doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.020

基于柔性夹持的青菜头收获机设计与试验

张　涛[1]　李　英[1]　宋树民[2]　庞有伦[1]　邵伟兴[1]　唐兴隆[1]

(1.重庆市农业科学院,重庆 401329;2.重庆茂旭科技有限责任公司,重庆 401329)

摘要:为解决西南丘陵山地青菜头机械化收获问题,结合青菜头生物特性和农艺要求,设计了一种具有柔性夹持功能的小型青菜头收获机。阐述了整机结构与工作原理,并对样机关键部件进行了结构设计和理论分析,柔性夹持装置初始间隙为 60 mm,最大允许通过青菜头直径为 150 mm,分析得到夹持输送带速度为 0.37 m/s、所需最大夹持力为 38.04 N;对割台架的仿地形能力和结构动力特性进行了分析,可得该结构允许地形起伏度为 50 mm,在安装割刀位置振幅最大,前 5 阶固有频率为 115.63 ~ 783.60 Hz,远大于发动机和地形产生的激励频率,因此不会发生共振现象。田间试验结果表明,切割及夹持输送机构运行平稳、振动小、切割有力、夹持力度适中;切割成功率为 89.5%,青菜头损伤率为 10.8%,实际工作效率为 0.035 hm^2/h,各项性能指标基本满足设计和农艺技术要求。

关键词:青菜头;收获机;模态分析;柔性夹持装置;仿地形;丘陵

中图分类号:S225.92　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)S2-0162-08

Design and Experiment of Tumorous Stem Mustard Harvester Based on Flexible Gripping

ZHANG Tao[1]　LI Ying[1]　SONG Shumin[2]　PANG Youlun[1]　SHAO Weixing[1]　TANG Xinglong[1]

(1. *Chongqing Academy of Agricultural Sciences*, *Chongqing* 401329, *China*

2. *Chongqing Maoxu Technology Co.*, *Ltd.*, *Chongqing* 401329, *China*)

Abstract: In solving the problem on the mechanized harvest of tumorous stem mustard in the southwest hills area and understanding the tumorous stem mustard biological characteristics and agronomic requirements, a small tumorous stem mustard harvester with flexible gripping function was developed. The structure and working principle of the whole machine were described and analyzed, also the parameters of the core parts of the machine were analyzed and determined theoretically, which got the adjustment clearance of the flexible gripping device was between 60 mm and 150 mm, the speed of the gripping conveyor belt was 0.37 m/s, the maximum gripping force required was 38.04 N. The terrain imitation capability and structural dynamic characteristics of the cutting bench were analyzed, the results showed that the allowed topographic relief was 50 mm, the maximum amplitude was at the position of the mounting cutter, and the first fifth natural frequency was 115.63 ~ 783.60 Hz which was much higher than the excitation frequency of the engine and the terrain, so there was no resonance effect. The field test results showed that the cutting and gripping conveying mechanism had stable operation which was with small vibration, powerful cutting and moderate gripping force. The success rate of cutting was 89.5%, the damage rate of tumorous stem mustard was 10.8%, and the actual working efficiency was 0.035 hm^2/h, which basically met the requirements of the design and agronomic techniques. The research achievement would provide an important reference for the mechanization of mustard industry.

Key words: tumorous stem mustard; harvester; modal analysis; flexible gripping device; imitation terrain; hills

收稿日期:2020-08-15　修回日期:2020-09-20

基金项目:重庆市市级良种创新项目(NKY-2020AB003)和重庆市科研机构绩效激励引导专项(cstc2019jxj100002)

作者简介:张涛(1989—),男,助理研究员,博士,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail:zt861205zt@163.com

通信作者:庞有伦(1966—),男,正高级工程师,主要从事农业工程技术与应用推广研究,E-mail:420330475@qq.com

0　引言

目前，青菜头深加工已经全面实现了机械化，但由于丘陵山区地块小、青菜头表皮损伤后易腐烂，导致青菜头收获仍停留在人工操作阶段，作业效率低，严重影响收获及时性，同时随着农村劳动力的转移，劳动力短缺问题日益突出，严重影响青菜头产业发展[1]。近年来，我国科研人员对青菜头物理特性和机械化采收方式进行了大量研究，并取得了一定成效[2-5]。文献[6-7]设计了简易拔取输送装置和具有扶叶、夹持拔取、输送、切叶等功能的青菜头收获机，机型小、传动简单，适宜丘陵山区小地块作业，但采用夹持拔取的方式导致收获成功率低、易损伤；吴渭尧[8-9]针对平原地区研发的乘坐式青菜头收获机性能稳定、可靠性高，但其机型庞大、传动及收获工艺复杂，丘陵山区适用性低。黎奎良等[10]针对青菜头切割装置及影响因素进行了研究，确定了高速无支撑切割的主要技术参数。此外国内外学者在类似作物机械化收获方面取得了大量成果[11-13]。李凯锋[14]设计了自走式胡萝卜联合收获机，对松土起拔、夹持输送、茎叶分离等关键技术进行了理论分析和试验研究；CZESLAW 等[15]研究了胡萝卜收获机技术和操作参数对其性能指标的影响；KANAMITSU 等[16]设计的大白菜收获机可通过液压系统控制割台离地高度，能够精准切割；HACHIYA 等[17]设计的集收获、输送、装箱等功能一体的甘蓝收获机，已形成产业化，但由于作物种类和作业环境的差异性，以上机械在丘陵山区青菜头收获中适应性不强。因此，本研究根据青菜头生物特性和小地块作业环境，设计一种具有仿地形和柔性夹持功能的小型青菜头收获机。

1　整机结构与工作原理

1.1　青菜头农艺模式及生物学特性

目前，青菜头采用厢面种植，厢面两边沟深度 30 cm、宽 30 cm，厢面行距 30 ~ 40 cm，株距 25 ~ 40 cm，行数 2 或 4 行。单株青菜头主要分为主根、茎瘤、叶柄和叶，其中茎瘤位于叶柄基部呈瘤状结构，是制作榨菜的主要原料，具体形态结构如图 1 所示。整株质量 2 ~ 4 kg，主根长 l 为 200 ~ 300 mm，地上部分的茎瘤直径 D 为 70 ~ 150 mm，茎瘤高度 h_1 为 100 ~ 170 mm，茎瘤质量一般为 0.5 ~ 1.5 kg，叶柄和叶高度 h_2 为 600 ~ 800 mm。在收获时需从贴近地面部位切断，所需切割力平均约为 41.5 N，切割功率平均约为 0.056 kW[5]。茎瘤部分在收获时最容易形成夹伤，严重影响青菜头的品质和贮藏时间，青菜头茎瘤部位轴向抗压强度为 1.09 ~ 2.34 MPa（沿地面垂直方向），径向抗压强度为 1.71 ~ 2.31 MPa（沿地面水平方向）。

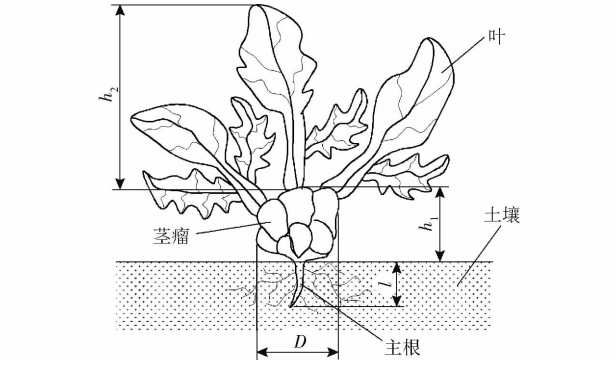


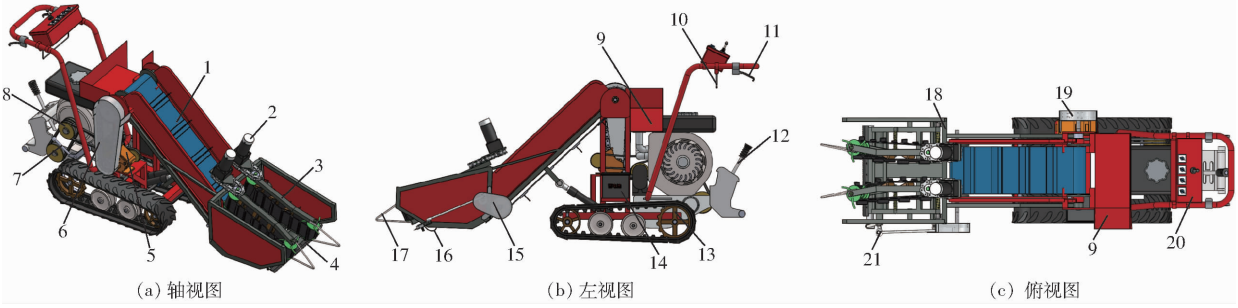
图 1　青菜头形态结构示意图

Fig. 1　Schematic of tumorous stem mustard morphology

1.2　整机结构

小型青菜头收获机选用 4.0 kW 以上履带式底盘作为动力，通过螺栓铰接形式与机架连接固定，可自由拆卸更换。整体结构如图 2 所示。

主要由履带底盘、提升运输装置、柔性夹持输送装置、往复切割装置、控制操作台、机架、传动系统等组成。机架是所有装置的安装载体，安装在底盘的上前方，在机架上设置有提升运输、柔性夹持输送、往复切割三大工作装置。机架一端与履带底盘通过



(a) 轴视图　　(b) 左视图　　(c) 俯视图

图 2　小型青菜头收获机三维结构示意图

Fig. 2　Three dimensional structure diagrams of small vegetable head harvester

1. 提升运输装置　2. 电机　3. 柔性夹持输送装置　4. 往复锯齿割刀　5. 变速器　6. 提升运输装置传动系统　7. 割台离合器　8. 发动机　9. 出料槽　10. 行走离合器　11. 转向把手　12. 挡杆　13. 履带底盘　14. 电瓶　15. 柔性夹持装置传动系统　16. 地面仿形装置　17. 扶禾器　18. 机架　19. 保护罩　20. 控制操作台　21. 割刀往复运动传动机构

钢管套接约束,使得机架仅可作圆周转动,并在机架主要承载位置与底盘之间通过电动推杆连接,电动推杆可以调节机架的工作高度。行走、提升运输和切割动力由汽油机提供,柔性夹持输送机构和电动推杆由电瓶提供动力,并通过扶手杆上的操作台控制其工作状态。

1.3 工作原理

小型青菜头收获机传动系统如图 3 所示,机架以铰接形式与履带底盘联结。机具工作时,动力传动轴将一部分动力传递到变速箱Ⅰ,驱动履带底盘前进;同时,将另一部分动力通过胶带传递给变速箱Ⅱ,经过减速后带动提升装置主动传动辊转动,使得提升运输装置工作。在提升装置从动传动辊一端装有齿轮,并与另一小齿轮啮合,起到增加转速作用,为了使整个割台部分有一定的仿地形功能,小齿轮轴心与柔性夹持装置安装轴同轴心。小齿轮焊接一个偏心轴,与往复运动机构联接,往复机构刀架上安装锯齿刀,使得锯齿刀进行一定距离的往复运动。为了夹持不同直径的青菜头,设计一款夹持间隙可调的柔性夹持装置,夹持部分的动力由电机提供,夹持输送带对称传动,起到夹持和输送的作用。

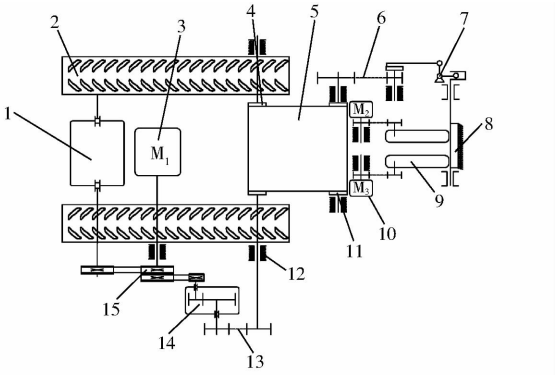


图 3 青菜头收获机传动系统示意图

Fig. 3 Schematic of driving system of small tumorous stem mustard harvester

1. 变速箱Ⅰ 2. 履带底盘 3. 汽油机 4. 提升装置主动传动辊 5. 提升装置输送带 6. 变速箱Ⅱ 7. 往复运动机构 8. 锯齿刀 9. 夹持输送机构 10. 电机 11. 提升装置从动传动辊 12. 轴承座 13. 链条传动系统 14. 变速箱Ⅲ 15. 胶带轮

在小型青菜头收获机作业前,根据作业地形,调节电动推杆,保证割刀紧贴地面。作业时,手动扳动行走和割台离合器、启动电机控制开关,使得履带底盘推进收获机沿青菜头行方向前进,同时提升运输装置和前端往复割刀装置开始工作。首先青菜头被割刀从根部切断,柔性夹持装置夹持切断的青菜头输送到提升运输装置上,柔性夹持装置的两个铰接处装有弹簧,因此夹持间隙可根据青菜头直径实时可变,提升运输装置的输送带上设计有间隙相等的挡板,将青菜头提升至出料口,完成单个青菜头收获过程。随着整机不断前进,收获机连续不断地进行青菜头切根、夹持、提升运输,最后在出料槽位置放置收集筐,便于集中收集。

1.4 整机主要技术参数

综合考虑整机质量、作业效率、功能要求,以及低损收获设计要求,参考块茎状蔬菜收获机作业标准,整机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 青菜头收获机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of tumorous stem mustard harvester

参数	数值
配套汽油机动力/kW	≥4.0
配套电机功率/kW	0.2
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 100×780×580
整机质量/kg	195
行数	1
提升运输装置线速度/(m·s^{-1})	0.54
柔性夹持装置线速度/(m·s^{-1})	0.37
行走速度/(m·s^{-1})	0.17~0.80
理论工作效率/(hm^2·h^{-1})	0.037

2 关键部件设计

割台单体是小型青菜头收获机实现切根、拾取功能的关键部件。其中往复切割装置需满足紧贴地面,实现快速切断,避免青菜头被推倒;柔性夹持装置能够根据不同直径茎瘤青菜头自动、灵敏地调节间隙,防止菜头夹持过松掉落或过紧夹伤;割台架作为主要工作部件的载体,既要满足一定的仿地形能力,而且在工作时需稳定可靠、结构紧凑合理,因此需对关键部件进行理论分析与参数设计。

2.1 柔性夹持装置

2.1.1 装置组成及设计原理

柔性夹持装置是小型青菜头收获机的关键部件,其结构及参数直接影响机具工作的流畅性和青菜头的损伤率。该柔性夹持装置采用一端转动结合滑动约束,另一端滑动约束,实现夹持过程中夹持间隙因青菜头茎瘤直径而实时改变,主要由电机、孔状传动辊、张紧辊、拨禾爪、橡胶夹持带、压紧簧、滑动支撑座等组成,结构如图 4a 所示。

该装置的主要工作过程为分禾、夹持、升运。分禾机构设有一定的敞开角,将对行性差的青菜头拢入拨禾爪内侧,然后进入夹持机构,夹持力不能过大或过小,根据该设计原则,对柔性夹持机构进行结构和尺寸设计。该机构沿机具前进方向左右对称,在初始状态下,夹持间隙 d 为 60 mm,在 A、B 两端安装

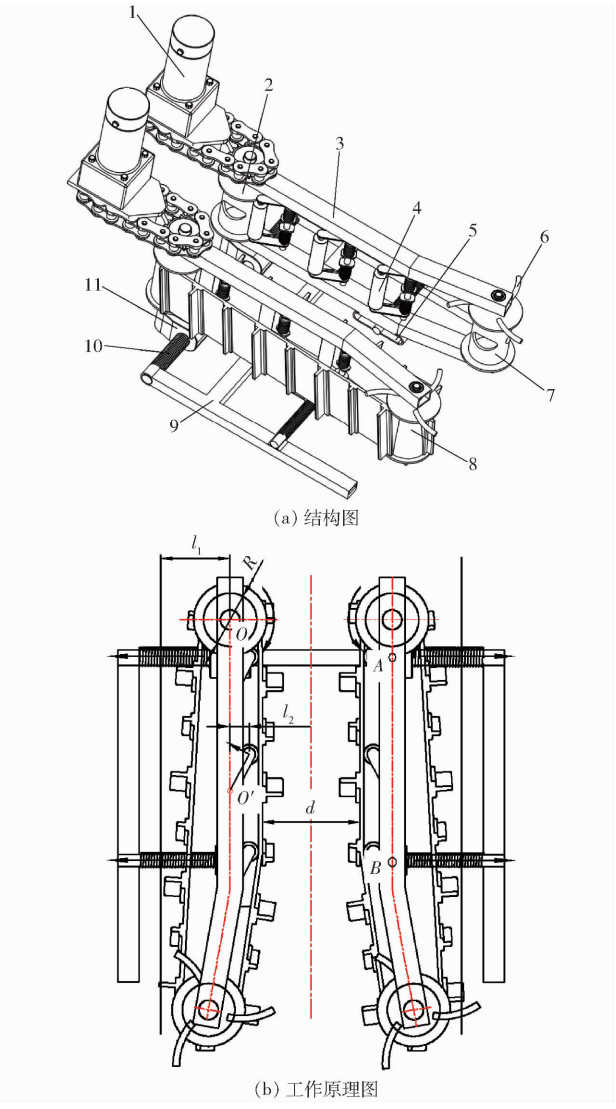


图 4　柔性夹持装置结构示意图

Fig. 4　Schematics of flexible gripping device

1. 电机　2. 主动孔状传动辊　3. 安装架　4. 张紧辊　5. U 型滑动槽　6. 拨禾爪　7. 从动孔状传动辊　8. 橡胶夹持带　9. 割台机架　10. 压紧簧　11. 滑动支撑座

有圆柱螺旋弹簧，其最大变形量 l_1 为 45 mm，则青菜头最大通过间隙为 150 mm，可适应不同直径青菜头通过；由于橡胶夹持带在运转过程中会产生塑性变形进而松弛，而且青菜头形状不规则，为了保证机构正常运行和夹持效果，需设置张紧装置进行二次预紧，张紧辊在扭簧的作用下具有一定间隙调整范围，其中张紧辊绕 O' 转动，单边张紧辊最大调整幅度 l_2 为 15 mm，如图 4b 所示。

橡胶夹持带具有传输和夹持双重作用，其结构内侧为光滑面，外侧均匀设置有 2 种高度挡条，挡条结构类似于凸台，大凸台高度 40 mm、底宽 26 mm、顶宽 5 mm，小凸台高度 20 mm、底宽 16 mm、顶宽 3 mm，其结构布置为 2 个大凸台挡条中间设置 1 个小凸台挡条，大凸台挡条间隔设为 105 mm。由于提升时柔性夹持装置与地面具有一定的倾角，因此需根据该倾角设置挡条角度，该夹持带挡条倾角 θ 为 72°。根据青菜头高度、孔状传动辊及割台机架结构尺寸，橡胶夹持带宽度为 100 mm、厚度为 3 mm、内侧直径为 65 mm、中心距离为 423 mm，具体结构参数如图 5 所示。该夹持输送带无需润滑，具有噪声小、传输稳定、夹持可靠、不易掉落和造成青菜头机械损伤等优点[18]。

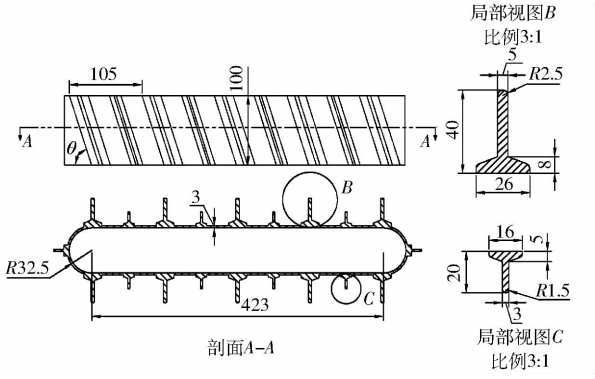


图 5　输送带结构示意图

Fig. 5　Schematic of conveyor belt structure

2.1.2　青菜头运动及受力分析

为了保证柔性夹持输送装置有序、可靠工作，该装置输送速度必须依据整机前进速度进行设定。青菜头与输送带接触点的速度和方向直接影响其输送状态，对青菜头运动过程进行分析，如图 6a 所示。青菜头的运动由整机前进速度和橡胶夹持带运动共同合成，其运动关系为

$$\boldsymbol{v}_r = \boldsymbol{v}_m + \boldsymbol{v}_e \tag{1}$$

式中　$\boldsymbol{v}_e$——橡胶夹持带线速度，m/s

$\boldsymbol{v}_m$——整机行走速度，m/s

$\boldsymbol{v}_r$——青菜头绝对运动速度，m/s

根据图中三角关系及正弦定理，可得

$$\begin{cases} \dfrac{v_e}{\sin(180-(\alpha+\beta))} = \dfrac{v_r}{\sin\alpha} \\ \dfrac{v_m}{\sin\beta} = \dfrac{v_r}{\sin\alpha} \end{cases} \tag{2}$$

由式(2)可得

$$\frac{v_e}{v_m} = \frac{\sin(\alpha+\beta)}{\sin\beta} = K \tag{3}$$

式中　α——橡胶夹持带与水平面夹角，(°)

β——青菜头绝对运动方向与橡胶夹持带夹角，(°)

K——橡胶夹持带速度与整机前进速度比

当 $K<1$，即 $v_e < v_m$ 时，青菜头的绝对速度会向机具前进方向前倾，不易夹取或易产生机械损伤；理想状态下，青菜头的绝对运动速度应竖直向上，则 K 需大于 1，$v_e = v_m/\sin\beta$。为了高效、有序夹持收获，一

般割台与水平面夹角范围为 10°~20°[19],本研究设 α 为 18°,则 β 为 72°,机具行走速度为 0.35 m/s,计算得到夹持输送带的速度为 0.37 m/s。此时橡胶夹持带夹取方向能达到最佳夹取状态,且其速度大于机具前进速度,能够避免青菜头在输送过程中出现拥堵。

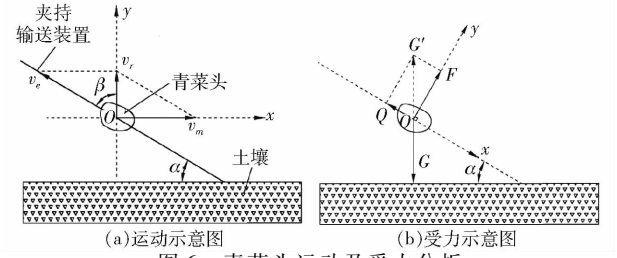


图 6 青菜头运动及受力分析

Fig. 6 Movement and force analysis of head of tumorous stem mustard

夹持运输过程,以单个青菜头为研究对象,建立青菜头力学模型,如图 6b 所示。由于机具前进速度和橡胶夹持带传输速度恒定,因此青菜头在此过程做匀速运动。青菜头受到自身重力、输送机构提升力和橡胶夹持带夹持力共同作用。进行受力分析可得

$$\begin{cases} Q = G\sin\alpha \\ F = G\cos\alpha \end{cases} \tag{4}$$

式中 F——橡胶夹持带夹持力,N

G——青菜头自身重力,N

Q——柔性夹持装置提升力,N

由式(4)可知,提升力 Q 和夹持力 F 受青菜头自身重力、夹持输送机构倾角 α 影响,当 α 越大,则 Q 越大,F 越小,传输速度过快且易掉落;当 α 越小,则 Q 越小,F 越大,传输速度过慢易出现拥堵和机械损伤,再次证明 α 是直接影响有序收获的关键因素。根据整株青菜头质量和夹持输送机构倾角,计算得到所需最大夹持力为 38.04 N,远远小于青菜头径向压力极值 195.3 N[5],对其不会造成机械损伤。依据该结果进行柔性夹持装置中所需的扭簧和压紧簧的选择和尺寸设计,并通过测试使得夹持过程中夹持力在 40 N 即可。

柔性夹持输送装置所需电机功率为[20]

$$N = \frac{Tn}{9\,550} \tag{5}$$

其中

$$T = \left(m\frac{v_e^2}{R} + Q\right)R \tag{6}$$

式中 N——柔性夹持装置所需功率,kW

T——电机输出轴扭矩,N·m

m——柔性夹持装置质量,kg

n——电机转速,r/min

R——圆辊半径,m

提升力 Q 为 12.36 N,柔性夹持装置质量 m 约为 20 kg,假定电动机转速 n = 360 r/min,则计算得到所需功率为 0.131 1 kW,为了保证足够的传动性能,本研究选取 12 V/200 W 无刷直流电机作为该装置的动力源。

2.2 往复切割装置

2.2.1 青菜头块茎切割过程力学分析

在农业收获机械研究中,按照支撑条件不同,切割分为高速无支撑和低速有支撑切割。由于青菜头块茎脆性较大,周边环境复杂,难以提供准确的支撑条件,且整机要求轻便,因此选用无支撑切割,仅依靠动刀片而无定刀片的一种切割方式,具体切割过程及受力简图如图 7 所示。切割瞬间有切割力 T_0、块茎的惯性力 T_1 和 T_2 以及剪切部位的抗弯力 T_k,高速无支撑切割时,青菜头应处于静止状态,则应满足 $T_0 = T_1 + T_2 + T_k$。在进行青菜头切根作业中,刀片的进给运动使青菜头弯曲,同时刀片的往复运动将青菜头从基部切断,完成一次切根过程。由于青菜头根茎部较粗且硬,因此在切割过程中扰度较小,发生的弯曲变形不明显。

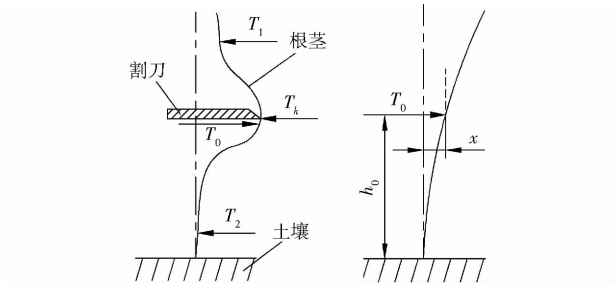


图 7 切割过程及受力分析

Fig. 7 Cutting process and force analysis

将切根过程可视为悬臂梁结构[21],分析切割力数学模型。割刀受到来自根茎部的反切力与反作用力,则切割力 T_0 应满足

$$T_0 = \Delta m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} + F_h(x) + T_e \tag{7}$$

其中

$$F_h(x) = \frac{3E_0I_0}{h_0^3}x \tag{8}$$

$$\Delta m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \Delta m\frac{v^2}{d_0} \tag{9}$$

式中 Δm——切除质量,kg

v——切割时线速度,m/s

t——切割时间,s

x——青菜头水平位移,mm

T_e——根茎部反切力,N

$F_h(x)$——根茎部水平分力,N

E_0——根茎部弹性模量,MPa

h_0——切割高度，mm

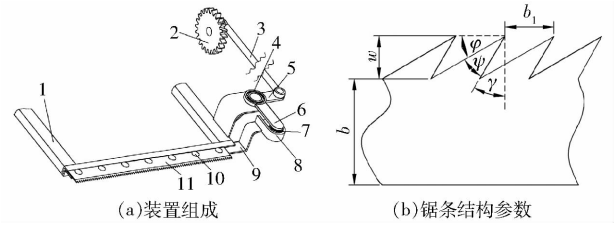
I_0——截面惯性矩，mm^4

d_0——切割处直径，mm

通过式(7)可知影响切割力的因素主要有根茎直径、割刀线速度和机具前进速度等。根茎直径越大，则抗弯能力越强，在切割过程中可起到一定的支撑作用；为了保证顺畅切割，需满足高切割线速度和低进给速度，如果切割线速度过低或进给速度过高，会使单齿进给量过大，容易导致青菜头根部切不断或前倾产生斜切，影响青菜头的完整性和品质。

2.2.2　装置组成及设计

往复切割装置主要由连杆、齿轮、轴承、锯齿锯条、刀座、U 形滑槽等零件构成，结构如图 8a 所示。该装置采用曲柄滑块机构驱动刀座进行往复运动，其中球形铰接连杆的一端通过偏心安装在齿轮上，另一端与连杆Ⅰ进行铰接，连杆Ⅰ和连杆Ⅱ垂直焊接在转动轴承上，并整体安装在割台机架右侧，连杆Ⅱ接有滑动轴承的一端安装在方块滑槽中，同时方块滑槽与刀座进行焊接，当转动轴承以一定角度摆动时，连杆Ⅱ带动方块滑槽和刀座进行运动；刀座安装在割台机架导向轨道中，限定其 5 个自由度，使刀座只能左右滑动；割台机架和刀座右侧均采用台阶结构设计，主要避免驱动机构过于贴近地面，土壤或其他杂质进入轴承和滑槽中，影响零件使用寿命。该设计中刀座提升 10 cm，因为过高，则会产生较大的扭矩，极易发生疲劳断裂；刀片为切断青菜头根茎的的主要零件，通过切割性能比较[22]，选择锯齿锯条，具体结构如图 8b 所示。由于地表不平和切割位置较低，需紧贴地面或者入土作业，因此对割刀性能要求较高，其中锯条宽 b 为 30 mm，锯条齿高 w 为 2.8 mm，锯条齿背角 ψ、楔角 φ 和刀面角 γ 均为 30°，锯条齿宽 b_1 为 2.4 mm，锯条采用线切割加工和磨刃处理，使得刀刃破口角为 30°，最后通过铆钉固定在刀座上，材料选择耐磨和屈强较高的 65Mn。



(a)装置组成　　(b)锯条结构参数

图 8　往复切割装置结构示意图

Fig. 8　Schematic of reciprocating cutting device

1. 割台机架　2. 齿轮　3. 球形铰接连杆　4. 转动轴承　5. 连杆Ⅰ　6. 连杆Ⅱ　7. 滑动轴承　8. U 形滑槽　9. 刀座　10. 铆钉　11. 锯齿锯条

2.3　割台架

2.3.1　割台架仿地形结构设计

机具在作业过程中，为了保证割刀始终紧贴地面，需对割台架做仿地形设计。本研究中割台架一端焊接有轴承座，通过旋转轴将割台架安装在整机机架上，并且在整机机架上设置有上下限位杆，因此可将该结构简化为一个固定铰支座约束，如图 9 所示。割台架前端设有滑板仿形器，机具前进过程中滑板仿形器沿地表滑行，割刀架可根据地形上下浮动。在限位杆作用下，滑板仿形器最高和最低接触点分别为 A_1 和 A_2，则允许地表起伏度为 A_1 和 A_2 的距离 d_1。根据小地块地形特点和整机结构，本研究中将 d_1 设为 50 mm，即可根据地面上下浮动 25 mm。

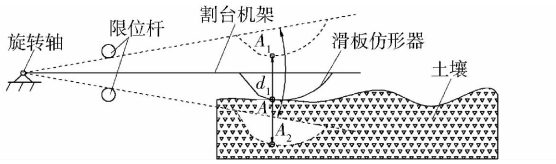


图 9　割台架仿地形原理示意图

Fig. 9　Schematic of terrain simulation for cutting bench

2.3.2　割台架模态分析

青菜头收获机的工作环境相对恶劣，而且特殊的仿地形结构设计，在行驶和工作时割台架受多自由度振动作用影响，因此对割台架进行模态分析，得到其固有频率和振型，以便检验该结构是否发生共振和结构刚度。采用 SolidWorks 软件按实际尺寸建立割台架的三维模型，并利用软件自带的 Simulation 插件进行频率分析，设定其材料类型为 Q235，其中弹性模量 210 GPa，泊松比 0.35，密度 7 850 kg/m^3。约束条件为在转动轴端添加固定铰链、支撑夹持装置端添加滑柱/滑杆约束，割刀摆动轴端添加轴承夹具，施加的载荷包括自身重力、土壤对其支撑力、夹持装置的压力、转动轴对割台架的支撑力。该机构为整体模型，选用同一单元进行网格划分。

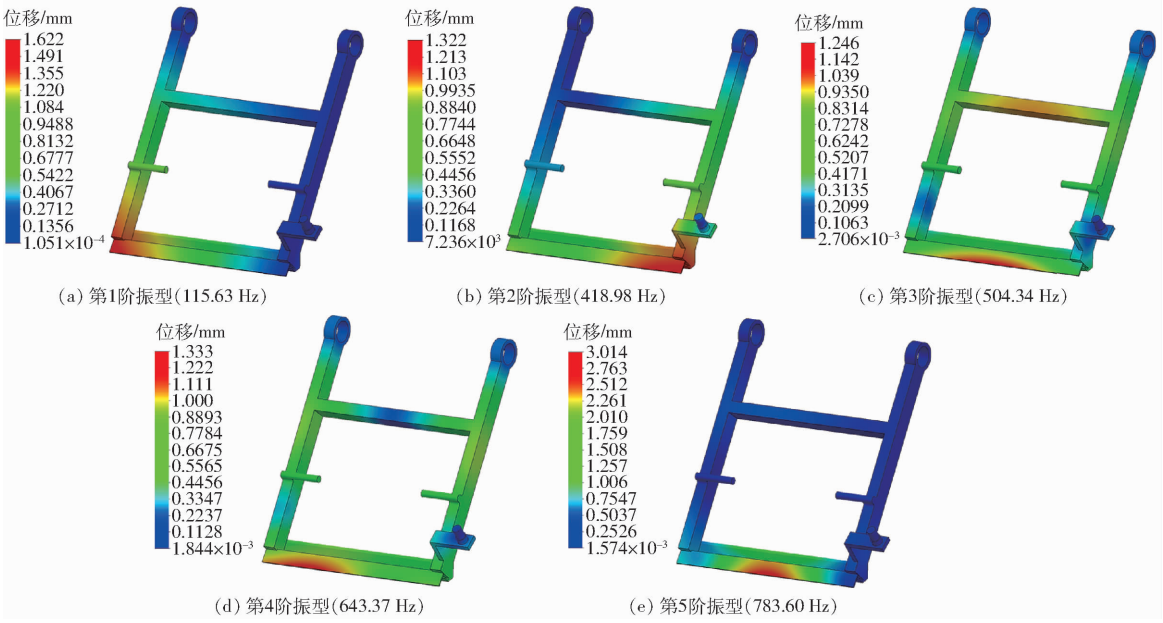
通过模拟得到割台架前 5 阶模态振型如图 10 所示。该机配备的发动机工作频率为 50 Hz，田间地形产生的外部激励主要与地面不平度和动力底盘的工作速度密切相关[23]，计算式为

$$f_0 = \frac{1\,000 v_m}{\lambda} \tag{10}$$

式中　f_0——地面激励频率，Hz

λ——地形不平度波长，一般取 320 mm

计算得到地面激励频率为 0.53 ~ 6.25 Hz。而割台架前 5 阶固有频率为 115.63 ~ 783.60 Hz，远大于发动机和地形产生的激励频率，因此该结构不会受共振影响而产生破坏。由图 10 可看出，割台架前端安装割刀位置振幅均最大，会产生弯曲或扭转振



(a) 第1阶振型(115.63 Hz) (b) 第2阶振型(418.98 Hz) (c) 第3阶振型(504.34 Hz)

(d) 第4阶振型(643.37 Hz) (e) 第5阶振型(783.60 Hz)

图 10 割台架模态振型云图

Fig. 10 Cloud patterns of header frame

动,因此可通过加厚、更换高刚度材料等处理,进而减小由振动引起的变形量。

3 田间试验与分析

3.1 试验材料与条件

小型青菜头收获机田间性能试验于 2019 年 2 月初在重庆市永川区万寿镇进行,海拔 330 m,机器工作期间平均气温为 9.0℃左右。试验地为黄壤土,含水率为 14.5%,土壤容重为 1.52 g/cm^3,田面较为平整、杂草较少。供试材料为"涪杂 2 号"青菜头,含水率 90%左右,种植行距 35 cm、株距 30 cm。夹持装置进行 0.5 h 测试,夹持带无跑偏和打滑现象,作业前进速度 0.35 m/s、割刀往复切割速度 1.8 m/s。

3.2 试验方法

根据样机预期设计功能,结合国家标准 GB/T 5262—2008《农业机械测定试验条件 测定方法的一般规定》和 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机 试验方法》进行田间性能试验[24-25]。试验选取损伤率、切割成功率、切割高度、工作效率等为测试指标,同时观察柔性夹持装置、提升运输装置、往复切割装置等结构的工作运转情况及整机稳定性,样机作业效果如图 11a 所示。

3.3 结果分析

田间试验结果如表 2 所示。由试验可知,机具切割有力、切口表面平整,切割成功率为 89.5%,青菜头收获质量如图 11b 所示。前端切割及仿地形效果较好,切割高度为 7.4 mm;夹持力度适中且运输基本顺畅,但当青菜头直径过小或过大时,青菜头会



(a) 田间作业 (b) 收获质量

图 11 样机田间试验

Fig. 11 Field test of prototype

表 2 田间收获性能试验结果

Tab. 2 Test results of harvest performance

性能参数	试验值	技术要求
损伤率/%	10.8	≤15
切割成功率/%	89.5	≥75
切割高度/mm	7.4	
对行失败率/%	5.6	
柔性夹持装置堵塞率/%	4.0	
实际工作效率/(hm^2·h^{-1})	0.035	

掉落或橡胶夹持带打滑,导致柔性夹持装置通道发生堵塞,整体上损伤率为 10.8%,柔性夹持装置堵塞率为 4.0%;由于丘陵山地地形不规则、坡坎较多,种植时厢面随弯即弯,而且青菜头生长过程中会发生歪倒现象,青菜头整体成行性较差,因此在收获时会产生机具对行失败,青菜头被推到或从茎瘤位置切断,影响收获质量和效率,整体上对行失败率为 5.6%,受成行性差和通道堵塞的影响,实际作业效率为 0.035 hm^2/h;各指标均符合设计要求和相关技术标准的规定,能达到青菜头产业减少劳动强度和提高生产效率的目的。青菜头损伤率、工作效率等

性能指标主要受青菜头生长特性和土地条件影响，除了在农艺种植上进一步规范以外，今后在机具的结构和履带底盘灵敏度上可做进一步优化改进。

4　结论

（1）通过对柔性夹持装置、往复切割装置、割台架 3 个重要部件进行设计与选型，设计了小型青菜头收获机，该机能较好解决西南丘陵地区青菜头机械化收获难题。

（2）采用一端转动结合滑动约束，另一端滑动约束，设计柔性夹持装置，实现夹持间隙因青菜头茎瘤直径而实时改变，调整间隙为 60 ~ 150 mm，以及倾角式挡条橡胶带设计，使得夹持力适度，不易夹伤或掉落。

（3）通过滑板式割台架设计，一端为转动约束，另一端上下设有限位杆，允许地形最大起伏高度为 50 mm；并对割台架进行模态分析，其固有频率远远大于发动机和地面不平产生的激励频率，不会受共振影响导致机构损坏。

（4）田间试验表明，小型青菜头收获机损伤率为 10.8%，切割成功率为 89.5%，切割高度为 7.4 mm，性能指标均达到了国家标准和设计要求。

参　考　文　献

[1] 刘福寿. 产业扶贫背景下涪陵榨菜产业发展对策研究[D]. 长沙：中南林业科技大学，2018.
LIU Fushou. Research on the development of Fuling pickled vegetable industry[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018. (in Chinese)

[2] 冯伟，李平，张先锋，等. 榨菜收获机割台结构设计与试验[J]. 南方农业，2018，12(34)：127 - 129，133.
FENG Wei, LI Ping, ZHANG Xianfeng, et al. Design and test of cutting table structure of pickle harvester[J]. South China Agriculture, 2018, 12(34): 127 - 129, 133. (in Chinese)

[3] 薛元鹏，陈俊杰，叶进，等. 青菜头物理特性研究[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2017，39(2)：147 - 152.
XUE Yuanpeng, CHEN Junjie, YE Jin, et al. Study on physical and mechanical properties of tumorous stem mustard[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2017, 39(2): 147 - 152. (in Chinese)

[4] 郝林杰，叶进，岳高峰，等. 青菜头缩短茎物理力学特性的试验研究[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2018，40(12)：30 - 36.
HAO Linjie, YE Jin, YUE Gaofeng, et al. A study of the physical and mechanical properties of the shortened stem of tumorous stem mustard[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2018, 40(12): 30 - 36. (in Chinese)

[5] 龚境一. 青菜头切割装置的设计与优化研究[D]. 重庆：西南大学，2018.
GONG Jingyi. Design and optimization of tumorous stem mustard cutting device[D]. Chongqing: Southwest University, 2018. (in Chinese)

[6] 龚境一，叶进，杨仕，等. 榨菜收获机的设计研究[J]. 农机化研究，2018，40(3)：120 - 124.
GONG Jingyi, YE Jin, YANG Shi, et al. Research and design of the tumorous stem mustard harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3): 120 - 124. (in Chinese)

[7] 王留步，叶进，杨仕，等. 榨菜收获机拔取输送机构的设计与试验[J]. 农机化研究，2018，40(4)：138 - 141，246.
WANG Liubu, YE Jin, YANG Shi, et al. Analysis of transmission system optimization strategy based on tractor transmission[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(4): 138 - 141, 246. (in Chinese)

[8] 吴渭尧. 一种榨菜收割机：201410218522.9[P]. 2014 - 05 - 22.

[9] 吴渭尧. 一种榨菜收割及清理收集装置：201320856687.X[P]. 2013 - 12 - 23.

[10] 黎奎良，叶进，岳高峰，等. 青菜头收获机切割装置设计与试验研究[J]. 农机化研究，2019，41(12)：140 - 144.
LI Kuiliang, YE Jin, YUE Gaofeng, et al. Design and experimental study on cutting device of tumorous stem mustard harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12): 140 - 144. (in Chinese)

[11] 施印炎，章永年，汪小昂. 环保自走式芦蒿有序收获机的研制与样机试验[J]. 中国农机化学报，2018，39(11)：17 - 21.
SHI Yinyan, ZHANG Yongnian, WANG Xiaochan. Development and prototype experiment of environmental self-propelled and orderly harvester for *Artemisia selengensis*[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(11): 17 - 21. (in Chinese)

[12] 伍渊远. 温室芹菜收获机的设计[D]. 银川：宁夏大学，2018.
WU Yuanyuan. Design of greenhouse celery harvester[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018. (in Chinese)

[13] HORIA M, ELSAHHAR E A, MOSTAFA M M, et al. A developed mechine to harvest carrot crop[J]. Farm Machinery and Power, 2008, 25(4): 1163 - 1173.

[14] 李凯锋. 自走式胡萝卜联合收获机关键技术的研究[D]. 北京：中国农业机械化科学研究院，2015.
LI Kaifeng. Research on the key techniques of self-propelled carrots combine harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2015. (in Chinese)

[15] CZESLAW W, ALEKSANDER L, ADAM S, et al. The impact of harvester technical and operating parameters on selected energy indicators during carrot root harvesting[J]. Inzynieria Rolnicza, 2008, 99(1): 389 - 394.

[16] KANAMITSU M, YAMAMOTO K. Development of a Chinese cabbage harvester[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 1996, 30(1): 35 - 41.

[17] HACHIYA M, AMANO T, YAMAGATA M, et al. Development and utilization of a new mechanized cabbage harvesting system for large fields[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2004, 38(2): 97 - 103.

（下转第 190 页）

rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(24):8 - 15. (in Chinese)
[15] 万星宇,舒彩霞,徐阳,等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(14):27 - 35.
WAN Xingyu, SHU Caixia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(14):27 - 35. (in Chinese)
[16] 王国欣. 圆筒式短茎秆清理装置试验研究及 CAD[D]. 洛阳:洛阳工学院,2000.
[17] 王启阳,吴文福,朱浩天. 玉米螺旋式清选装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(20):12 - 19.
WANG Qiyang, WU Wenfu, ZHU Haotian. Design and test of screw cleaning mechanism for corn[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(20):12 - 19. (in Chinese)
[18] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007:965 - 966.
[19] 邱先钧. 贯流风机在联合收割机中的应用及其设计[J]. 农业工程学报,2003,19(1):110 - 112.
QIU Xianjun. Design and application of cross flow blower in combines[J]. Transactions of the CSAE,2003,19(1):110 - 112. (in Chinese)
[20] 余波,王强,王霜. 基于 Fluent 的风筛式清选室气流场的仿真[J]. 江苏农业科学,2016,44(7):358 - 361.
YU Bo, WANG Qiang, WANG Shuang. Simulation of air flow field in air screen cleaning chamber based on Fluent[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2016,44(7):358 - 361. (in Chinese)
[21] HE Y, GAO Q J. Analysis of the inherent frequency of circular vibrating screen and modelling and simulation of Matlab/Simulink[J]. Applied Mechanics & Materials,2015(4113):200 - 204.
[22] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
[23] 刘芳建,杨学军,方宪法,等. 甘蔗收获机切段装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9):90 - 95.
LIU Fangjian, YANG Xuejun, FANG Xianfa, et al. Design and experiment of chopper device in sugarcane harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(9):90 - 95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180910&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.010. (in Chinese)

(上接第 169 页)

[18] 刘向东,王学农,王春耀,等. 差速式三通道鲜杏动态定向输送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10):35 - 43.
LIU Xiangdong, WANG Xuenong, WANG Chunyao, et al. Design and test of apricot dynamic orientation and conveying device with 3-path differential belts[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(10):35 - 43. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161005&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.005. (in Chinese)
[19] 章永年,施印炎,汪小旦,等. 茎叶类蔬菜有序收获机柔性夹持输送机构设计[J]. 中国农机化学报,2016,37(9):48 - 51.
ZHANG Yongnian, SHI Yinyan, WANG Xiaochan, et al. Design on flexible clamping-conveying mechanism of orderly harvester for stems-leafy vegetables[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2016,37(9):48 - 51. (in Chinese)
[20] 北京起重运输机械研究所. DTⅡ(A)型带式输送机设计手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2003.
[21] 施印炎,陈满,汪小旦,等. 芦蒿有序收获机切割器动力学仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):110 - 116.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Dynamic simulation and experiments on *Artemisia selengensis* orderly harvester cutter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):110 - 116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170215&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.015. (in Chinese)
[22] 李常营. 留高茬式玉米收获机切割部件的仿生设计及其切割原理[D]. 长春:吉林大学,2014.
LI Changying. Bionic blade of corn harvester for leaving high stubble and its cutting mechanism[D]. Changchun: Jilin University,2014. (in Chinese)
[23] 王金武,白海超,孙小博,等. 水田喷雾机喷雾装置设计与动态分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):69 - 79.
WANG Jinwu, BAI Haichao, SUN Xiaobo, et al. Design and dynamic analysis of spray device for paddy field sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):69 - 79. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190307&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.007. (in Chinese)
[24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 5262—2008 农业机械试验条件 测定方法的一般规定[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
[25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 8097—2008 收获机械 联合收割机试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.