doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.005

青贮饲料收获机自动抛料装车系统研究

余永峰[1,2]　李雷霞[1,2]　杨泽宇[1,2]　杨德秋[1,2]　赫志飞[1,2]　滕绍民[1,2]
华荣江[1,2]　谢胜建[1,2]

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083;
2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对青贮饲料收获机田间作业过程中,抛料装车环节人工操作劳动强度大、自动化程度低等问题,设计了一套青贮饲料收获机自动抛料装车系统。通过对青贮饲料收获机抛送饲料在跟随料车车斗内的堆积模型进行研究分析,提出了一种基于车斗尺寸的饲料落点位置规划方法及填装规则,然后根据青贮饲料物料特性建立离散元模型,在 EDEM 软件中开展仿真试验,结果表明,提出的抛送方法在各种饲料抛送角度下均能实现更为均匀的填装,提高了车斗空间利用率。对青贮饲料实际抛送轨迹进行简化,从而将抛臂和抛送饲料整体视为特殊结构的五自由度串联机械臂,利用改进 Denavit - Hartenberg 建模法建立连杆坐标系,对抛臂进行正运动学分析和逆运动学分析,得出到达理想落点所需的关节变量目标值,通过控制关节变量实际值逼近目标值,实现了青贮收获过程自动抛料装车。以关节角度误差、料车填装率和抛送损失率为试验指标开展田间试验,试验结果显示,抛臂基座旋转角度和抛头转动角度的平均绝对误差分别为 1.80°和 1.08°,自动抛料装车系统的料车填装率较人工控制抛料装车提升 4.94 个百分点,抛送损失率平均值较人工控制抛料装车方法降低 0.45 个百分点,满足田间收获要求。

关键词: 青贮饲料收获机; 自动抛料装车; 离散元; 控制系统

中图分类号: TP391.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0063-13　　**OSID**:

Automatic Feed Throwing and Loading System for Silage Harvester

YU Yongfeng[1,2]　LI Leixia[1,2]　YANG Zeyu[1,2]　YANG Deqiu[1,2]　HE Zhifei[1,2]
TENG Shaomin[1,2]　HUA Rongjiang[1,2]　XIE Shengjian[1,2]

(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In response to the issues of high labor intensity and low automation levels in the manual operation of the feed loading process during field operations of silage harvesters, the automatic feed throwing and loading system for silage harvesters was designed. By analyzing the accumulation model of silage feed being discharged into the hopper of a following feed truck, a feed landing point positioning method and loading rules was proposed based on hopper dimensions. Subsequently, a discrete element model was established based on the material properties of silage feed and simulated by using EDEM software. The results indicated that the proposed discharge method achieved more uniform loading under various discharge angles, thereby improving the utilization rate of the hopper space. The actual feed throwing trajectory of silage feed was simplified, treating the throwing arm and the entire feed throwing mechanism as a special five-degree-of-freedom serial robotic arm. The improved Denavit - Hartenberg modeling method was used to establish a link coordinate system, and forward and inverse kinematic analyses were conducted on the throwing arm. The target values for joint variables required to reach the ideal landing point were obtained. By controlling the actual joint variable values to approach the target values, automatic feed loading during silage harvesting was achieved. Field trials were conducted by

收稿日期: 2025-07-01　修回日期: 2025-08-19
基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2000504)
作者简介: 余永峰(2001—),男,硕士生,主要从事农业装备智能测控技术研究,E-mail: yuyf0603@163.com
通信作者: 李雷霞(1982—),女,研究员,主要从事智能农机收获装备电控系统研究,E-mail: lileixia1016@163.com

using joint angle error, filling rate of the truck, and feed throwing loss rate as experimental indicators. The results showed that the average absolute errors for the rotation angle of the throwing arm base and the rotation angle of the throwing head were 1.80° and 1.08°. The filling rate of the truck in the automatic feed throwing and loading system was 4.94 percentage points higher than that of the manually controlled feed loading system. And the average feed throwing loss rate was reduced by 0.45 percentage points compared with that of the manually controlled feed loading method, meeting the requirements for field harvesting.

Key words: silage harvester; automatic feed throwing and loading; discrete elements; control system

0 引言

青贮饲料是指将新鲜草料或青贮农作物秸秆通过一定的工艺技术加工后,制成的可长期贮存的优质饲料,具有贮存时间长、营养价值高等优点,近年来成为牛、羊等反刍动物的重要纤维性饲料原料[1-2]。目前,随着我国畜牧业规模化、集约化进程显著加速,青贮饲料作为畜牧养殖的核心饲料来源,其机械化高效收获与加工需求日益迫切[3]。采用青贮饲料收获机进行机械化收获作业是目前青贮饲料收获最常用的方式,该收获机能够在田间一次性完成对玉米、苜蓿、黑麦草等青贮作物的收割、切碎、籽粒破碎,并通过抛臂将破碎的饲料抛送至跟随的料车车斗内,显著提高了青贮饲料的收获效率[4]。然而,目前国内青贮饲料收获机的抛料装车环节仍高度依赖人工操作,由驾驶员或专业的操纵人员通过肉眼观察,利用手柄或遥控器控制抛臂的运动,使饲料能够抛入跟随料车车斗内,但存在劳动强度大、自动化程度低等问题[5-6],因此开展青贮饲料收获机自动抛料装车技术研究对提高收获机整机智能化水平、实现高效收获作业具有重要意义。

国外发达国家对青贮饲料收获机的研究起步较早,以克拉斯和约翰迪尔等大型农机企业为代表,在抛料装车方面已经实现了自动抛料装车技术的产品化应用,克拉斯 JAGUAR960 系列自走式青贮饲料收获机可选配 AUTO FILL 自动装载系统,该系统以数字 3D 图像分析原理为基础,通过摄像头采集收获机跟随料车图像,经处理后识别出车斗轮廓,由此自动控制抛臂使得饲料能够精准地抛送到料车中的指定位置,有效地提升了收获效率[7]。近年来,随着规模化养殖场对机械化收贮作业要求不断提升,国内青贮饲料收获机得到了快速发展,但对于青贮饲料收获机自动抛料装车技术的研究整体还处于初始研发阶段,ZHANG 等[8]基于深度视觉信息提取实现对跟随料车车斗的识别,并通过建立位姿变换矩阵完成了车斗空间位置的定位,但对实际作业过程中抛臂的运动控制未开展进一步的研究;LIU 等[9-10]利用深度学习方法完成了对车斗边界的识别,并基于此提出了一种改进 PID 控制器的抛臂轨迹跟踪控制方法;尤泳等[11]基于旋转目标检测算法直接获取了期望落料点和实际落料点的位置信息,并利用 Arduino 控制器实现对抛送筒的运动控制。

上述研究为开展青贮饲料收获机自动抛料装车技术研究提供了参考,但多数研究未充分考虑青贮饲料收获机抛料作业过程中饲料填装均匀性问题及抛臂运动实时控制问题。因此本文基于我国畜牧业规模化发展需求,针对青贮收获抛料装车环节,设计青贮饲料收获机自动抛料装车系统,以期实现对跟随料车车斗的均匀填装和对抛臂运动的实时控制,提高青贮饲料收获机整机智能化水平。

1 总体方案

1.1 整体结构

青贮饲料收获机抛料系统内部整体结构如图 1 所示,主要由切碎装置、籽粒破碎装置、抛送风机和抛臂等组成。青贮作物在经过收获机最前方的割台收割喂入后,由切碎装置中的动刀和定刀将作物切碎成一定长度的饲料段,然后经由籽粒破碎装置将饲料流中果穗和秸秆等进行充分破碎,最后通过抛送风机将饲料沿着抛臂抛入跟随的料车车斗内,以完成整个收获作业过程[12]。

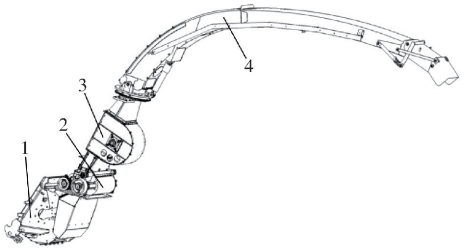


图 1 青贮饲料收获机抛料系统内部结构图

Fig. 1 Internal structure diagram of silage harvester throwing system

1. 切碎装置 2. 籽粒破碎装置 3. 抛送风机 4. 抛臂

1.2 抛料工作原理

青贮饲料收获机抛出饲料落点位置由抛臂控制,抛臂的运动主要包括了 3 个自由度,第 1 自由度为抛臂绕抛臂基座旋转中心的水平旋转自由度,主要控制抛料过程中饲料落点的左右位置变化;第 2

自由度为抛臂高度升降自由度，使收获机获得更大的抛送角度；第 3 自由度为抛头转动自由度，主要用于控制饲料落点距离抛臂基座旋转中心的远近位置。在青贮饲料收获机进行田间收获作业时，一般控制抛臂第 2 自由度使得抛臂升至最高，之后在抛料过程中不再调整抛臂高度，由第 1 自由度和第 3 自由度控制饲料落点左右前后 4 个方向的位置，即可实现收获过程中所有抛料位置的调整。

青贮饲料收获机实现自动抛料装车的关键在于完成跟随料车车斗识别与定位，并根据车斗具体位置控制抛臂运动，将饲料准确地抛送到料车车斗中的指定位置。在之前的研究中，通过田间实地采集和人工扩充采集相结合的方式建立了一个跟随料车车斗图像数据集，利用改进 DeepLabV3 + 算法以及直线拟合算法实现对车斗区域的识别，识别出的车斗区域 mIoU 高达 94.49%，同时获取了车斗 4 个角点在深度相机像素坐标下的位置，本文对饲料填装规则和抛臂运动控制展开进一步研究。

2　饲料填装规则设定与仿真分析

当获取到车斗 4 个角点的空间位置后，需要根据角点位置坐标在车斗区域内划分出一系列的抛料点，从而调整抛臂运动将抛出饲料流对准抛料点进行抛料作业[6]。现有针对抛料过程的研究多是沿着车斗长边的中线位置划分出一定数量的抛料点进行抛送[8,10]。但在青贮饲料收获机抛料作业时，饲料通常不是从车斗的正上方垂直向下抛出，而是与车斗平面呈一定角度并以较高的初速度抛出，因此受车斗高度和宽度的影响，饲料的实际落点将会更加靠近料车远端壁面。随着抛料过程的进行，饲料堆积高度不断增加，当远端壁面处的饲料高度达到车斗高度时，近端壁面处可能还存在一定的空间未填装满，此时继续抛送将导致远端壁面处的饲料抛出车斗范围，从而造成饲料抛送损失。因此为提高料车车斗空间利用率，本文对青贮饲料收获过程中抛出饲料在跟随料车车斗中的堆积模型开展研究，提出了一种基于车斗尺寸的饲料落点位置规划方法及填装规则，并进行 DEM 仿真验证分析。

2.1　饲料填装规则

由于深度相机的安装并非刚好垂直于车斗平面，因此相机的成像存在透视投影现象，从识别处理后的图像中得到的车斗形状并不是标准四边形，其 4 条边界中越远离收获机的边界越短。因此以相机拍摄得到的图像中最短边为基准沿长边方向划分出若干区域，以最短边处的区域作为第 1 区域开始进行逐区域抛送。同时，针对抛料作业时远近端堆积饲料分布不均匀的问题，将车斗沿短边方向进一步细分为近端区和远端区，如图 2 所示。将远端区的中心位置定义为远抛点，近端区的中心位置定义为近抛点，第 1 区域与第 n 区域的远/近抛点设定为与两边及中线等距的中心位置。每个区域的抛料流程又分 3 个阶段进行：第 1 阶段先将该区域的远抛点作为饲料理想落点进行抛料作业，控制抛臂运动使得饲料实际落点逼近理想落点，此时由于车斗壁面的阻挡作用，饲料将贴着远端壁面沿车斗高度方向堆积，通过深度相机检测远抛点处的饲料堆积高度，直至其达到指定阈值；第 2 阶段将近抛点设为饲料理想落点，调整抛臂对准近抛点进行抛送，此时由于远端区已堆满饲料，则由于堆积饲料的阻挡作用，饲料抛出后将逐渐在近端区堆积，直至近端区的饲料高度达到指定阈值。此时车斗内的饲料基本已装满车斗区域，但为了充分利用车斗空间，仍需在车斗顶面继续进行第 3 阶段的抛送作业。将中心点设为饲料理想落点，调整抛臂对中心位置进行补充抛送，直至中心点处的饲料堆积高度也达到指定阈值，则对于该区域的填装基本达到最大值，从而开始对下一区域进行填装作业，直至所有区域均填装完毕。

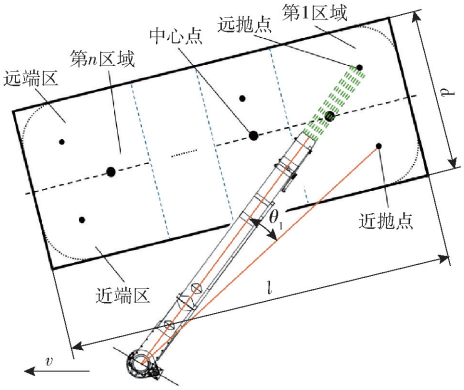


图 2　落点位置规划示意图

Fig. 2　Schematic plan of location of landing site

饲料在车斗内堆积时，其自然堆积模型如图 3 所示[13]，当已知青贮饲料的堆积角后，根据堆积模型底面直径即可确定饲料堆积高度。根据前面的填装规则，各阶段的抛送需保证堆积模型外轮廓不超出车斗范围，由于不同抛送阶段饲料落点在车斗空间中的位置分布不同、与车斗边界的距离不同，故其

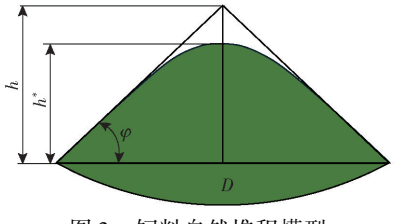


图 3　饲料自然堆积模型

Fig. 3　Feed natural accumulation model

饲料堆积高度阈值也不同。第 1、2 阶段对远/近抛点进行抛送,其饲料堆积模型的底面直径为车斗短边长度的一半,因此其理论堆积高度计算式为

$$h_1 = 0.25d\tan\varphi \tag{1}$$

式中 h_1——第 1、2 阶段理论堆积高度,m

φ——饲料堆积角,(°)

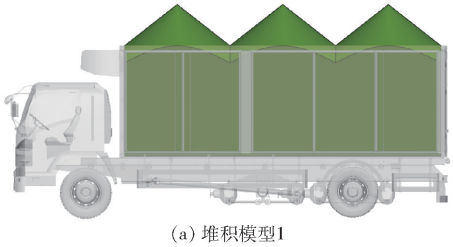
d——车斗短边长度,m

由于抛出饲料的速度较大,考虑到抛出饲料对堆积模型的“削峰作用”[14],实际饲料堆积高度会低于理论计算得到的高度,因此需设置一个调控因子 ζ,则第 1、2 阶段实际高度 h_1^* 阈值设置为

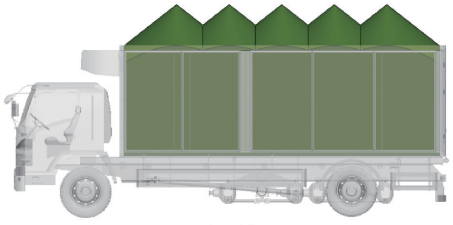
$$h_1^* = \zeta h_1 \tag{2}$$

通过测量仿真试验堆积模型的实际高度,计算得到调控因子 ζ 平均值为 0.79,为保证饲料不抛出车斗范围,ζ 值宜低不宜高,故将 ζ 取 0.7。第 3 阶段对中心点进行补充抛送,其饲料堆积模型的底面直径为第 1、2 阶段的 2 倍,故其高度阈值为 $2h_1^*$。

沿车斗长边方向划分出若干区域,则在车斗上方会形成多个相互干涉的饲料堆。由于用于饲料装载的料车种类并不唯一,因此如何确定中心点的数量及位置,对于充分利用车斗空间至关重要。本文在对饲料堆积过程进行理论分析和仿真验证后,提出了一种基于车斗长短边尺寸的中心点划分方法。



(a) 堆积模型1



(b) 堆积模型2

图 4 饲料堆积示意图

Fig. 4 Schematics of feed stacking

当对一空料车进行抛料时,先从远离青贮饲料收获机的短边一侧开始抛送,根据饲料堆积的特点,则第 1 区域和第 n 区域最后阶段的抛送需保证饲料堆的轮廓不超过车斗的 3 条边,因此这两区域的中心点距离车斗 3 条边的长度应当相同。由于车斗短边长度固定,则可确定第 1 区域和第 n 区域中心点的位置。若其余各区域均按照这两区域的大小进行划分,其堆积示意图如图 4a 所示,此时两相邻饲料堆之间的相贯线高度较小,在两饲料堆之间仍存在大量区域未填装完全。因此,实际抛料作业时需合理设置两相邻区域中心点之间的距离,以保证最大程度利用车斗空间。经综合考虑,将两相邻区域中心点之间的距离设置为车斗短边长度的一半,则此时所有中心点均为等距划分,相邻饲料堆之间的相贯线高度处于饲料堆整体高度的中间位置,使得饲料堆的中间区域空间得到充分利用,其堆积示意图如图 4b 所示。对于确定的料车,假设其短边长度为 d、长边长度为 l,则划分出的饲料落点数量为

$$[n] = \frac{2l}{d} - 1 \tag{3}$$

式中 $[n]$——不超过 n 的最大整数

由于料车车斗长边与短边的长度并不一定能够保证刚好满足饲料落点的划分关系,因此实际抛料作业过程中两落点之间的距离 l^* 为

$$l^* = \frac{l}{[n]+1} \tag{4}$$

2.2 基于离散元的饲料填装过程仿真试验

随着计算机技术的不断发展,离散元法(DEM)被广泛地用于分析农业机械与作物颗粒之间的相互作用,因此本文采用离散元法对提出的饲料填装规则进行验证[15]。对青贮饲料收获机收获的饲料进行分析与测量,建立其颗粒模型,如图 5 所示。设置料车属性为钢板,查阅相关文献后获得各材料属性参数如表 1 所示,材料接触参数如表 2 所示[16-17]。由于青贮作物在收获时含水率较高,收割的饲料经籽粒破碎后内部水分被压出并附着在饲料表面,使得刚收割的青贮饲料之间存在显著的粘附性。因此,为更好地模拟青贮饲料堆积特性,选用 Hertz - Mindlin with JKR 粘结性颗粒接触模型作为青贮饲料之间的接触模型。该模型在 Hertz - Mindlin 接触模型基础上引入了表面能,用于表征颗粒间因范德华力或液桥力产生的粘附效应,能够更好地模拟青贮饲料之间的粘弹性特征[18],根据相关研究,将其表面能系数设定为 0.273 5 J/m^3[19]。

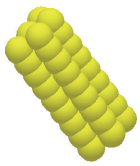


图 5 青贮饲料离散元模型

Fig. 5 Discrete elemental modeling of silage

表 1 材料属性参数

Tab. 1 Material property parameters

材料类型	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m^{-3})
青贮饲料颗粒	0.40	4.8×10^8	1 060
钢板	0.28	7.5×10^{10}	7 850

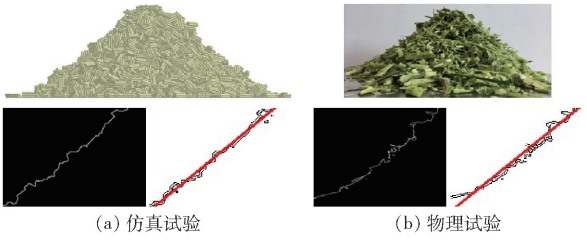
表 2　材料接触参数

Tab. 2　Material contact parameters

项目	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
饲料–饲料	0.325	0.495	0.078
饲料–钢板	0.350	0.420	0.119

在进行抛料过程仿真试验前，需要先验证所建立的青贮饲料离散元模型的准确性。通过堆积角试验，对比仿真试验堆积角和物理试验堆积角的差异，从而验证所建立离散元模型的准确性。

仿真试验在 EDEM 软件中进行，采用圆筒提升法获得青贮饲料的堆积模型，并导出仿真结果的正视图，如图 6a 所示。物理试验采用同样的方法得到其实际堆积模型，待堆积模型稳定后，利用相机拍摄青贮饲料堆积正视图像，如图 6b 所示，每种试验均以相同的步骤重复试验 10 次。为了获得准确的角度拟合结果，将获得的图像利用 Pycharm 软件进行图像二值化、轮廓提取和直线拟合等处理，最终得到直线与水平面的夹角即为测量的堆积角[20]。对所有图像进行处理后可得：EDEM 仿真试验所得的堆积角平均值为 39.65°，物理试验所得的青贮饲料实际堆积角平均值为 39.073°，二者误差仅为 1.5%，表明建立的青贮饲料离散元模型准确有效。



(a) 仿真试验　　(b) 物理试验

图 6　青贮饲料堆积角测定对比

Fig. 6　Comparison of silage stacking angle measurements

青贮饲料收获机的抛送高度为 4.9 ~ 5.6 m，农用货车车体高度为 2.5 ~ 4.0 m。故在青贮饲料收获机抛料过程中，抛头与跟随料车车斗顶部平面之间的距离一般不超过 3.1 m，因此在 EDEM 软件中将饲料抛出点距离车斗高度设定为 3.1 m。以常见的 4.2 m 高栏货车为例，建立其车斗模型尺寸为 4.2 m × 2.05 m × 2.1 m。按照 2.1 节提出的落点规划方法划分出饲料中心点共 3 个，然后设定饲料流抛出方向与水平面夹角分别为 30°、45°和 60°。对沿中线位置抛送和按照本文提出的填装规则抛送两种方法进行 DEM 仿真，最终抛送结果需保证饲料不抛出车斗范围。试验结束后得到不同的饲料堆积模型，将模型数据导出并绘制饲料高度云图后得到试验结果云图，如图 7 所示。当按照传统方法沿中线位置抛送时，其最终堆积模型如图 7a 所示。可以明显看出，远端区域饲料堆积高度已经基本达到车斗高度值，但靠近收获机一侧存在大量未填充完全的区域，且随着与水平面夹角减小，未填装区域空间也随之增大。按照本文设定的填装规则抛送的结果如图 7b 所示，可看出车斗区域基本被完全填装完毕，在中间位置形成了较为明显的 3 个饲料堆积中心点，由中心点向外堆积高度逐渐降低，与理论分析结果一致。且不同抛出方向对车斗最终填装效果几乎没有影响，表明提出的饲料填装规则能够适应田间收获时的各种抛送情况，实现对车斗空间的充分利用，提高收获效率。

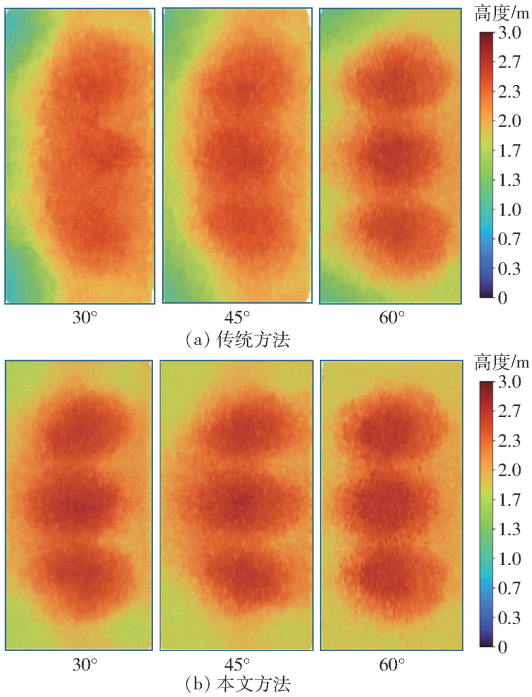


图 7　饲料堆积高度云图

Fig. 7　Feed pile height cloud map

3　抛臂运动学分析

3.1　饲料轨迹运算

当青贮植株在被收割喂入后，先进行切碎和籽粒破碎，之后通过抛送风机加速并经由抛臂沿抛头方向以一定的初速度抛出。当抛头转动角度发生变化时，饲料的抛出方向随之变化，但其初速度大小不会发生变化，该过程可以视为具备一定初速度和抛出角度的斜抛运动。以饲料抛出点为坐标原点建立坐标系，则饲料抛送轨迹示意图如图 8 所示，根据物体斜抛运动的公式可得到饲料的抛送轨迹方程为

$$y_p = x_p \tan\theta + \frac{g x_p^2}{2 v_0^2 \cos^2\theta} \tag{5}$$

式中　(x_p, y_p)——实际饲料流轨迹坐标

θ——抛头方向与 x 轴正向之间的夹角，取绝对值，(°)

v_0——饲料抛出初速度，m/s

g——重力加速度,m/s^2

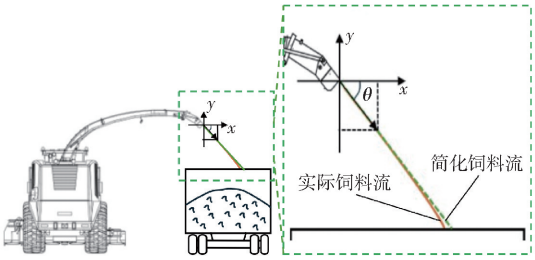


图 8 青贮饲料抛送轨迹示意图

Fig. 8 Schematic of silage casting trajectory

根据文献[21]所述,饲料在抛出后以超 50 m/s 的速度在空气中运动。考虑到饲料抛出初速度较大,为简化模型,利用直线运动来替代饲料抛出后的斜抛运动。取其最小初速度 50 m/s 进行分析,饲料在抛出点沿饲料抛出初速度方向运动的直线方程为

$$y_l = x_l \tan\theta \tag{6}$$

式中 (x_l, y_l)——简化饲料流轨迹坐标

当青贮饲料收获机在田间作业时,跟随料车一般位于青贮饲料收获机侧后方,抛头与 x 轴之间的夹角 θ 一般为 30°~90°。根据最低转动角度和抛头与跟随料车顶面之间最大距离进行分析,采用直线简化饲料抛送运动轨迹的最大水平偏差距离 Δx 为

$$\Delta x = |x_p - x_l| = |5.25 - 5.37| = 0.12 \text{ m} \tag{7}$$

相对误差 ε 为

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_p} \times 100\% = \frac{0.12}{5.25} \times 100\% = 2.29\% \tag{8}$$

对于抛料过程来说,二者最大水平偏差距离的相对误差较小,可忽略不计。田间收获作业过程如图 9 所示,可看出饲料抛出后其抛送轨迹近似呈直线状,与理论分析结果一致。且抛出饲料相对集中,不存在抛散现象,表明利用直线替换饲料抛送的运动轨迹具备较高的可靠性。



图 9 青贮饲料实际抛送轨迹

Fig. 9 Actual silage casting trajectory

3.2 抛臂正运动学分析

通过对青贮饲料收获机抛臂结构及运动过程进行分析,可将其视为一个特殊的串联机械臂。对机械臂进行正运动学分析后,可以根据已知的关节变量得到机械臂末端相对于基准坐标系的位置与姿态。目前机械臂建模方法中最常用的是 Denavit - Hartenberg(D - H)建模法。该方法需要为机械臂的每个连杆建立一个局部坐标系,并构建两相邻坐标系之间的齐次变换矩阵,然后将机械臂上所有相邻连杆的变换矩阵依次相乘,从而将末端处的位置信息传递到基准坐标系[22]。改进 D - H 建模法在传统方法的基础上将连杆坐标系原点设定在各连杆首端,使得机械臂更加便于建模和计算,故本文采用改进 D - H 建模法对抛臂进行正运动学分析[23]。

本文以中机美诺 9360B 系列青贮饲料收获机为研究对象。根据该收获机抛臂结构特点可知:抛臂整体共有 4 个旋转关节,由于本文将饲料抛送轨迹直接简化为直线,因此可以将抛出饲料的运动视为抛臂末端的一个移动自由度。从而将抛臂视为由 4 个旋转关节和 1 个移动关节组成的特殊结构的 5 自由度串联机械臂,由此可通过正运动学方程直接得到抛料落点在基准坐标系下的空间位置。根据改进 D - H 建模法的定义建立其连杆坐标系,如图 10 所示。本文将基准坐标系原点 O_0 设置为与抛臂基座水平旋转坐标系原点 O_1 重合,Z 轴垂直于水平面向上,Y 轴始终指向收获机前进方向,X 轴由二者确定,其余坐标系原点建立在抛臂各关节的旋转中心。建立抛臂改进 D - H 参数表如表 3 所示。其中,α_{i-1} 和 a_{i-1} 分别为沿 X_{i-1} 轴观察时,Z_{i-1} 轴与 Z 轴之间的角度和距离;θ_i 和 d_i 分别为沿 Z_i 轴观察时,X_{i-1} 轴与 X 轴之间的角度和距离。

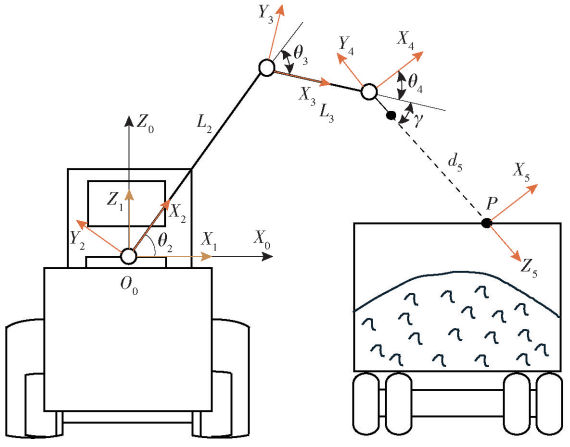


图 10 抛臂连杆坐标系

Fig. 10 Swing arm coordinate system

表 3 改进 D - H 参数

Tab. 3 Improved D - H parameters

i	α_{i-1}/(°)	a_{i-1}	θ_i	d_i
1	0	0	θ_1	0
2	90	0	θ_2	0
3	0	L_2	θ_3	0
4	0	L_3	θ_4	0
5	90	0	0	d_5

根据改进 D－H 法参数建模的原理，抛臂由关节 $i-1$ 到关节 i 的齐次变换矩阵为[24]

$$ {}^{i-1}\boldsymbol{T}_i=\begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & a_{i-1} \\ s_i c_{\alpha_{i-1}} & c_i c_{\alpha_{i-1}} & -s_{\alpha_{i-1}} & -d_i s_{\alpha_{i-1}} \\ s_i s_{\alpha_{i-1}} & c_i s_{\alpha_{i-1}} & c_{\alpha_{i-1}} & d_i c_{\alpha_{i-1}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{9} $$

其中

$$ \begin{cases} c_i=\cos\theta_i \\ s_i=\sin\theta_i \\ c_{\alpha_{i-1}}=\cos\alpha_{i-1} \\ s_{\alpha_{i-1}}=\sin\alpha_{i-1} \end{cases} \tag{10} $$

根据表 3 中的数据，将抛臂各连杆的 D－H 参数代入等式(9)中，可获得相邻连杆的齐次变换矩阵分别为：${}^0\boldsymbol{T}_1$、${}^1\boldsymbol{T}_2$、${}^2\boldsymbol{T}_3$、${}^3\boldsymbol{T}_4$、${}^4\boldsymbol{T}_5$。通过将以上矩阵依次相乘，可计算得到青贮饲料收获机抛料落点位置相对于基准坐标系的位姿变换矩阵${}^0\boldsymbol{T}_5$，即

$$ {}^0\boldsymbol{T}_5={}^0\boldsymbol{T}_1{}^1\boldsymbol{T}_2{}^2\boldsymbol{T}_3{}^3\boldsymbol{T}_4{}^4\boldsymbol{T}_5=\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}= $$

$$ \begin{bmatrix} c_1c_{234} & s_1 & c_1s_{234} & c_1(L_2c_2+L_3c_{23}+d_5s_{234}) \\ s_1c_{234} & -c_1 & s_1s_{234} & s_1(L_2c_2+L_3c_{23}+d_5s_{234}) \\ s_{234} & 0 & -c_{234} & L_2s_2+L_3s_{23}-d_5c_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11} $$

根据矩阵相等对应位置矢量分别相等，则各位置矢量分量计算式为

$$ \begin{cases} n_x=c_1c_{234} \\ n_y=s_1c_{234} \\ n_z=s_{234} \\ o_x=s_1 \\ o_y=-c_1 \\ o_z=0 \\ a_x=c_1s_{234} \\ a_y=s_1s_{234} \\ a_z=-c_{234} \\ p_x=c_1(L_2c_2+L_3c_{23}+d_5s_{234}) \\ p_y=s_1(L_2c_2+L_3c_{23}+d_5s_{234}) \\ p_z=L_2s_2+L_3s_{23}-d_5c_{234} \end{cases} \tag{12} $$

其中，$c_{234}=\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4)$，其他同理。

通过测量得到 L_2、L_3 为 4 312.57、432.02 mm，当已知抛臂各部分的相对转动角度 θ_1、θ_2、θ_3、θ_4 及抛出饲料距离时，根据方程组即可计算得出位置矢量 $\boldsymbol{n}$、$\boldsymbol{o}$、$\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{p}$，从而确定末端点相对于基准坐标系的位置与姿态[25]。

为了验证所建立正运动学方程的准确性，利用 Matlab 软件中的 Robotics 工具箱对抛臂正运动学进行仿真，根据改进 D－H 法建立抛臂模型，将关节变量设定为 $(\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4)=\left(0,\frac{20.96\pi}{180},-\frac{\pi}{3},\frac{1.58(-60)+157.53}{180}\pi\right)$，$d_5=3$ m，得到仿真结果如图 11 所示[26]，再将参数代入式(11)得到计算结果为

$$ {}^0\boldsymbol{T}_5={}^0\boldsymbol{T}_1{}^1\boldsymbol{T}_2{}^2\boldsymbol{T}_3{}^3\boldsymbol{T}_4{}^4\boldsymbol{T}_5= \begin{bmatrix} 0.916 & 0 & 0.402 & 5.568 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0.402 & 0 & -916 & -1.477 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{13} $$

通过对比可知，仿真结果与正运动学公式计算结果相等，由此证明了正运动学分析结果的准确性。

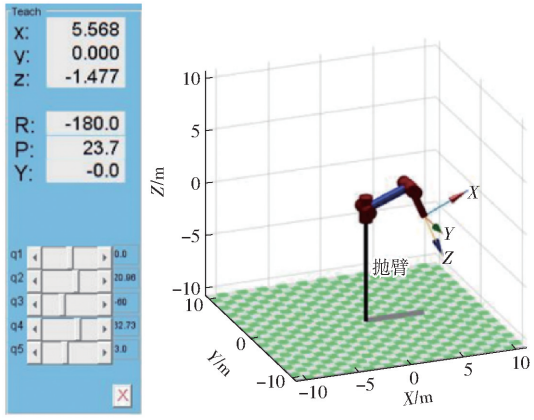


图 11　抛臂仿真模型

Fig. 11　Throwing arm simulation model

3.3　限定条件下的抛臂逆运动学分析

逆向运动学问题即在已知目标点的位姿后，通过逆运动学方程求解抛臂的各关节变量。在本文中，抛送饲料的运动视为抛臂末端的一个移动自由度，将末端点设定为 2.1 节研究中确定的规划落点，则此时该点即为抛料过程中的理想落点。根据理想落点的位置信息进行抛臂逆运动学分析，可获得到达理想落点处所需的抛臂各关节变量目标值。在获取到当前位置关节变量实际值后，根据目标值与实际值的差值控制抛臂关节的运动，使得饲料实际落点逼近理想落点。

在青贮饲料收获机抛料作业过程中，抛臂主节部分在升至最高后固定高度位置不动，故抛臂的关节角 θ_2 在整个抛料过程中将保持不变，可通过测量获得。同时由于抛臂结构的特殊性，抛头部分的连杆 3 与连杆 4 由一连杆机构连接，通过一个伸缩液压油缸同时进行驱动，因此图 10 中关节角 θ_3 与 γ

之间存在固定的线性关系。通过抛头部分转动获得两个关节角的多组数据,对二者进行线性拟合结果如图 12 所示,拟合直线的决定系数 $R^2=0.992$,表明二者具有极高的线性相关性,其线性关系式为

$$\gamma=1.58\theta_3+67.53 \tag{14}$$

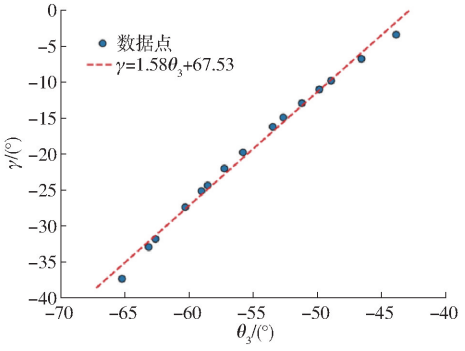


图 12 两角度线性拟合结果

Fig. 12 Two angle linear relationship

结合上述限定条件,抛臂在运动过程中的独立变量为 θ_1、θ_3 和 d_5。θ_1 能够控制抛臂在水平面内的左右旋转,即对应抛臂运动的第 1 自由度;θ_3 能够控制抛头相对于抛臂主节的转动,从而控制饲料落点的远近,即对应抛臂运动的第 3 自由度。因此本文主要关注 θ_1 和 θ_3 的数值变化,通过构建逆运动学方程对其具体数值进行求解。

(1)求解 θ_1

根据求解得到的抛臂正运动学方程 ${}^0\boldsymbol{T}_5={}^0\boldsymbol{T}_1{}^1\boldsymbol{T}_2{}^2\boldsymbol{T}_3{}^3\boldsymbol{T}_4{}^4\boldsymbol{T}_5$,在方程两端同时左乘 ${}^1\boldsymbol{T}_2^{-10}\boldsymbol{T}_1^{-1}$[27-28],得到

$${}^1\boldsymbol{T}_2^{-10}\boldsymbol{T}_1^{-10}\boldsymbol{T}_5={}^2\boldsymbol{T}_3{}^3\boldsymbol{T}_4{}^4\boldsymbol{T}_5=\begin{bmatrix} c_{34} & 0 & s_{34} & L_2+L_3c_3+d_5s_{34} \\ s_{34} & 0 & -c_{34} & L_3s_3-d_5c_{34} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{15}$$

记 $r(i,j)$、$l(i,j)$ 分别为矩阵 ${}^1\boldsymbol{T}_2^{-10}\boldsymbol{T}_1^{-10}\boldsymbol{T}_5$ 和矩阵 ${}^2\boldsymbol{T}_3{}^3\boldsymbol{T}_4{}^4\boldsymbol{T}_5$ 中第 i 行第 j 列的元素,根据式(15)中 $r(3,4)=l(3,4)$,可得

$$p_xs_1-p_yc_1=0 \tag{16}$$

故可求出 θ_1 为

$$\theta_1=\arctan(p_y/p_x) \tag{17}$$

(2)求解 θ_3

令式(15)中 $r(1,4)=l(1,4)$、$r(2,4)=l(2,4)$,可以得到

$$\begin{cases} p_xc_1c_2+p_ys_1c_2+p_zs_2=L_2+L_3c_3+d_5s_{34} \\ -p_xs_2c_1-p_ys_1s_2+p_zc_2=L_3s_3-d_5c_{34} \end{cases} \tag{18}$$

上述公式中末端点的坐标 (p_x,p_y,p_z) 已知,抛臂各段长度 L_2、L_3 也已知,抛臂主节的倾斜角度 θ_2 固定不变,故式(18)可简化为

$$\begin{cases} L_3c_3+d_5s_{34}=A \\ L_3s_3-d_5c_{34}=B \end{cases} \tag{19}$$

其中

$$\begin{cases} A=p_xc_1c_2+p_ys_1c_2+p_zs_2-L_2 \\ B=-p_xs_2c_1-p_ys_1s_2+p_zc_2 \end{cases} \tag{20}$$

同时由图 10 建立的连杆坐标系可知 $\theta_4=90°+\gamma$,再根据式(14)可以得出 θ_4 与 θ_3 的线性关系式,因此结合式(18)即可求出 θ_3 的隐式方程为

$$\tan(2.58\theta_3+157.53)=\frac{A-L_3\cos\theta_3}{B+L_3\sin\theta_3} \tag{21}$$

将式(13)得到的末端点坐标位置代入式(17)、(21)逆解出关节变量,通过计算得出 $\theta_1=0°$,$\theta_3=-60°$,与设定关节角相同,证明了逆运动学分析结果的准确性。

4 控制系统设计

4.1 控制系统方案

青贮饲料收获机抛臂的运动主要涉及 3 个自由度,分别由 3 个不同的机构进行驱动,而抛臂升降自由度在收获过程中保持不变,故其驱动液压油缸行程固定。为了能够准确获取到抛臂的运动信息,需要根据剩下 2 个自由度的运动情况和驱动装置空间位置分布情况,设置合理的信号采集装置。抛臂基座的驱动液压马达竖直分布,故在液压马达输出端通过一对啮合齿轮连接一个旋转编码器即可实现对抛臂基座水平旋转信号的采集。抛头的转动是相对于抛臂主节连接部位的转动,因此选用角位移传感器对抛头的相对转动信号进行采集。安装时利用支架将角位移传感器直接焊接在抛臂主节顶部,连杆机构的末端焊接在抛头顶部,之后通过标定测量出摆杆的初始角度。当抛头转动时带动摆杆绕中心转动,从而测量出其相对转动角度。

建立青贮饲料收获机自动抛料装车控制系统,主要由深度相机、工控机、控制器、信号检测模块、驱动模块等组成,如图 13 所示。在收获作业时,调节抛臂升至最高位置,将抛头调节对准车斗区域,启动自动抛料装车系统。由抛臂上方的深度相机对作业过程中的车斗进行拍摄,并通过工控机对其进行处理,获取到车斗的 4 个角点,然后结合深度信息及相机标定参数获得角点的世界坐标,从而划分出饲料理想落点。当获取到理想落点位置信息后进行逆运动学分析得出所需的关节角度目标值,同时由安装的旋转编码器和角位移传感器获取到抛臂当前关节角度实际值,将这些数据传输给控制器。控制器根据目标值与实际值的差值,通过电液比例阀控制液压马达和伸缩液压油缸的运动,使得对应关节角实际值向目标值靠近。旋转编码器和角位移传感器对

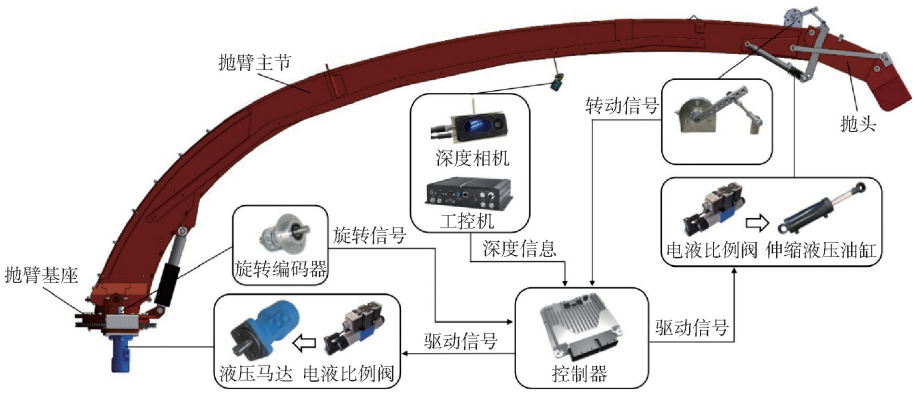


图 13　自动抛料装车控制系统构成图

Fig. 13　Schematic of automatic material loading control system

关节角的实际值进行反馈，当检测到角度达到目标值 ±1°范围时即可认定饲料的实际落点达到了理想落点，以防止因微小角度变化导致系统频繁调整。深度相机对相应落点处的饲料堆积高度进行检测，当达到指定阈值时控制抛臂转向，对下一落点进行抛送。按照设定饲料填装规则依次装满所有区域，最终完成整个自动抛料装车作业过程。

4.2　控制系统组成

4.2.1　控制器

中机美诺 9360B 系列青贮饲料收获机整车电控系统采用徐州威卡电子控制技术有限公司生产的 F501 型控制器。该控制器集成了高速运算芯片，具有端口诊断功能，能对各种故障类型进行快速、准确的判断。控制器共有 154 个管脚、4 路 CAN 通信接口，实现控制器运行的公用端口、数据通信及收获机主要收获作业功能共使用了 122 个管脚，剩余管脚功能完全能够满足自动抛料装车控制系统需求。故直接在整车控制器上增加自动抛料装车子控制系统，并通过设置开关按钮来实现功能切换。

4.2.2　工控机

工控机选用临滴科技有限公司生产的 LPA3588 嵌入式智能计算机，其基于瑞芯微 RK3588 芯片设计，集成 ARM Mali－G610 MP4 四核 GPU 图像处理器，支持 8 路 AHD 摄像头同时接入，通过 CAN 总线实现数据传输，同时支持多种操作系统，具有极高的可扩展性。

4.2.3　旋转编码器

编码器选用 CONTRINEX 公司的 CXGA 58B 型旋转编码器。该编码器单圈分辨率最大可达 14 位、单圈精度在 ± 0.35° 内、内部循环时间小于等于 600 μs，检测精度高。同时支持 CANopen 协议，能够通过 CAN 总线进行编码器与控制器之间的高效数据传输，实现高精度控制。

4.2.4　角位移传感器

选用徐州威卡电子控制技术有限公司 RAT880 系列角位移传感器进行抛头部分相对转动角度的测量。该传感器输出信号为 4 ~ 20 mA，采用霍尔芯片，并通过滤波补偿、非线性校正、温度补偿等技术保证传感器在各种恶劣工况下仍然保持极高的安全性能。

4.2.5　深度相机

选用 Goermicro 公司 NYX660 型 ToF 深度相机。该相机能够实现水平 70°、垂直 50°的大视场角范围探测，满足青贮饲料收获机田间作业需求。为了获取到车斗 4 个角点在世界坐标系下的空间位置，需要首先完成相机的标定。相机标定的过程就是确定二维像素坐标系到三维世界坐标系之间的变换矩阵，其中涉及世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系和像素坐标系之间依次的变换关系。

（1）相机内参标定

将空间中的物体由三维相机坐标系转换到二维像素坐标系的过程称为透视投影变换，二者之间的变换参数即为相机内参，其具体关系式为[29]

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x & 0 \\ 0 & f_y & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \tag{22}$$

式中　(u,v)——像素坐标系下的点坐标

(X_c,Y_c,Z_c)——相机坐标系下的点坐标

(c_x,c_y)——相机主点坐标

f_x、f_y——相机在 x、y 方向上的焦距，mm

由于 NYX660 型深度相机在出厂前已进行了相机内参标定，故可直接获取其内参矩阵参数。将深度相机与计算机连接，并使用 24 V 直流电源对相机进行供电，之后利用相机厂商提供的 ScepterSDK 在 PyCharm 软件中直接获取得到主点坐标（307.894 mm，240.164 mm），x、y 方向的焦距分别为 411.746、

444.474 mm。

(2)相机外参标定

将相机安装在中机美诺 9360B 系列青贮饲料收获机上,调整到合适的视角以保证能够拍摄到收获机的侧后方来车。由于收获过程中抛臂升至最高位置后高度始终保持不变,故相机坐标系与抛臂基座水平旋转坐标系的相对位置固定。为了确定两个坐标系之间的变换关系,需构建两坐标系之间的旋转平移矩阵,其具体关系式为[30-31]

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \boldsymbol{R} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} + \boldsymbol{T} \tag{23}$$

式中 (X_w, Y_w, Z_w)——抛臂基座水平旋转坐标系点坐标

$\boldsymbol{R}$——旋转变换矩阵

$\boldsymbol{T}$——平移矩阵

将运动学分析中所建立的基准坐标系作为世界坐标系,则当抛臂水平旋转时,基座水平旋转坐标系与世界坐标系相对位置改变,其变化角度可通过旋转编码器进行测量。故根据测量获得的旋转角度与上述外参变换矩阵,即可得出相机坐标系与世界坐标系之间的变换关系。再结合相机内参矩阵,最终确定相机像素坐标系中获得的饲料理想落点在世界坐标系下的空间位置。

5 田间试验

5.1 试验材料与方法

在河北省固安县和湖北省黄梅县开展田间试验,收获植株选择籽粒达到乳熟末期至蜡熟前期青贮玉米植株。收获机采用中机美诺 9360B 系列青贮饲料收获机,割幅宽度为 3.6 m、发动机匹配功率为 343 kW、收获后地面留茬高度小于等于 12 cm。将自动抛料装车系统搭载到 9360B 系列青贮饲料收获机上进行田间收获作业,试验过程如图 14 所示。



图 14 青贮收获田间试验

Fig. 14 Field trial of silage harvesting

5.1.1 抛臂运动控制性能试验

为了测试自动抛料装车系统控制性能,导出田间收获作业过程中多个时间节点处旋转编码器和角位移传感器检测到的关节角度实际值,以及当前时刻抛送理想落点所对应的关节角度目标值。以关节角度实际值与目标值之间的角度误差、最大绝对误差和平均误差为试验指标对系统控制性能进行评价。系统的角度误差 σ 定义为

$$\sigma = \theta_s - \theta_m \tag{24}$$

式中 θ_s——实际关节角,(°)

θ_m——目标关节角,(°)

5.1.2 自动抛料装车作业效果对比试验

为了验证本文所提出填装规则的装载效果及自动抛料装车系统的实际作业效果,将传统人工控制抛料装车作为对照组,以料车填装率和饲料抛送损失率作为评价指标开展对照试验。在试验时各试验组的跟随料车均位于收获机侧后方几乎相同位置,且二者均以 8 km/h 的速度行驶。

(1)料车填装率测算

由于田间收获试验时跟随料车种类并不唯一,因此为了能够量化料车内饲料的装载情况,以填装率评估各料车的装载情况,填装率 ξ 定义为

$$\xi = \frac{m_s}{m_m} \times 100\% \tag{25}$$

式中 m_s——料车实际装载质量,kg

m_m——料车理论满载质量,kg

料车理论满载质量可根据各料车车斗尺寸和物料密度进行测算,料车实际装载质量通过地磅进行称量。在收获作业前利用地磅对空载料车进行称量,在填装完毕后称量料车整体质量,进而计算出料车实际装载质量。

(2)饲料抛送损失率测算

抛送损失率定义为收获区域内抛送至地面的饲料质量占收获区域理论收获饲料总质量的百分比。为准确地量化抛送损失率,试验前在试验田内划分出一个四方形的测区,测区内按照 GB/T 5262—2008 中规定的五点取样法确定取样点位。以每个点位为中心按收获机收割时的留茬高度割取周围 1 m^2 玉米植株,立即称量其质量并计算算术平均值作为该试验田内单位面积收获饲料质量,在完成青贮收获后通过测量地块面积测算出收获的总产量。同时收集所测量地块内所有抛送到田间的饲料质量,则其饲料抛送损失率 p 计算式为

$$p = \frac{G_s}{G} = \frac{G_s}{G_l S} \times 100\% \tag{26}$$

式中 G_s——抛送损失质量,kg

G_l——单位面积收获饲料质量,kg/m^2

S——收获试验田面积,m^2

G——收获饲料总产量,kg

5.2　试验结果

5.2.1　抛臂运动控制性能试验结果与分析

随机导出田间收获作业过程中 10 个节点处关节角度的目标值与实际值，计算后获得角度误差如图 15 所示。根据图中数据，抛臂基座旋转角度误差和抛头转动角度误差的范围均稳定在 -4° ~ 4°之间，其最大绝对误差分别为 3.26°和 2.41°，平均绝对误差分别为 1.80°和 1.08°。抛臂基座旋转角度误差的波动略大于抛头转动角度误差，究其原因主要是由于收获过程中料车会与收获机保持较大的安全距离，使得理想落点与抛臂基座旋转中心距离较远，基座旋转范围相比于抛头转动范围更大，由于田间地形起伏变化和机械振动等带来的扰动导致运动控制误差也相对较大。总体而言，试验结果符合田间作业场景，控制误差基本满足作业需求，表明自动抛料装车控制系统具有较强的稳定性和可靠性。

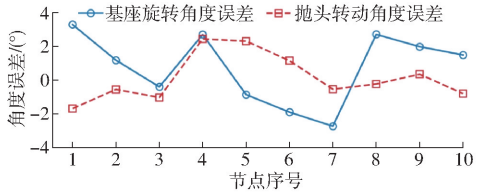


图 15　运动角度误差变化曲线

Fig. 15　Variation curves of motion angle error

5.2.2　自动抛料装车作业效果对比试验结果与分析

为提高料车装载量，农用料车在收获作业时大都进行了一定程度的改装，其实际质量与料车出厂质量相差较大，因此在田间试验前需对空载料车质量进行称量。本次用于填装试验的料车共有 3 辆，通过地磅称量可获得其空载质量分别为 4 189、4 983、5 032 kg。试验时采用两种抛料装车方法分别对 3 辆料车进行填装，收获后称量料车总质量，在除去空载质量后即可获得料车实际装载饲料质量，分别统计各组试验结果，如表 4 所示。人工控制抛料装车方法料车的平均填装率为 91.87%，而基于本文所提出填装规则的自动抛料装车方法对料车的平均填装率达到了 96.81%，较人工控制方法提升了 4.94 个百分点，表明本文所提出的填装规则及抛料方法能够有效提高料车车斗空间的利用率。

抛料损失试验在 3 块试验田内进行，在开始收获试验前，先通过 5.1.2 节所述的试验方法测算得到各试验田单位面积收获饲料质量分别为 4.92、5.37、5.54 kg/m^2。在收获结束后利用手持式测亩仪分别测量各试验组所收获的试验田总面积，计算得到各试验组收获总质量。同时称量各自试验区域内所有抛送损失的饲料质量，计算后最终获得各组试验的抛送损失率如表 5 所示。根据表中数据可看出，自动抛料装车方法的抛送损失率平均值为 1.21%，比人工控制抛料装车方法低 0.45 个百分点。说明本文所研究的自动抛料装车系统作业效果优于传统人工控制抛料作业，有效减少了收获过程中的饲料损失，满足青贮饲料田间收获要求。

表 4　填装试验结果

Tab. 4　Results of filling test

抛料方法	车辆序号	总质量/kg	饲料质量/kg	理论满载质量/kg	填装率/%
人工抛料装车	料车 1	14 440	10 251	10 914	93.93
	料车 2	13 022	8 039	9 078	88.55
	料车 3	12 797	7 765	8 339	93.12
	平均值	13 420	8 685	9 444	91.87
自动抛料装车	料车 1	14 941	10 752	10 914	98.52
	料车 2	13 657	8 674	9 078	95.55
	料车 3	13 068	8 036	8 339	96.37
	平均值	13 889	9 154	9 444	96.81

表 5　抛料损失率试验结果

Tab. 5　Results of material loss rate test　%

抛料方法	试验田 1	试验田 2	试验田 3	平均值
人工抛料装车	1.67	1.49	1.83	1.66
自动抛料装车	1.15	0.86	1.62	1.21

6　结论

(1)通过对抛送饲料的堆积模型进行研究，提出了一种基于车斗尺寸的饲料落点规划方法和填装规则。并建立离散元模型开展 DEM 仿真试验验证，结果表明，提出的饲料填装方法在各个饲料抛送角度下均能实现更为均匀的填装，提高了车斗空间的利用率。

(2)对青贮饲料实际抛送轨迹进行简化，从而将抛臂和抛送饲料整体视为特殊结构的五自由度串联机械臂。利用改进 D-H 建模法建立连杆坐标系，对抛臂进行正运动学和逆运动学分析，得到饲料理想落点位置信息与关节变量之间的变换关系，通过理想落点位置坐标即可求解出各个关节角具体值，从而实现对抛臂的运动控制。

(3)搭建青贮饲料收获机自动抛料装车控制系统，以关节角度误差为试验指标开展抛臂运动控制性能试验。试验结果表明，抛臂基座旋转角度和抛头转动角度的平均绝对误差分别为 1.80°和 1.08°，控制误差基本满足作业需求。以料车填装率和抛送损失率为试验指标开展自动抛料装车作业效果对比试验。试验结果显示，自动抛料装车系统的料车平均填装率达到了 96.81%，较人工控制抛料装车提

升 4.94 个百分点,有效地提高了对车斗空间的利用率。自动抛料装车系统的抛送损失率平均值达到了 1.21%,较人工控制抛料装车降低 0.45 个百分点,表明采用自动抛料装车系统能够替代传统人工抛料作业,降低收获过程中的人工成本和劳动强度,提高收获效率。

参 考 文 献

[1] 刘杰, 杨蜜, 金孟达, 等. 青贮饲料营养价值、影响因素及其在家畜生产中的应用[J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60(2): 58 - 64.
LIU Jie, YANG Mi, JIN Mengda, et al. Nutritional value and affacting factors of silage and its application in livestock production[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2024, 60(2): 58 - 64. (in Chinese)

[2] KUNG L, SHAVER R D, GRANT R J, et al. Silage review: interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5): 4020 - 4033.

[3] 谭秀文, 崔绪奎, 金海, 等. 我国肉羊养殖生产全程机械化现状及发展建议[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(4): 51 - 57.
TAN Xiuwen, CUI Xukui, JIN Hai, et al. Current situation analysis and development suggestions on the whole process mechanized production of mutton sheep breeding in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4): 51 - 57. (in Chinese)

[4] 王泽群, 华荣江, 赫志飞, 等. 自走式青饲料收获机主要机械部件技术现状[J]. 农业工程, 2022, 12(3): 20 - 25.
WANG Zequn, HUA Rongjiang, HE Zhifei, et al. Technical status of main mechanical parts of self-propelled forage harvester [J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(3): 20 - 25. (in Chinese)

[5] 余永峰, 李雷霞, 刘淑平, 等. 青贮饲料机械化收获现状及关键技术[J]. 农业工程, 2025, 15(1): 7 - 13.
YU Yongfeng, LI Leixia, LIU Shuping, et al. Current status and key technologies of silage mechanized harvesting [J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(1): 7 - 13. (in Chinese)

[6] 苗中华, 陈苏跃, 何创新, 等. 基于3D 视觉的青饲机拖车车斗自动识别与定位方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 43 - 49.
MIAO Zhonghua, CHEN Suyue, HE Chuangxin, et al. Automatic identification and location method of forage harvester trailer hopper based on 3D vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 43 - 49. (in Chinese)

[7] LIU L, HOU S Y, DU Y F, et al. A trajectory tracking control method for the discharge arm of the self-propelled forage harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109627.

[8] ZHANG W, GONG L, CHEN S Y, et al. Autonomous identification and positioning of trucks during collaborative forage harvesting[J]. Sensors, 2021, 21(4): 1166.

[9] LIU L, DU Y F, LI X Y, et al. Trailer hopper automatic detection method for silage harvesting based improved U - Net[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107046.

[10] LIU L, DU Y F, LI X Y, et al. An automatic forage unloading method based on machine vision and material accumulation model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 208: 107770.

[11] 尤泳, 李芳旭, 纪中良, 等. 基于旋转目标检测的青贮机精准抛送系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 36 - 45.
YOU Yong, LI Fangxu, JI Zhongliang, et al. Design and experiment of the precise throwing system for silage machines based on rotating target detection[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(21): 36 - 45. (in Chinese)

[12] 牟孝栋, 姜慧新, 孙延成, 等. 青贮玉米收获机碟盘式籽粒破碎装置仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 218 - 226.
MU Xiaodong, JIANG Huixin, SUN Yancheng, et al. Simulation optimization and experiment of disc-type grain crushing device for silage corn harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 218 - 226. (in Chinese)

[13] 刘沅明, 唐凌思, 曾树华. 基于堆积模型的物料运输车控制系统研究[J]. 控制与信息技术, 2023(5): 55 - 61.
LIU Yuanming, TANG Lingsi, ZENG Shuhua. Research on control system for material transport vehicle based on stacking model [J]. Control and Information Technology, 2023(5): 55 - 61. (in Chinese)

[14] 杨娟. 基于堆积试验与离散元模拟的道砟级配对休止角影响的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
YANG Juan. Effect of particle gradation on the repose angle of ballast based on hopper flow test and discrete element simulation [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022. (in Chinese)

[15] 王守江, 颜丙新, 李立伟, 等. 基于离散元的肥料流重构玉米分层施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 138 - 150,184.
WANG Shoujiang, YAN Bingxin, LI Liwei, et al. Design and experiment of corn layer fertilization device with fertilizer flow reconstruction based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 138 - 150,184. (in Chinese)

[16] 刘海涛, 张炜, 马军民, 等. 青贮玉米饲料籽粒破碎装置仿真分析与试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(8): 32 - 39.
LIU Haitao, ZHANG Wei, MA Junmin, et al. Simulation analysis and experiment of silage corn feed grain crushing device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(8): 32 - 39. (in Chinese)

[17] LI G, MA J, TIAN X, et al. Discrete meta-simulation of silage based on RSM and GA - BP - GA optimization parameter

calibration[J]. Processes, 2023, 11(9): 2784.
[18] 朱新华, 伏胜康, 李旭东, 等. 不同含水率羊粪离散元参数通用标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 34-41.
ZHU Xinhua, FU Shengkang, LI Xudong, et al. General method for discrete element parameters calibration of goat manure with different moisture contents[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 34-41. (in Chinese)
[19] 王保兴. 自走式全混合日粮制备机的设计与优化[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
WANG Baoxing. Design and optimization of self-propelled total mixed ration preparation machine[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[20] 王小勇, 朱珺语, 张德, 等. 基于离散元的茶叶抖筛机茶叶运动特性分析与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 109-121,133.
WANG Xiaoyong, ZHU Junyu, ZHANG De, et al. Kinematic characteristic analysis and test of tea in tea vibrating-sifting machine based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 109-121,133. (in Chinese)
[21] LIU L, LI X Y, DU Y F, et al. Structure optimization for the discharge arm of the self-propelled forage harvester based on CFD-DEM[J]. Powder Technology, 2025, 449: 120399.
[22] 王怡, 方珍龙. 五自由度双清洗盘清洗机械臂的运动学分析与路径规划[J]. 船舶工程, 2025, 47(2): 119-128.
WANG Yi, FANG Zhenlong. Kinematic analysis and path planning of a 5-DOF cleaning robot arm with dual cleaning discs[J]. Ship Engineering, 2025, 47(2): 119-128. (in Chinese)
[23] 马艳艳, 曾台英, 江海林. 基于 MATLAB 的机械臂运动学分析和轨迹规划[J]. 包装工程, 2023, 44(3): 187-193.
MA Yanyan, ZENG Taiying, JIANG Hailin. Kinematics analysis and trajectory planning of manipulator based on MATLAB[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(3): 187-193. (in Chinese)
[24] 韩兴国, 宋小辉, 殷鸣, 等. 6R 焊接机器人逆解算法与焊接轨迹误差分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 384-390,412.
HAN Xingguo, SONG Xiaohui, YIN Ming, et al. Solution of inverse kinematics and welding trajectory error analysis for 6R welding robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 384-390,412. (in Chinese)
[25] 王基月, 张晓莹. 混凝土液压拆除机械臂运动学分析与研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(14): 28-30.
WANG Jiyue, ZHANG Xiaoying. Kinematic analysis and research on concrete hydraulic demolition manipulator[J]. Machine Tools & Hydraulics, 2019, 47(14): 28-30. (in Chinese)
[26] 冷肃. 煤矿巷道喷浆机械臂设计与运动控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2023.
LENG Su. Research on the design and motion control of coal mine roadway shotcrete mechanical arm[D]. Chongqing: Chongqing University, 2023. (in Chinese)
[27] 张鑫, 刘长润, 李旭, 等. 液压支架顶梁焊接机械臂的运动学分析与仿真[J]. 机床与液压, 2024, 52(13): 169-175.
ZHANG Xin, LIU Changrun, LI Xu, et al. Kinematics analysis and simulation of top beam welding manipulator of hydraulic support[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(13): 169-175. (in Chinese)
[28] 梁相龙, 姚志凯, 邓文翔, 等. 六自由度液压机械臂运动学标定和逆解研究[J]. 机械工程学报, 2025, 61(2): 346-357.
LIANG Xianglong, YAO Zhikai, DENG Wenxiang, et al. Research on kinematic calibration and inverse solution of 6-DOF hydraulic manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(2): 346-357. (in Chinese)
[29] 李旭, 阳奥凯, 刘青, 等. 基于 ORB-SLAM2 的温室移动机器人定位研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 1): 317-324,345.
LI Xu, YANG Aokai, LIU Qing, et al. Greenhouse mobile robot localization based on ORB-SLAM2[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp.1): 317-324,345. (in Chinese)
[30] 江庆, 安东, 韩华宇, 等. 基于激光雷达与 RGB 相机融合的玉米作物行检测算法研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 263-274.
JIANG Qing, AN Dong, HAN Huayu, et al. Maize crop row detection algorithm based on fusion of LiDAR and RGB camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 263-274. (in Chinese)
[31] 薛金林, 褚阳阳, 宋悦, 等. 基于自适应阈值 ORB 特征提取的果园双目稠密地图构建[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 42-51,59.
XUE Jinlin, CHU Yangyang, SONG Yue, et al. Construction of binocular dense map of orchard based on adaptive threshold ORB feature extraction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 42-51,59. (in Chinese)