

基于码值矩阵的移栽用周转轮系功能图自动生成

徐亚丹^{1,2} 孙良^{1,3} 武传宇^{1,3} 俞高红^{1,3} 张国凤^{1,3} 方治^{1,3}

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 杭州职业技术学院, 杭州 310018;
3. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 针对利用图论进行移栽用周转轮系综合过程中,依靠经验实现轮系的双色拓扑图到功能图的转换,容易出现可行轮系结构遗漏的问题,提出一种基于码值矩阵(CVM)的周转轮系功能图(FSE)的自动生成方法,实现轮系拓扑图到功能图的系统化转换。根据轮系功能图的结构特征,制定轮系的基本图形符号,并完成编码(码值图);在用邻接矩阵描述构件间的运动约束关系的基础上,提取轮系基本环,完成码值矩阵描述,并获取3类基本环功能图(FSF);在各基本环功能图随机组合的基础上,利用基本环连接与简化原则实现各个基本环功能图的自动匹配,建立系统化的周转轮系的功能图谱。最后,以轮系式玉米钵苗移栽机构为例,研究传动轮系功能图的自动生成,完成移栽机构型综合、结构设计与轨迹测试,将优化软件输出的仿真轨迹与通过高速摄影描绘的轨迹进行对比,两者基本一致,验证了从拓扑图到功能图生成方法的可行性。

关键词: 移栽机构; 周转轮系; 功能图; 码值矩阵; 基本环

中图分类号: TH112.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0091-09

Automatic Generation of Functional Schematic of Epicyclic Gear Trains for Transplanting Based on Code Value Matrix

XU Yadan^{1,2} SUN Liang^{1,3} WU Chuanyu^{1,3} YU Gaohong^{1,3} ZHANG Guofeng^{1,3} FANG Zhi^{1,3}

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China
2. Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China
3. Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China)

Abstract: During the mechanisms synthesis of epicyclic gear trains for transplanting by graph theory, it appears that the feasible functional schematic would be omitted easily when conversion from bicolored graph to functional schematic with experience. The approach that automatic generation of functional schematic of epicyclic gear trains (FSE) based on code value matrix (CVM) was proposed. Systematic conversion from topological graph to FSE was achieved. According to the structural features of the FSE, the basic graphic symbols of the epicyclic gear trains were defined and encoded. On the basis of using adjacency matrix to describe the motion constraints between links, fundamental circuits were extracted, the description of the CVM were completed and three types of functional schematic of fundamental circuits (FSF) were obtained. Based on the random combination of all fundamental circuits, the FSF were matched by the principle of fundamental circuits connection, and atlas of the FSE was established systematically. Finally, the automatic generation of FSE was carried out on the design of corn pot seedling transplanting mechanism with epicyclic gear trains. The structure design, prototype mechanism and trajectory testing of the transplanting mechanism were completed. The simulation trajectory and the test trajectory were compared, which were basically the same. The result verified the feasibility of the automatic generation of functional schematic.

Key words: transplanting mechanism; epicyclic gear trains; functional schematic; code value matrix; fundamental circuit

收稿日期: 2018-02-05 修回日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675487, 51475430)、浙江省公益技术应用研究项目(2017C32100)、浙江省151人才培养计划项目、杭州市农业科研自主申报项目(20170432B26)和浙江理工大学521人才培养计划项目

作者简介: 徐亚丹(1981—),女,博士生,杭州职业技术学院副教授,主要从事农业机构设计与优化研究, E-mail: xuyadan2005@163.com

通信作者: 孙良(1981—),男,副教授,主要从事农业机构设计与优化研究, E-mail: liangsun@zstu.edu.cn

0 引言

轮式移栽机构具有结构对称性,比连杆式移栽机构工作更平稳、高效^[1-3],采用非匀速传动又可实现多样的运动轨迹^[4-6],因此非匀速轮式移栽机构被广泛应用在水田、旱田的各种移栽装备中。日本学者小西达也等^[7]于20世纪80年代末首先提出不等速周转轮系式移栽机构,并成功解决连杆式移栽机构效率低、振动大的问题,使水稻(毯苗)插秧机实现了高速作业;赵匀等^[8-10]针对我国水稻大苗插秧中存在的“搭桥”、“倒秧”等问题,从动、静轨迹形状、机构工作姿态对轮系式分插机构(毯苗移栽机构)进行了系统性研究,获得了直立度好的插秧轨迹,并提出了系列非圆齿轮行星轮系移栽机构,解决了插秧机无法进行大苗移栽的难题;俞高红等^[11]、俞亚新等^[12]在钵苗移栽机构研究中,将锁止弧与非圆齿轮结合,提出不完全非圆齿轮副,并应用于两级行星轮系移栽机构中;ZHOU等^[13]采用传动比具有一般性变化规律的二阶非圆齿轮,实现水稻钵苗等行距移栽所需的“8”字形轨迹;在轮式旱地钵苗移栽机构研究中,赵雄等^[14-15]提出了一种用于西兰花移栽的行星轮系取苗机构,采用5个共轭的自由二阶非圆齿轮和大栽植臂尺寸设计,以满足苗爪的夹土式取苗方式(入钵轨迹约40 mm)。

上述针对不同移栽对象(毯苗、钵苗)和不同移栽方式(等行距、宽窄行、Z字形)的轮式移栽机构研究都是以给定某种轮系构型为条件,通过设计具有特定传动比变化规律的齿轮副,让轮系充分发挥描述移栽运动轨迹的能力^[16-20]。然而,由于移栽作业的多样性,现有轮系构型在轨迹形状与姿态设计中存在局限性,难以满足如蔬菜钵苗取栽一体式移栽机构的作业要求^[21]。为此SUN等^[21]基于图论开展了移栽用轮系机构的构型综合问题,找到了多种符合移栽动作要求的轮系构型的拓扑图。一个轮系拓扑图可以获得多种具体的轮系功能图,目前,实现拓扑图与功能图之间的转化主要采用直觉和经验结合的方法获得,存在的功能结构设计的盲目性可能会遗漏理想结构功能图。李雨桐等^[22]给出了便于计算机识别的符号方案,王玉新等^[23]对符号方案所包含的基本机构及其连接关系进行识别,但以上方法未能生成功能图。

为此,本文提出一种轮式移栽机构设计中的实现从拓扑图到功能图的自动生成方法。根据给定的拓扑图,用邻接矩阵进行规范表达,编写程序进行基本环的提取,并对基本环进行组合与同构判别,筛选出不重复的构型。定义码值图对应的编号,用码

值矩阵表达周转轮系的结构,并输出周转轮系的功能图。

1 周转轮系的表达

1.1 周转轮系拓扑图与功能图的表达

文献[24]将周转轮系的功能图用双色拓扑图来表达,如图1a是一个5构件周转轮系拓扑图。点表示构件,边表示构件之间的连接关系;细边表示旋转副,粗边表示齿轮副。字母a、b、c表示旋转副的层级,图1a中构件1、2与构件3、4的旋转副层级都是a,在图1b的功能图中用a表示旋转副;图1a中的旋转副层级b、c在图1b中用b、c表示旋转副。

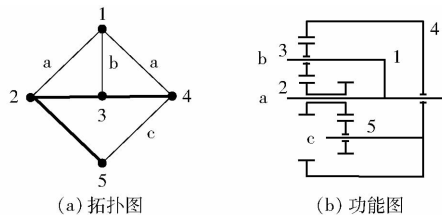


图1 5构件周转轮系拓扑图与功能图
Fig. 1 Topological graph and functional schematic of five links epicyclic gear trains

本文以周转轮系双色拓扑图为研究基础,遵循以下规则^[25]:

- (1)对于自由度为 F ,构件数为 n 的拓扑图,包含 $n-1$ 个旋转副和 $n-1-F$ 个齿轮副。
- (2)一个拓扑图移除全部齿轮副,剩余的旋转副构成树。
- (3)将齿轮副添加到规则(2)得到的树中,由一个齿轮副若干个旋转副形成唯一的基本环。基本环的数量等于齿轮副的数量。
- (4)每个旋转副的边定为一个层,在功能图中表示一个旋转副。
- (5)在一个基本环里面,转换点的两侧为不同层,一侧为同一层,另一侧为同一层。
- (6)同一层的边形成树。
- (7)周转轮系的拓扑图不存在只包含齿轮副的基本环。

1.2 基本环功能图的表达

基本环是形成周转轮系的基本单元,由3构件或者4构件组成。包含1个齿轮副和2个不同层级的旋转副。一个周转轮系拓扑图可以由若干个基本环组成,如图2所示,图1a的5构件周转轮系拓扑图由3构件基本环①(1,2,3)、②(1,3,4)与4构件基本环③(1,2,5,4)组成。

1.3 拓扑图的邻接矩阵表达

为了实现周转轮系结构图生成的计算机化,用邻接矩阵表达拓扑图。邻接矩阵中的元素 $x_{ij}=0$ 表

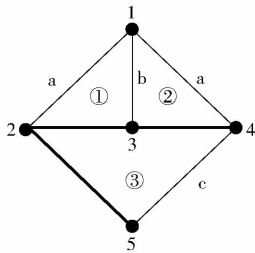


图 2 5 构件拓扑图分解为 3 个基本单元环

Fig. 2 Five links topological graph was broken down into three fundamental circuits

示构件 i 与 j 之间不存在运动副连接;用 $x_{ij} = n$ 表示构件 i 与 j 之间存在运动副连接,当 $n = 1$ 时表示旋转副层级 a ,当 $n = 2$ 时表示旋转副层级 b ,当 $n = 3$ 时表示旋转副层级 c ,当 $n = 4$ 时表示旋转副层级 d ,当 $n = 5$ 时表示旋转副层级 e 。为了编程时容易区分,本文用 $n = 10$ 表示齿轮副,如果拓扑图有更多的层级,可以用更大的数值比如 100 来表示齿轮副。图 1a 所示的 5 构件周转轮系的拓扑图其邻接矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 10 & 0 & 10 \\ 2 & 10 & 0 & 10 & 0 \\ 1 & 0 & 10 & 0 & 3 \\ 0 & 10 & 0 & 3 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.4 基本环的提取与标记

基本环用邻接矩阵表示,图 3a 的 3 构件基本环拓扑图用邻接矩阵表示为

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 10 \\ 2 & 10 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

图 3b 的 4 构件基本环拓扑图用邻接矩阵表示为

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

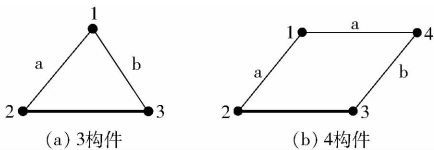


图 3 基本环拓扑图

Fig. 3 Topological graph of fundamental circuit

基本环提取的思路为:

(1) 3 构件基本环的提取:根据周转轮系分层准则第 5 条,假定构件 i 与构件 j 之间为齿轮副连接,且构件 j 与构件 k 之间为旋转副连接 ($0 < A(j, k) < 10$),且构件 i 与构件 k 之间为旋转副连接 ($0 < A(i, k) < 10$),且构件 j 与构件 k 之间、构件 i 与构件 k 之间不能为同一层,那么构件 i, j, k 组成 3 构件基

本环,如图 4a 所示。

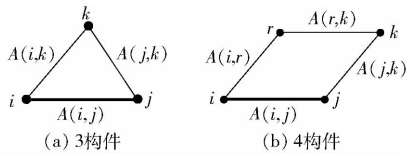


图 4 基本环的提取

Fig. 4 Extraction of fundamental circuit

(2) 4 构件基本环的提取:根据周转轮系分层准则第 5 条,假定构件 i 与构件 j 之间为齿轮副连接,且构件 j 与构件 k 之间为旋转副连接 ($0 < A(j, k) < 10$),构件 i 与构件 r 之间为旋转副连接 ($0 < A(i, r) < 10$),构件 r 与构件 k 之间的连接 $A(r, k)$ 与构件 j 与构件 k 之间的连接 $A(j, k)$ 为同一层,且构件 i 与构件 r 之间的连接 $A(i, r)$ 、构件 r 与构件 k 之间的连接 $A(r, k)$ 不能为同一层,那么构件 i, j, k, r 组成 4 构件基本环,如图 4b 所示。

(3) 提取周转轮系第 i, j, k 行与 i, j, k 列,第 i, j, k, r 行与第 i, j, k, r 列形成新的矩阵,作为 3 构件基本环与 4 构件基本环的邻接矩阵,具体为

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 10 & 0 & 10 \\ 2 & 10 & 0 & 10 & 0 \\ 1 & 0 & 10 & 0 & 3 \\ 0 & 10 & 0 & 3 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 10 & 0 & 10 \\ 2 & 10 & 0 & 10 & 0 \\ 1 & 0 & 10 & 0 & 3 \\ 0 & 10 & 0 & 3 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 10 & 0 & 10 \\ 2 & 10 & 0 & 10 & 0 \\ 1 & 0 & 10 & 0 & 3 \\ 0 & 10 & 0 & 3 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

编写程序,输入周转轮系邻接矩阵,计算提取基本环的邻接矩阵与组成基本环的构件标号,流程图如图 5 所示。

2 功能图的组合与筛选

2.1 功能图的组合

图 1a 拓扑图可由 2 个 3 构件基本环与 1 个 4 构件基本环组成。基本环 134、基本环 123 与基本环 1245 各有 3 种形式的功能图,如图 6 ~ 8。所以图 1a 拓扑图对应的功能图有 $3^3 = 27$ 种可能的组合。

为了便于计算机筛选与计算,这 27 种组合可用基本环功能图组合矩阵来表示。

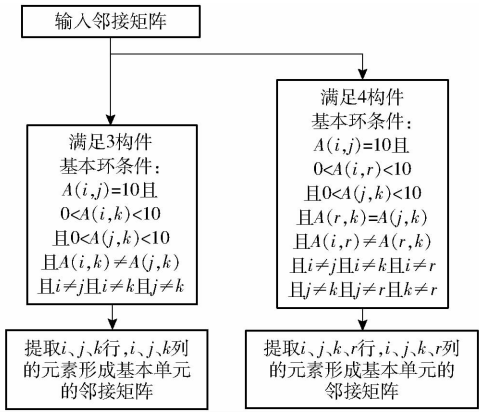


图 5 从周转轮系的邻接矩阵提取基本环邻接矩阵的流程图

Fig.5 Flow chart of adjacency matrix of fundamental circuit abstracted from adjacency matrix of epicyclic gear trains

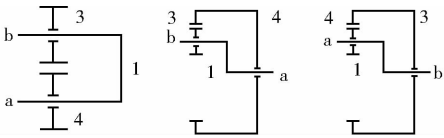


图 6 基本环 134 功能图的 3 种形式

Fig.6 Three types FSF of 134

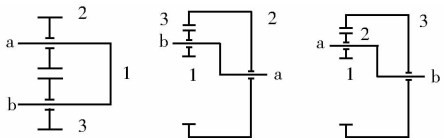


图 7 基本环 123 功能图的 3 种形式

Fig.7 Three types FSF of 123

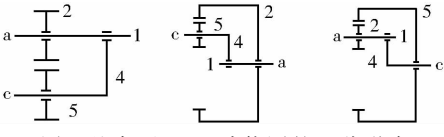


图 8 基本环 1245 功能图的 3 种形式

Fig.8 Three types FSF of 1245

$$\begin{aligned} W_1 &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & g & 0 \\ r & g & g & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & g \end{bmatrix} & W_2 &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & g & 0 \\ r & g & g & 0 & 0 \\ r & G & 0 & r & g \end{bmatrix} \\ W_3 &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & g & 0 \\ r & g & g & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & G \end{bmatrix} & W_4 &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & G & 0 \\ r & g & g & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & g \end{bmatrix} \\ W_5 &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & G & 0 \\ r & g & g & 0 & 0 \\ r & G & 0 & r & g \end{bmatrix} & W_6 &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & G & 0 \\ r & g & g & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & G \end{bmatrix} \\ W_7 &= \begin{bmatrix} r & 0 & G & g & 0 \\ r & g & g & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & g \end{bmatrix} & W_8 &= \begin{bmatrix} r & 0 & G & g & 0 \\ r & g & g & 0 & 0 \\ r & G & 0 & r & g \end{bmatrix} \\ W_9 &= \begin{bmatrix} r & 0 & G & g & 0 \\ r & g & g & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & G \end{bmatrix} & W_{10} &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & g & 0 \\ r & G & g & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & g \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{11} &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & g & 0 \\ r & G & g & 0 & 0 \\ r & G & 0 & r & g \end{bmatrix} & W_{12} &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & g & 0 \\ r & G & g & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & G \end{bmatrix} \\ W_{13} &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & G & 0 \\ r & G & g & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & g \end{bmatrix} & W_{14} &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & G & 0 \\ r & G & g & 0 & 0 \\ r & G & 0 & r & g \end{bmatrix} \\ W_{15} &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & G & 0 \\ r & G & g & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & G \end{bmatrix} & W_{16} &= \begin{bmatrix} r & 0 & G & g & 0 \\ r & G & g & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & g \end{bmatrix} \\ W_{17} &= \begin{bmatrix} r & 0 & G & g & 0 \\ r & G & g & 0 & 0 \\ r & G & 0 & r & g \end{bmatrix} & W_{18} &= \begin{bmatrix} r & 0 & G & g & 0 \\ r & G & g & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & G \end{bmatrix} \\ W_{19} &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & g & 0 \\ r & g & G & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & g \end{bmatrix} & W_{20} &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & g & 0 \\ r & g & G & 0 & 0 \\ r & G & 0 & r & g \end{bmatrix} \\ W_{21} &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & g & 0 \\ r & g & G & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & G \end{bmatrix} & W_{22} &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & G & 0 \\ r & g & G & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & g \end{bmatrix} \\ W_{23} &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & G & 0 \\ r & g & G & 0 & 0 \\ r & G & 0 & r & g \end{bmatrix} & W_{24} &= \begin{bmatrix} r & 0 & g & G & 0 \\ r & g & G & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & G \end{bmatrix} \\ W_{25} &= \begin{bmatrix} r & 0 & G & g & 0 \\ r & g & G & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & g \end{bmatrix} & W_{26} &= \begin{bmatrix} r & 0 & G & g & 0 \\ r & g & G & 0 & 0 \\ r & G & 0 & r & g \end{bmatrix} \\ W_{27} &= \begin{bmatrix} r & 0 & G & g & 0 \\ r & g & G & 0 & 0 \\ r & g & 0 & r & G \end{bmatrix} \end{aligned}$$

每一行表示一个基本单元环,每一列表示一个构件, r 表示构件作旋转副, g 表示构件作外啮合齿轮或者内啮合的内齿轮, G 表示构件作内啮合的外齿轮。

2.2 同构判别

某个拓扑图的所有可能的基本环组合矩阵中,如果某一个矩阵,经过若干行列式变换,变换成另一个矩阵,那么这两个基本环组合矩阵所表示的功能图同构。下面举例说明这个问题:

图 9 所示的 4 构件 1 自由度的拓扑图,由 2 个 3 构件基本环 123 与 134 组成。功能图用基本环组合矩阵表示有 9 种形式。

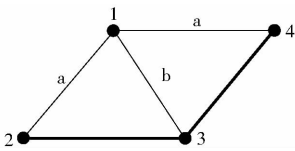


图 9 4 构件拓扑图

Fig.9 Four links topological graph

$$P_1 = \begin{bmatrix} r & g & g & 0 \\ r & 0 & g & g \end{bmatrix} \quad P_2 = \begin{bmatrix} r & G & g & 0 \\ r & 0 & g & g \end{bmatrix}$$
$$P_3 = \begin{bmatrix} r & g & G & 0 \\ r & 0 & g & g \end{bmatrix} \quad P_4 = \begin{bmatrix} r & g & g & 0 \\ r & 0 & G & g \end{bmatrix}$$
$$P_5 = \begin{bmatrix} r & G & g & 0 \\ r & 0 & G & g \end{bmatrix} \quad P_6 = \begin{bmatrix} r & g & G & 0 \\ r & 0 & G & g \end{bmatrix}$$
$$P_7 = \begin{bmatrix} r & g & g & 0 \\ r & 0 & g & G \end{bmatrix} \quad P_8 = \begin{bmatrix} r & G & g & 0 \\ r & 0 & g & G \end{bmatrix}$$
$$P_9 = \begin{bmatrix} r & g & G & 0 \\ r & 0 & g & G \end{bmatrix}$$

经过行列式变换,矩阵 P_3 变换成 P_4 。所以矩阵 P_3 与 P_4 表示的功能图同构。同理 P_2 与 P_7 表示的功能图同构。经过分析发现,对称的拓扑图会出现这种同构的情况。 $W_1 \sim W_{27}$ 27 个基本环组合矩阵经过行列式变换后都不能成为这 27 个矩阵之中的其他任意矩阵。所以这 27 个矩阵所表示的功能图异构。

3 周转轮系功能图的生成

3.1 基本环功能图的连接与简化

- 将基本环的功能图连接,连接原则如下:
- (1)同轴相连。各个基本环功能图中标号相同的轴为同一个轴,生成功能图时要连接起来并且在一条直线上。
 - (2)某一构件在两个功能图中同时做齿轮时,这个齿轮可以用一个齿轮或者同轴齿轮替代。
 - (3)某一构件在两个基本环功能图中分别做齿轮和轴时,将齿轮和轴直接固连。
 - (4)机架可以直接固连。

按照以上的原则,对基本环的功能图进行连接与简化,形成 5 构件功能图的原始图,基本环组合矩阵 $W_1 \sim W_6$ 所对应的功能图如图 10 所示。

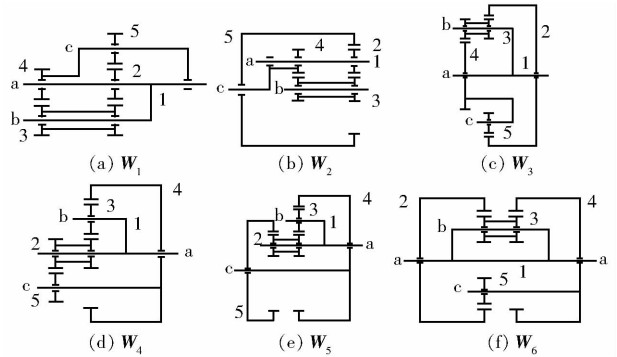


图 10 基本环组合矩阵 $W_1 \sim W_6$ 对应的功能图

Fig. 10 Functional schematic of matrix $W_1 \sim W_6$

3.2 码值图与码值矩阵的定义

对功能图中的基本方块图形进行编号,称为码值图,编号如表 1 所示。功能图可以用码值图通过

拼图生成,如图 11a、11b,用码值矩阵 I 、 J 表示。

表 1 单元图与对应码值

Tab. 1 Cell graph and code value

0	1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31	32	33	34	35
36	37	38	39	40	41	42	43	44
45	46	47	48	49	50	51	52	53
54	55	56	57	58				

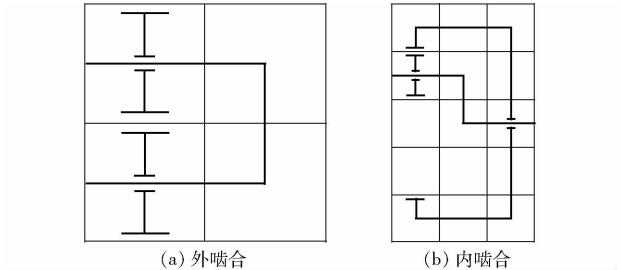


图 11 3 构件基本环功能图

Fig. 11 Three link FSF

$$I = \begin{bmatrix} 6 & 25 \\ 6 & 23 \end{bmatrix}$$

(7)

$$J = \begin{bmatrix} 36 & 18 & 25 \\ 6 & 25 & 17 \\ 0 & 24 & 13 \\ 0 & 0 & 17 \\ 37 & 18 & 23 \end{bmatrix}$$

(8)

3.3 周转轮系功能图的计算机生成

图 10 的功能图,用码值矩阵表示为

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 26 & 6 & 18 & 25 \\ 41 & 54 & 6 & 27 & 45 \\ 4 & 29 & 3 & 23 & 0 \end{bmatrix}$$

(9)

$$L = \begin{bmatrix} 26 & 18 & 18 & 18 & 39 \\ 17 & 46 & 43 & 18 & 6 \\ 13 & 23 & 4 & 29 & 3 \\ 17 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 24 & 18 & 18 & 18 & 38 \end{bmatrix}$$

(10)

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 36 & 18 & 25 \\ 4 & 3 & 25 & 17 \\ 1 & 0 & 17 & 17 \\ 13 & 18 & 28 & 13 \\ 34 & 18 & 25 & 17 \\ 0 & 6 & 23 & 17 \\ 0 & 37 & 18 & 23 \end{bmatrix}$$

(11)

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & 36 & 18 & 25 \\ 0 & 6 & 25 & 17 \\ 4 & 3 & 28 & 13 \\ 6 & 18 & 18 & 14 \\ 0 & 37 & 18 & 23 \end{bmatrix}$$

(12)

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 36 & 18 & 25 \\ 26 & 39 & 6 & 25 & 17 \\ 17 & 4 & 3 & 28 & 13 \\ 13 & 18 & 18 & 18 & 14 \\ 17 & 0 & 0 & 0 & 17 \\ 24 & 38 & 37 & 18 & 23 \end{bmatrix}$$

(13)

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 26 & 18 & 39 & 36 & 18 & 25 \\ 17 & 26 & 4 & 3 & 25 & 17 \\ 13 & 28 & 18 & 18 & 28 & 13 \\ 17 & 0 & 6 & 18 & 18 & 14 \\ 24 & 18 & 38 & 37 & 18 & 23 \end{bmatrix}$$

(14)

编写程序,生成码值矩阵(9)~(14)对应的功能图如图 12 所示。

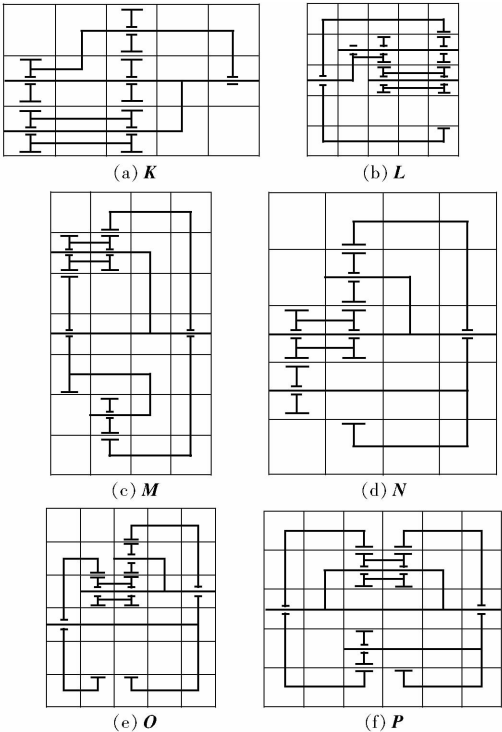


图 12 码值矩阵对应的功能图
Fig. 12 Functional schematic of CVM

4 玉米钵苗移栽机构的构型综合

4.1 功能图生成

设计要求:根据玉米钵苗株距大,钵盘口径大、穴深,移箱机构尺寸大的特点与要求,提出一种 6 构件的自动玉米移栽机构^[26],1 个动力输入,4 个转动轴,能够模拟人工移栽的轨迹、动作和姿态要求,既能够满足尖嘴式取土的设计,也能够同时满足大株距栽植的动作,实现自动取苗、持苗和栽植苗。运转稳定,惯性小,可以实现高速移栽。

由设计要求可知:该机构的自由度 $F=1$,构件数 $n=6$,根据公式

$$\begin{cases} N_r = n - 1 \\ N_g = n - 1 - F = 4 \end{cases}$$

式中 N_r ——旋转副数 N_g ——齿轮副数
可知旋转副数 $N_r=5$,旋转副层级为转动轴数 4,齿轮副数 $N_g=4$ 。图 13 的拓扑图符合上述设计要求,运用本文的方法,从拓扑图生成功能图的步骤如下:写出该拓扑图的邻接矩阵;提取基本单元环的邻接矩阵与序号;生成基本环的功能图;通过行列式变换对 81 个基本环组合矩阵进行同构判别,得出这 81 种组合方式异构;基本环连接;写出码值矩阵;生成 6 构件周转轮系的功能图。

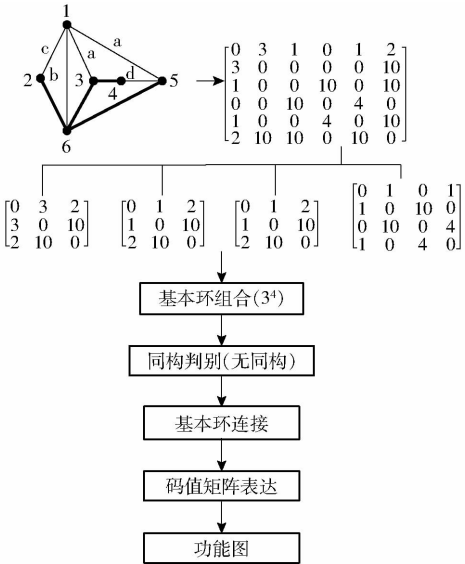


图 13 6 构件周转轮系生成功能图的过程
Fig. 13 Process of six links conversion from topological graph to FSE

考虑到移栽时移栽臂相对第一行星架的转速比为 1:1,以及移栽机构传动箱体结构的紧凑性,采用外啮合齿轮副较合适^[27]。

因此选择基本环组合矩阵 $\mathbf{Q}$ 生成功能图,用图 14 的 4 个基本环功能图组合而成。

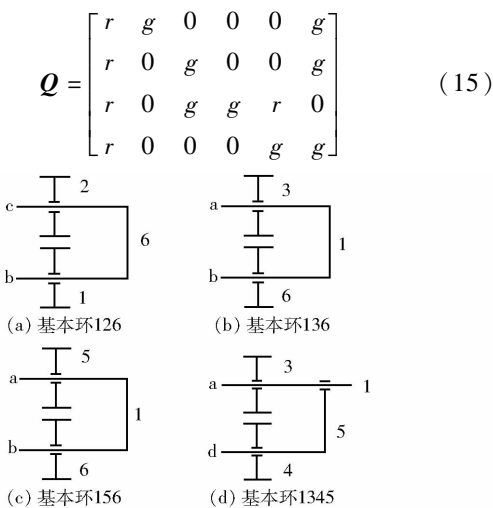


图 14 6 构件周转轮系基本环功能图

Fig. 14 Fundamental circuit of six links epicyclic gear trains

根据单元环功能图连接与简化原则对图 14 的 4 个基本环功能图进行整理,用码值矩阵 R 表示,并生成功能图如图 15 所示。

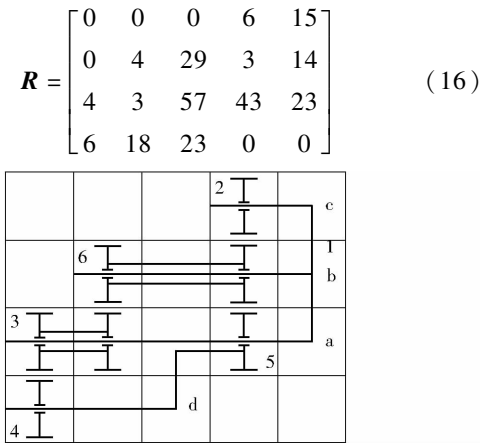


图 15 6 构件周转轮系功能图

Fig. 15 Six links FSE

4.2 移栽机构设计

根据功能图与设计要求,得到图 16 所示玉米移栽机构示意图,图中 1~6 表示的零部件与图 15 中 1~6 表示的构件一一对应。玉米钵苗移栽机构主要由齿轮箱、非圆齿轮组、移栽臂等组成。运行时由传动机构带动主齿轮箱转动;太阳轮固定在机架上,与太阳轮啮合的中间轮 A 带动同一轴上的中间轮 B、中间轮 C 转动,与中间轮 B 啮合的行星轮 B 带动行星轴 a 转动,行星轴 a 与副齿轮箱Ⅳ固联,与中间轮 C 啮合的行星轮 C 带动副齿轮 A 转动,与副齿轮 A 啮合的副齿轮 B 带动移栽臂轴转动,移栽臂轴与移栽臂固联。机构运行时,太阳轮固定,主齿轮箱转动,通过内部非圆齿轮组的传动,副齿轮箱Ⅳ相对于主齿轮箱 1 做周期性回转运动,移栽臂 V 相对于副齿轮箱Ⅳ做周期性往复摆动,从而实现复杂的轨迹与姿态要求。加工完成后齿轮的安装位置如

图 17 所示。

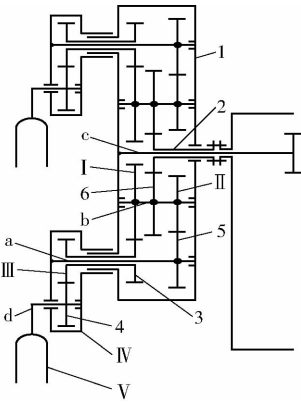


图 16 玉米移栽机构示意图

Fig. 16 Diagram of seedling transplanting mechanism

1. 主齿轮箱 2. 太阳轮 3. 行星轮 C 4. 副齿轮 B 5. 行星轮 B
6. 中间轮 A a. 行星轴 b. 中间轴 c. 主轴 d. 移栽臂轴
- I. 中间轮 C II. 中间轮 B III. 副齿轮 A IV. 副齿轮箱
- V. 移栽臂



图 17 齿轮的初始安装位置图

Fig. 17 Initial installation location diagram of gears

4.3 样机试验

对机构运转时的高速摄影视频进行分析与测量,可以获得移栽臂部件尖点在图像中的坐标位置,对移栽臂部件尖点的相对运动轨迹进行描点,得到相对轨迹曲线。将优化软件输出的仿真轨迹(图 18a)与通过高速摄影描绘的轨迹(图 18b)进行

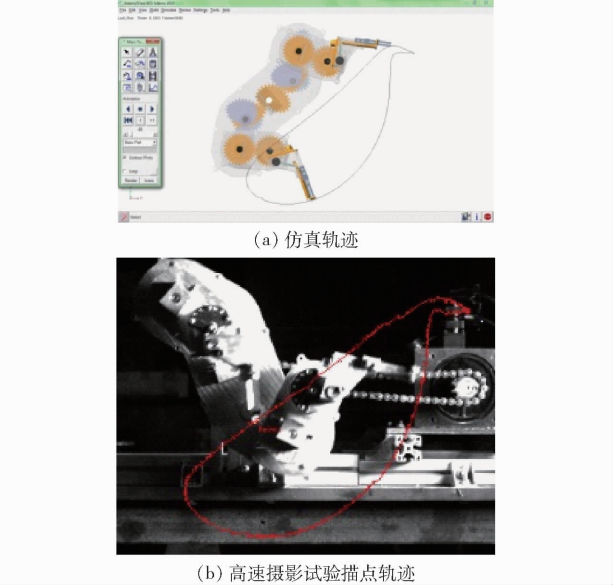


图 18 仿真与试验轨迹对比

Fig. 18 Comparison of simulation trajectory and test trajectory

比对,可以得出两者基本一致的结论,验证了物理样机的正确性,进一步验证了从拓扑图到功能图的自动生成方法的可行性。

5 结论

(1)研究了拓扑图到功能图的自动生成问题。根据给定的拓扑图,用邻接矩阵进行规范表达,编写程序进行基本环的提取,定义码值图与对应的编号,用码值矩阵表达基本环,按照单元环功能图连接与简化原则进行调整,生成周转轮系的码值矩阵,得到

周转轮系的功能图。

(2)根据设计要求,运用拓扑图到功能图的自动生成方法,进行了非圆齿轮双行星轮系玉米钵苗移栽机构的构型综合,完成了机构的结构设计、轨迹仿真。在移栽机械试验平台上,结合高速摄影技术,对移栽机构运转轨迹与姿态进行拍摄,将优化软件输出的仿真轨迹与通过高速摄影描绘的轨迹进行对比,两者基本一致,验证了物理样机的正确性,进一步验证了所提出的从拓扑图到功能图的自动生成方法的可行性。

参 考 文 献

- 1 CHEN Chao. Power flow and efficiency analysis of epicyclic gear transmission with split power[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 59: 96 – 106.
- 2 CHEN Chao, CHEN Jiabin. Efficiency analysis of two degrees of freedom epicyclic gear transmission and experimental validation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 87: 115 – 130.
- 3 陈建能, 黄前泽, 王英, 等. 钵苗移栽机非圆齿轮行星轮系栽植机构参数分析与反求[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 18 – 26.
CHEN Jianneng, HUANG Qianze, WANG Ying, et al. Parametric analysis and inversion of transplanting mechanism with planetary non-circular gears for potted-seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 18 – 26. (in Chinese)
- 4 ZHANG Xin, FAN Shouwen. Synthesis of the steepest rotation pitch curve design for noncircular gear[J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 102: 16 – 35.
- 5 叶秉良, 易卫明, 俞高红, 等. 不完全非圆齿轮传动钵苗移栽机构缓冲装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 69 – 75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170308&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.008.
YE Bingliang, YI Weiming, YU Gaohong, et al. Buffer device of transplanting mechanism for plug seedlings based on transmission with incomplete non-circular gears[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 69 – 75. (in Chinese)
- 6 叶秉良, 吴国环, 俞高红, 等. 非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 68 – 73, 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161109&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.009.
YE Bingliang, WU Guohuan, YU Gaohong, et al. Optimized design and tests on rice potted seedling transplanting mechanism of planetary gear train with non-circular gears[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 68 – 73, 67. (in Chinese)
- 7 小西达也, 山影征男. 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.
- 8 赵匀, 黄巨明, 张国凤, 等. 变形椭圆齿轮分插机构运动分析与优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 48 – 52, 61.
ZHAO Yun, HUANG Juming, ZHANG Guofeng, et al. Kinematic analysis and optimization of transplanting mechanism with deformable elliptic gears transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 48 – 52, 61. (in Chinese)
- 9 赵匀, 高林弟, 陈建能, 等. 变形偏心非圆齿轮行星系分插机构设计和参数优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 74 – 77.
ZHAO Yun, GAO Lindi, CHEN Jianneng, et al. Design and parameters optimization of deformed eccentric non-circular gears transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 74 – 77. (in Chinese)
- 10 陈建能, 赵匀. 高速插秧机椭圆齿轮行星系分插机构的参数优化[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 46 – 49.
CHEN Jianneng, ZHAO Yun. Parameters optimization of transplanting mechanism with planetary elliptic gears for high-speed transplante[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 46 – 49. (in Chinese)
- 11 俞高红, 黄小艳, 叶秉良, 等. 旋转式水稻钵苗移栽机构的机理分析与参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 16 – 22.
YU Gaohong, HUANG Xiaoyan, YE Bingliang, et al. Principle analysis and parameters optimization of rotary rice pot seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 16 – 22. (in Chinese)
- 12 俞亚新, 骆春晓, 俞高红, 等. 椭圆-不完全非圆齿轮行星系取苗机构参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 62 – 68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130612&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.012.
YU Yaxin, LUO Chunxiao, YU Gaohong, et al. Parameters optimization of pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears and incomplete non-circular gear[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 62 – 68. (in Chinese)

- 13 ZHOU Maile, SUN Liang, DU Xiaoqiang, et al. Optimal design and experiment of rice pot seedling transplanting mechanism with planetary bezier gears[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(6): 1537 – 1548.
- 14 赵雄, 王川, 杨茂祥, 等. 非圆齿轮行星轮系自动取苗机构逆向设计分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 30 – 36.
ZHAO Xiong, WANG Chuan, YANG Maoxiang, et al. Reverse design and analysis of automatic seedling pick-up mechanism with non-circular gear planetary train[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 30 – 36. (in Chinese)
- 15 赵雄, 陈建能, 杨茂祥, 等. 二阶自由非圆齿轮行星系钵苗移栽机取苗机构[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 123 – 127. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140419&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.019.
ZHAO Xiong, CHEN Jianneng, YANG Maoxiang, et al. Seedling pick-up mechanism of planetary gear train with two-order general non-circular gears[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 123 – 127. (in Chinese)
- 16 孙良, 刘兵, 陈旋, 等. 差速水稻钵苗 Z 字形宽窄行移栽机构设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 18 – 27.
SUN Liang, LIU Bing, CHEN Xuan, et al. Design of differential transplanting mechanism for zigzag wide-narrow row rice pot seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 18 – 27. (in Chinese)
- 17 俞高红, 廖振飘, 徐乐辉, 等. 大株距行星轮系蔬菜钵苗栽植机构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 38 – 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150706&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.006.
YU Gaohong, LIAO Zhenpiao, XU Lehui, et al. Optimization design and test of large spacing planetary gear train for vegetable pot-seedling planting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 38 – 44. (in Chinese)
- 18 赵匀, 罗华, 蒋鹏鹏, 等. 步行式偏心-变位齿轮行星轮系宽窄行分插机构运动分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 9 – 15.
ZHAO Yun, LUO Hua, JIANG Pengpeng, et al. Kinematics analysis on wide-narrow row walking-type transplanting mechanism with eccentric and eccentric-modified planet gears[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9): 9 – 15. (in Chinese)
- 19 叶秉良, 朱浩, 俞高红, 等. 旋转式水稻钵苗移栽机构动力学分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 53 – 61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160508&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.008.
YE Bingliang, ZHU Hao, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and tests of rotary transplanting mechanism for rice pot-seedling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 53 – 61. (in Chinese)
- 20 陈建能, 章鹏华, 王英, 等. 旋转式钵苗栽植机构多目标参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 46 – 53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150508&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.008.
CHEN Jianneng, ZHANG Penghua, WANG Ying, et al. Multi-objective parameter optimization and experiment of rotary seedling planting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 46 – 53. (in Chinese)
- 21 SUN Liang, CHEN Xuan, WU Chuanyu, et al. Synthesis and design of rice pot seedling transplanting mechanism based on labeled graph theory[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143(12): 249 – 261.
- 22 李雨桐, 王玉新. 汽车自动变速箱中周转轮系设计方案的自动生成[J]. 中国机械工程, 2013, 20(10): 2742 – 2752.
LI Yutong, WANG Yuxin. Computerized creative design of epicyclic gear mechanisms for transmission systems of automotive vehicles[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 20(10): 2742 – 2752. (in Chinese)
- 23 王玉新, 张旭光, 毛晓辉. 机构概念设计符号方案的自动识别[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(6): 796 – 803.
WANG Yuxin, ZHANG Xuguang, MAO Xiaohui. Automatic identification of symbolic schemes of conceptual design of mechanisms[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(6): 796 – 803. (in Chinese)
- 24 TSAI L. An application of the linkage characteristic polynomial to the topological synthesis of epicyclic gear trains[J]. Journal of Mechanical Design, 1987, 109(3): 329 – 336.
- 25 TSAI L. Mechanism design: enumeration of kinematic structures according to function[M]. USA: CRC Press, 2000.
- 26 SUN Liang, MAO Shiming, ZHAO Yun, et al. Kinematic analysis of rotary transplanting mechanism for wide-narrow row pot seedlings[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(2): 475 – 485.
- 27 王英, 陈建能, 赵雄, 等. 非圆齿轮行星轮系传动的栽植机构参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 85 – 93. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150912&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.012.
WANG Ying, CHEN Jianneng, ZHAO Xiong, et al. Parameter optimization and experiment of planting mechanism driven by planetary non-circular gears[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 85 – 93. (in Chinese)