

# 水稻插秧机分插机构的研究进展

陈建能<sup>1,2</sup>, 赵 匀<sup>1</sup>

(1 浙江大学; 2 福建农林大学)

**摘 要:** 分插机构是水稻插秧机的主要工作部件, 其性能决定其插秧质量、工作可靠性和单位时间的插次。该文总结了目前 2 种主要类型的分插机构(曲柄摇杆分插机构和行星轮系分插机构)的研究进展, 分析比较了这 2 种机构的优缺点, 并提出进一步研究的方向。

**关键词:** 水稻插秧机; 分插机构; 研究进展

**中图分类号:** S233 91

**文献标识码:** A

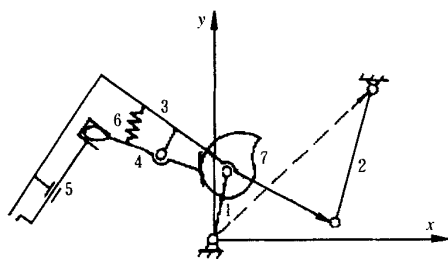
**文章编号:** 1002-6819(2003)02-0023-05

## 1 引言

分插机构是水稻插秧机从秧群中分取一定数量的秧苗并插入土中的机构, 它是插秧机的主要工作部件, 其性能决定插秧质量、工作可靠性和单位时间的插次。因而分插机构从水稻插秧机问世以来一直是研究的热点。研究主要有两个方面: 一是如何保证插秧质量, 即如何实现插秧时的秧爪轨迹和姿态(取秧角和插秧角), 达到不伤秧、不钩秧、不漂秧、立苗好和返青快; 二是如何提高单位时间的插次。目前生产的水稻插秧机分插机构主要是曲柄摇杆式<sup>[1~12]</sup>(普通插秧机)和行星轮系式<sup>[12~30]</sup>(高速插秧机)的机构。本文总结它们的研究与应用情况; 并提出分插机构进一步研究的方向。

## 2 曲柄摇杆式分插机构

曲柄摇杆分插机构的水稻插秧机是 1987 年前成型机中较成熟的分插机构, 由于其良好的插秧质量而被广泛应用于各种机型, 即使在 20 世纪 90 年代, 其市场占有率很大<sup>[2]</sup>。其机构简图如图 1。



1. 曲柄 2. 摇杆 3. 栽植臂体(连杆) 4. 推秧拨叉 5. 推秧杆 6. 推秧弹簧 7. 凸轮

图 1 曲柄摇杆分插机构简图

Fig 1 Schematic diagram of crank and rocker-arm transplanting mechanism

该机构中曲柄 1 是主动件, 能满足秧爪 3 特殊运动轨迹和姿态的要求, 保证良好的插秧质量。为减少秧苗

的回带、漂秧和漏插, 以提高插秧质量, 还配有推秧装置<sup>[1,11]</sup>。推秧装置是由曲柄带动凸轮 7 转动推动推秧拨叉 4 压缩推秧弹簧 6。随着凸轮半径的增大弹簧变形量增大, 随后曲柄上的凸轮和推秧拨叉分离, 凸轮对拨叉的作用力突然消失, 在推秧弹簧的作用下, 拨叉将推秧杆 5 快速推到底部, 完成推秧过程。

设计与研究大多采用优化方法: 通过运动学或动力学分析, 得出数学模型, 确定目标(单目标或多目标)函数和约束方程, 优化得到较优参数, 后来陆续对机构进行改进设计以提高插秧质量和单位时间的插次。

### 2.1 运动学特性的研究

运动学的研究主要是为了得到能够实现插秧要求(秧爪轨迹和姿态)的一组机构参数<sup>[1~6]</sup>。

赵匀等对推秧装置的凸轮和拨叉进行分析, 提出优化方案并试制样机进行试验, 该方案能大大降低振动和磨损<sup>[1]</sup>。白海英等从质点动能定理出发, 也对推秧装置进行运动分析, 得到改进凸轮轮廓的方案, 减少凸轮的磨损和整机的振动<sup>[2]</sup>。

陈德俊、胡杭湘等采用了轨迹再现的方法, 研究了适合多熟制水稻插秧的分插机构<sup>[4]</sup>。即先给定秧针轨迹的几个特征点, 通过运动分析得到与这些预定特征点距离最小的目标函数, 并列约束函数, 采用随机方向法, 优化得到最佳机构参数。

邵陆寿等则以插穴大小适中为目标函数, 以保证秧苗垂直下插、秧爪不刮撞已插秧苗、秧爪入土和出土姿态为约束条件, 用优化方法来确定机构参数<sup>[6]</sup>。

### 2.2 动力学特性的研究

传统的动力学分析方法是质量中心轨迹法。但赵匀、应义斌等指出这种做法是不合理的, 因为它既没有探讨质心的加速度, 也没有涉及其振动源、曲柄和摇杆转动中心的作用力以及驱动链的作用力的波动<sup>[8,9]</sup>。还有一种传统的方法是图解法: 即利用图解方法求得周期内曲柄转动几个位置时各铰链点作用力、链条作用力和机构的惯性力来研究动力学性质。但是图解法不仅存在和质量中心轨迹法一样的不足, 而且工作量较大, 不能对周期内各点作分析, 误差也较大。

为增加该机构的插次和减少振动, 赵匀等从动力学的角度进行机构分析和试验验证, 得到其振动源作用力的周期变化规律<sup>[8~11]</sup>。动力学分析突破传统的分析: 1)

收稿日期: 2002-05-31 修订日期: 2002-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(50275137); 福建农林大学青年教师基金项目(02A 04)

作者简介: 陈建能, 博士生, 讲师, 浙江大学生物工程与食品科学学院; 福州市金山 福建农林大学机电工程学院, 350002

考虑了推秧装置在工作过程中对机构的影响,而不是把机构简化为曲柄摇杆机构来分析;2)改变了传统的将驱动曲柄链条的作用力简化为力偶矩来分析;3)考虑了非定向转动的两相邻杆件铰结点的摩擦矩;4)提出了动力学方程逐次求解的方法,大大简化了动力学方程的求解。通过他们的动力学分析,得到了与实际基本相符的计算机模型,为结构优化提供了理论依据。如采用曲柄附加平衡块和改变缓冲垫刚度的方法,可以平衡或减少部分惯性力,提高单位时间的插次。

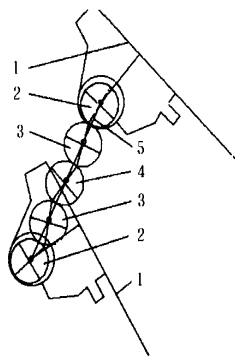
到目前为止对该类型的分插机构的研究是比较全面的。但是该机构由于其固有运动惯性力的作用以及推秧装置的存在,使得作用在曲柄轴上的力随着单位时间内插次的提高,波动逐渐增大,引起机架振动,部件磨损加快,严重地影响了插秧质量,这就限制了工作效率的提高。该机构的实际最高插次为 250 r/min 左右,若再提高插次,振动就会加剧,以致无法正常工作。若要进一步提高插次,必须采用新型的分插机构才能实现。

### 3 行星轮系分插机构

为提高单位时间的插次,1982 年日本开始致力于高速插秧机的新型分插机构研究,用于代替曲柄摇杆式分插机构<sup>[14]</sup>。这就是行星轮系分插机构。其主要创新是用旋转式分插机构取代了传统的曲柄摇杆式分插机构,优点是旋转式分插机构惯性力小,旋转 1 周插秧 2 次,在插次提高 1 倍的情况下,秧爪的线速度基本保持不变,因而伤秧率没有变化,即高速作业下,保持良好的插秧质量,在方田化的大块水稻作业时,可充分发挥高作业效率的特点。下面分类介绍。

#### 3.1 偏心齿轮行星系分插机构

偏心齿轮行星系分插机构由日本率先发明,并在中国申报专利。其简图如图 2,共有 5 个半径相同的偏心齿轮,太阳轮 4 固定不动,两边对称布置两对齿轮,栽植臂 1 固定在行星轮 2 上,行星架 5 与太阳轮共轴。工作时,行星架转动,2 个惰轮 3(也称中间轮)绕太阳轮转动,带动 2 个行星轮在周期内摆动,栽植臂上各点作复合运动:行星轮轴随行星架的圆周运动和随行星轮作相对于行星轮轴的摆动,构成了特殊的运动轨迹,可满足



1. 栽植臂 2. 行星轮 3. 惰轮 4. 太阳轮 5. 行星架  
图 2 偏心齿轮行星系分插机构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of planetary eccentric gear transplanting mechanism

秧爪轨迹和姿态的要求<sup>[14~16]</sup>。偏心齿轮行星系分插机构与椭圆齿轮行星系分插机构相比较,加工简单,但齿隙变化引起振动,需增加防震装置,结构较复杂。

中国学者也对该机构进行研究和改进:陈怡群等在不考虑偏心对啮合的影响下分析该机构的运动情况,采用优化的方法得到一组机构参数<sup>[17]</sup>。L. S Guo 等在考虑偏心的影响对该机构进行运动分析<sup>[18]</sup>。应义斌等证明了偏心齿轮传动的 3 个重要性质<sup>[19]</sup>,用解析法建立了偏心齿轮行星系分插机构的运动学模型。

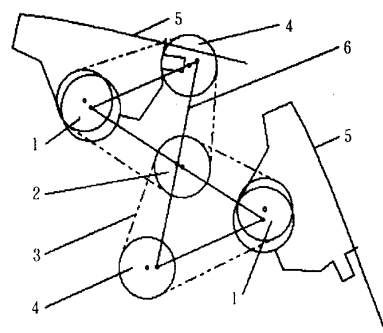
#### 3.2 椭圆齿轮行星系分插机构

椭圆齿轮行星系分插机构是在偏心齿轮行星系分插机构基础上发展起来的,也由日本发明。其结构原理和偏心齿轮行星系分插机构相类似,这里不再赘述<sup>[20,21]</sup>。椭圆齿轮行星系分插机构较偏心齿轮行星系分插机构的优点是传动平稳,但加工复杂,要求精度高,虽利用粉末冶金加工,可提高加工质量和简化加工工艺,但一次性投入大。

李革等分析了椭圆传动的特性,用解析法建立了偏心齿轮行星系分插机构的运动学模型,在 VB 平台上编制了人机对话功能强的机构参数优化软件,可以方便快捷地按照设计者要求找出一组最优参数。设计了适合南、北方不同栽植模式的两种分插机构<sup>[22]</sup>。

#### 3.3 偏心链轮、椭圆差速和正齿行星轮分插机构

这 3 种分插机构是由赵匀主持的“高速水稻插秧机分插机构的机理和结构参数研究”国家自然科学基金的课题组成员研制并申报 7 项专利(行星轮曲柄摇杆分插机构、曲柄摇杆行星轮系分插机构、圆盘式椭圆齿轮行星轮系分插机构、圆盘式正齿行星轮系分插机构、双控制分插机构、偏心行星链轮分插机构、差速分插机构)其中的 3 种机构。他们对这 3 种类型的分插机构进行运动学分析,建立计算机模型并在 VB 平台上编制了机构参数优化软件,可以方便快捷地按照设计者要求找出一组最优参数。这种快捷的手段是方法上的一大突破,若用传统的方法(作图法或人工计算)即使花费大量的时间也难以达到他们的效果<sup>[25]</sup>。下面分别介绍:



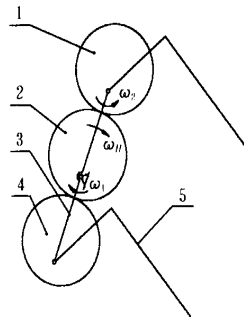
1. 行星轮 2. 太阳轮 3. 链条 4. 张紧轮 5. 栽植臂 6. 行星架  
图 3 偏心链轮分插机构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of eccentric sprocket transplanting mechanism

偏心链轮分插机构<sup>[25,26]</sup>简图如图 3,它采用 3 个等径的偏心链轮,由其中两个偏心链轮的传动比变化,实现分插机构传动要求。两偏心链轮轮心在一个工作周期

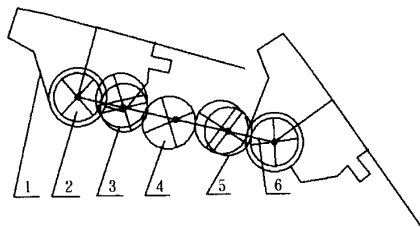
中, 靠近和远离造成的链条松紧变化, 由偏心张紧链轮 4 消除。他们对该机构进行理论分析, 采用优化方法: 在优化太阳轮 2 和行星轮参数时, 把取秧角、插秧角、秧针轨迹和秧针轨迹高度作为目标函数, 在优化张紧轮参数时, 把链条处于张紧状态下的长度变化最小作为目标函数; 在此基础上用 VB 平台编制优化软件, 优化参数, 使得该机构能同时满足插大苗和小苗的两种工况要求, 链条总长度的变化在 3 mm 之内。

椭圆差速分插机构<sup>[27]</sup>的简图如图 4, 它由 3 个全等的椭圆齿轮和两套栽植臂 5 组成, 3 个椭圆齿轮的回转中心均在椭圆齿轮的焦点上, 且相位相同, 并支撑在壳体 3(行星架)上, 两套栽植臂分别与两个行星轮 1、4 轴相固连。工作时壳体作为一个原动件绕中心轮的回转中心转动, 而中心轮 2 作为另一个原动体以壳体 2 倍的转速同向转动, 从而两个被动行星轮输出所要求的运动, 带动栽植臂形成所要求的轨迹和运动。



1 行星轮 2 太阳轮 3 行星架 4 行星轮 5 栽植臂  
图 4 椭圆差速分插机构示意图

Fig 4 Schematic diagram of elliptical differential gear transplanting mechanism



1 栽植臂 2 行星轮 3 椭圆中间轮  
4 太阳轮 5 正圆中间轮 6 行星架  
图 5 正齿行星轮分插机构示意图

Fig 5 Schematic diagram of planetary normal gear transplanting mechanism

正齿行星轮分插机构<sup>[28]</sup>的简图如图 5, 它由 4 个全等正圆齿轮和 3 个全等椭圆齿轮组成, 3 个椭圆齿轮的回转中心均在椭圆齿轮的焦点上, 且初始相位相同。中心椭圆齿轮 4(也叫太阳轮)固定不动, 工作时行星架 6 在中心轴的带动下, 两个椭圆齿轮啮合, 引起传动比的变化, 从而导致对称布置的 2 个行星圆齿轮作往复摆动。栽植臂 1 和行星圆齿轮 2 固联, 它一方面随着行星架作圆周运动, 另一方面随着行星圆齿轮作往复摆动, 形成秧爪要求的运动轨迹和姿态。

4 曲柄摇杆式分插机构和行星轮系分插机构的比较

比较(表 1)表明, 行星轮系分插机构是发展的趋势方向。

表 1 曲柄摇杆式分插机构和行星轮系分插机构的比较  
Table 1 Comparison of two kinds of transplanting mechanisms (crank and rocker-arm and planetary gears)

	曲柄摇杆式分插机构 (普通插秧机)	行星轮系分插机构 (高速插秧机)
主要研究方法	均采用优化方法, 编写计算机优化软件来优化机构的参数, 得到较优的参数	
特点	机构惯性力大, 实际最高插次 250 次/m in	机构惯性力小, 旋转 1 周插秧 2 次, 最高插次 500 次/m in, 高效作业
研究领域	运动学和动力学都有研究	到目前只研究运动学
研究中存在问题		对其动力学特性还没有研究
加工精度	精度要求较低	精度要求较高, 特别是轮系相对位置
应用中的问题	价格可以接受, 但可靠性较低	可靠性好, 但价格高
市场占有率	在我国市场占有率大	国外(如日本和韩国)市场占有率大
推广前景	不好	市场前景广阔

5 存在的问题及研究的方向

对水稻插秧机分插机构有两个要求: 一是满足秧爪轨迹和姿态的要求; 二是在保证插秧质量的前提下尽量提高单位时间的插次。曲柄摇杆分插机构和行星轮系分插机构都能满足第一个要求。由于曲柄摇杆机构固有的特点, 尽管采用了各种机构优化、平衡和减振办法, 其单位时间的实际插次最多只能在 250 r/m in 左右。而行星轮系分插机构的插次最高可达 400~ 600 r/m in, 但若进一步提高插次, 振动就变得明显, 插秧质量下降。如何在保证插秧质量的前提下提高插次是值得进一步研究的问题。要增加曲柄摇杆分插机构的插次的可能性不是太大了, 因为不管是从运动学角度还是从动力学角度对该分插机构的研究都比较彻底。但是对于行星轮系分插机构的研究到目前为止还只是局限于运动学的分析。故笔者认为下面几个问题值得进一步研究。

1) 对行星轮系分插机构进行动力学分析。要进一步提高行星轮系分插机构的插次, 必须研究其振动源作用力的周期变化规律, 即研究其动力学特性。可以这样来处理, 首先对该类机构进行运动学分析, 得到满足运动学特性的一组机构参数的范围, 然后以此参数范围作为约束条件, 以动力学特性的分析为目标函数, 再次对机构进行优化。这样一来就可以得到即满足运动学条件又具有良好的动力学特征的机构参数。

在进行动力学分析时, 要兼顾多项动力学指标, 包括摆动力、摆动力矩、输入转矩和运动副反力, 以得到综合的优化动力学特性。因为单独追求某一动力学指标, 往往以牺牲其它指标为代价。同时在分析过程中必须考虑: 变质量的特性, 因为在一个插秧循环(秧爪取秧

运秧、插秧和空回程)中质量是变化的;考虑间隙的影响,由于齿轮的加工精度问题会影响秧爪的轨迹和姿态,从而影响取秧量,甚至碰撞秧苗;考虑秧爪取秧力的大小。目前对分插机构动力学分析均不考虑取秧力,这与实际工况不一致。为了使理论分析更接近实际工况,必须研究取秧力的影响。

2) 改变行星轮系分插机构的安装角度(相对于转动中心)。目前其最常见的配置是 3 对 6 个分插机构安装角度一样,这样在插秧时就同时取秧和推秧,必成为很大的振动源。在装配时可以考虑将每对分插机构交叉布置,相差 90°;这样在插秧时一次只有 3 个分插机构同时作业,大大降低振动,平衡惯性力,提高作业速度。当然这需在整机上协调,如移箱机构运动相位和分插速度等的调整,但这有一定的难度。显然,这样插出来的秧苗成“之”字形。日本还专门研究能够插出“之”字形的分插机构(采用椭圆齿轮和非正交的锥齿轮传动),试验研究证明“之”字形栽植方式能增产 10%<sup>[29,30]</sup>。

### 3) 研究新型高效的分插机构。

#### [参 考 文 献]

- [1] 赵 匀, 武俊生, 张宝奎. 插秧机推秧装置凸轮和拨叉的理论分析和优化设计[J]. 农机化研究, 1990, (2): 22~ 28
- [2] 白海英, 刘德仁, 田临林等. 分插机构运动特性分析[J]. 农业机械学报, 1995, 26(2): 121~ 122
- [3] Khan A S, Gunkel W W. Design and development of a 6-row korean transplanter[J]. AMA, 1988, 19(1).
- [4] Edathiparambil V areed Thomas Development of a mechanism for transplanting rice seedlings[J]. Mechanism and Machine Theory, 37(11~ 12), 2002: 395~ 410
- [5] 陈德俊, 胡杭湘, 邬介年等. 多熟制水稻插秧机分插机构精密综合[J]. 农业机械学报, 1995, 26(1): 111~ 114
- [6] 邵陆寿, 王忠祥, 夏 萍. 根据插穴确定曲柄摇杆式分插机构参数的方法[J]. 华中农业大学学报, 1997, 16(3): 304~ 310
- [7] [日]梅田重夫, 穗波信雄. 插秧机构分插机的动特性[J]. 农业机械学会志, 1980, (1): 51~ 56
- [8] 应义斌, 赵 匀, 宋世贵等. 插秧机分插机构动力学模拟与曲柄平衡块优化设计[J]. 农业工程学报, 1994, 10(增刊): 85~ 90
- [9] Ying Yibin, Zhao Yun. Research in dynamic simulation of separating-planting mechanism of rice transplanter [J]. AMA, 1997, 28(3): 15~ 19
- [10] 赵 匀, 武俊生, 程 革等. 水稻插秧机分插机构的动力学分析[J]. 农业机械学报, 1991, 22(3): 20~ 24
- [11] 赵 匀, 武俊生, 程 革等. 水稻分插机构推秧装置动力学分析与试验[J]. 农业机械学报, 1992, 23(3): 276~ 281
- [12] 赵 匀. 农业机械计算机辅助分析和设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998
- [13] 蒋焕煜, 应义斌, 赵 匀等. 水稻插秧机分插机构的运动学特性分析[J]. 浙江农业大学学报, 1998, 24(3): 321~ 324
- [14] [日]小西达也等. 高速插秧机的开发[J]. 日本农业机械学会, 1989, 51(6): 89~ 95
- [15] [日]山影征男, 小西达也等. 偏心行星齿轮式栽植部件[J]. 机械化农业, 1990, (7): 49~ 51
- [16] [日]山影征男, 小西达也等. 采用回转式栽植机构的高速水田栽植机的开发研究[J]. 农业机械学会志, 1990, 52(3): 2
- [17] 陈怡群, 袁利和等. 偏心行星轮系插秧机械的优化设计[J]. 农业机械学报, 1992, 23(1): 28~ 33
- [18] Guo L S, Zhang W J. Kinematic analysis of a rice transplanting mechanism with eccentric planetary gear trains [J]. Mechanism and Machine Theory, 36(11~ 12), 2001: 1175~ 1188
- [19] 应义斌, 赵 匀. 偏心齿轮行星系水稻分插机构的分析研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(2): 130~ 134
- [20] [日]市川真郎, 田尻功郎等. 旋转式水稻插秧机的振动分析——行星椭圆齿轮的运动分析(第 1 报)[J]. 农业机械学会志, 1994, 56(5): 73~ 79
- [21] [日]市川真郎, 田尻功郎等. 旋转式水稻插秧机的振动分析——分插机构振动的实验分析(第 2 报)[J]. 农业机械学会志, 1995, 57(6): 107~ 113
- [22] 李 革, 赵 匀, 俞高红等. 椭圆齿轮行星系分插机构的机理分析和优化设计[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 78~ 81
- [23] [日]清水一史. 水稻插秧机的最新产品开发动向[J]. 机械化农业, 1996, (3): 5~ 7
- [24] [日]小西达也. 水稻插秧机的新技术[J]. 农业机械学会志, 1997, 59(4): 123~ 127
- [25] 赵 匀, 蒋焕煜, 武传宇等. 双季稻高速插秧机偏心链轮分插机构结构设计和参数优化[J]. 机械工程学报, 2000, 36(3): 37~ 40
- [26] 赵 匀, 蒋焕煜, 武传宇等. 偏心链轮传动机构的设计和应用[J]. 机械设计与研究(增), 1998, 12: 157~ 158
- [27] 尹建军, 赵 匀, 张际先等. 水稻插秧机分插机构的创新设计[J]. 江苏理工大学学报(自然科学版), 2001, 5
- [28] 俞高红. 水稻插秧机正齿行星轮分插机构的计算机辅助分析与设计[D]. 杭州: 浙江大学农业工程与食品科学学院, 2000
- [29] [日]小西达也, 津贺幸之介等. 水稻插秧机之字型分插机构的开发(第 1 报)[J]. 农业机械学会志, 1998, 60(5): 91~ 99
- [30] [日]小西达也, 津贺幸之介等. 水稻插秧机之字型分插机构的开发(第 2 报)[J]. 农业机械学会志, 1999, 61(1): 179~ 185

Research advances in transplanting mechanism of rice transplanter

Chen Jianneng<sup>1,2</sup>, Zhao Yun<sup>1</sup>

(1. College of Biological Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract** Transplanting mechanism is the main part of a transplanter, its performance determines the transplanting quality, reliability and number of transplants per minute. In this paper, research advances on two main kinds of transplanting mechanisms (crank and rocker-arm mechanism and planetary gears mechanism) were summarized, and the advantages and disadvantages of them were pointed out. At the same time, the direction for further study in this field was provided.

**Key words:** rice transplanter; transplanting mechanism; research advances