doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.034

自走式大宗茶蓬面仿形采茶机关键装置设计与试验

郇晓龙[1,2]　高　响[1]　吴　敏[1,3]　范国帅[1]　武传宇[1,2]　贾江鸣[1,2]　陈建能[1,2]

(1.浙江理工大学机械工程学院,杭州 310018;
2.浙江省全省农业智能感知与机器人重点实验室,杭州 310018;
3.浙江工业职业技术学院交通学院,绍兴 312000)

摘要:针对国内茶园地形复杂、蓬面不规整以及机械化采摘大宗茶质量差等问题,本文结合大宗茶蓬面生长特点和收获技术要求,设计了一种切割器位姿可调整的自走式仿形采茶机。确定了大宗茶仿形采收技术要求,进行了自走式大宗茶仿形采茶机总体结构设计和工作原理分析。设计了仿形采收装置、风力输送装置、传动系统和仿形控制系统,使整机在作业过程中结构更加紧凑、工作效率更加稳定。为提高仿形状态下茶鲜叶采收质量,进一步对切割器进行优化设计;通过计算机仿真和响应面试验,根据切割图中不同切割区域面积占比评价切割性能,最终确定切割器关键参数组合为前桥宽度 3.44 mm、刀齿高度 20.63 mm、刀机速比 1.2;该参数组合下漏割率为 3.90%,重割率为 16.36%,有效降低漏割率的同时重割率也相对较低,表明参数优化有效。田间试验结果表明,仿形采收机作业性能良好,平均鲜叶完整率为 85.66%,平均漏集率为 1.17%,平均漏采率为 0.79%,3 项指标均满足采茶机作业质量行业标准。此外,作业后茶树蓬面状况良好,不影响后续茶叶生产,符合采茶机设计需求。

关键词:采茶机;大宗茶;仿形;自走式;优化设计

中图分类号:S225.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0374-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Key Devices for Self-propelled Bulk Tea Canopy Surface Shaping Tea Picking Machine

HUAN Xiaolong[1,2]　GAO Xiang[1]　WU Min[1,3]　FAN Guoshuai[1]　WU Chuanyu[1,2]
JIA Jiangming[1,2]　CHEN Jianneng[1,2]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Zhejiang Sci-Tech University*, *Hangzhou* 310018, *China*
2. *Key Laboratory of Zhejiang Transplanting Equipment Technology*, *Hangzhou* 310018, *China*
3. *School of Transportation*, *Zhejiang Industry Polytechnic College*, *Shaoxing* 312000, *China*)

Abstract: In response to the problems of complex terrain in domestic tea gardens, irregular canopy shapes, and poor quality of machine-harvested bulk tea, a self-propelled contour-following tea harvester with adjustable cutter position was designed based on the growth characteristics of bulk tea canopies and the technical requirements for harvesting. The technical requirements for contour-following bulk tea harvesting were determined, and the overall structure and working principle of the self-propelled contour-following bulk tea harvester were analyzed. The contour-following harvesting device, pneumatic conveying device, transmission system, and contour-following control system were designed to make the whole machine more compact and stable in operation. To improve the quality of fresh tea leaves harvested in contour-following mode, the cutter was further optimized. Through computer simulation and response surface experiments, the cutting performance was evaluated based on the area ratio of different cutting regions in the cutting diagram. The optimal combination of cutter parameters was determined as a front bridge width of 3.44 mm, a cutter tooth height of 20.63 mm, and a cutter-to-machine speed ratio of 1.2.

收稿日期:2024-12-18　修回日期:2025-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(32301715)、财政部和农业农村部:国家茶叶产业技术体系项目(CARS-19)、浙江省"尖兵"研发攻关计划项目(2023C02009)、浙江省农机研发推广一体化项目、浙江省自然科学基金项目(LQ24E050010)和绍兴市科技局基础公益项目(2023A12003)

作者简介:郇晓龙(1995—),男,博士后,主要从事现代农业收获机械研究,E-mail:huanxl@zstu.edu.cn

通信作者:陈建能(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备及其智能化研究,E-mail:jiannengchen@zstu.edu.cn

Under this parameter combination, the missed cutting rate was 3.90%, and the over-cutting rate was 16.36%. This effectively reduced the missed cutting rate while maintaining a relatively low over-cutting rate, indicating the effectiveness of the parameter optimization. Field trials verified that the contour-following harvester had good operational performance. During the trial period, the average intact leaf rate was 85.66%, the average missed collection rate was 1.17%, and the average missed cutting rate was 0.79%. All three indicators met the industry standards for tea harvester operation quality. Additionally, the canopy condition of the tea trees after operation was good, which did not affect subsequent tea production and met the design requirements of the tea harvester.

Key words: tea-picking machine; bulk tea; profiling; self-propelled; optimal design

0　引言

我国作为茶文化的发源地，茶树种植面积和茶叶产量均稳居世界首位。作为我国的传统优势产业，茶产业对我国发展特色农业、增加农民收入、推进乡村振兴具有重要意义。茶鲜叶采收是茶叶生产过程的重要环节，其具有较强的季节性[1]，如果无法及时采收茶鲜叶，将会严重影响茶叶产量与质量。而近年来农业劳动力老龄化趋势明显，招工难、用工贵已成为制约茶区产业发展的瓶颈[2]。因此，提高茶叶采收机械化是确保茶产业可持续发展的必然选择。大宗茶产量占据国内茶叶总产量的一半以上[3]，庞大的产量和相对较低的采摘标准使得大宗茶机械化采收成为必然趋势。

针对以上问题，国内外学者对大宗茶机械化采摘进行了相关研究[4]。钱争光等[5]设计的微型采茶机，采用小型刀板，利用拨叶轮解决了采摘过程中新老叶难以分离的问题；吴先坤等[6]设计了一种单人背负式的采茶机，通过小型汽油机和软轴驱动往复式切割器提供动力；王升[7]基于切割图理论与响应面法，对便携式采茶机刀片结构进行参数优化，并通过田间试验验证了其良好采摘性能。上述各种类型的小型采茶机因具备作业灵活、环境适应力强等优点，一定程度上提高了大宗茶采收效率，但应用过程中也存在一些缺陷。如单人手持式采茶机续航能力较差，更适合小型茶园使用；而单人和双人抬式采茶机机具十分沉重，需要壮劳力操作。因此，将自走式采茶机应用于规模化的茶园是必然趋势，国内科研单位也相继开展了自走式采茶机研究。原农业部南京农业机械化研究所研制了国内首台自走式全自动采茶机[8]，吴先坤[9]设计了一种自走式采茶机，采摘效果良好；俞国红等[10]设计了一种适用于缓坡茶园的轻便自走式采茶机。上述自走式采茶机在工作原理上与日本类似，均采用切割器位姿固定的方式进行茶叶采收，面对国内种植与管理标准化差的茶园环境，这种“一刀切”的采收模式易导致收获的鲜叶破碎率高、老梗率高。对此，国内外学者们开始将仿形技术[11-13]应用于大宗茶采收机械。王琪[14]在采茶机切割器下方安装了一块金属板，通过其形变量反馈切割器高度以实现自适应调节，但接触式反馈易受茶树生长密度影响；王财盛[15]针对乘用式采茶机，设计了基于机器视觉的割刀自动调平调高控制方法；闫晶晶[16]设计了一款仿形手扶自走式采茶机，利用传感器与 PLC 实时检测茶蓬高度并自动调节刀具位置，但对茶园起伏度有要求，导致刀具难以及时调节到准确位置；赵润茂等[17]设计了单元组合式仿形采茶机实现了切割器对茶树的自适应贴合作业，提高了采收质量，但各采收单元间的间隙易导致茶鲜叶漏采。

针对大宗茶采收劳动强度高、现有收获机械的收获质量相对较低等问题，本文设计一种切割器位姿可自适应调整的自走式仿形采茶机。在整机总体设计的基础上，对关键装置进行优化设计，并通过田间采茶试验验证整机作业效果。

1　整机结构设计与工作原理

1.1　大宗茶仿形采收技术要求

选择绍兴御茶村茶叶有限公司种植基地作为试验地点，该种植基地茶树品种为薮北，茶树种植地形为山地丘陵，种植方式为单行条列式，如图 1 所示，茶树行间距约为 150 cm，宽幅为 120 ~ 130 cm，树高（不含鲜叶）为 70 ~ 80 cm，冠层轮廓整体呈弧形。

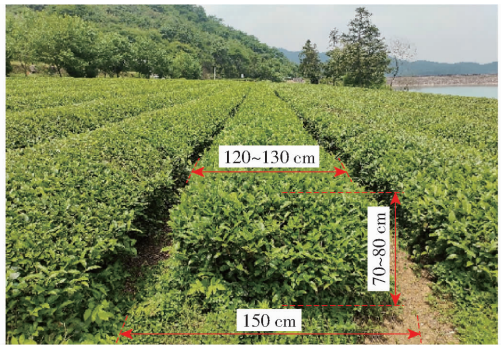

图 1　茶树种植农艺

Fig. 1　Agronomy of tea planting

为实现仿形采收机预期功能，结合茶树种植农

艺特点,对仿形采收机设计满足:

(1)仿形采收机具备良好的地形适应能力,在起伏不平的茶园环境中能够稳定作业。

(2)仿形采收机结构尺寸应考虑茶树行间距、宽幅以及树高等因素,确保仿形采收机在茶行间的通过性,避免作业过程中拉扯、碾压茶树。结合茶树种植调研结果,设计采茶机履带间距为 140 ~ 160 cm,切割幅宽大于 130 cm。

(3)切割器具备仿形调姿功能,可适应形态不一的茶树冠层,确保仿形采收机在切割的过程中切割器与茶蓬面能够以一定的高度、角度来贴合茶树冠层。

(4)上位机能通过传感器获取茶树冠层信息,并在线计算仿形切割基准,控制切割器位姿实时调节。

(5)采收作业质量需符合行业标准[18],即采收鲜叶完整率大于等于 70%,漏采率小于等于 2.0%,漏集率小于等于 1.5%,采后蓬面状况不影响后续茶叶生产。

1.2 整机总体设计

仿形采收机由柴油机提供动力,整机主要包括履带式底盘、仿形采收装置、切割器、风力输送装置、传送系统以及仿形控制系统等[19]。其中履带式底盘是通过立柱将车架安装在两条液压行走履带上,具有良好的爬坡与行驶能力,满足茶园环境下作业性能需求;所设计的仿形采收装置、切割器、风力输送装置、传送系统被布置于履带式底盘车架下方,使整机结构更加紧凑;用于蓬面三维信息获取的三维激光雷达则安装于车架上方,通过预留的矩形开口可扫描到车架下方场景;控制柜被布置于车架上方的角落,用于部署测控系统所需的部分硬件;底盘后方设有用于放置收集袋的尾板。设计的仿形采收机总体结构如图 2 所示。

1.3 仿形采收工作原理

整机工作原理如下:仿形采收机驶入茶垄后,首先进入仿形作业模式,通过安装于车架上方的三维激光雷达获取仿形采收装置前方的茶蓬面点云;根据上位机指令,接收上位机信息并在线处理点云数据,依据点云呈现的茶蓬面形状特征计算来调节仿形机构,由仿形升降装置实现仿形架整体高度调整,2 个电动推杆实现左右两侧切割器的倾角调整,使 3 个切割器形成的轮廓对茶蓬面进行贴合,3 个切割器对茶蓬面贴合后;则切割器开始对茶蓬面进行切割,将茶鲜叶切割后,各切割器壳体上安装有风力管道,风管进风口通过波纹软管与底盘风机系统连接,当风机开始转动后气流从主管往支管中高速喷出,

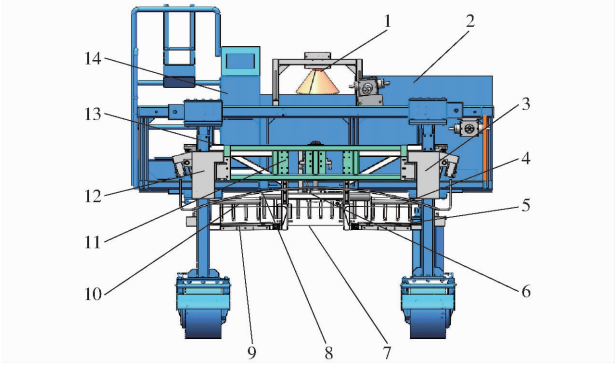

图 2 仿形采收机结构示意图

Fig. 2 Schematic of structure of copy collector

1. 激光雷达 2. 履带式底盘 3. 右侧电动推杆 4. 右侧风力管 5. 右侧切割器 6. 中间风力管 7. 中间切割器 8. 尾板 9. 左侧切割器 10. 左侧风力管 11. 仿形架 12. 左侧电动推杆 13. 固定横梁 14. 控制柜

此时风力管将切割下的茶鲜叶通过风送入采收机后方的收集袋,至此完成大宗茶鲜叶仿形采收。整机工作流程如图 3 所示。

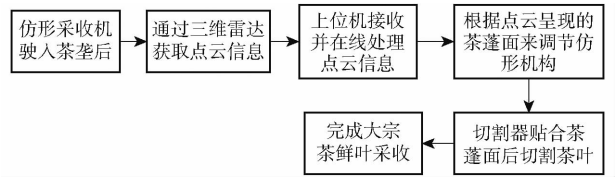

图 3 整机工作流程图

Fig. 3 Workflow diagram of whole machine

2 关键部件设计

2.1 仿形采收装置设计

仿形采收装置是仿形采收机的关键部分,根据茶树蓬面形态特征,设计了一套多个切割器分段切割的仿形采收装置。整个仿形采收装置共有 3 个切割器,中间切割器水平固定,左右两侧切割器可通过电动推杆调节倾角,此外,仿形采收装置整体可通过蜗轮丝杠升降机构调节高度。

仿形采收装置三维模型如图 4 所示。由图 4 可知,仿形采收装置主要部件包括固定横梁、仿形架、电动推杆、往复式切割器等。其中,固定横梁固定安

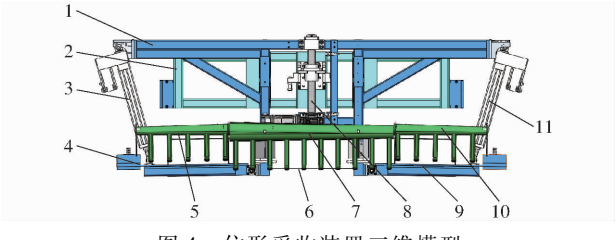

图 4 仿形采收装置三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model of profiling recovery device

1. 仿形架 2. 固定横梁 3. 左侧电动推杆 4. 左侧切割器 5. 左侧风管 6. 中间切割器 7. 中间风管 8. 仿形升降装置 9. 右侧切割器 10. 右侧风管 11. 右侧电动推杆

装于仿形采收机底盘车架下方，相当于其余部件的机架；仿形架通过仿形升降装置（蜗轮丝杠升降机）与固定横梁配合安装；3 个往复式切割器安装在仿形架最下方，中间切割器与仿形架为固定连接，左右两侧切割器内端与仿形架铰链接；2 个电动推杆底座铰链接于仿形架最上方的两端，推杆末端分别与左右切割器外端铰链接；各切割器壳体上安装有风管，风管进风口通过波纹软管与底盘风机系统连接。为防止切割器铰接处出现漏割区域，将中间切割器与两侧切割器前后错开布置，且中间切割器两铰接点位于刀片长度范围内。

仿形采收装置中切割器与茶蓬面之间的贴合运动由电动推杆的往复运动得以实现，电动推杆是一种将电机旋转运动通过机械结构转换为推杆往复直线运动的电力驱动装置。本文伺服电动缸和丝杠连接方式是平行式，即电缸伸出轴的轴线和丝杠轴线平行，伺服电动缸安装在推杆旁边，此种连接方式，通过同步带将伺服电动缸和丝杆连接。这种连接方式使得电动推杆整体长度减少，结构显得更加紧凑。其中，推杆伸长和缩短可以通过控制电机正反转实现，推杆推力取决于电缸输出扭矩和推杆导程。

在仿形采收过程中，调整两侧切割器倾角实现对茶树蓬面的贴合，改变电动推杆伸长量能够调整切割器倾斜角；切割器升降通过蜗轮丝杠升降机调整，如图 5 所示，切割器倾斜角调整从 θ_1、θ_2 到 θ_{r1}、θ_{r2}，H 为当前状态下 3D LiDAR 测距中心至中间切割器的距离，H_r 为通过仿形采收装置进行仿形调节后 3D LiDAR 测距中心至中间切割器的距离。电动推杆电缸选型决定推杆最终推力，仿形采收过程中电动推杆最大工作行程为 250 mm，电动推杆最大推力为 1 500 N。选取 RKD65 型伺服电动缸，电压为 220 V，功率为 1.4 kW。

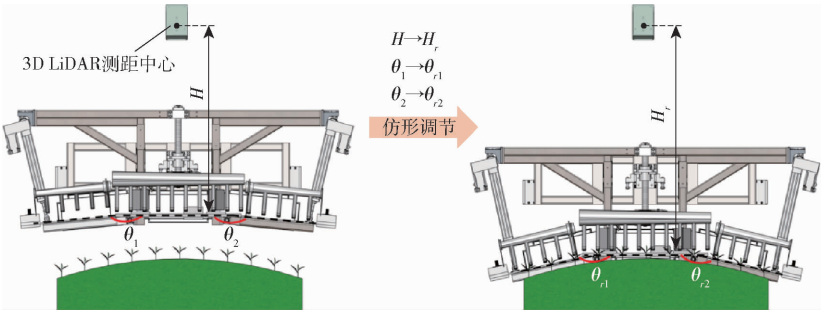

图 5　仿形原理示意图

Fig. 5　Schematic of profiling principle

2.2　切割器结构设计

采用双偏心轮机构驱动的双动刀往复式切割器，其结构如图 6 所示。

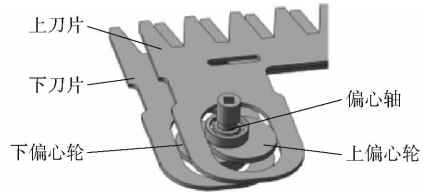

图 6　切割器结构示意图

Fig. 6　Schematic of cutter structure

双动往复式切割器通过上下两组动刀片往复运动，实现对作物茎秆切割。刀片作为切割器关键部件，其结构参数对切割器性能有重要影响。根据刃口形状，往复式切割器刀片通常分为光刃与齿刃两种类型[20]。其中，齿刃在切割作物茎秆时，会先形成多个切入点，再由齿间刃口扩大切口实现切割，多用于粗茎秆、表皮硬作物；而光刃通过一个切入点进行切割，具有割茬平整、不易堵刀等优点，常用于含水率较高、细茎秆作物；考虑到茶叶茎秆物理特性，仿形采收机刀片选用梯形光刃结构，如图 7 所示，其

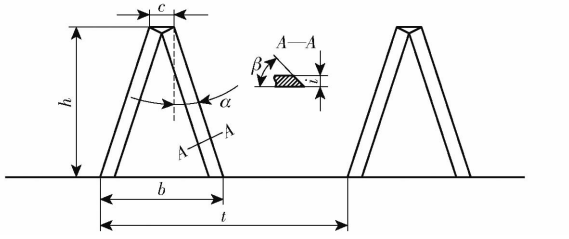

图 7　梯形光刃刀片结构示意图

Fig. 7　Schematic of structure of trapezoidal blade

结构参数主要包括前桥宽度 c、刀齿宽度 b、刀齿高度 h、切割角 α、刀片节距 t、刀刃角 β 以及刀片厚度 i 等。

切割角 α：切割角是影响刀片切割阻力的重要因素，切割角的增大可有效降低切割阻力，但同时也会增加刀片与茎秆的相对滑切速度，当切割角过大时茎秆会出现滑移现象。部分采茶切割器相关研究发现，当切割角大于 20°时，茶茎秆被切割时出现滑移[21]。综合考虑后，本文取刀片切割角为 18°。

刀刃角 β：刀刃角越小，刀片在切割茎秆时受到的阻力也越小，但同时也会降低刀片强度，使刀片更易磨损。针对灌木作业，刀刃角一般取 20° ~

40°[22],本文取 30°。刀齿高度 h:参考现有采茶机梯形光刃刀片及文献[23],取 15 ~ 25 mm,具体数值通过后续优化确定。前桥宽度 c:参考现有采茶机梯形光刃刀片及文献[24],取 2 ~ 4 mm,具体数值通过后续优化确定。刀齿宽度 b:切割角、刀齿高度和前桥宽度已知时,其刀片宽度为确定值,参数间关系满足

$$b = 2h\tan\alpha + c \tag{1}$$

刀片节距 t:对于双动往复式切割器,其刀片节距 t 为切割行程 S 的两倍[25],同时切割行程应不小于刀片宽度 b,否则会出现切割盲区,刀片节距 t 应不小于刀片宽度 b 的 2 倍,综合考虑后取刀片节距为 41 mm。刀片厚度 i:参考现有梯形光刃刀片及文献[26],取 2 mm。

2.3 风力输送装置设计

风力输送装置是仿形采收机的重要组成部分,风力输送装置主要是由风力管道、尾板、集叶袋组成。风力管道设计直接影响到仿形采收机工作效率以及机采效果,所以在设计过程中应该考虑到各个方面的影响因素。风力输送装置功能主要是将风机产生的风量送出,并通过各支管使产生的风量分布到集叶板上,从而将通过切割器剪切的鲜叶吹入集叶袋中。由于仿形采收装置中包含 3 个切割器,为了保证每个切割器在剪切茶叶后能够有效地吹到集叶袋里,因此在每个切割器壳体上安装有风管。在风力管道上分布间距相同的支管,支管出风口位于切割器刀齿前上方,当通过风机转动后气流从主管往支管中高速喷出,切割器剪切下的鲜叶则被顺利吹入集叶袋中。

根据茶陇宽度和弧度形状特点设计风力管道,3 个风力管道所围成的形状与茶树蓬面基本相吻合,有利于将鲜叶吹到集叶袋里。风力管道主要包含主管道和支管道,其中主管道是风力输送装置的核心。风力管道材料为工程塑料聚甲醛,风力管道由主管道和支管道两部分所构成。根据相关资料可知,茶陇宽度一般为 120 ~ 130 cm。茶叶在生长过程中,根据茶叶长势,将茶行修剪成弧形,有利于茶叶生长以及采摘。本文设计的风力管道主管长度为 40 cm,支管数量为 5,如图 8a 所示;中间风力管道主管长度为 70 cm,支管数量为 10,如图 8b 所示。主风管道进口端直径较大,随后逐渐减小,以保证前后风压均匀。在 3 个切割器完成仿形剪切后,风力管在风机产生的气体动压下将茶叶吹入集叶袋中。

2.4 传动系统设计

传动系统主要为仿形采收机在茶园行走、转弯提供动力,传动系统传送路线图如图 9 所示。柴油发动机通过皮带将动力传递给液压泵,液压泵将液压油通过油管传递给液压马达,驱动液压马达转动,通过液压马达转动来驱动左右履带底盘行走,同时分动箱通过软轴驱动 3 把割刀往复切割,完成切割器往复运动。高压液压油经过阀门控制送入液压缸的油腔中,液压缸内部有活塞,液压油通过管路进入液压缸,进而能够控制风力输送装置中尾板的升降。同时通过换向阀控制液压泵工作转向,改变油路流动方向,操控液压马达转动方向与启停,从而能够控制履带底盘前进、后退与转向,以保证仿形采收机在作业时,左右履带底盘行走的稳定性。

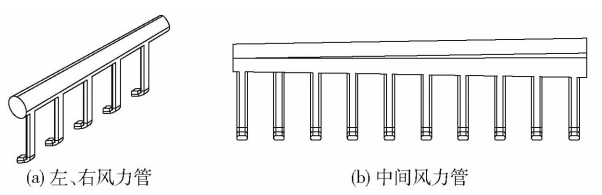

图 8 风力管结构示意图

Fig. 8 Schematics of wind pipe structure

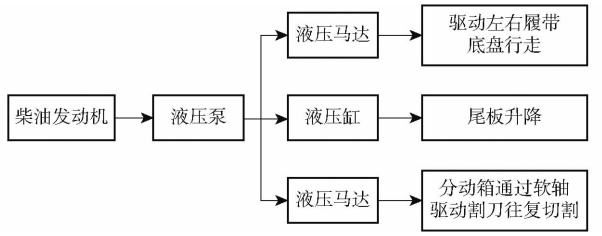

图 9 传动系统作业流程图

Fig. 9 Transmission system operation flowchart

3 基于响应面法的切割器优化设计

采用响应面试验法,以切割器关键参数刀齿高度、前桥宽度以及刀机速比为试验因素,以漏割率和重割率为试验指标,开展切割器试验。

3.1 切割器刀片参数优化

切割图法是往复式切割器优化刀片参数的重要手段[27],该方法结合刀片结构参数和刀机速比(刀片往复运动速度与机具前进速度比值),绘制出刀片在空间中的绝对运动轨迹,即切割图,并根据切割图中不同切割区域面积占比评价切割性能,进而优化刀片参数。

图 10 为双动往复式切割器切割图区域示意图。由图 10 可知,刀片形成的切割区域分为:①一次切割区:被刀刃单次切割,为最理想的切割区域。②漏割区:作业时位于该区域的作物茎秆不会被切割,应尽量避免该区域的出现。③重割区:被刀刃多次切割,产生功率浪费,应尽量减小该区域的面积。根据不同参数下切割图中 3 个区域面积,计算出刀片一次切割率、漏割率以及重割率,可对刀片结构参数与

运动参数(刀机速比)进行优化,获取一定范围内的最优参数组合。

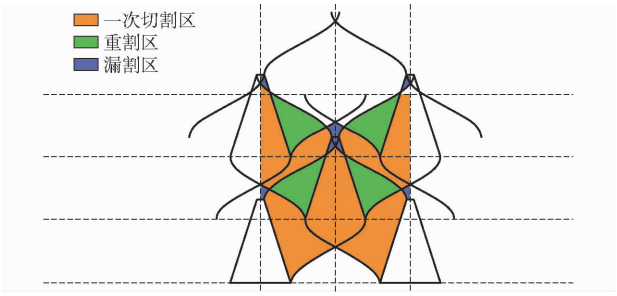

图 10　切割图区域示意图

Fig. 10　Schematic of cutting chart area

前文已初步确定本文切割器刀片刀齿高度取 15 ~25 mm,前桥宽度取 2 ~4 mm,结合切割图理论和响应面法对刀片参数进行优化,确定刀齿高度、前桥宽度以及刀机速比较优组合,其中,响应值选择漏割率和重割率,计算方法为

$$Y_1 = \frac{S_1}{S_1 + S_2 + S_3} \times 100\% \tag{2}$$

$$Y_2 = \frac{S_2}{S_1 + S_2 + S_3} \times 100\% \tag{3}$$

式中　S_1——切割图中一次切割区面积,mm^2

S_2——切割图中漏割区面积,mm^2

S_3——切割图中重割区面积,mm^2

Y_1——漏割率,%

Y_2——重割率,%

3.2　响应面试验设计与试验仿真

试验设计因素与水平如表 1 所示,结合试验因素,通过响应面分析软件 Design-Expert 8.0.6 进行响应面试验设计,采用 Box - Behnken 试验设计方法。

表 1　试验设计因素编码

Tab. 1　Experimental design factors and levels

编码	因素		
	前桥宽度 A/mm	刀齿高度 B/mm	刀机速比 C/mm
-1	2	15	0.8
0	3	20	1.0
1	4	25	1.2

在 Solidworks 中建立试验所需的不同结构参数的切割器部件三维模型,装配完成后另存为(*x_t)文件格式;在 ADAMS 软件中导入上述(*x_t)文件,为各零部件添加约束与驱动等仿真条件后,根据刀机速比设置偏心轴转速以及切割器相对地面的直线移动速度,并在刀片上添加标记点;进行运动学仿真后,将标记点运动轨迹点坐标导出至 Excel,根据点坐标在 AutoCAD 软件中绘制切割图;通过 AutoCAD 软件功能获取所绘制切割图中一次切割区、重割区以及漏割区面积,进而计算漏割率和重割率。试验结果如表 2 所示。

表 2　试验方案与结果

Tab. 2　Test protocol and results

序号	因素			漏割率 Y_1/%	重割率 Y_2/%
	前桥宽度 A/mm	刀齿高度 B/mm	刀机速比 C/mm		
1	2	15	1.0	25.24	4.30
2	4	15	1.0	18.69	2.95
3	2	25	1.0	4.00	20.79
4	4	25	1.0	6.73	16.95
5	2	20	0.8	20.19	4.82
6	4	20	0.8	15.76	3.35
7	2	20	1.2	5.54	19.26
8	4	20	1.2	8.20	15.79
9	3	15	0.8	36.41	0.97
10	3	25	0.8	11.64	8.88
11	3	15	1.2	12.19	7.63
12	3	25	1.2	2.35	30.25
13	3	20	1.0	12.77	9.64
14	3	20	1.0	12.70	9.64
15	3	20	1.0	12.70	9.64
16	3	20	1.0	12.70	9.64
17	3	20	1.0	12.70	9.64

3.3　漏割率、重割率回归模型分析

根据方差分析结果(表 3)可知,漏割率 Y_1 二次项模型 F 高达 50.30 且模型 P 小于 0.01,说明该二次项模型整体高度显著;B、C、BC 对模型影响极显著;AB 以及 B^2 对模型影响显著;各试验因素对漏割率的显著性影响关系从大到小依次为刀齿高度、刀机速比和前桥宽度;重割率 Y_2 二次项模型 F 高达 4 148.30 且模型 P 小于 0.01,各单因素、交互项因素以及平方项因素均为极显著。各试验因素对重割率的显著性影响从大到小依次为刀齿高度、刀机速比和前桥宽度。漏割率 Y_1 和重割率 Y_2 与各试验因素间的回归模型为

$$Y_1 = 218.58 - 9.98A - 10.08B - 109.47C + 0.46AB + 3.73BC + 0.08B^2 \tag{4}$$

$$Y_2 = 54.36 + 2.28A - 3.97B - 77.98C - 0.12AB - 2.5AC + 3.68BC + 0.24A^2 + 0.05B^2 + 23.13C^2 \tag{5}$$

3.4　参数组合优化与验证

通过方差分析对漏割率、重割率回归方程进行了拟合,得到了回归方程。现根据回归模型对试验因素进行多目标优化求解,为切割器工作参数匹配提供理论指导,即

表 3 漏割率 Y_1、重割率 Y_2 模型方差分析

Tab. 3 Analysis of variance of model for rate of missed cutting Y_1 and rate of overcutting Y_2

方差来源	Y_1					Y_2				
	平方和	自由度	均方和	P	F	平方和	自由度	均方和	P	F
模型	1 082. 36	9	120. 26	<0. 000 1 **	50. 30	924. 43	9	102. 71	<0. 000 1 **	4 148. 30
A	3. 91	1	3. 91	0. 241 9	1. 63	12. 83	1	12. 83	<0. 000 1 **	518. 04
B	574. 77	1	574. 77	<0. 000 1 **	240. 42	465. 43	1	465. 43	<0. 000 1 **	18 797. 12
C	388. 09	1	388. 09	<0. 000 1 **	162. 33	376. 89	1	376. 89	<0. 000 1 **	15 221. 23
AB	21. 53	1	21. 53	0. 019 99 *	9. 01	1. 55	1	1. 55	<0. 000 1 **	62. 60
AC	12. 57	1	12. 57	0. 055 6	5. 26	1. 00	1	1. 00	0. 000 4 **	40. 39
BC	55. 73	1	55. 73	0. 001 9 **	23. 31	54. 10	1	54. 10	<0. 000 1 **	2 184. 75
A^2	5. 71	1	5. 71	0. 166	2. 39	0. 24	1	0. 24	0. 016 6 *	9. 79
B^2	17. 87	1	17. 87	0. 029 2 *	7. 47	7. 87	1	7. 87	<0. 000 1 **	318. 00
C^2	2. 8	1	2. 81	0. 313 9	1. 18	3. 60	1	3. 60	<0. 000 1 **	145. 50
残差	16. 74	7	2. 39			0. 17	7			
失拟项	16. 74	3	5. 58			0. 17	3			
纯误差	0	4	0			0	4			
总和	1 099. 09	16				924. 61	16			

注：* 表示影响显著($0.01 \leqslant P < 0.05$)，** 表示影响极显著($P < 0.01$)。

$$\begin{cases} Y_1 \leqslant 5\% \\ \min Y_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} 2\ \text{mm} \leqslant A \leqslant 4\ \text{mm} \\ 15\ \text{mm} \leqslant B \leqslant 25\ \text{mm} \\ 0.8 \leqslant C \leqslant 1.2 \end{cases} \end{cases} \tag{6}$$

通过 Design-Expert 软件 Numerical 模块进行优化分析，所设置目标函数与各因素约束条件为式(6)，在漏割率小于等于 5% 的条件下重割率尽可能取小的值，求解得到多组优化参数组合，为前桥宽度 3. 44 mm，刀齿高度 20. 63 mm，刀机速比 1. 2，为便于加工，将前桥宽度取为 3. 40 mm，刀齿高度取为 20. 60 mm。

根据优化后参数组合建立切割器三维模型，并绘制其在刀机速比为 1. 2 时的切割图，验证参数优化是否有效。根据切割图计算得到该参数组合下漏割率 Y_1 为 3. 90%，重割率 Y_2 为 16. 36%，有效降低漏割率的同时重割率也相对较低，说明参数优化有效。

4 样机试制与田间试验

4.1 样机试制

大宗茶仿形采收机样机在浙江省种植装备技术重点实验室完成加工试制，样机如图 11 所示。

人机交互界面中的各部分功能如下：

(1)仿形开启：如图 12 所示点击后 PLC 开始按照上位机指令驱动电机，实时仿形；再次点击后仿形将停止。

(2)高度、角度复位：点击后仿形升降装置和电动推杆回到初始位置，即仿形架抬升到最高、两侧切割器恢复至水平状态。

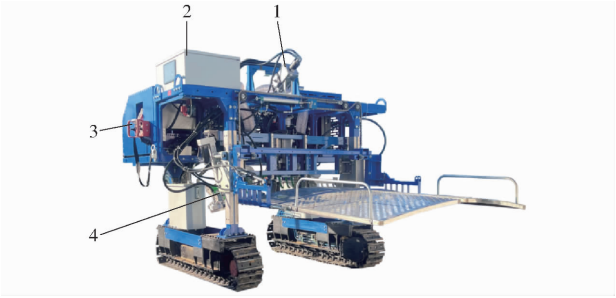

图 11 大宗茶仿形采收机样机示意图

Fig. 11 Prototype of bulk tea profiling harvester

1. Livox Mid－70 2. 控制柜 3. 底盘遥控器 4. 仿形采收装置



图 12 仿形采收机人机交互界面

Fig. 12 Human-computer interaction interface of profiling harvester

(3)当前高度、角度：实时显示当前仿形架高度、两侧切割器倾角。

(4)目标高度、角度：实时显示上位机通过算法估计出的仿形架目标高度、两侧切割器目标倾角。

(5)高度、角度补偿：当算法估计的高度或角度偏大或偏小时，可在此输入补偿值，上位机通过寄存器读取到该值，并在估计结果上加算该值。以图 13 为例，以算法估计值为基准仿形时，左侧切割器未能贴合蓬面，因此在人机交互界面为估计值添加补偿量，调整切割器至适宜切割位姿。



未贴合蓬面　　贴合蓬面
(a) 初始估计值下　　(b) 补偿量后

图 13　仿形效果

Fig. 13　Mimetic effect

4.2　田间试验

试验地点为绍兴市御茶村茶园种植基地，试验时间为 2023 年 5 月上旬。试验茶园环境如图 14 所示，茶园坡度不大于 15°，茶树行间距约 150 cm，蓬面宽幅约 120 ~ 130 cm，树高（不含鲜叶）70 ~ 80 cm，收获期鲜叶长度可达 15 cm。



图 14　试验茶园环境

Fig. 14　Experimental tea garden environment

采收质量评价指标参考采茶机作业质量行业标准[18]，选择芽叶完整率 R_1、漏集率 R_2 以及漏采率 R_3 作为仿形采收机作业质量评价指标。

结合采收质量评价指标，采收试验流程为：

（1）如图 15a 所示，选择一垄茶树作为采收对象，操控仿形采收机驶入该茶垄。

（2）通过人机交互界面开启仿形功能，并根据实际情况在交互界面输入估计值补偿量。

（3）在每个切割器后方安装鲜叶收集袋，开启风机以及各切割器，操控采收机以速度 1 m/s 沿茶垄前行约 3 m，实施仿形采收；采收完毕后，关闭风机以及各切割器，将收集袋中的鲜叶倒入编织袋中另行存放。

（4）收集采收区域内漏集鲜叶（被切割下但未能风送入收集袋的鲜叶），另行存放。

（5）对采收区域内漏采鲜叶（机采切割面上未被采下的鲜叶）进行人工辅采，所得鲜叶另行存放。

（6）重复进行试验步骤（3）~（5）共计 5 次，如图 15b 所示，对所得采收样本进行处理与分析。



(a) 采收现场　　(b) 采收样本

图 15　仿形采收试验现场

Fig. 15　Profiling recovery test site

对试验结果进行统计与分析，共得到 5 组采收样本。称取各试验组样本中机采鲜叶总质量 W、漏集鲜叶质量 W_3 以及漏采鲜叶质量 W_4，并记录相应数据；按对角线四分法（图 16a）从各试验组的机采鲜叶中分别提取出 300g 以上的分析样，记录分析样质量 W_1；挑选各组分析样中的完整鲜叶（图 16b），称取并记录完整鲜叶质量 W_2。计算结果如表 4 所示。



(a) 四分法缩分样本　　(b) 完整鲜叶　　(c) 碎叶与杂质

图 16　采收样本统计

Fig. 16　Statistics of collected samples

表 4　仿形采收机作业质量试验结果

Tab. 4　Operational quality test results of profiling collector

参数	组别 1	组别 2	组别 3	组别 4	组别 5	平均值
机采鲜叶总质量 W/g	1 719. 6	2 156. 0	1 963. 5	1 654. 9	1 836. 4	1 866. 08
分析样质量 W_1/g	360. 2	385. 9	350. 1	430. 6	306. 8	366. 72
完整鲜叶质量 W_2/g	307. 4	332. 2	291. 8	369. 2	269. 4	314. 00
漏集鲜叶质量 W_3/g	24. 7	24. 1	18. 3	19. 9	22. 9	21. 98
漏采鲜叶质量 W_4/g	13. 4	14. 7	16. 6	13. 0	17. 1	14. 96
鲜叶完整率 R_1/%	85. 34	86. 08	83. 35	85. 74	87. 81	85. 66
漏集率 R_2/%	1. 42	1. 11	0. 92	1. 19	1. 23	1. 17
漏采率 R_3/%	0. 76	0. 67	0. 83	0. 77	0. 91	0. 79

由表 4 可知,样机在采收试验中的鲜叶完整率平均值为 85.66%,漏集率平均值为 1.17%,漏采率平均值为 0.79%,该 3 项指标均符合采茶机作业质量行业标准的要求(表 5)。

表 5 采茶机作业质量要求

Tab. 5 Quality requirements for tea pickers %

参数	质量指标要求	样机相关指标平均值
鲜叶完整率 R_1	≥70	85.66
漏集率 R_2	≤1.5	1.17
漏采率 R_3	≤2.0	0.79

仿形采收机鲜叶完整率与漏采率 2 项指标均处于较高水准,但漏集率这一指标的表现稍差。经过对试验现场的观察,发现切割下的鲜叶容易被风管与切割器间的连接件阻拦(图 17),为导致漏集率较高的主要原因,后续可尝试改进结构。

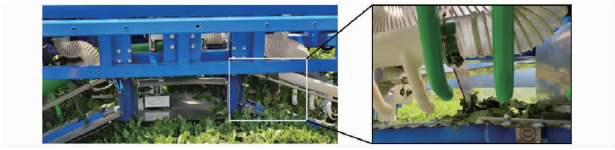

图 17 连接件阻挡鲜叶

Fig. 17 Connecting parts blocking fresh leaves

5 结论

(1)设计了一种具备自适应采收功能的自走式采茶机。该仿形采收机采用模块化设计,履带式底盘和作业装置采用两套独立的动力源,传动结构简单,易于实现整机的轻量化。

(2)对仿形采收机关键部件进行了设计,包括仿形采收装置、切割器结构设计、风力输送装置和传动系统进行参数设计与选型计算。结合切割图理论和响应面法对切割器的关键参数进行了优化,选择漏割率和重割率为响应值,建立漏割率、重割率回归模型。根据回归模型对试验因素进行多目标优化求解,得到切割器参数组合为前桥宽度为 3.40 mm、刀齿高度 20.60 mm、刀机速比为 1.2。最终根据切割图计算到该参数组合下漏割率为 3.90%,重割率为 16.36%。

(3)完成了仿形采收机样机的加工以及仿形测控系统的硬件集成,并设计了人机交互界面。结合采茶机作业质量行业标准,设计并开展仿形采收机田间收获试验。试验结果表明,仿形采收机性能良好,采收鲜叶完整率为 85.66%,漏集率为 1.17%,漏采率为 0.79%,采收后蓬面状况良好,不影响后续茶叶生产,符合采茶机设计要求。

参 考 文 献

[1] 李杨, 董春旺, 陈建能, 等. 茶叶智能采摘技术研究进展与展望[J]. 中国茶叶, 2022, 44(7): 1-9.
LI Yang, DONG Chunwang, CHEN Jianneng, et al. Research progress and prospect of intelligent tea picking technology [J]. China Tea, 2022, 44(7): 1-9. (in Chinese)

[2] 何雪军. 多目标靶向的优质大宗茶前置处理关键技术研究及装备研发[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
HE Xuejun. Multi-objective targeted quality bulk tea pre-treating key technologies research and equipment development [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)

[3] 韩余, 肖宏儒, 秦广明, 等. 国内外采茶机械发展状况研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 20-24.
HAN Yu, XIAO Hongru, QIN Guangming, et al. Studies on develop situations of tea-leaf picker both at home and abroad [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 20-24. (in Chinese)

[4] 权启爱. 采茶机械的研制和我国采茶机械化事业的发展[J]. 中国茶叶, 2018, 40(8): 14-17.
QUAN Qiai. Development of tea picking machinery and development of tea picking mechanization in China[J]. China Tea, 2018, 40(8): 14-17. (in Chinese)

[5] 钱争光, 茹利军. 6CDW-220 型微型采茶机的设计[J]. 中国茶叶加工, 2015(2): 58-60,71.
QIAN Zhengguang, RU Lijun. Design of 6CDW-220 type miniature tea plucking machine [J]. China Tea Processing, 2015(2): 58-60,71. (in Chinese)

[6] 吴先坤, 李兵, 王小勇, 等. 单人背负式采茶机的设计分析[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 92-96,101.
WU Xiankun, LI Bing, WANG Xiaoyong, et al. Design and analysis of single knapsack tea plucking machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8): 92-96,101. (in Chinese)

[7] 王升. 便携式电动采茶机关键部件设计与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
WANG Sheng. Research design and experimental study on portable electric tea plucking machine [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)

[8] 李岩. 全自动采茶机研发成功[J]. 农产品加工(创新版), 2012(9): 39.
LI Yan. Successful research and development of automatic tea picking machine [J]. Agricultural Products Processing (Innovation Edition), 2012(9): 39. (in Chinese)

[9] 吴先坤. 履带自走式采茶机的设计与试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
WU Xiankun. Design and experimental study on self-propelled tea-picking machine [D]. Hefei: Anhui Agricultural University,

2018.(in Chinese)
[10] 俞国红，郑航，叶云翔，等.轻便自走式采茶机的设计与试验[J]. 浙江农业学报，2023，35(9)：2233－2239.
YU Guohong，ZHENG Hang，YE Yunxiang，et al. Design and experiment on portable self-propelled tea picker [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences，2023，35(9)：2233－2239.(in Chinese)
[11] KUKHMAZOV K Z，YASHIN A V，PETROVA E V. Theoretical justification of the optimal parameters of the copying crop lifter of the combine harvester header [J]. IOP Conference Series：Earth and Environmental Science，2022，953(1)：012007.
[12] SCHLESSER M W，KRAUS J T. Agricultural bi-mower with cantilever beam suspension：US，7051501[P].2006－05－30.
[13] SHEARER B R. Header with flexible crop cutting knife mounted on flex blades：US，10791671B2[P]. 2020－10－06.
[14] 王琪. 一种割刀高度自适应调节的采茶机设计与试验研究[D]. 福州：福建农林大学，2022.
WANG Qi. Design and experimental study of a tea picker with adaptive adjustment of cutter height [D]. Fuzhou：Fujian Agriculture and Forestry University，2022.(in Chinese)
[15] 王财盛.基于机器视觉的采茶机割刀控制方法研究与设计[D]. 杭州：浙江工业大学，2017.
WANG Caisheng. Research and design of cutter control method for tea plucking machine based on machine vision [D]. Hangzhou：Zhejiang University of Technology，2017.(in Chinese)
[16] 闫晶晶.仿形采茶机的优化设计及与茶园管理的协调性研究[D].合肥：安徽农业大学，2019.
YAN Jingjing. Optimization design of profiling tea picking machine and research on coordination with tea plantation management[D].Hefei：Anhui Agricultural University，2019.(in Chinese)
[17] 赵润茂，卞贤炳，陈建能，等. 分布控制的乘坐式仿形采茶原型机研制与试验[J]. 茶叶科学，2022，42(2)：263－276.
ZHAO Runmao，BIAN Xianbing，CHEN Jianneng，et al. Development and test for distributed control prototype of the riding profiling tea harvester[J]. Journal of Tea Science，2022，42(2)：263－276.(in Chinese)
[18] 中华人民共和国农业部. 采茶机作业质量：NY/T 2614—2014[S]. 北京：中国农业出版社，2015.
[19] 范国帅. 3D LiDAR 感知的大宗茶仿形采收机研制与试验[D]. 杭州：浙江理工大学，2024.
FAN Guoshuai. Development and experiment of 3D LiDAR-based bulk tea profiling harvester [D]. Hangzhou：Zhejiang Sci-Tech University，2024.(in Chinese)
[20] 冉军辉. 油菜联合收割机双动刀切割器及行星齿轮驱动机构设计与试验[D]. 北京：中国农业科学院，2021.
RAN Junhui. Design and experiment of double-acting cutter with planet gear driver for rape harvester [D]. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences，2021.(in Chinese)
[21] 白启厚. 往复切割式采茶机切割器试验研究[J]. 安徽工学院学报，1985(2)：29－44.
BAI Qihou. Experimental study on reciprocating cutting cutter for tea picker[J]. Journal of Anhui Institute of Technology，1985(2)：29－44.(in Chinese)
[22] 任子超. 沙棘收获机剪切装置设计与试验研究[D].石河子：石河子大学，2023.
REN Zichao. Design and experimental research on the shearing device of seabuckthorn harvester [D]. Shihezi：Shihezi University，2023.(in Chinese)
[23] 韩余，宋志禹，陈巧敏，等. 弧型往复双动式采茶切割器优化与试验[J]. 农业工程学报，2022，38(24)：35－43.
HAN Yu，SONG Zhiyu，CHEN Qiaomin，et al. Optimization and experiment of arc reciprocating double-acting tea picking cutter[J]. Transactions of the CSAE，2022，38(24)：35－43.(in Chinese)
[24] 金心怡. 采茶机、轻修剪机最佳刀、机速度[J]. 福建农学院学报，1993(4)：470－475.
JIN Xinyi. The optimal velocity of knife and machine of tea plucker and tea pruning machine [J]. Journal of Fujian Agricultural University，1993(4)：470－475.(in Chinese)
[25] 张雪恒. 垄作甘蔗轻简化手扶式收割机设计与试验[D]. 杭州：浙江理工大学，2022.
ZHANG Xueheng. Ridge as a sugarcane light simplified hand-held sugarcane harvester[D]. Hangzhou：Zhejiang Sci-Tech University，2022.(in Chinese)
[26] 刘彪，肖宏儒. 单人电动茶叶采摘机主要机构设计[J]. 江苏农业科学，2018，46(5)：180－182.
LIU Biao，XIAO Hongru. Design of main mechanism of single electric tea picking machine[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2018，46(5)：180－182.(in Chinese)
[27] 宋占华，宋华鲁，闫银发，等. 棉花秸秆往复式切割器动刀片优化设计[J]. 农业工程学报，2016，32(6)：42－49.
SONG Zhanhua，SONG Hualu，YAN Yinfa，et al. Optimizing design on knife section of reciprocating cutte bars for harvesting cotton stalk[J]. Transactions of the CSAE，2016，32(6)：42－49.(in Chinese)