

玉米柔性摆锤脱粒系统研究报告

作品名称：玉米柔性摆锤脱粒系统

团队成员：徐江东、刘亦轩、翟文耀

指导教师：姚艳春

研究报告的主要内容（不限于此）：

● 研究背景及意义

我国是农业大国，玉米是我国重要粮食作物之一，同时也是生产饲料的重要原料。目前已出现多种玉米脱粒装置，共分为钉齿式、板齿式、钉齿—纹杆组合式。钉齿式对玉米籽粒的脱净率较高，属于刚性脱粒，但其对玉米籽粒的破坏性较大。板齿式脱粒元件，虽实现了较高的籽粒完整性，降低了破损率，但对玉米籽粒的脱净率相对较低，往往出现籽粒残留的情况。钉齿—纹杆组合式脱粒元件，虽同时保证了较高的脱净率与较低的破损率，但适应地区却有限，对于较高含水率的玉米而言，其效果有所下降。因此，需要一种新型柔性脱粒元件满足作业需求。

● 国内外现状

国外发展现状：

1815 年，美国设计出第一台用于玉米脱粒的脱粒装置，国外学者开始对玉米脱粒装置进行大量研究。**Bilanski**^[1]通过研究玉米载荷—变形曲线发现含水率及压缩位置对玉米籽粒变形的显著影响，并发现在低速和高速碰撞条件下含水率较高的籽粒损伤要大。**Shelef** 等^[2]发现弹性模量和变形模量与籽粒水分成反比关系。**Srivastava** 等^[3]研究玉米的动力学性能发现在冲击载荷下，籽粒剪切强度与水分成反比，与冲击速度成正比，籽粒受冲击作用时纵向剪切强度要比横向剪切强度弱，并提出在纵向冲击中单位面积所受的能量是衡量籽粒破损的最佳参数。

如图 1 所示，玉米果穗沿滚筒切线方向喂入，脱粒后从滚筒切线方向排出。作物在该脱粒装置内脱粒行程小，脱粒时间短，玉米大颗粒作物进行脱粒作业时，会产生较高的玉米破碎率。该装置能够适应潮湿的作业环境，在物料喂入不均匀、低转速的情形下仍具有良好的脱粒效果。轴流式脱粒装置可分为纵轴流式脱粒装置和横轴流式脱粒装置，而纵轴流式脱粒装置又可分为单纵轴流式脱粒装置和双纵轴流式脱粒装置。单纵轴流式脱粒分离装置的代表机型为美国 CASE 9240 型玉米联合收获机，如图 2 所示。该脱粒装置的脱粒滚筒的前端设计为过渡锥形与螺旋叶片组合系统，增大喂入能力，具有物料流动性好、玉米籽粒破碎率低等优点。



图 1 切流式装置



图 2 单纵轴流装置

双纵轴流式脱粒分离装置的代表机型为美国 CASE New Holland 公司生产的 CR 8090 型玉米联合收获机，该脱粒装置适应潮湿环境作业，双滚筒上安装有可调节的螺旋喂入叶片，提高喂入能力，具有良好的脱粒性能。John Deere 的 S690 型收获机采用的是子弹头式纵轴流脱粒装置，设计的子弹头式脱粒滚筒在收获湿度大、种植密度高的作物时，可以减少收获机的动力消耗。脱粒分离室的直径逐级加大，不仅提高了玉米籽粒的脱粒分离能力，而且减小了功率消耗。为克服切流式脱粒装置和纵轴流式脱粒装置的各自存在的缺点，设计了以德国 CLASS LEXION 760 型收获机为代表的切流与纵轴流组合式脱粒装置。切流滚筒对作物具有预脱粒与分离功能，双纵轴流脱粒滚筒大大提高了谷物的脱净率与分离效率^[4-6]。

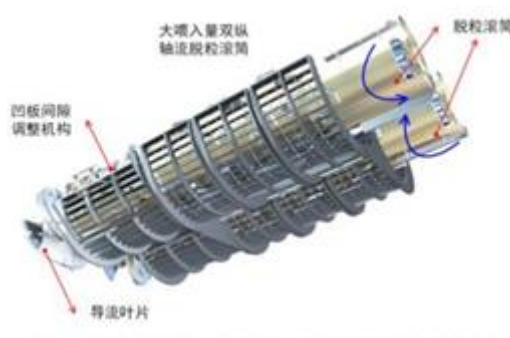


图 3 双纵轴流装置



美国 John Deere



德国 CLASS



美国 AGRO

图 4 代表机型

国际上谷物联合收获机主要以大型多功能为主，主要集中在欧美地区，代表企业为 John Deere、CLASS 和 AGRO 等，喂入量高达 20kg/s，动力突破 700 马力，产品占据国际市场 85% 以上。谷物联合收获机高速化、大型化、智能化是提升农机装备的核心竞争力，也是走向国际市场的必然要求。

国内发展现状：

对国内而言，机械化起步相对较晚，现有机械化水平相对较低，联合收获机市场保有量在 70 万台左右，喂入量从 1.5kg/s 发展到 12kg/s（目前以 4-8kg/s 为主），收获作业速度在 8-10km/h，动力从 50 马力发展到 220 马力，低端产品相对成熟，高端收获机械产品整体技术配置低，割幅低于 6m，长期依赖进口。国产收获机械作业性能和效率严重依赖操纵人员，随着收获作业速度、喂入量的不断提高，作业效果差、损失率高、可靠性差，竞争力相对较弱。

李耀明等对成熟期的油菜进行了脱粒试验，探究出轴流式、装有短纹杆块的脱粒滚筒对油菜脱粒的效果较好，油菜籽粒破碎率较低；其又进行了短纹杆—板齿与钉齿脱粒装置的脱粒对比实验发现短纹杆—板齿式脱粒装置的脱出物杂余量小、功耗低^[7]。衣淑娟等^[8]利用轴流式、脱粒元件为板齿和钉齿组合式脱粒滚筒对水稻脱粒展开试验研究，发现了脱出物轴向分布曲线规律；徐立章等^[9]通过设计的纹杆块和板齿组合式的双横轴流脱粒滚筒进行试验研究发现，该装置可以在较大喂入量情况下仍可实现低损伤率、高脱净率；戴飞等^[10,11]先后设计了两种纵轴流脱粒滚筒，对小麦脱粒展开试验发现，该两种滚筒具有损失损伤率低、能耗小的优点；邸志峰等^[12]利用纹杆块与钉齿的组合装置对含水率为 32%~34% 的玉米进行了脱粒试验，发现其破碎率最低为 2.88%，脱净率最低为 0.06%，验证了组合式脱粒装置可适用于较高含水率玉米的脱粒工作；屈哲等^[13]以一种完全自主设计的低损伤组合式轴流脱粒装置对玉米果穗开展脱粒试验发现，喂入量和滚筒转速之间应搭配得当，这样能有效地降低破碎率，提高脱粒效率和脱粒质量。李心平等^[14]观察鸡啄食玉米对果穗上籽粒产生离散作用的过程，以鸡喙为仿生原型，设计出了仿生离散单元，并将离散单元与脱粒辊、差速辊进行结合设计出了玉米种子仿生脱粒装置。仿生脱粒机采用先离散后脱粒的原理对种用玉米进行脱粒，通过试验和参数优化可以达到较好的脱净率和较低的损失率。赵武云^[15]通过对玉米生物力学特性的详细测定确定了组合式螺旋板齿脱粒机理，并设计了变直径变间距组合式螺旋板齿脱粒滚筒，并设计了排芯口变刚度压板装置，经试验验证

明该装置的脱净率为 99.6%，破碎率为 0.4%。

综合切流式脱粒装置和纵轴流式脱粒装置的缺点，国内众多学者及科研机构开始研究切流轴流组合式脱粒装置。唐忠等^[16,17]搭建谷物切流轴流组合式脱粒装置试验台，通过试验开展对其进行了理论分析；徐立章等^[18]对水稻切流-单轴流组合式脱粒装置进行了试验优化设计；李耀明等^[19]对水稻切流-双横轴流组合式脱粒装置进行试验，实现了高脱净率和低损伤率；李磊等^[20]改变了水稻切流轴流组合式滚筒倾角，保证了喂入、脱粒的平稳性；饶师任等^[21]对小麦切流-双纵轴流脱粒装置进行试验研究，得出最优作业参数组合；杨立权等^[22,23]对玉米切流-横轴流脱粒装置进行试验研究，通过安装有不同形式的脱粒元件，得出该装置最优工作参数范围。雷沃谷神系列收割机采用的是切流与横轴流组合式脱粒分离装置，如图 5 所示。该机型是黄淮海地区籽粒收获的主流机型，通过更换割台、调整参数，适用于小麦、玉米收获，作为玉米籽粒直收机型应用于黄淮海地区。

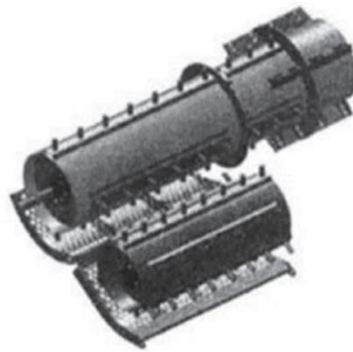


图 5 切流式与纵轴流式组合脱粒分离装置

参考文献：

- [1] Bilanski W K. Damage resistance of seed grains [J]. Trans of ASAE, 1966, 11(2):360-363.
- [2] Shelef L, Mohsenin N N. Effect of moisture content on mechanical properties of shelled corn [J]. Cereal Chemistry, 1969, 46(5):242-253.
- [3] Srivastava A K, Herum F L, Stevebs K K. Impact parameters related to physical damage to corn kernel [J]. Transaction of the ASAE, 1976, 19(8):1147-1151.
- [4] 崔涛, 樊晨龙, 张东兴, 等. 玉米机械化收获技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 1-13.
- [5] 相姝楠, 付君, 张屹晨. 玉米脱粒技术及装置研究进展[J]. 中国农机化学报,

2019, 40(03): 95-101.

- [6] 李俊忠. 基于玉米籽粒直收的脱粒装置关键技术与装备研发[D].吉林大学, 2021.
- [7]李耀明, 李洪昌, 徐立章.短纹杆-板齿与钉齿脱粒滚筒的脱粒对比试验研究[J].农业工程学报, 2008(03): 139-142.
- [8]衣淑娟, 陶桂香, 毛欣.两种轴流脱粒分离装置脱出物分布规律对比试验研究[J].农业工程学报, 2008(06): 154-156.
- [9]徐立章, 李耀明, 马朝兴, 等.横轴流双滚筒脱粒分离装置设计与试验[J].农业机械学报, 2009, 40(11): 55-58.
- [10]戴飞, 高爱民, 孙伟, 等.纵轴流锥型滚筒脱粒装置设计与试验[J].农业机械学报, 2011, 42(01): 74-78.
- [11]戴飞, 韩正晟, 赵武云, 等.纵轴流双滚筒小区育种脱粒分离装置设计与试验[J].农业现代化研究, 2016, 37(05): 1015-1020.
- [12] 邸志峰, 崔中凯, 张华, 等.纹杆块与钉齿组合式轴流玉米脱粒滚筒的设计与试验[J].农业工程学报, 2018, 34(01): 28-34.
- [13]屈哲, 张东兴, 杨丽, 等.纵轴流玉米脱粒分离装置喂入量与滚筒转速试验[J].农业机械学报, 2018, 49(02): 58-65.
- [14]李心平, 吴康, 金鑫, 等.基于仿生脱粒的鸡喙啄取玉米果穗引起籽粒离散过程分析[J].农业工程学报, 2015, 31(18): 34-40.
- [15]赵武云. 组合式螺旋板齿种子玉米脱粒装置研究[D].西北农林科技大学, 2012.
- [16]唐忠, 李耀明, 徐立章, 等.切纵流联合收获机小麦脱粒分离性能评价与试验[J].农业工程学报, 2012, 28(03): 14-19.
- [17]唐忠. 切纵流结构谷物脱粒分离理论与试验研究[D].江苏大学, 2013.
- [18] 徐立章, 李耀明, 王成红, 等.切纵流双滚筒联合收获机脱粒分离装置[J].农业机械学报, 2014, 45(02): 105-108+135.

[19] 李耀明, 周伟, 徐立章, 等.单切双横流脱粒分离装置参数试验与优化[J].农业机械学报, 2015, 46(05): 62-67+92.

[20]李磊, 李耀明.新型斜置切纵流联合收获机脱粒分离装置[J].农机化研究, 2016, 38(04): 84-89.

[21]饶师任, 陈树人, 沈柳柳, 等.切-双纵流脱分装置试验研究与分析[J].农机化研究, 2017, 39(04): 202-206.

[22]杨立权, 王万章, 张红梅, 等.切流-横轴流玉米脱粒系统改进设计及台架试验[J].农业工程学报, 2018, 34(01): 35-43.

[23]杨立权. 切流横轴流玉米脱粒系统设计及试验研究[D].河南农业大学, 2018.

● 原理及依据

前期进行黄淮海地区的玉米摘穗实验, 积累了玉米植株物理性质以及力学特性数据如表 1 所示, 并对玉米果穗进入脱粒装置后脱粒前与脱粒中所受力变化进行了实验验证与分析。

表1 玉米植株特性参数

参数	最小	最大	平均值	标准差
植株节数/节	13	15	14.15	0.853
植株高度/mm	1800	2563	2133	195.8
最低结穗高度/mm	800	1110	910.52	82.3
果柄长度/mm	35	150	95.5	13
近果柄端秸秆直径	20	28	23.35	1.35
带叶果穗最大端直径/mm	48	56.5	52.3	2.98

对玉米籽粒多次进行力学特性实验，如图6、7所示。通过力学试验机测定了籽粒在平放与侧立时所能承受力的最大限度，建立玉米籽粒力学特性曲线。

如图8、9所示。以便于了解在脱粒过程中玉米籽粒载荷。



图6 力学试验机整体图

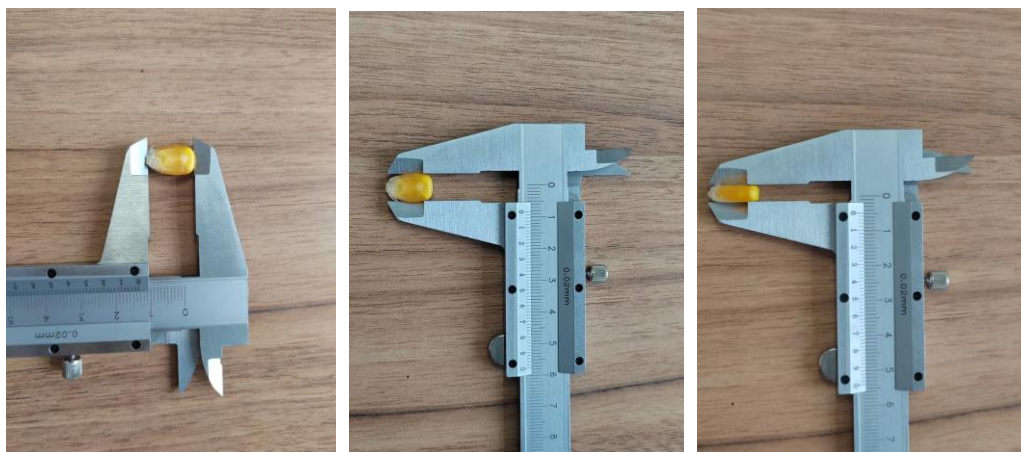


图7 玉米长、宽、厚测量

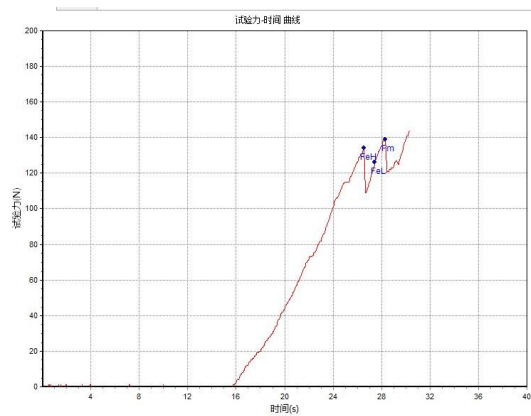


图8 玉米平放力学特性曲线

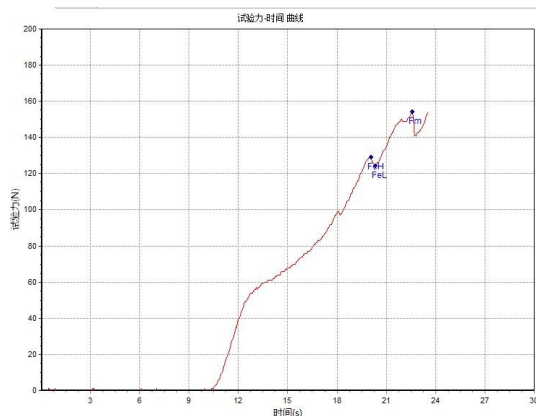


图9 玉米侧立时力学特性曲线

玉米柔性脱粒装置作业时，玉米果穗经由喂料口进入脱粒滚筒内，首先在滚筒上螺旋分布的钉齿元件作用下进行初步脱粒，果穗被强制拖入滚筒与凹板的间隙并受到钉齿与凹板及果穗间的冲击、挤搓和摩擦作用，在此过程，果穗受到螺旋分布钉齿的作用以及上罩导流板的配合作用，沿着滚筒轴向很快进入弹性短纹杆区域。玉米果穗将一直处在齿槽空间内，使玉米果穗填充齿槽空间的三分之二，上罩、凹版筛与橡胶垫和玉米果穗之间是面接触，增加玉米果穗揉搓时间，减小玉米籽粒破碎和破损。在此区域内，果穗受到凹板的阻滞，受到纹杆的循环冲击与搓擦作用，完成其余籽粒的脱粒。在滚筒末端，排芯板将脱粒后的玉米芯排出机外，完成整个脱粒过程。本试验台采用弹性短纹杆，有效减弱纹杆对果穗的刚性冲击，降低了脱粒过程的籽粒损伤，实现玉米果穗的净脱、细脱。整体装置图如图 10 所示，滚筒装置如图 11 所示。

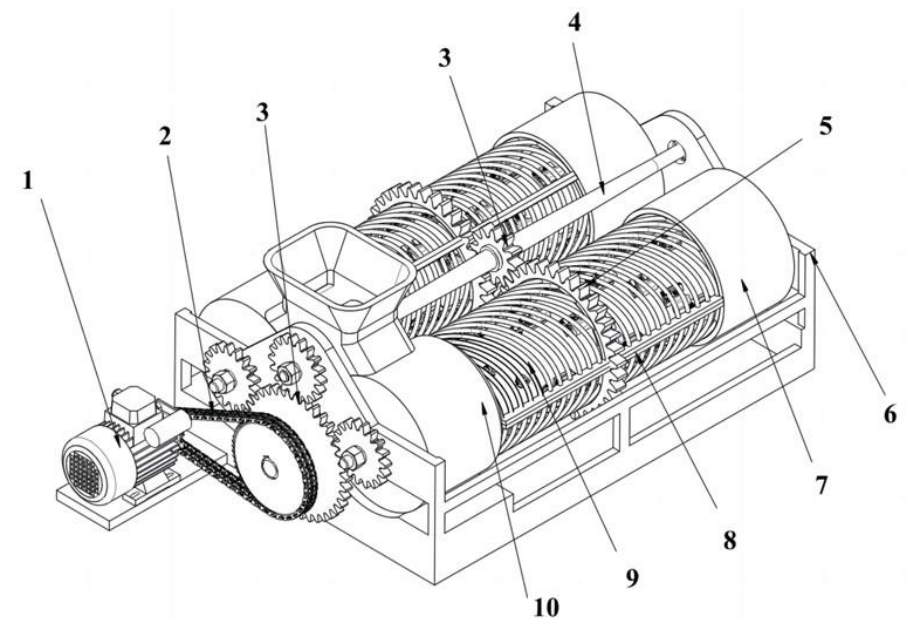


图 10 整体轴测图

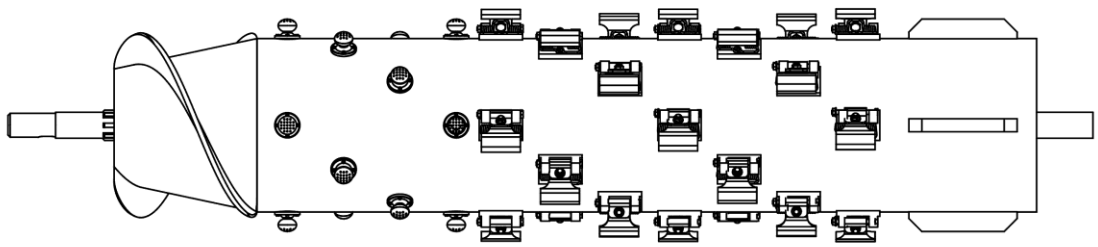
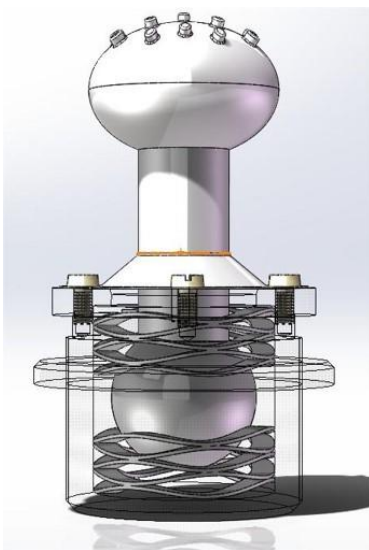
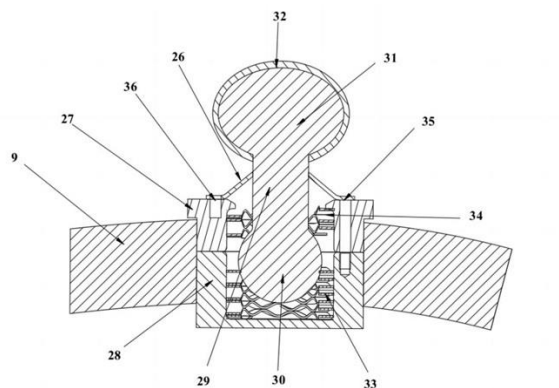


图 11 柔性脱粒滚筒整体图



柔性摆锤



摆锤剖面图

● 解决的关键问题

- 1、采用柔性揉搓装置，玉米果穗与脱粒元件接触面积大，接触时间增长，可有效增加揉搓力，对玉米籽粒损伤小，破损率低，脱粒彻底。
- 2、利用双纵轴流脱粒滚筒形式，可有效缩短滚筒长度和滚筒半径，减少玉米籽粒收获机的整机长度。
- 3、籽粒脱粒机理和损伤力学特性研究针对当前收获机脱粒过程存在损伤/损失严重的问题、传统脱粒方式难以满足多作物和大喂入量作业需求的共性技术难题，研究籽粒与穗部连接力，揭示籽粒损伤载荷特性，以增大脱粒元件与籽粒接触面积，借助脱粒元件与籽粒接触瞬时的变形来延长接触时间、降低脱粒元件对籽粒的脱粒强度，降低脱粒过程中的籽粒损伤；以提高脱粒滚筒转速、增加脱粒元件与脱粒对象作用的循环次数提高脱粒效率，研究籽粒含水率、脱粒滚筒转

速与脱粒效果之间的最优关系。

4、研究开发大喂入量下高含水率多作物高效低损柔性脱粒技术，创新变刚度的柔性脱粒元件新结构，降低籽粒损失率、粮食破碎率，提高作物脱净率。

5、建立适用于玉米脱粒机械化的双纵轴流脱粒的柔性脱粒动力学模型，揭示脱粒元件碰撞摩擦力在籽粒中的传递规律；探明脱粒滚筒转速，脱粒元件材质、大小、形状，且在滚筒的排列位置对玉米籽粒作用力的影响规律，试图解决籽粒与脱粒元件之间接触强度过大导致籽粒损失率难以达到理论最优的难题。

● 主要功能和实用情况

- 1、对柔性摆锤而言，当玉米与高速旋转下的柔性摆锤接触时，活动元件向里移动或偏转一定角度，压缩下部弹性体缓冲冲击力，以实现减小玉米破碎率
- 2、柔性摆锤顶部为安装有橡胶套的椭圆球，椭圆形球可增大与玉米果穗的接触面积、接触时间，橡胶套可减小椭圆球对玉米的冲击力，增大对玉米的摩擦力，以实现提高揉搓效果，提高脱净率。
- 3、本装置凹板筛采用转动的方式，带动底部玉米运动，从而减少底部堆积，并及时排出籽粒，减少物料堵塞。
- 4、通过双纵轴流脱粒方式，可增大玉米果穗喂入量，且相对于目前单纵轴流脱粒装置，相同喂入量条件下，喂入玉米物料流分布均匀，且物料层相对较薄，能够保证玉米物料流有序向后流动，同时避免物料堆积堵塞，并且可以减小滚筒直径和长度，使玉米籽粒收获机更加紧凑。

● 创新点或特色

- 1、采用双纵轴流脱粒形式，有利于提高玉米的喂入量，提高玉米籽粒收获机工作效率。
- 2、凹板筛与滚筒反向差速的双纵轴流柔性脱粒装置，整体呈 $6\sim 10^\circ$ 倾斜，以保证玉米稳定向后输送。
- 3、凹板筛与脱粒滚筒旋转方向相反，脱粒滚筒的转速为 $400\sim 1000\text{r/min}$ ，凹

板筛的转速为50~150r/min，凹板筛与脱粒滚筒旋转方向相反，由于旋转速度不同，可增大与玉米的摩擦力，提高对玉米的揉搓效果；上凹板筛与下凹板筛的螺旋筛条旋向相反，在凹板筛旋转时，上凹板筛与下凹板筛的螺旋筛条对玉米产生变化的力，从而增加玉米运动姿态，提高与脱粒元件接触的概率，提高脱粒效果。