体会。首先，收获机械加工（处理）的对象是有生命的生物体——包含作物的籽粒、茎、叶的整株，其特点就是作物的性状随着时间、地域、气候等因素而各不相同，变化范围大；其次，联合收割机要求完成的功能有割、脱、分、清等多方面，而且相互之间具有复杂的作用关系；第三，现代联合收割机都是自走式，其行走、变速、操向以及防陷等方面的要求，几乎接近于汽车。另外，作物适合收获的时间非常短，田间试验量受到很大的限制，再加上加工对象——有机物的多变性，要求

适应范围又广，导致产品的设计很难依靠室内试验研究所得的数学模型进行定量计算。仅能以其为参考，最后的几何尺寸、运动等参数还得依据田间实地的、多年的、广泛地域的大量试验来修正、定案，这是国际上知名的农机企业的共识。联合收割机不像以机械学为主的农业机械，例如插秧机，当将分插机械的运动轨迹的数学模型准确地研究出来，就可开发出多种机型，而且性能可靠。此点我国已有实例。因为联合收割机试验时间短，每当发现问题必须在现场就拿出改进方案，而且要连夜制造出来，抢时间完成试验。这种试验的紧迫性强，条件苛刻。江苏大学李耀明教授所领导的科研团队能够以十年如一日的精神和以十年磨一剑的勇气，务实进取，攻坚克难，长期专注于收获机械的研究和推广工作，并取得一系列丰硕的成果，十分难得。颇有镇江农机学院（江苏大学前身）老一辈农机专家的精神传承，这是我所赞赏的。

随着我们国家经济社会的发展，农业机械的发展水平不仅降低了农业生产的劳动强度，而且是解决农村劳动力大量往城市转移导致农业劳动力严重缺乏的唯一出路。在当前及今后相当长的一段时期内，收获机械研究将是农机领域的一个持续的热点。虽然稻麦联合收割机已在一定程度上得到了普及，但随着人们生活水平的提高和工业技术反哺效应的日益显著，收获机械的研究将会面临机具作业的高效、优质和监控操纵自动化等越来越高的要求。本书的出版必将对我国收获机械的发展起到促进作用，为我国的农机事业添砖加瓦。广大读者也可从中得到有益启发。

我欣赏李耀明教授及其团队踏实奋进的精神。在此由衷地期待李耀明教授和他的科研团队在今后的工作中做出更多、更大的成绩！

中国工程院院士、东北农业大学教授



2013年10月7日

黑龙江·哈尔滨·东北农业大学

前 言

相对于同时期发达国家的农机装备而言，我国的农机装备一直处于比较低端、廉价和落后的地位，究其原因当然包括经济、社会和历史等多个方面的因素，但作为长期致力于推动和提升我国农机装备水平的高校农机科教工作者而言，对解决目前我国农机领域存在的问题具有义不容辞的责任。当前，我国的农机装备在相当程度上还存在对国外机型过多地依赖性模仿和借鉴现象，在自主研发设计中仍普遍停留在粗放式设计和经验式设计阶段，严重缺乏自主核心技术和针对我国农业生产特点及地理特点开展的基础理论研究。同时，农机领域的著作还比较少，大多数能查阅到的著作或手册也较为陈旧，这就是我们编著本书的总体背景和原因所在。我们真诚地希望，本书能给从事收获机械研究及开发的工作者提供参考和启发。

本书是在课题组的共同努力下，将本团队在过去十年中围绕收获机械开展的大量研究工作进行系统梳理后编著而成的。在章节的安排上，第1~4章按照典型联合收割机的切割、脱粒和清选环节进行顺序编排，第5章和第6章则着重阐述了课题组近年来在联合收割机籽粒损失传感监测、作业速度智能控制和作业流程故障诊断等方面开展的工作，第7章专门对切纵流结构联合收割机的设计进行了阐述。具体的编写分工如下：第1章由马朝兴高工和徐立章副研究员执笔，第2章由李耀明教授和唐忠博士执笔，第3章和第4章由李耀明教授和马征博士生执笔，第5章由赵湛副研究员和李耀明教授执笔，第6章由陈进教授执笔，第7章由徐立章副研究员和李耀明教授执笔。李耀明教授负责本书的统稿和校审工作。

书中的研究工作受到了国家自然科学基金、国家“863”计划

和国家科技支撑计划等多个项目的支持，书稿的完成和出版受到了江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室和江苏省高校优势学科的资助，在此表示衷心感谢！

由于作者水平所限以及时间仓促，书中一定有不少缺点和错误之处，敬请读者批评指正。

李耀明

2013年10月

江苏·镇江·江苏大学

目 录

序言

前言

第 1 章 油菜割台的设计与试验	1
1.1 油菜角果抗裂角性	1
1.1.1 油菜角果抗裂角性测定的重要性	1
1.1.2 油菜角果抗裂角性测定的试验装置及方法	2
1.1.3 油菜角果抗裂角性的试验结果及分析	3
1.2 油菜收获的难点	5
1.2.1 油菜的形态参数	5
1.2.2 油菜联合收割机与稻麦联合收割机割台的主要区别	7
1.3 油菜割台的设计	7
1.3.1 竖侧切割器的设计	7
1.3.2 拨禾轮的设计	13
1.4 油菜割台的试验	17
1.4.1 油菜割台的试验装置及方法	17
1.4.2 油菜割台的试验结果与分析	20
第 2 章 脱粒分离装置的设计与试验	29
2.1 水稻穗头籽粒的连接力	29
2.2 谷物脱粒分离模型	34
2.2.1 切流滚筒脱粒分离模型	34
2.2.2 轴流滚筒脱粒分离模型	37
2.3 籽粒脱粒损伤模型	40
2.4 切横流双滚筒脱粒分离装置	50
2.4.1 切横流双滚筒脱粒分离装置的设计	50
2.4.2 切横流双滚筒脱粒分离装置的试验与分析	53
2.5 横轴流双滚筒脱粒分离装置	56
2.5.1 横轴流双滚筒脱粒分离装置的设计	56
2.5.2 横轴流双滚筒脱粒分离装置的试验与分析	59

2.6	切纵流双滚筒脱粒分离装置	60
2.6.1	切纵流双滚筒脱粒分离装置的设计	60
2.6.2	切纵流双滚筒脱粒分离装置的试验与分析	62
2.7	切纵流三滚筒脱粒分离装置	64
2.7.1	切纵流三滚筒脱粒分离装置的设计	64
2.7.2	切纵流三滚筒脱粒分离装置的试验与分析	68
第3章	风筛式清选装置的颗粒运动与透筛研究	75
3.1	典型风筛式清选装置简介	75
3.2	风筛式清选装置中筛面颗粒运动理论建模与分析	76
3.2.1	单颗粒的定常运动分析	76
3.2.2	单颗粒物料在清选装置中的非线性运动分析	82
3.2.3	物料群在清选装置中的运动规律	88
3.3	风筛式清选装置中颗粒透筛的理论建模与试验分析	93
3.3.1	清选筛面上颗粒透筛概率模型	93
3.3.2	基于图像跟踪技术的颗粒透筛概率试验研究	96
3.4	清选筛面的颗粒运动数值模拟	114
3.4.1	基于虚拟样机的颗粒运动数值模拟	114
3.4.2	基于神经网络的物料筛分过程数值模拟	122
3.4.3	基于离散元的颗粒运动数值模拟	126
第4章	风筛式清选过程的气固耦合与清选试验研究	135
4.1	风筛式清选装置内部气流场的数值模拟与分析	135
4.1.1	模型建立与网格划分	135
4.1.2	数值模拟结果与分析	136
4.2	风筛式清选装置的气固耦合数值模拟与分析	142
4.2.1	CFD-DEM 耦合	142
4.2.2	风筛式清选装置的模型及颗粒模型	144
4.2.3	耦合结果与分析	145
4.3	风筛式清选装置的清选性能试验研究	150
4.3.1	油菜清选性能试验与分析	150
4.3.2	水稻清选的物料组成及筛下物料分布试验与分析	161
第5章	籽粒夹带与清选损失监测技术	164
5.1	籽粒损失监测技术	164
5.1.1	籽粒夹带损失监测原理	164
5.1.2	籽粒清选损失监测原理	169

5.2 籽粒损失监测传感器的设计	170
5.2.1 籽粒损失监测传感器的结构	170
5.2.2 水稻籽粒的碰撞分析	173
5.2.3 传感器的振动力学分析	180
5.2.4 信号处理电路的设计	185
5.2.5 籽粒检测的性能试验	190
第6章 联合收割机作业速度智能	
控制及作业流程的故障诊断系统	198
6.1 作业速度智能控制方案设计	198
6.1.1 联合收割机作业过程特点分析	198
6.1.2 作业速度控制系统总体结构	199
6.2 作业速度手自一体智能控制系统	202
6.2.1 手自一体调速装置	202
6.2.2 作业速度智能控制装置的硬件电路设计	203
6.2.3 作业速度智能控制系统的软件设计	205
6.2.4 作业速度的预测与控制方法	207
6.3 作业流程故障诊断系统的设计	217
6.3.1 作业流程的故障诊断方法	217
6.3.2 故障诊断系统的软件设计	219
6.4 联合收割机作业速度智能控制和故障诊断系统的试验	224
第7章 切纵流联合收割机的设计	229
7.1 4LQZ-6型轮式切纵流多滚筒联合收割机	229
7.1.1 总体结构	229
7.1.2 主要工作部件的设计	230
7.1.3 整机系统集成	238
7.2 4LZ-2.2Z履带式切纵流双滚筒联合收割机	240
7.2.1 总体结构	240
7.2.2 切纵流双滚筒脱粒分离装置	240
7.2.3 高效清选装置	245
7.2.4 整机系统集成	247
参考文献	249

第1章 油菜割台的设计与试验

油菜植株上部分枝多，枝蔓纵横交错，进行机械化收获分禾比较困难；成熟油菜的果荚在受到拨禾轮弹齿的拨动、牵拉后极易炸荚，造成落粒损失。本章首先对油菜角果抗裂角性测定的重要性、测定试验装置和试验结果进行了叙述与分析，然后从油菜的农艺特性、形态参数及物理机械特性入手，分析了油菜机械化收获的难点。设计了用于将待割区与未割区顺利分开的开行竖切割器，研究了竖切割器刀片的特性、竖切割器传动机构的工作性能和强度，设计并分析了拨禾轮的结构和工作参数。在油菜联合收割机专用割台试验台上进行了多参数组合对比试验，得到了最佳参数组合，研制出了适合于我国长江流域油菜收获的专用割台。

1.1 油菜角果抗裂角性

1.1.1 油菜角果抗裂角性测定的重要性

油菜是我国的主要油料作物。油菜生长周期可分为苗期、蕾薹期、开花期和角果成熟期。抽薹后，主茎节间迅速伸长呈直立型并同时长粗，至终花期，茎的伸长基本停止。主茎由下往上分为缩茎段（主茎基部，节短而密集，着生长柄叶）、伸长茎段（主茎中部，节较长，着生短柄叶）、薹茎段（主茎上部，节最长，着生无柄叶）。分枝由茎秆叶腋间的腋芽发育形成，分枝上可再生分枝，即二次分枝、三次分枝等。

开花期油菜的开花顺序为：主茎先开，分枝后开；上部分枝先开，下部分枝后开；同一花序，则下部先开，依次陆续向上开放，大体分为初花期、盛花期和终花期。角果发育的迟早与开花早晚一致，生长发育速度受温度影响。角果成熟期一般分为绿熟期、黄熟期和完熟期。由于油菜的生长特性，茎秆的发育和开花的时间存在先后顺

序, 导致在角果成熟期油菜角果很难同时到达黄熟期或完熟期, 同时油菜角果又具有易裂角性, 即油菜在完熟期时油菜角果在外力作用下容易开裂的特性。由于这一特性的存在, 收获时损失一般可占籽粒总产量的 8% ~ 12%, 如收获延迟, 产量损失可能增加到 20% 以上。同时油菜角果的裂角性又会对机械收获有很大的影响, 例如油菜联合收割机采用何种结构的脱粒滚筒和运动参数。油菜角果的抗裂角力研究对选育耐裂品种, 增强油菜品种的抗落粒性, 提高机械化收获效率具有重要的价值。

1.1.2 油菜角果抗裂角性测定的试验装置及方法

目前对油菜角果抗裂角力的研究方法主要有拉裂法、悬空压裂法和随机碰撞法等。

拉裂法(图 1-1)是把油菜角果粘附在平板上, 在角果一端通过上拉使油菜角果开裂, 记录开裂时角果弯曲的角度或定量测定油菜角果开裂需要的外力。

悬空压裂法(图 1-2)是把油菜角果放在悬梁支撑架上, 在角果中部施加外力使油菜角果开裂, 记录油菜角果被压裂瞬间所需要的最大载荷。

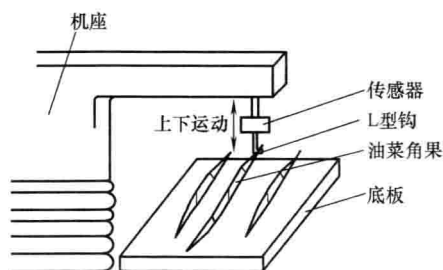


图 1-1 拉裂法原理图

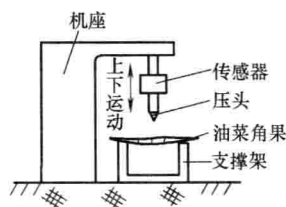


图 1-2 悬空压裂法原理图

随机碰撞法(图 1-3)是把一定数量的油菜角果放入圆柱体料盒中, 料盒内放入金属球, 然后使料盒以一定形式运动一段时间, 使金属球与油菜角果之间发生随机碰撞, 将油菜角果撞裂, 最后统计油菜角果开裂的比例, 开裂比例越高, 抗裂角性越低。

1.1.3 油菜角果抗裂角性的试验结果及分析

1. 悬空压裂法的油菜角果抗裂角力测试的试验样品与方法

在油菜成熟期选取生长良好、无虫害、无破损的油菜角果。每个品种分别随机选取直播5株、移栽5

株，每株在上、中、下位置各随机摘取5个完好的角果，每个品种最终各取150个角果用保鲜袋装好，贴上标贴。所试验的28个油菜品种见表1-1。试验在WDW30005型万能试验机上进行（图1-4），采用3点弯曲变形法加载。

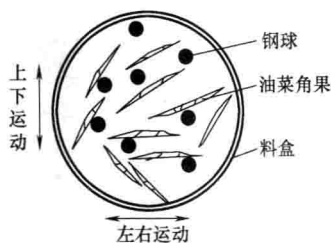


图 1-3 随机碰撞法原理图

表 1-1 28 个油菜品种

序号	品种名称	序号	品种名称
1 号	宁油 12	15 号	苏油 4
2 号	宁油 14	16 号	镇油 5
3 号	宁油 16	17 号	沪油 17
4 号	宁油 18	18 号	史力丰
5 号	宁杂 11	19 号	史力佳
6 号	宁杂 21	20 号	华油 2790
7 号	NJ0801	21 号	红油 3
8 号	NJ0901	22 号	浙双 3
9 号	红油杂 2	23 号	浙双 8
10 号	华油杂 6	24 号	浙平 4
11 号	华油杂 10	25 号	秦优 9
12 号	华油杂 13	26 号	希望 98
13 号	中农油 6	27 号	丰油 701
14 号	苏油 1	28 号	中油 519

连接有传感器的加载探头压裂油菜角果，通过传感器接收压力信号。从每个油菜品种的保鲜袋中各随机选取5个完好无损的角果，每次将一个角果悬空放在悬梁支撑架上，支撑架跨度为40mm，载荷 F 作用在跨度中点，以10mm/min的速度加载，试验过程中，角果尚未破裂时载荷力曲线不断上升，当载荷力达到一定程度时，角果会在该

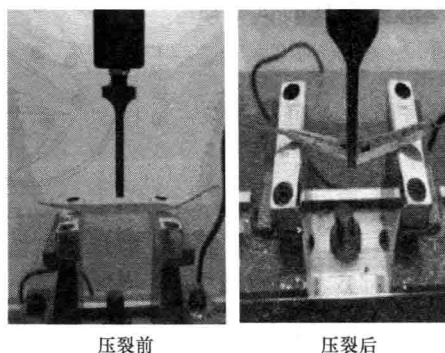


图 1-4 悬空压裂油菜角果试验

力的作用下瞬间破裂，并伴随着一声清脆的开裂声，瞬间得到一个峰值力，随后载荷力曲线迅速下降，该峰值力即为角果的抗裂角力，计算机动态显示油菜角果被压裂瞬间所需要的最大载荷和载荷-位移曲线，并自动记录角果开裂瞬间的最大峰值力等机械物理特性参数。每个品种做 5 次试验，取平均值。

2. 悬空压裂法的油菜角果抗裂角力测试结果与分析

28 个品种的油菜角果抗裂角力比较图如图 1-5 所示。通过试验得出：油菜品种、角果尺寸、成熟度、含水率均对角果抗裂角力产生影响。试验测得 28 个品种油菜角果的抗裂角力范围为 0.898 ~ 3.035N，其中浙平 4 油菜角果抗裂角力最大（为 3.035N），最不易破裂，沪油 17 抗裂角力最小（为 0.898N），最容易破裂，角果尺寸大时其抗裂角力大，成熟度越高、含水率越低的油菜角果，其抗裂角力越小，越容易破裂；试验中油菜角果的抗裂角力不仅与其品种有

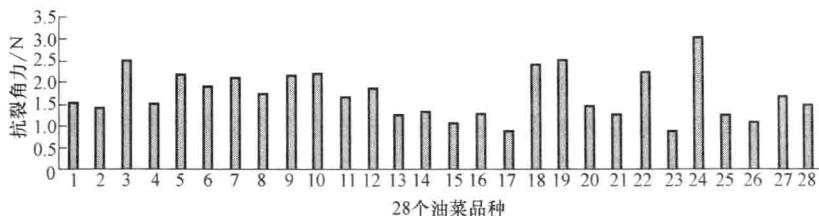


图 1-5 28 个品种的油菜角果抗裂角力比较图

关，还与角果大小、角果成熟度及角果含水率有关。

1.2 油菜收获的难点

1.2.1 油菜的形态参数

油菜的农艺特性、形态参数及其物理机械特性是油菜收获机械最原始的设计依据。成熟油菜的主要特点是：油菜植株下部（约50cm以下）茎秆粗壮且坚韧，不易切割；油菜株体上部（约60cm以上）分枝密布纵横交错，分禾困难，而且含水率高，因此对后续的分选、清选十分不利；成熟的果荚在受到拨禾轮弹齿的拨动、牵拉后极易开裂，造成落粒损失；油菜各个部位的果荚成熟很不一致，过熟的果荚在机械化收获时会开裂落粒，未成熟的青果荚又会产生脱不净的现象，也会造成收获损失。与油菜机械化收获相关的油菜的农艺和形态参数主要有：株距、行距、主茎秆直径、植株高度、分枝高度以及角果的直径和高度等。

我国的油菜品种繁多，加上气候条件与地理环境的不同，各地油菜的农艺特性也有较大差别，试验采用江苏省镇江地区油菜如图1-6所示，各测定结果见表1-2。

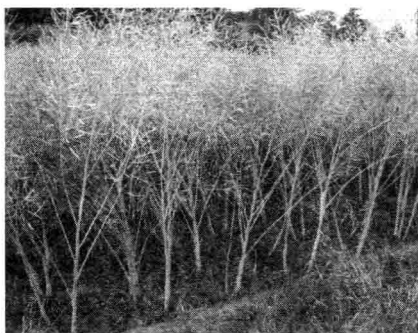


图1-6 田间成熟油菜的长势

1. 油菜主茎秆直径的测定

从表1-2可以看出油菜主茎秆直径最大值为20.3mm，最小值为16.5mm，均值为17.9mm，油菜的主茎秆比较粗壮。

表 1-2 油菜主茎秆直径测试数据统计表

序号	1	2	3	4	5	6	7	最大值	最小值	均值
直径/mm	20.3	16.8	18.1	17.8	19.12	16.5	16.6	20.3	16.5	17.9

2. 植株高度的测定

从表 1-3 中可以看出油菜植株高度较高, 最高值达 1800mm, 因此在联合收割机割台设计时要求拨禾轮作业时高度调整范围更大。

表 1-3 油菜植株高度测试数据统计表

序号	1	2	3	4	5	6	7	最大值	最小值	均值
高度/mm	1650	1710	1650	1630	1750	1800	1700	1800	1630	1698.6

3. 主茎秆上开始分枝处高度的测定

表 1-4 测定的结果表明, 植株在离地面平均 265.7mm 处开始分枝, 且随着植株高度的增加分枝越来越多。这项数据的测定为确定机具割茬高度提供依据。割茬过低势必造成切割力增大, 同时也给后面的脱粒清选带来困难。割茬高虽然可以改善上述不利影响, 但是也受分枝高度的限制, 同时留在田里过高的割茬会给后继的田间作业造成影响。

表 1-4 主茎秆上开始分枝处高度测试数据统计表

序号	1	2	3	4	5	6	7	最大值	最小值	均值
高度/mm	300	250	400	230	230	160	290	400	160	265.7

4. 植株角果层直径和高度的测定

表 1-5 测试数据表明, 单株角果层直径为 450 ~ 640mm, 底层角果离地高度为 600 ~ 900mm。从上述数据可以看出角果层直径远大于株距和行距, 从而使各株油菜的分支纵横交错相互牵扯。在机械化收获时, 如果依靠拨禾轮将植株强行分开, 植株间会因为牵扯造成炸荚落粒, 损失增加。

表 1-5 角果层直径和高度测试数据统计表

序号	1	2	3	4	5	6	7	最大值	最小值	均值
高度/mm	610	600	800	870	700	840	900	900	600	760
直径/mm	640	600	450	500	600	480	580	640	450	550

1.2.2 油菜联合收割机与稻麦联合收割机割台的主要区别

1. 安装纵向竖切割装置

将油菜待割区的分枝切断，达到分禾的目的，解决油菜分枝相互牵连而造成收获过程中的炸荚损失。

2. 增加割台长度

将横向主割刀前移，拨禾轮相对后移，在割台前部安装一块与割台宽度一致的底板，前部呈一定角度向上倾斜。割台的面积增大后，可以使由拨禾轮的撞击、梳刷和搅龙撞击挤压而炸裂的油菜籽粒都落在割台内，同时使油菜植株尽量全部落入割台，减少割台损失。

3. 增加割台挡板的高度

由于油菜在收割过程中比水稻小麦更容易产生飞溅损失，因此增加割台左右及后侧的挡板高度，能减少飞溅损失。

4. 改变拨禾轮结构和运动参数

拨禾轮位置调高，作业调节范围加大；减少拨齿数量，减少拨齿对果荚的撞击和梳刷次数，降低果荚的炸裂损失；降低拨禾轮转速，减少拨禾轮对植株的冲击速度和打击次数，降低割台损失。

5. 切割装置的改进

油菜的茎秆比小麦、水稻的茎秆粗且坚韧，所需的切割力较大，割刀传动采用摆环机构代替曲柄连杆机构，以增加动刀杆驱动强度，减小振动。

1.3 油菜割台的设计

1.3.1 竖侧切割器的设计

1. 竖侧切割器的数量

竖侧切割器以左右各设置一个为好，可在油菜田的任何位置开道收割，适合大面积油菜田块机械化收获。但是，左右各设置一个竖侧切割器，一是造价较高，机械化收获成本增加；二是传动线路复杂；三是在拆除竖侧切割器后恢复稻麦收割状态较困难。因此，目前国内的油菜收获机均只设置一个竖侧切割器，其位置有左有右，均在卸粮口的反向位置。考虑到造价、结构和兼收稻麦的因素，课题组研制的