

我国秸秆粉碎机的研究现状与展望

祖宇, 郝玲, 董良杰* (吉林农业大学, 吉林长春 130118)

摘要 我国是生物质产出大国, 随着对生物质能的不断开发与利用, 对生物质的粉碎就显得十分的重要。该文概述了我国秸秆粉碎机的研究发展现状, 研究了现有粉碎机如铡切式、锤片式、揉切式和组合式粉碎机的结构特点、性能参数及粉碎的基本原理, 阐述了今后秸秆粉碎机的发展趋势, 提出要重视对秸秆粉碎机的理论研究与创新, 优化现有的粉碎设备, 进一步改进和完善现有机型, 使各种机型的主要工作部件实现标准化。发展一体化联合加工设备, 大力开拓秸秆粉碎机的经济市场, 从而提高经济效益。

关键词 生物质; 粉碎技术; 现状

中图分类号 S226.8 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2012)03-01753-04

The Research Situation and Prospect of Straw-Muller in China

ZU Yu et al (Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118)

Abstract Biomass resources are abundant in China, with the increasing exploitation and utilization of biomass energy, the crushing of biomass is extremely vital. This paper summarized the present situation and development of straw-muller in China, and researched the structure features, performance parameters and basic principles of guillotine cut, hammer, knead cut and combined mullers, and analyzed the recent development and the general trend of muller, then put forward that we should put emphasis on the theoretical research and innovation of straw-muller, optimizing the existing crush equipment, further improving and perfecting the existing machines types, so that the main working parts of each machine type will be more standardized. We should develop integrated processing equipment, exploit the economic market of straw-muller greatly, thereby, improve the economic benefit.

Key words Biomass; Crushing technology; Existing situation

随着全球化石能源的消耗殆尽、环境问题的日益突出, 能源问题越来越受到人们的关注。能源是人类赖以生存发展的物质基础, 与社会的发展有着密切的关系。我国作为生物质产出大国, 应对对生物质的开发与利用放在重要的位置上。

同时, 我国又是农业大国, 生物质资源含量非常丰富, 现在每年农村的秸秆量就有 6.50 亿 t, 到 2010 年达 7.26 亿 t, 相当于 3 亿 t 标准煤^[1]。城市垃圾和生活废水、畜禽粪便等方面的生物质资源可达 6 亿 t 标准煤以上, 林业废弃物每年可达 3 700 万 hm²^[2]。但是这些资源至今未被充分利用, 也常常因为就地焚烧而污染环境。目前, 我国对生物质利用的主要技术有沼气工程、生物质气化、压缩成型燃料、与煤复合燃烧、生物质热裂解等。而生物质原料在开发利用前期都需要进行相应的粉碎加工处理, 由此可见, 生物质的粉碎是生物质能源利用转化与开发的必要前提条件。因此, 对生物质粉碎机的开发与研究也是必不可少的一部分, 其中以秸秆粉碎机最具有代表性。

1 秸秆粉碎机的研究意义

农作物秸秆是一种重要的生物资源, 如果处置不当, 不仅会造成资源的浪费, 更会对环境造成极大的破坏。因此, 如何做好农作物秸秆的转化工作, 已成为亟待解决的农业问题^[3]。大部分的秸秆原料在开发利用前都需要进行相应的粉碎加工等处理, 只有当生物质的粉碎颗粒符合一定的尺寸和要求时, 才能为后续的生物质研究与利用做好充分的准备。所以, 秸秆粉碎机的研究对生物质能的开发与利用有着

重要的意义。

虽然我国在秸秆粉碎技术方面相对较成熟, 粉碎机的种类与粉碎方式也是多种多样, 但从现有的粉碎设备的能耗、产量, 物料的适应性、粉碎粒度、经济性以及机型本身的工作稳定性、操作安全性、寿命、工作性能等多方面进行综合考虑, 还是有许多不完善的地方, 不能很好地满足各类生物质粉碎的要求^[4]。因此, 对对秸秆粉碎机的研究, 对我国生物质能源利用的经济化、商业化和促进农业的可持续发展都具有十分重要的意义。

2 粉碎机的研究现状

粉碎机的研制在国内已有几十年的历史, 其主要集中在饲料粉碎和农作物秸秆切碎等方面^[5]。粉碎技术根据粉碎方式和粉碎手段的不同可分为铡切式、锤片式、揉切式和组合式粉碎技术^[6]。在我国, 秸秆粉碎机普遍采用的是锤片式和爪齿式粉碎。

2.1 铡切式粉碎 铡切式粉碎的主要设备是铡草机, 也称为切碎机, 主要用来切断茎秆, 如谷草、稻草、麦秸、玉米秸秆等。铡草机的主要加工原理是切断, 其结构简单、功耗低、生产率较高。20 世纪 80~90 年代, 我国研制了许多机型, 按规格主要分为小型、中型和大型; 按切割方式可分为滚筒式和圆盘式; 按作业方式可分为田间直接收获机和固定式切碎机^[7]。

目前, 我国铡草机的研究技术比较成熟, 且种类机型也比较多, 能基本满足不同生产的需要。如新乡市兴田机械制造有限公司研制的 93QS-3 型铡草机, 其动力为 5.5 kW, 产量为 1 t/h (干草)、3 t/h (青草); 山西科惠农业发展有限公司生产的 93ZT-0.8 型铡草机, 动力为 1.5~2.2 kW, 产量为 500~800 kg/h^[8]。莱阳农学院研制的 9QS-1 型玉米饲料收获机, 与 8.8~11.0 kW 小四轮拖拉机配套, 直接在田间完成收

基金项目 长春市科技计划项目(2009095)。

作者简介 祖宇(1986-), 女, 辽宁葫芦岛人, 在读硕士, 从事新能源开发利用研究, Email: hldzuyu@126.com。* 通讯作者, 教授, 博士后, 硕士生导师, 从事生物质能方面的研究。

收稿日期 2011-10-20

获、切碎和收集等过程,并且采用了甩刀式切抛器,便于抛送切碎的物料,生产率为 500~2 000 kg/h,适用于小型农户作业。固定式切碎机代表机型主要有内蒙古赤峰市喀喇沁旗农牧机械厂生产的 9QS-70A、9QS-120 型,配套动力分别为 4.5 kW 和 13 kW,生产率分别为 3 000 kg/h 和 10 000 kg/h。

同时,浙江大学的宋慧芝等人以棉秆、桑枝等农作物硬茎秆为对象,对农作物硬茎秆切碎机的主要结构进行了参数设计,设计出了能够自动调节喂入高度的喂入机构和直刃刀切碎器,如图 1 所示。试验结果表明该机具有良好的切碎性能,且产量高、能耗低^[9]。由黑龙江省畜牧机械化研究所研究设计的 9ZS20-40 型秸秆铡碎机,通过对该机型主要工作部件及动力性能指标的设计研究计算,进而提高了秸秆的利用率和农作物秸秆直接喂饲的适用率^[10]。

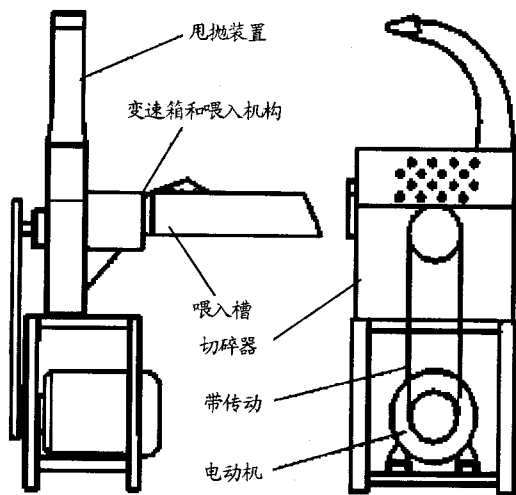


图1 自动调节喂入高度的喂入机构和直刃刀切碎器

2.2 锤片式粉碎 锤片式粉碎机是利用高速旋转的锤片击碎物料的一种机械,其具有粉碎质量好、维修方便和生产效率高优点,并且使用非常广泛^[11]。一般情况下,大部分粉碎秸秆的机型都选用锤片式粉碎机。锤片式粉碎机的粉碎原理是:生物质秸秆由进料口喂入粉碎室,经过锤片的高速旋转打击,从而得到一定程度的粉碎,同时,物料以较高的速度被抛向固定在粉碎室内部的齿板和筛片上,并受到齿板的碰撞和筛片的搓擦得到进一步的粉碎。粉碎过程在粉碎室内重复进行,直到物料可通过筛孔为止。如图 2 所示,锤片式粉碎机的喂入方式多为切向喂入和顶部喂入。影响粉碎机粉碎性能的主要因素包括:被粉碎物料的结构特点及物理特性、粉碎室的形状、粉碎机的结构、锤片的数量、厚度和线速度、筛孔的形状及其孔径、锤片末端与筛网间的间隙、物料的喂入量及空气流量等^[8,12]。

1975 年原第一机械工业部机械院农机所组织了 11 个省市 23 个单位对锤片式粉碎机进行了一系列试验选型和系列设计工作,把全国几十个品种统型为一个系列 6 种机型,即 9F-32、45、55 和 9FQ-40、50、60 型,初步完成了以 9F 系列锤片粉碎机为主的饲料粉碎机定型工作^[13]。20 世纪 90 年代以来全国各地相继开展研制了不同系列的锤片式粉碎机。据统计 2004 年我国约有 300 多家饲料粉碎机的生产企

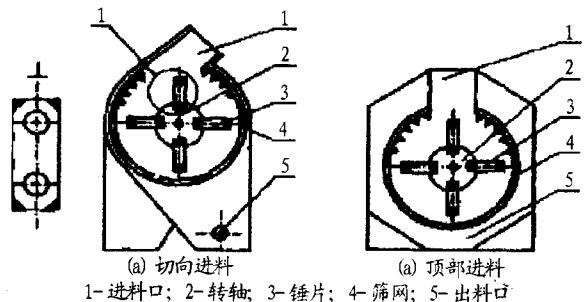


图2 锤片式粉碎机

业^[14]。如江苏正昌集团和江苏牧羊集团,引进了国外的先进技术设备,先后开发生产了水滴型粉碎机、立轴式粉碎机^[15-16]。其中,水滴型粉碎机采用了水滴型粉碎室,有利于提高粉碎效率,并且锤筛的间隙可调,能够进行粗、细、微 3 种粉碎,同时还具有自动负荷控制等特点。由上海春谷实业有限公司研制开发的横宽形振动筛锤片式粉碎机,是由电动机、振动器、多层筛体(筛体分内层筛和外层筛)、机体等组成。该机的生产效率高,物料的粉粒比较均匀,对含水率较高的物料和含纤维的物料都有较好的适应性,且具有筛片寿命长,锤片更换周期长等优点^[17-19]。

此外,上海春谷实业有限公司最新研制开发的振筛剪式锤片式粉碎机,经设计试验,在筛板内侧的物料运动环内均匀放置定锤,使定锤和动锤有规律地均匀错开^[20],结果能使筛板内物料的运动速度降低,使锤片末端与物料的速度差提高,从而达到提高粉碎效率的效果。刘文广、刘伟峰通过对粉碎室形状的分析与研究^[21],设计出一种新的粉碎室,如图 3 所示。即将圆形筛片弯曲成梯形的粉碎室,这种梯形粉碎室能有效破坏粉碎室内的环流层,增大筛理面积,对提高粉碎机的性能有一定实质性的意义。同时还有北京市旭世盛畜牧机械公司生产的 9FQ-40B、9FQ-SOB 型粉碎机,四川省自贡市浙飞机械厂生产的 9FZ23、29、35 型粉碎机,东省诸城市粉碎机厂生产的 9FQ40-28、9FQ40-1、9FQ32-26 型粉碎机等。

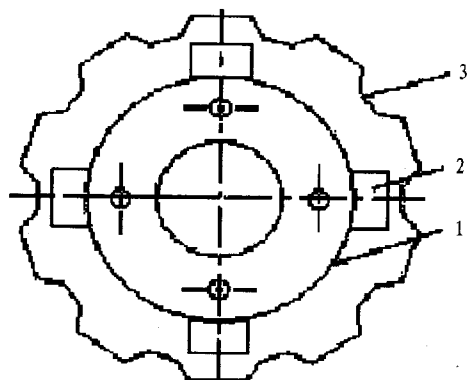


图3 一种新型粉碎室

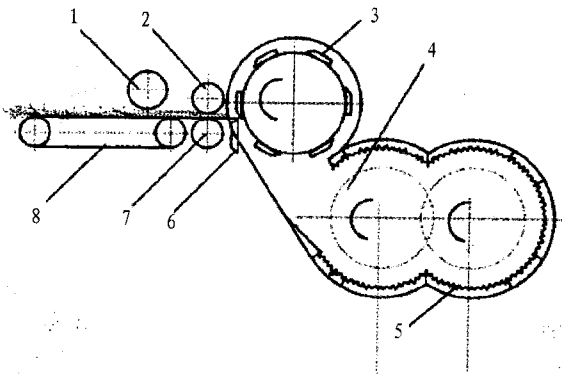
我国经过多年的潜心研究,锤片式粉碎机的技术水平和性能指标基本上能达到国际同类产品的先进水平。我国秸秆粉碎机企业生产的产品品种多、规格齐全,基本上能够满足

足我国生产发展的需要。但是锤片式粉碎机仍然存在能耗高、效率低等问题。

2.3 揉切式粉碎 揉切式粉碎包括揉搓机和揉碎机。

2.3.1 揉搓机。揉搓机主要由机架、喂入机构、锤片转子、变高度齿、刀片和风机等部件机构构成。工作时,高速旋转的锤片不断打击喂入的秸秆,同时机具凹板上装有变高度齿板和定刀,斜齿呈螺旋走向,从而保证了撞击后产生轴向运动,秸秆碎段经过隔板空缺部分流向机器的抛送室,然后再由风机抛出。

在我国,秸秆揉搓机大都采用螺旋排列的锤片进行揉搓,再借助风机抛送,加工的秸秆物料只能达到破碎或细碎的状态,生产率较低、耗能高、不适于高湿或韧性大的物料^[22]。图4所示的是最新设计的机型,其采用双螺杆螺旋揉搓推进机构,对物料进行强制揉搓与输送,从而保证了对物料的揉搓及顺畅的出料能力^[23]。为了适应秸秆等生物物质的粉碎加工发展需要,国内揉搓机的代表机型有:辽宁凤城东风机械厂生产的93RC-40型秸秆揉搓机,配套动力为7.5~10.0 kW,生产率为1 000 kg/h;江西红星机械厂生产的93FC-50型揉草机;山西省大同农牧机械厂的9RS-40型揉草机;吉林省农机研究所研制的9RF-40型揉搓粉碎机;郑州鑫地机械设备有限公司生产的9RQ-1、9RQ-2、9RQ-3型揉切粉碎机;安徽濉溪县农机推广站研制的9JX-300型秸秆揉搓机;北京燕京集团生产的9SC-400型揉草机等^[7-8]。



注:1.喂草轮;2.上喂入辊;3.滚刀;4.螺旋揉搓机械;5.齿板;6.定刀;7.下喂入辊;8.喂入带。

图4 双螺杆螺旋揉搓推进机构

由中国农业大学农业工程研究院研制的9LRZ-80型立式秸秆揉切机,采用了多动刀与定刀组合的多刀剪切,利用刀刃对物料的剪切性,并利用动刀与定刀之间的间隙对物料进行揉搓,由高速旋转的转子抛向揉搓室内壁,然后由转子再进行揉搓。在降低机器能耗的同时,又保证了物料的加工质量。揉搓机的动、定刀组的设计,立式喂入的结构设计,轴向喂入设计,改进的动刀结构及其加工工艺和定刀组加装弹簧的设计都是创新之处^[24]。

由黑龙江八一农垦大学研制的93RJ-40型揉搓机,其转子转速2 800 r/min,转子直径400 mm,锤片末端线速度59 m/s,度电产量130 kg/kW·h(玉米秸秆)^[25]。

由山西省长治市农机研究所开发的9RC-400型揉搓机,其转子转速1 900 r/min,转子直径400 mm,锤片末端线速度40 m/s,度电产量110 kg/kW·h(玉米秸秆)^[26]。河南农业大学研制的RC-11型高效秸秆揉搓机,该机项目属于国家863计划项目(2001AA514010)。其主要设计指标如下:生产率为3 000 kg/h,转子转速1 777 r/min,转子直径430 mm,锤片末端线速度40 m/s,度电产量270 kg/kW·h(秸秆)^[27]。但该机的度电产量高出其他同类机型一倍左右。

2.3.2 揉碎机。揉碎机是我国近年来研制生产的一种新型的粗饲料加工机械,是一种介于铡切和粉碎两种机械加工方式之间的新型加工方式。揉碎机加工的秸秆为柔软、蓬松的丝状段,具有适宜的 lengths 和粗细度(85%以上长度为4~12 mm,粗细度为2~6 mm),并被切成8~10 cm的碎段^[28]。揉碎加工不仅适用于新鲜的秸秆,同时对含水率较低的秸秆仍具有较好的揉碎效果。

揉碎机在我国出现的较晚,是20世纪90年代初提出的一种新型的粗加工的方式,所以在这方面的研究相对也比较少一些。目前主要的机型有北京市林海农牧机械厂的9RC-40粗饲料揉碎机,配套动力为7.5~13.0 kW,生产率为2 000 kg/h;吉林省九台市石河农具厂生产的9FRQ-40B型秸秆揉碎机;陕西西安市畜牧乳品机械厂生产的93F-45型揉碎机;陕西秦原生物有限责任公司生产的9RC-30型揉碎机等。

由内蒙古农业大学研制的9R-40型揉碎机可将玉米秸秆、豆秸、牧草等粗饲料揉碎成丝状。其转子转速2 700 r/min,转子直径400 mm,锤片末端线速度55 m/s,度电产量100~110 kg/kW·h(玉米秸秆)^[29-30]。中国农大学的于海燕对9RZ-60型秸秆揉切机的工作室进行了改进设计,并总结了该机型的主要技术特点。此外,还分析了动刀安装中挡块相对动刀的安装尺寸对动刀应力分布的影响^[31],为进一步改进揉切机的结构设计提供了理论基础并开拓了设计思路。9RS-700型茎秆揉碎机由黑龙江省八五二农场研制,其转子转速2 350 r/min,转子直径420 mm,锤片末端线速度为52 m/s,度电产量为80 kg/kW·h(玉米秸秆)^[32]。

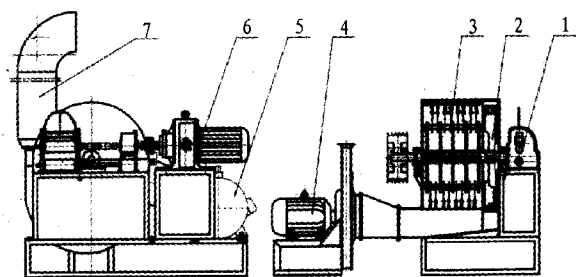
由山西省农业机械化科学研究院研制的悬挂式玉米秸秆揉碎机,能一次性完成秸秆的切割、输送、揉碎和收集等多项作业,可以在田间直接将秸秆揉碎,使其直接转化为饲料,以便于直接饲喂或做为后续加工的原料,从而使秸秆资源能够得以充分的利用^[33]。涂建平采用力学数学的方法对揉碎机动刀片的受力和在刀轴上的排列方式进行了理论分析和总结。并在“均力免震假设”的基础上,推导出常用刀片类型的结构参数优化方程;利用计算机高级语言程序对优化方程求解,得出了相应的刀片优化排列方式^[34],为秸秆加工机械的设计提供了相关的理论依据。

2.4 组合式粉碎 组合式粉碎技术是将铡切、粉碎和揉搓等功能组合为一体的新型粉碎技术。如北京顺诚明星机械厂生产的9FZ-700型多功能秸秆组合粉碎机,其粉碎室内装有高速旋转的锤片,上机体内装有定刀、动刀和齿板,加入

的物料在锤片的强烈打击及锤片与齿板之间的撕裂和搓擦等作用下迅速的被粉碎成粉状,由于离心力和粉碎机下腔负压的作用,被粉碎的物料通过筛孔落入出料口;黑龙江八一农垦大学研制的 93RZ-40 型揉浆机集切断、粉碎、揉搓功能于一体,物料在动刀、定刀、锤片和齿板的综合作用下被粉碎,在离心力和风机作用下排出,提高了粉碎的质量与效率。目前在江西必高生物质能科技有限公司、清华大学清洁能源研究与教育中心、北京佳禾木科技有限公司、辽宁天鑫饲料有限公司、江苏鼎元科技发展有限公司等企业均有使用该技术设备。

由农业部南京农业机械化研究所研究设计的 JF-720 型多功能秸秆粉碎机有揉搓与粉碎 2 个加工室,集揉搓与粉碎功能为一体,其技术性能稳定。该机主要由转子、揉搓破碎室、粉碎室、机座、上下壳体、物料输送料斗、传动装置等 5 大部分组成,配套动力为 30 kW。机器运行时,农作物秸秆由人工输送到揉搓破碎室,秸秆在刀片或锤片高速旋转形成的负压以及系统机构尾部风机的联合作用下进入揉搓破碎室,经刀片的高速剪切或锤片的强力揉搓,以及物料之间的碰撞摩擦之后,物料则进入粉碎室,经粉碎后的物料通过筛孔进入出料口。粉碎不同农作物秸秆时其能耗均稳定在 78 kW·h/t 左右,生产率均稳定在 0.8 t/h 左右,如不受人工输送原料快慢因素的影响,其生产率可达到 1 t/h^[35]。由于采用了负压吸料的加工原理,人工送料劳动强度小,加工时没有灰尘的污染,因此该机属于一种环保型的秸秆粉碎机械。

汪莉萍为了解决秸秆粉碎机的生产效率、降低能耗和对多种物料的适应性问题,确定从揉切工作部件、机器喂入方式和尺寸等方面进行研究,设计了 9FR-66 型秸秆粉碎机。如图 5 所示的是一种组合式粉碎机,它是将铡切、粉碎



注:1. 进料机构;2. 动刀切碎结构;3. 揉搓机构;4. 输送电机;5. 主电机;6. 进料机构调速电机;7. 出料管。

图 5 组合式粉碎机

和揉搓等功能组合成一体的机型^[36]。俞佳芝研究的 4Q-1.5 型秸秆粉碎机,使用了不同的切碎刀,同时使用了甩刀式和锤爪式的切碎刀,联合作业机可采用 L 型甩刀与锤爪型刀片配合使用,这是一种新型、实用、高效的秸秆粉碎机。在机器工作时,秸秆受到高速旋转锤爪(甩刀)的冲击。同时,由于锤爪高速旋转,在喂入口处形成负压,秸秆很容易被吸入机壳内,并且在机壳内的第一排定齿处进行第一次切割;接着切割后的秸秆流经折线型的机壳内壁,由于截面的变化导致气流速度不断变化,致使秸秆多次受到锤爪的撞击,从而使秸秆进一步被粉碎,最后被气流抛出去。该机动力配置适

当,环境适应性强,生产作业效率高,运行平稳,性能稳定^[37]。

3 结语

随着我国对农业资源不断开发与利用,对秸秆粉碎机的理论研究与创新显得尤为重要。因此,需要重视对秸秆粉碎机的理论研究与创新。优化现有的粉碎设备,进一步改进和完善现有机型,使各种机型的主要工作部件实现标准化。提高秸秆粉碎机的质量,降低能耗,增强机组的安全性。发展一体化联合加工设备,进而提高生产效率、降低劳动强度和加工成本,从而使经济效益更加显著。同时,根据不同地区特点及广大农民的需求,发展功能较为全面,价格适宜的粉碎设备,从而提高农民的积极性,为今后粉碎机的研究与发展打下坚实的群众基础。大力开拓秸秆粉碎机的经济市场,增加秸秆粉碎机的种类和机型,进而降低其生产成本,进一步促进秸秆粉碎机的研制和开发。

参考文献

- [1] 王雅鹏,孙凤莲,丁文斌,等.中国生物质能源开发利用探索性研究[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] 彭武厚,陆鑫.生物质能的电能转化[J].上海电力,2005(6):584-587.
- [3] 柴民杰,李磊,李金民.我国秸秆的利用现状及发展趋势分析[J].硅谷,2009(19):158.
- [4] 朱文德,陈永生,肖宏儒,等.我国生物质粉碎加工技术的研究进展[J].现代农业装备,2007(7):47-50.
- [5] 钱春华.桑枝削片粉碎机三维设计与结构分析的研究[D].南京:南京林业大学,2006.
- [6] 于海燕,刘向阳.秸秆饲料加工机械现状及进展[J].粮油加工与食品机械,2003(6):53-55.
- [7] 孟海波,曲峻岭,刘依.我国秸秆饲料加工机械现状及发展[J].中国农机化,2002,11(4):29-31.
- [8] 汪莉萍.复合式秸秆粉碎机设计方法理论研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2010.
- [9] 宋慧芝,盛奎川,钱湘群.农作物硬茎秆切碎机的设计研制[J].浙江大学学报,2003,29(2):157-160.
- [10] 于晓波,张凤菊,胡景媛.秸秆铡碎机的设计[J].农机化研究,2003,4(2):142-143.
- [11] 黄勇.锤片式粉碎机的调试、维护及保养[J].机械工程师,2006(3):159-160.
- [12] 黄亦其.锤片式粉碎机性能试验研究[J].中国农机化,2004(1):50-51.
- [13] 王卫国.饲料粉碎粒度研究[J].粮食与饲料工业,2000(8):22-23.
- [14] 刘晃.我国饲料粉碎机的现状与发展[J].渔业现代化,2004(1):42-43.
- [15] 谷文英.配合饲料工艺学[M].北京:中国轻工业出版社,1999.
- [16] 王与,王顺喜.饲料粉碎机发展现状分析[J].粮食与饲料工业,2007(10):29-32.
- [17] 俞信国.锤片粉碎机:中国,97234455.1[P].1999-03-12.
- [18] 俞信国,乐其呈,王靖.提高锤片式粉碎机加工饲料均匀度的问题[J].中国饲料,1998(18):12-14.
- [19] 俞信国,乐其呈,王靖.横宽形振动筛锤片式粉碎机[J].上海饲料,1998(6):33-36.
- [20] 俞信国.振筛剪式锤片粉碎机[C/OL].www.docin.com/p-219445853.html.
- [21] 刘文广,刘伟峰.梯形筛片对锤片式粉碎机性能影响的试验研究[J].农机化研究,2006(11):168-170.
- [22] 赵黎明.浅议秸秆机械化综合利用技术的应用[J].当代农机,2009(5):72-73.
- [23] 陈海霞,董德军,张凤菊.大型秸秆揉搓机的研究设计[J].农机化研究,2005(1):177-178.
- [24] 韩鲁佳,刘向阳,闫巧娟,等.9LRZ-80 型立式秸秆揉切机的研制[J].农业工程学报,1999(3):131-141.
- [25] 秦春兰,王新忠.牧草揉搓机的性能试验研究[J].黑龙江八一农垦大学学报,2002,14(2):59-60.

(下转第 1759 页)

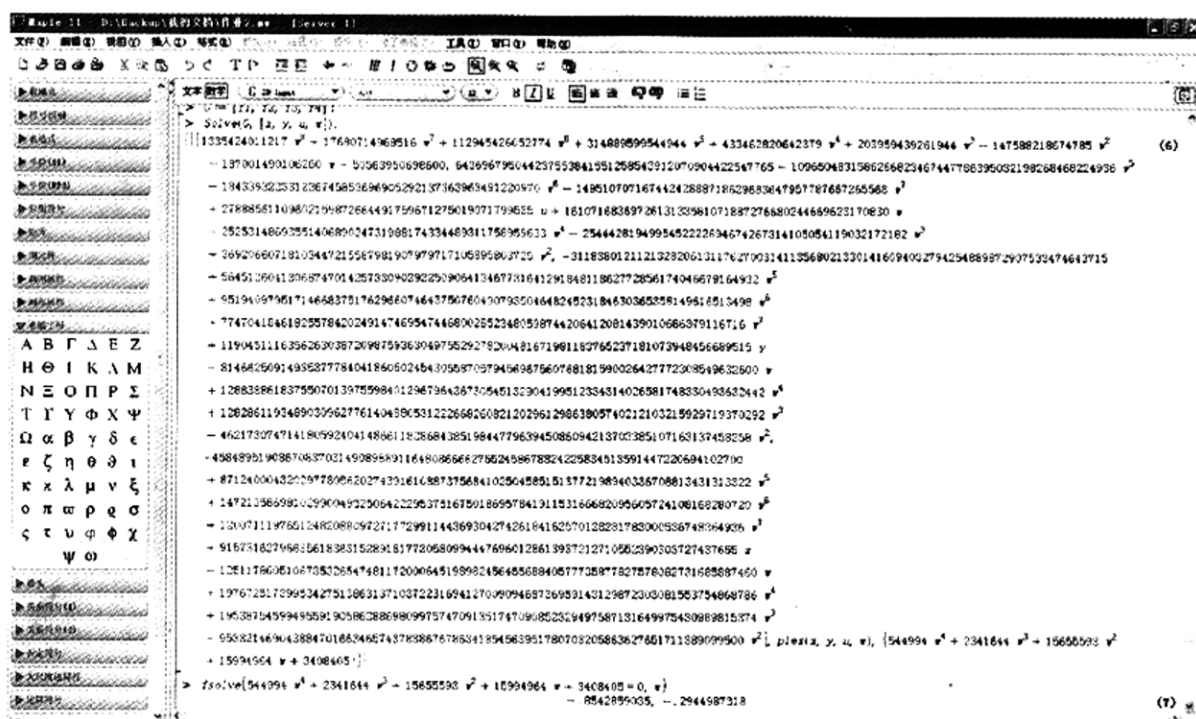


图3 Groebner基及w实数解

4 小结

针对采摘机械臂通用逆运动学求解问题,通过具体算例,对五自由度采摘机械臂建立通用运动学模型,构造一般方程组,并进行求解,验证了基于Groebner基法的采摘机械臂运动学通用算法的可行性。同时,受各方面条件限制,该算法无法直接由已知参数直接得到全部结果。在后续研究中,将对以上问题进行完善和改进。

逆运动学通用算法的建立,不仅对于采摘机械臂结构设计提供了更多选择,同时,结合计算机视觉等技术,将提高采摘机械臂工作精度和效率。

参考文献

[1] 宋健,张铁中,徐丽明,等. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业

机械学报,2006(5):158-162.

- [2] 赵匀,武传宇,胡旭东,等. 农业机器人的研究进展及存在的问题[J]. 农业工程学报,2003(1):20-24.
- [3] 陈磊,陈帝伊,马孝义. 果蔬采摘机器人的研究[J]. 农机化研究,2011(1):95-100.
- [4] 卢伟,宋爱国,蔡健荣,等. 柑橘采摘机器人结构设计及运动学算法[J]. 东南大学学报:自然科学版,2011(1):224-227.
- [5] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [6] 徐超. 可重构机器人研究的现状和展望[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2004(S1):32-34.
- [7] WENZ M, WORN H. Solving the inverse kinematics problem symbolically by means of knowledge-based and linear algebra-based methods[C]//Emerging Technologies and Factory Automation, 2007. ETFA. Patras: IEEE, 2007:1346-1353.
- [8] 杭鲁滨,王彦,杨廷力. 基于Groebner基法的一般串联6R机器人机构逆运动学分析[J]. 上海交通大学学报,2004(6):853-856.

(上接第1756页)

- [26] 李向兰. 9RC-400型饲草揉搓机的设计研究[J]. 山西农业大学学报, 2004(3):267-269.
- [27] 赵祥雄. RC-11型高效秸秆揉搓机研究设计[J]. 江西农业学报,2007, 19(9):126-127.
- [28] 郭庭双. 秸秆畜牧业[M]. 上海:上海科学技术出版社,1996.
- [29] 李林,杨明韶,王春光,等. 9R-40型揉搓机的研究与试验[J]. 内蒙古农牧学院学报,199718(3):69-74.
- [30] 李林,王春光,谢玉红,等. 9R-40型揉搓机的试验研究[J]. 内蒙古农牧学院学报,1997(4):79-82.
- [31] 于海燕. 9RZ-60型秸秆揉切机的改进研究[D]. 北京:中国农业大学, 2004:1-34.

- [32] 祁春兰,赖卫民. 9RS-700型秸秆揉搓机[J]. 现代化农业,1994(3):35-36.
- [33] 刘中峰. 悬挂式玉米秸秆揉搓机的整体设计[J]. 当代农机,2007(12):73-74.
- [34] 徐建平,徐雪红,夏忠义,等. 秸秆还田机刀片及刀片优化排列的研究[J]. 农机化研究,2003,2(4):7-25.
- [35] 肖宏儒,朱德文,钟成义. 农作物秸秆多功能粉碎机的试验研究[J]. 农业装备技术,2009(5):8-12.
- [36] 汪莉萍,王述洋,景果仙,等. 9FR-66型秸秆粉碎机设计[J]. 机电产品开发与创新,2009(3):51-52,55.
- [37] 俞佳芝,余泳昌,朱星贤,等. 4Q-1.5型秸秆粉碎机主要工作部件参数确定与校核[J]. 农机化研究,2006(9):74-76,79.