

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.044

基于进化理论的变自由度机构设计与原型系统研究

华尔天^{1,2} 鹿浩¹ 李生辉¹ 沈永康¹ 汤守伟¹

(1. 浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310023; 2. 浙江水利水电学院, 杭州 310018)

摘要: 针对现有变自由度机构设计中存在以拓扑综合为主、系统研究机构设计过程不充分、创新程度不高等问题, 引入进化理论完成变自由度机构的设计。首先, 根据设计要求建立“源”树图模型; 然后, 利用进化计算扩展机构的形式得到欠驱机构的树图模型; 最后, 将树图模型转换为机构运动简图, 通过筛选评价得到满足要求的变自由度机构。在此基础上, 构建了一种变自由度机构设计原型系统, 该系统包含需求分析、进化计算、评价筛选、设计知识库4个模块, 实现了一定程度上的人机混合智能设计。以采摘机传动机构设计为例, 验证了该原型系统的有效性及其合理性。

关键词: 变自由度机构; 进化设计; 树图模型; 原型系统

中图分类号: TH122 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)03-0390-11

OSID:



Innovation Design and Prototype System of Variable Freedom Mechanism Based on Evolution Theory

HUA Ertian^{1,2} LU Hao¹ LI Shenghui¹ SHEN Yongkang¹ TANG Shouwei¹

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

2. Zhejiang University of Water Resources and Electric, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems in the existing design research of variable-degree-of-freedom mechanisms that mainly focused on topological synthesis and lacked of systematic research on its design process, the evolutionary theory was introduced to complete the design of variable-degree-of-freedom mechanisms. Firstly, according to the design requirements and pre-defined tree diagram structure, a “source” tree diagram model was established; secondly, evolution operations such as reproduction, crossing and mutation were used to expand the mechanism to obtain the tree diagram model of underdrive mechanism; finally, the tree model graph was transformed into mechanism movement diagram. The mechanism that met the axiom design criteria and motion requirements was obtained through screening and evaluation. Based on this, a prototype system for intelligent design of variable degree of freedom mechanism was constructed. The system included four modules of requirements analysis, evolutionary calculation, evaluation and screening, and database, which realized intelligent design. The realization process and programming steps of the system were used to illustrate the operation of each module. Taking the driving mechanism of picking machine as an example, the validity and rationality of the prototype system was verified.

Key words: variable freedom mechanism; evolutionary design; tree graph model; prototype system

0 引言

传统机构运动形式单一, 能够完成的任务有限, 而大部分机械设备需要通过执行一系列运动来完成目标生产或加工任务。变自由度机构可按不同的需求, 在运动中改变构态, 使之适应不同的任务, 从而

实现常规机构需要多个或复杂的设计才能完成的安全保护、顺序动作、均衡作用力等功能^[1]。李林等^[2]提出了变自由度机构概念, 以及剩余自由度不仅不影响机构的正常工作, 而且能改善机构性能的观点。曲志刚等^[3]给出了两种变自由度机构的形成方法——变约束运动副法和限动运动件法, 并分

收稿日期: 2020-04-27 修回日期: 2020-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(61772469)

作者简介: 华尔天(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事机构设计、进化设计和概念设计研究, E-mail: het@zjut.edu.cn

析了变自由度机构的功能。郭宗和等^[4]根据自由度的变化规律对变自由度机构进行了分类,并利用变胞机构原理和拓扑理论对变自由度机构自由度的变化过程进行了构态变换描述,提出了一种对不同类型的变自由度机构进行拓扑分析的“杆-杆”合并的新方法。苏昱景等^[5]结合工程实例研究了基于变胞原理的变自由度机构,提出相对于传统结构,变自由度机构可在满足基本功能的同时优化受力性能和结构功能。PFURNER等^[6]研究了变自由度单环机构的类型综合和重构分析,提出将两个杆件插入多自由度单环过约束机构对变自由度单环机构进行类型综合的新方法。变自由度机构凭借其特殊性质,在插秧机、联合收获机等机构设计上应用比较广泛^[7]。郭宗和等^[8]基于运动链图谱和拓扑图,利用变自由度机构的结构特点设计了一种机械抓手。王才东等^[9]运用变自由度机构构型设计方法,设计了变自由度螺栓夹紧定位机构,并对其不同工作阶段的不同功能结构进行分析,实现了成组螺栓的夹紧与释放。CHAUDHURY等^[10]对一种多自由度并联机械手和闭环机构进行了优化设计。变自由度机构作为一种可重构机构,能够满足多任务、多工况与多功能的要求,可实现“一机多用”的目的,对先进制造技术领域和新一代机器人的发展具有重大意义^[11]。

目前,对变自由度机构的研究主要集中在类型综合方面,利用拓扑图、邻接矩阵来表述机构各阶段构态变化及综合过程,针对杆-杆合并、运动副形式的变化等情况对不同阶段的构态进行分析^[12-15],系统研究机构设计过程的不多,且大多数变自由度机构的设计依赖于对原机构的改进,制约了机构形式上的创新。此外,在变自由度机构的构态表述方面,拓扑图和邻接矩阵虽可相互转换、易于编程及可视化,适合对构件关系的变化进行分析,但构态的变化对应不同阶段矩阵的转换,由矩阵所展现出的杆件和运动副关系不易直观得出机构各阶段运动与整体运动的联系。

针对上述变自由度机构设计中存在的问题,本文利用树图模型来代替拓扑图和矩阵对变自由度机构的形态进行表述,引入进化设计理论完成变自由度机构的创新设计。通过复制、交叉、变异3种进化运算扩展机构形式,实现创新设计,构造变自由度机构的创新设计原型系统,以为设计人员提供一种工具化设计手段。

1 进化设计

1.1 进化设计理论

遗传生物学中,环境的选择作用决定了生物个体的进化方向。进化设计是指采用进化机制从一组

产品实例出发,利用选择、复制、交叉、变异遗传算子,在适应函数的引导下,继承原有产品优良基因,生成具有更好性能指标的下一代产品群^[16]。遗传编程(Genetic programming, GP)作为进化计算的一个分支,它不同于一般遗传算法(Genetic algorithm, GA,通过设定个体复制、交叉、变异的比例和约束函数来选择较为优异的个体),采用动态的非线性树状数据结构,末端叶节点表示参数,分支表示函数集运算,针对不同问题领域可以灵活定义树节点,且编码结构可以携带语义信息,不需要建立编码空间与解空间的映射^[17],适合智能化求解技术。

此外,树图的异构编码形式十分符合机构在进化求解过程中的结构不确定特性,利于机构的创新设计。许红^[18]利用GP的异构编码形式将机构表示成树状结构,通过遗传操作并采用一定评价准则评价个体优劣,进而得到新的机构构型。华尔天等^[19]在机构运动链再生法中引入进化设计理论,用遗传编程代替其中的数综合过程,解决了数综合过程复杂繁琐的计算问题。相比矩阵和拓扑图,树图模型凭借其特殊的层次性、从属性、并列性,在形式上更接近运动链,结构性强,对于具有多构态的变自由度机构,可通过树图对不同阶段的运动实现封装,更容易对各部分构件进行约束选择,以完成不同运动构态间的转换。

进化设计作为一种新的设计方法,属于现代设计方法的范畴,同其他设计方法共同作用以提高设计效率和设计质量,具备自适应强、应用范围广、创新性高、设计柔性好等特点^[20]。其核心步骤为:①将设计要求转化为产品基因。②确定进化路线及进化操作方式。③执行进化运算过程。④对产品基因进行解码。⑤方案评价及优化。

进化运算过程中,根据适应度函数选择优良个体进行遗传操作十分重要。适应度函数作为一种控制运算进程的约束函数,能够很大程度上影响进化过程的快慢及进化结果的准确性。遗传算法中有适应度函数,而GP相比遗传算法,适应度函数在进化过程中发生变化,不断改善,实现结构与功能的并行演化。在机构设计中引入进化理论扩展机构形式,也需要对进化运算过程添加相应的约束函数,使机构尽可能减少不合理结果的产生。

1.2 定向进化设计

为了使机构在演化过程中能够围绕设计要求拓展构型,减少不合理树图的产生,一定程度上实现定向进化,对进化设计过程作以下改进:①分析任务要求。②根据设计要求确定原动件及执行件,将其作为演化过程中的不变量。③生成“源”树图模型,即

初始化种群。④添加约束函数及终止条件。⑤执行复制、交叉和变异3种进化运算操作。⑥迭代进化过程终止,得到进化后的欠驱机构树图模型。

以图1所示的鄂式破碎机为例,给出机构定向进化过程中树图模型的语义空间规则。图2为相应的树图模型,F表示机架,数字节点(1,2,⋯,5)表示杆件,从最上层原动件的位置出发,树的末端节点为执行件及其所连机架,节点之间的连线表示运动副,转动副R用‘—’表示,移动副P用‘=’,组合运动副用‘- -’表示。树图中,实线圆部分为进化过程中的不变量,虚线圆部分为进化运算部分,从树图可以很直观地看出该机构为6杆机构,7个转动副,整体机构自由度为1。

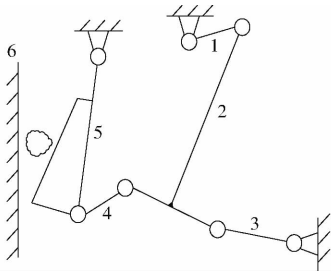


图1 鄂式破碎机机构
Fig. 1 Mechanism of jaw crusher

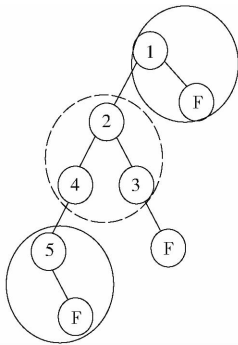


图2 鄂式破碎机机构树图模型
Fig. 2 Tree graph model of jaw crusher mechanism

1.2.1 进化运算

复制、交叉、变异3种遗传算子可对应机构杆件、运动副的数目、类型及其连接关系等结构变化过程。进化过程中,根据运动要求确定机构的原动件部分和执行部分,将其作为进化运算中的不变量,对其余部分执行运算操作。以图1所示的鄂式破碎机为例,说明具体的操作过程。

(1)复制

复制对应增添或合并杆件、运动副,一般不改变机构的整体结构形式,增添会使得机构繁杂,导致运动传递损失,而合并可以简化运动链,在能完成基本运动任务的同时降低机构复杂程度。

根据定向进化设计规则,将1-F和5-F作为进化运算中的不变量,对杆2、3、4两两合并后,原机

构就变为简单的5杆及4杆机构,图3a不满足自由度要求,图3b对应的原机构如图4所示,虽一定程度上简化了机构运动链,但是机构执行杆件的运动轨迹也随之简化,机构对石块的破碎效果有所下降。

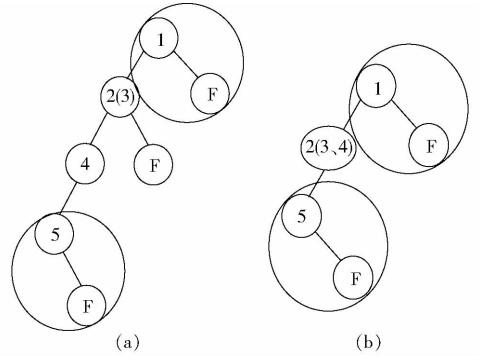


图3 复制操作后的树图模型

Fig. 3 Tree graph model after reproduction

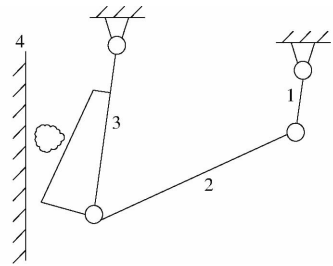


图4 鄂式破碎机机构1
Fig. 4 Mechanism 1 of jaw crusher

大部分复制情况可以使得机构的运动轨迹更为完整精准,而部分合并操作则能够减少机构的信息量及运动损失,需要根据机构的具体应用情况做出判断。

(2)交叉

交叉对应改变运动副、杆件的连接关系,通过交换机构杆件或运动副在机构中的位置来改变运动传递方向及运动形式。如交换图2树图模型中杆件2、3、4的顺序可得到不同形式的新鄂式破碎机机构(图5),交换过程中整体杆件数和运动副数都不发生改变。

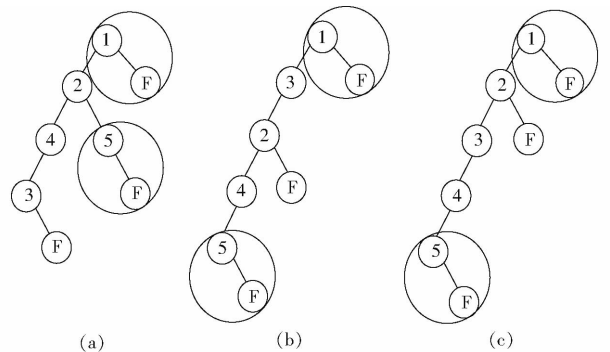


图5 交叉操作后的树图模型

Fig. 5 Tree graph model after crossing

交叉操作能够在保留所有原杆件、运动副的情

况下对机构进行改进,使其完成运动任务,操作便捷。交叉相同类型构件会产生同构体,需要进行同构识别。图6为由图5c还原得到的改进鄂式破碎机结构。

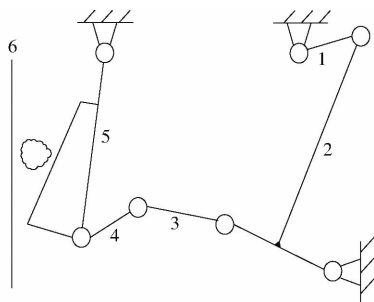


图6 鄂式破碎机机构2
Fig.6 Mechanism 2 of jaw crusher

(3) 变异

变异是机构进化设计过程中一个非常重要的操作,能够大大增加机构的创新程度和应用范围。变异操作对应改变运动副或杆件,包括改变杆件尺寸形状,或是将普通运动副替换为组合运动副,通过力及位移限位来使机构适应不同情况等。

选择表1构件中标有序号的杆件、运动副,在进化过程中对树的节点和枝干进行替换,实现变异操作。随着构件库中杆件、运动副内容增加,变异操作所能够产生的结构形式更加丰富。

表1 部分构件库

Tab.1 Component library

序号	杆件	运动副
1		
2		
3		
4		
5		
⋮	⋮	⋮

如图7所示,先将原鄂式破碎机机构中杆件3的一端转动副替换为滑槽副,然后将杆2由三副杆变异为二副杆,改变杆2、3、4之间的连接关系。该变异操作通过控制转动副在滑槽内的移动情况来改变杆件5对石块的破碎程度,增加了执行杆件的破碎范围,能够有效防止在破碎大物块时发生卡死的情况。

由于进化运算过程具有随机性,为了得到满足设计要求的变自由度机构,在以上3种运算规则的基础上,还需要添加相应的约束函数,使逐步演化而

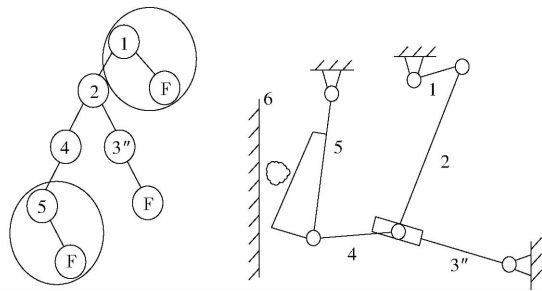


图7 鄂式破碎机机构3及其树图模型
Fig.7 Mechanism 3 of jaw crusher and its tree graph model

来的机构符合变自由度机构的特征。

1.2.2 约束函数

变自由度机构有以下几个特征:①具有多个自由度。一开始机构的原动件数小于自由度数目,为欠驱机构。在运动过程中机构部分构件受约束,自由度数发生改变,变化后机构运动确定。②自由度的改变不一定产生拓扑结构的改变。当机构到达运动死点时,受外力作用机构产生运动,自由度变化。

根据变自由度机构的特征,设计进化运算中的约束函数如下:

(1) 机构自由度计算公式为

$$F = 3(N - 1) - 2P_l - P_h \quad (1)$$

式中 F ——机构自由度

N ——机构杆件数(含机架)

P_l ——低副数目 P_h ——高副数目

进化设计过程中,由树图模型计算对应机构的自由度,为满足变自由度要求,其机构应为欠驱机构,即

$$F > d \quad (2)$$

式中 d ——驱动杆数, $d \geq 1$

(2) 定义树图长度即机构运动链长度为 L ,复制操作中增加或减少的杆件数要根据设计要求在范围内变化。

树图的原动件为树图的第1层,树图底端运动件为树图的最高层(不含机架),“源”树图模型树长 $L_0 \geq 3$,如图8所示。当机构运动链不存在支路的情况下,树图长度取得最大。在进化中给定树图的层数,控制进化计算迭代终止。

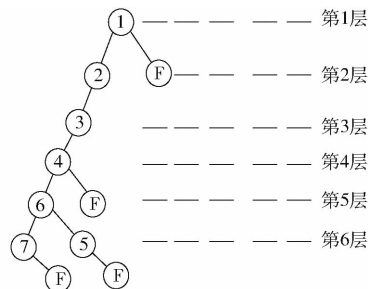


图8 树图层次结构

Fig.8 Hierarchical tree structure

$$L_0 \leq L \leq N - 1 \quad (3)$$

(3) 对于低副杆,在复制运算中每引入 1 个 n 副杆给整体机构引入 $2n - 3$ 个自由度,当要求进化前后机构的自由度数保持不变时,需要在树图模型中添加对应数目的机架。

$$f = \sum_{i=2}^n b_i(2i - 3) \quad (4)$$

式中 f ——机架数

b_i —— i 副杆数目,取值为 $2, 3, \dots, n$

(4) 复制、交叉、变异的概率。复制作为进化运算过程的基础,为交叉及变异运算提供了解的搜索空间;交叉则能够进一步扩大搜索空间,在构件、运动副数不变的情况下扩展机构构型,增加机构适用范围;变异随机发生,可以避免进化运算陷入局部最优解,增加优解情况,提高机构构型的创新程度。

进化运算中,复制、交叉、变异的概率互相独立。设复制概率为 P_r ,交叉概率为 P_c ,变异概率为 P_m 。为使机构在杆件数稳步递增的情况下,交叉得到的构型数目尽可能多,保证定向进化过程的稳定,此处设进化过程中 $P_r = 0.5, P_c = 0.7$ 。变异过程会引入大量复杂形态的杆件及运动副,给机构的运动传递带来损耗,因此 P_m 越小越好,此处设 $P_m = 0.02$ 。

(5) 根据树图模型所表达的构件数、运动副数等信息,计算排除不符合式(1)、(2)的运算结果,将满足欠驱机构要求的机构树图模型保存下来。

1.2.3 基因编码

进化运算过程主要受两个因素的控制:约束函数和编码规则。编码规则为模型中特定遗传信息的传递提供了一种演化途径。

为了使进化的模型满足变自由度机构的要求,需要传递进化过程中机构的运动副数、杆件数及自由度的变化情况遗传信息,通过计算判别是否符合欠驱机构要求。定义编码规则如图 9 所示。

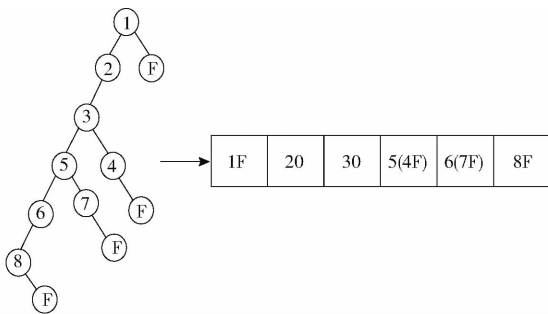


图 9 基因编码结构

Fig. 9 Gene coding structure

基因编码中,将树图的分层结构进行分段表示,进化运算对应改变编码结构中的基因段,每一段以空集“0”或机架“F”结束,可根据设计要求对某一段

编码进行选择保护,使其不参与进化运算过程。计算机可通过编码结构实现遗传信息的保留与计算:数字表示构件;数字 + F 计为 1 个运动副;分层之间的运动副根据构件的数目计算,如,2030 之间为 1 个运动副,3054F 为 1 个运动副,54F67F 为 2 个运动副。由图 9 编码结构可知,改机构模型的构件数为 8,运动副数为 11,为欠驱机构类型。

2 创新设计流程

图 10 为变自由度机构创新设计的实现过程。

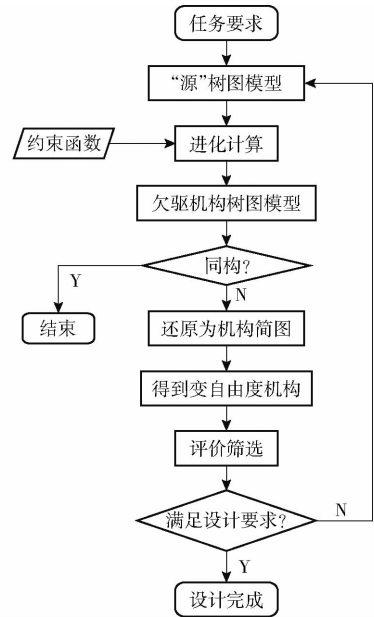


图 10 变自由度机构创新设计流程图

Fig. 10 Innovative design flowchart of variable freedom mechanism

(1) 分析设计任务。针对任务要求确定机构的原动件和执行件构件形式,如使用曲柄滑块完成移动,曲柄摇杆完成急回运动,双摇杆机构完成转向运动等,使变自由度机构的进化设计过程围绕运动要求进行。

(2) 建立“源”树图模型。即根据设计任务确定设计参数,如原动件类型、初始树图长度等,建立“源”树图模型。以下创新设计流程所提及的模型均为通用树图模型。

根据 1.2 节中给出的树图模型,建立机构“源”树图模型如图 11 所示。根据具体的设计任务要求,实线内部分可在进化设计之前发生改变,如 1 - F 原动件部分可选择凸轮驱动或活塞冲程驱动、曲轴转动驱动等, $(n - 1) - F$ 部分也可根据设计任务做出相应变化。对于多驱动件、多执行件工作的特殊情况,如图 12 所示,两个执行杆件同时运动时,对应叶子节点应位于树图同一层;存在先后运动顺序时,后执行件节点则置于树图下层。

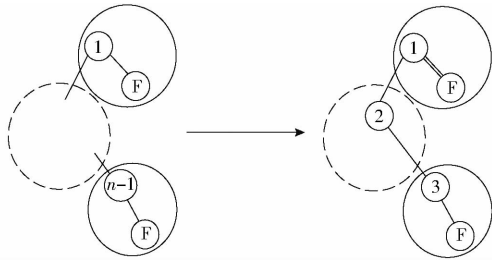


图 11 “源”树图模型

Fig. 11 “Source” tree graph model

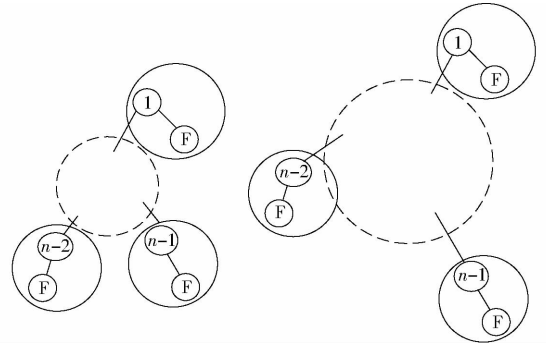


图 12 多执行杆件树图模型

Fig. 12 Tree model of multi-execution members

(3) 进化计算。对“源”树图模型进行定向进化设计,通过如 1.2.1 节所述的复制、交叉、变异 3 种运算演化树图模型,扩展机构形式(图 13)。复制、交叉、变异运算的比例可按设计任务进行调整。

在复制进化模型的基础上,对其中部分杆件、运动副进行交叉、变异运算,改变其数目和类型,并通

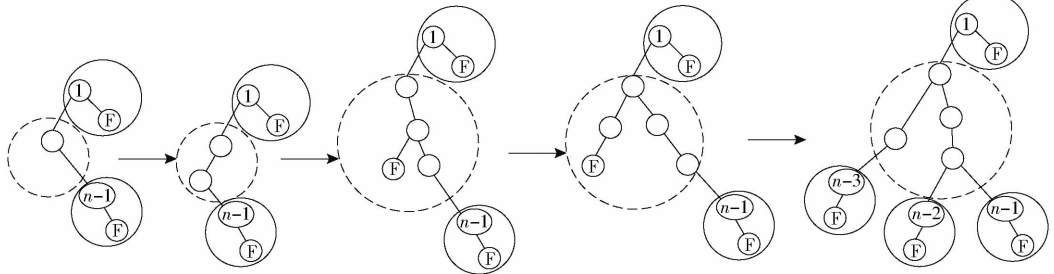


图 13 复制进化模型

Fig. 13 Evolution model of reproduction

过约束函数控制进化计算得到欠驱机构的树图模型(图 14)。

对两者进行交叉运算后,机构的杆件关联关系发生改变,对应拓扑图也发生改变;图 15b 所示交叉运算中,杆件 3、4 为同类型构件时,拓扑图形式不变,为同构机构。设计过程中的同构识别主要针对该同构类型。

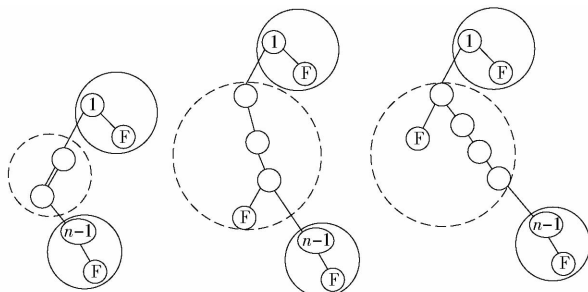


图 14 变异进化模型

Fig. 14 Evolution model of mutation

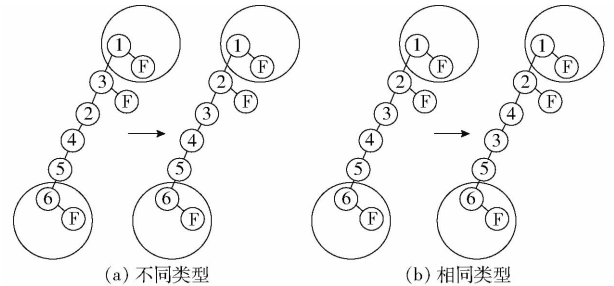


图 15 交叉运算

Fig. 15 Crossover operation

(4) 同构识别

将机构转换为拓扑图的形式,如果两个机构的拓扑图中点与线的关联关系一一对应,则称这两个机构同构^[21]。进化运算得到的机构树图模型很多,同构会增加后续将树图转换为机构简图的工作量。因此,在进化过程中还需要对得到的树图模型进一步作同构识别,排除部分冗余多余的构型。树图模型的进化过程中,复制运算不产生同构体,而交叉同类型构件会产生同构体。通常情况下,机构的构件数越多,产生的同构体越多,如 5 杆机构有 1 种同构体,1 种非同构体,7 杆机构有 192 种同构体,8 种非同构体基本构型。

同构识别过程如图 16 所示,主要以机架 F 在机构中的位置关系作为比对标准,快速识别相同类型构件交叉运算产生的同构体。首先,通过 1.2.3 节中的基因编码将树图模型转换为分段字符串;然后,对比字符串中 F 的位置完成同构识别,排除冗余构型。

(5) 得到变自由度机构。根据树图模型中叶子节点和枝干与机构构件的对应关系,将第 4 步中完成同构识别的欠驱机构树图模型还原为机构简图,然后对机构中不同运动构件进行约束,即可改变机

如图 15a 所示,由于杆件 2、3 为不同类型构件,

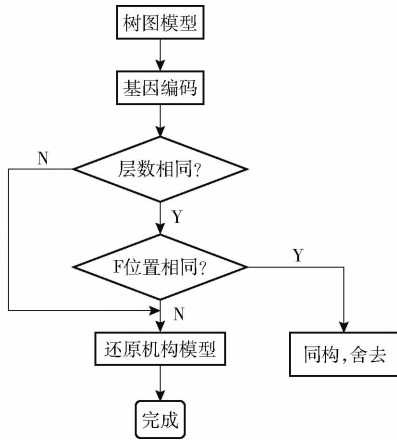


图 16 同构识别流程图

Fig. 16 Isomorphic identification flowchart

构的自由度,完成变自由度设计要求。树图模型遵循从上到下的先后运动传递,树图模型中靠上层部分构件优先执行运动,位于树图末端的运动构件对应周期运动最终阶段;各执行杆件部分节点位于树图同一层,则不同执行件同步运动。

变自由度机构在运动过程的不同阶段能够改变自由度,由欠驱不确定运动转换为确定运动,完成不同环境下的运动要求。对于多自由度欠驱机构,自由度的变化可通过改变构件的约束度进一步实现,如添加机架约束、替换低副构件为高副构件,替换移动副、转动副为组合运动副等;还可通过改变与机架相连的构件属性,使该构件成为驱动件,从而确定运动。

如图 17 所示,1-F 和 6-F 分别为原动件和执行件,机构为二自由度欠驱机构,整体运动轨迹不确定。当把 6-F 由执行件转换为原动件后,机构拥有确定运动,2 个原动件共同控制构件 3 的平面运动。

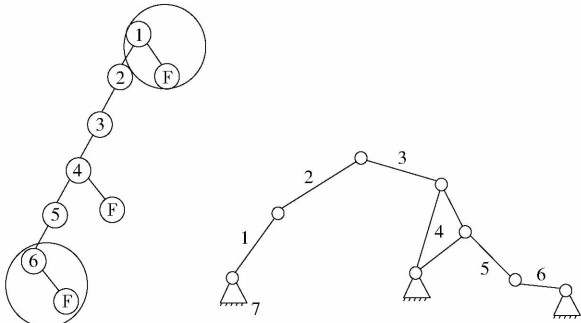


图 17 进化运算得到的树图模型及其机构简图

Fig. 17 Tree diagram model and mechanism diagram obtained by evolution operation

3 评价筛选

创新设计流程得到的变自由度机构还需要作进一步筛选和评价,去除不符合设计要求的机构构型,具体的评价筛选规则如下:

(1) 满足运动要求

进化设计而来的机构应满足基本的运动要求,即执行件的运动能够按要求成功实现。可通过还原前的树图模型结构分析机构的运动传递方向,从树图顶端第 1 层原动件到第 N 层的执行杆件,执行件在树图中的位置应根据设计任务进行选择判别。如图 18 所示,执行件的位置选择不同,机构的运动传递情况会发生改变,两种树图模型相比,图 18a 还原得到机构更适合远距离的运动传递。

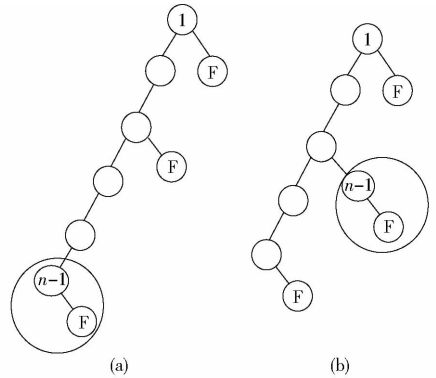


图 18 两种不同执行件位置情况的树图模型

Fig. 18 Model graph for two different actuator positions

(2) 满足公理设计准则要求

选用公理设计准则作为本文机构设计的一条评价准则。公理设计将产品的设计领域分为用户域、功能域、物理域和过程域,主要解决设计中存在的:设计方案能否满足产品功能要求? 满足的程度如何? 当有多个设计方案时,如何选择等问题^[22]。公理设计有两大准则:①独立公理。独立公理即当产品有两个或以上功能要求时,设计方案需满足一个功能要求,且不影响其他的功能要求。由于进化设计过程中,执行件不参与进化过程、独立运动,因此符合独立公理。②信息公理。进化过程会产生许多满足同种运动要求的相似机构,需要进一步对所得机构评价取优。信息公理作为公理设计的两大准则之一,其特点是利用满足功能要求的概率形式表达设计者对评价指标的满意程度,即隶属度,且不像其他评价方法那样需要考虑权重^[23]。信息公理中信息量计算公式为

$$\begin{cases} I_i = \text{lb} \frac{1}{P_i} = -\text{lb} P_i \\ P_i = \frac{A_{cr}}{A_{sr}} \end{cases} \quad (5)$$

式中 I_i ——满足某个功能需求的信息量

P_i ——满足某一功能需求的概率

A_{sr} ——满足该功能需求所能提供的系统范围

A_{cr} ——设计范围与系统范围的公共范围

对于多功能需求,总信息量为满足各功能需求

的信息量之和。信息量作为设计复杂性的度量,而机构由杆件和运动副组成,机构杆件数、运动副数是影响基本运动的重要因素,两者数量越多,机构形式越复杂,机构运动时能量传递损失增加。参照式(5)可推出机构信息量计算公式为

$$I = - \left(\text{lb} \frac{N_{cr}}{N} + \text{lb} \frac{P_{lcr}}{P_l} + \text{lb} \frac{P_{hcr}}{P_h} \right) + ch \quad (6)$$

式中 N_{cr} 、 P_{lcr} 、 P_{hcr} —— N 、 P_l 、 P_h 范围与规定的设计范围的公共范围

c ——复合铰链的惩罚因子,取正值

h ——复合铰链数目

在选择还原得到的机构时,可将最小机构信息量作为评价标准。当分子分母数值相近时,信息量为0,为最佳选择。

如图19所示,3种曲柄滑块机构的信息量 $I_a = I_b < I_c$,通过进一步对比机构a、b的树图长度 $L_a > L_b$,可得机构b为较合适的机构类型。

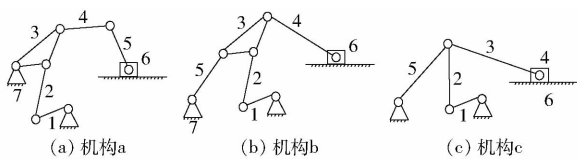


图19 多杆曲柄滑块机构

Fig. 19 Multi-rod crank slider mechanism

4 原型系统

4.1 系统框架

根据上述变自由度机构创新设计过程,构建了一个包含设计知识库、需求分析、进化计算、评价筛选4个模块的变自由度机构设计原型系统^[24-25],力求从用户的设计要求出发快速实现变自由度机构的设计。系统的整体框架如图20所示。

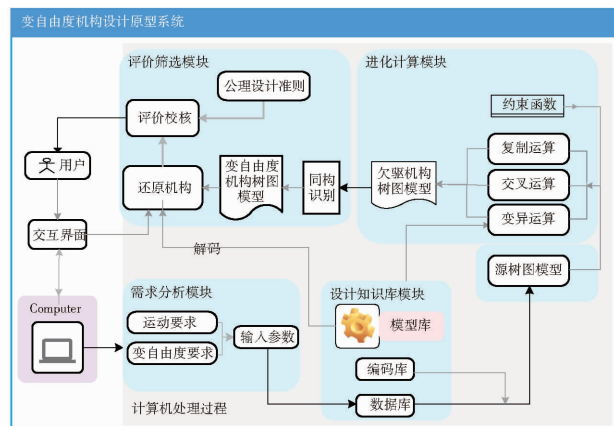


图20 系统框架

Fig. 20 Mechanism of jaw crusher

(1) 设计知识库模块

设计知识库模块主要包含3部分:①模型库,由

创新设计过程中树图模型的语义空间及构件库组成,语义空间对应树图与机构之间的转化规则,构件库用来存放不同结构形式的杆件和运动副,供在进化计算中选择调用(表1),随着设计系统的使用,构件库的内容会不断增加,丰富变自由度机构的构型。
②编码规则库,用来完成树图模型和基因编码之间的转换规则,方便计算机实现进化计算及同构识别。
③数据库,用来存放需求分析模块得到的输入参数等数据。

(2) 需求分析模块

即用户通过人机交互界面将设计任务要求输入系统中,系统根据设计任务要求,确定所设计机构所需要的自由度数、原动件以及执行件的种类和数目等输入参数,再将各参数输入到设计知识库模块中供进化计算模块调用参与运算。

功能向结构参数的转换可以通过构造相应的功能结构矩阵实现,针对不同的运动要求,由功能结构矩阵确定原动件、驱动件数目及类型,并由自由度要求确定进化计算中“源”树图模型的长度、构件数、运动副数等输入参数。表2为全低副构件情况下,二自由度欠驱机构的相应的输入参数组合。

表2 输入参数组合(全低副)

Tab. 2 Input parameter combination (full low pair)

杆件数	运动副数	树图长度
5	5	4
7	8	4~6
9	11	5~8
11	14	5~10

(3) 进化计算模块

该模块主要完成创新设计流程中从“源”树图模型到进化后欠驱机构树图模型这一部分工作。根据1.2节中定义的复制、交叉、变异进化运算规则,利用编码运算完成进化设计过程,扩展机构的结构形式,实现创新设计。进化计算过程中加入约束函数,由编码结构计算树图模型的自由度,排除不符合欠驱要求的机构构型使机构围绕欠驱要求定向进化。

(4) 评价筛选模块

评价筛选模块包含进化运算后欠驱机构树图模型的同构识别及还原解码为变自由度机构后的评价校核两部分。进化计算过程得到的树图模型形式多样,首先,通过第2节中的同构识别方法排除欠驱机构的冗杂构型;然后,选择符合图21所示自由度变化处理过程的欠驱机构作为变自由度机构;最后,将得到的变自由度机构树图解码还原为机构简图,并

根据第3节中的运动性及公理设计评价准则,利用式(6)计算作进一步评价筛选。

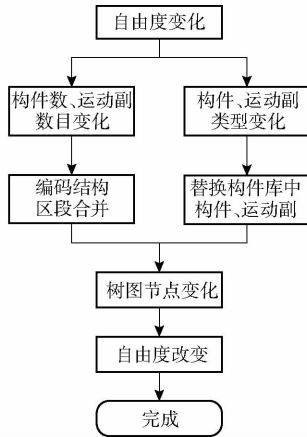


图 21 自由度变化处理过程

Fig. 21 Process of changing degrees of freedom

4.2 系统实现过程及程序设计

本系统基于 Matlab 平台实现,使用软件的 GPlab 工具箱加以修改作为原型系统中的进化运算模块,再融合需求分析、设计知识库以及评价筛选 3 个模块,实现人机混合智能设计,系统实现过程如图 22 所示。

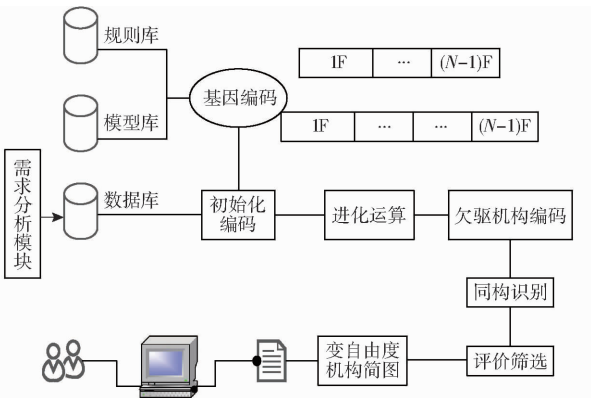


图 22 系统实现过程

Fig. 22 System implementation process

(1) 根据用户的设计要求,通过需求分析模块确定输入参数。

(2) 输入参数传输到设计知识库模块的数据库中,由编码规则得到相应“源”树图模型的初始编码结构。该过程中,通过 GPlab 中的 setnodes、setfunctions 及 setterminals 函数定义树图模型与编码结构的转换规则,并调用初始树长 iniclevel、终止树长 maxlevel、operatorprobs 运算概率等函数设定输入参数,生成初始编码结构传输至进化运算模块。

(3) 进化计算模块对初始编码结构执行复制、交叉、变异等进化运算。通过 findnodes、swapnodes 等节点操作函数对编码结构执行如 1.2.1 节中所示的运算,并通过 setfitness 函数设定欠驱约束,得到进化后欠驱机构的编码,将其传输至评价筛选模

块中。

(4) 评价筛选模块分两步完成对机构的筛选及评价工作。第 1 步,通过比较两个基因编码结构中 F 的位置,对进化运算产生的相似结构进行同构识别,排除冗杂多余的构型,作初步筛选。第 2 步,进一步对机构进行筛选。首先,使用 maketree 函数将同构识别后的基因编码生成树图模型,由用户确定其是否符合运动性要求;然后,调用设计知识库中的构件库及语义空间,将树图转换为机构简图,用户根据欠驱机构简图选择构件约束,得到变自由度机构的运动简图;最后,由式(6)定义 setcomplexity 函数,通过系统计算比较机构信息量,取信息量小的为较优机构。

(5) 系统通过 savetofile 函数将机构简图保存为图形文件,储存在计算机中。

5 实例验证

以高丛蓝莓采摘机采摘系统的传动机构设计为例,验证该原型系统的可行性、合理性。

由图 23 可知,采摘机传动机构由两部分组成,杆件 1、2、3、6 组成的曲柄摇杆机构带动杆件 3、4、5、6 组成的双摇杆机构执行采摘动作。

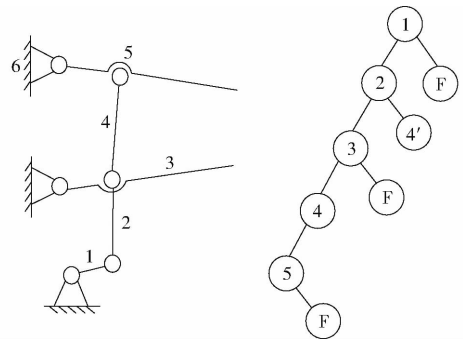


图 23 采摘机传动机构简图^[26]及其树图模型

Fig. 23 Mechanism diagram of picker driving mechanism and its tree model

使用原型系统,首先通过需求分析模块将设计要求转换为参数。采摘机构的设计要求为一个原动件提供动力,两个构件执行采摘运动,由此确定输入参数 $L_0 = 3$,原动件数目为 1、执行件数目为 2,进化终止树长 $L = 7$,通过进化运算并排除同构体可得到符合欠驱要求的基本构型:5 杆机构 0 个,7 杆机构 4 种,9 杆机构 51 种。

由于运算结果众多,取图 24 所示两种树图模型进行解码对比说明。

代入设计知识库中的构件,对树图模型解码后可得到如图 25 所示的机构简图。设计得到的两种机构均为二自由度欠驱机构,运动形式不确定,可通过约束构件、替换运动副等方式改变自由

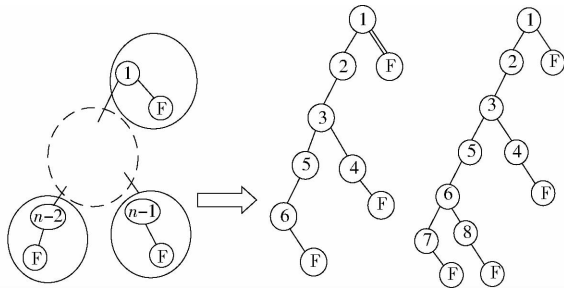


图24 进化运算结果

Fig. 24 Evolution operation result

度或添加原动件使其拥有确定运动,成为变自由度机构。

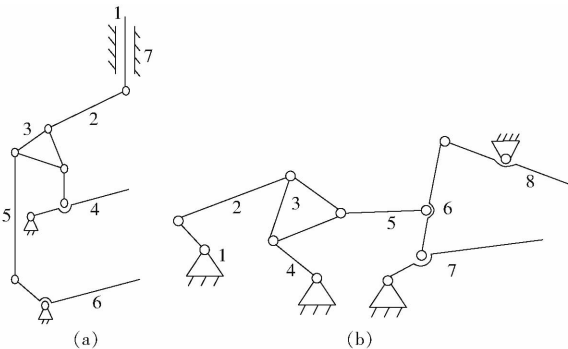


图25 7杆/9杆采摘机传动机构简图

Fig. 25 7/9-bar picking machine transmission mechanism diagram

对比两种设计结果,图25a为7杆二自由度机构,该机构除原动件、执行件外不存在与机架相连的构件,无法通过进一步选择构件进行约束或添加原动件使机构运动确定。图25b为9杆二自由度机

构,可以通过选择构件4成为原动件,使机构拥有确定运动。

相比图23所示的传动机构,本原型系统得到的9杆机构模型能够在满足设计要求的情况下,对机构实现创新设计,添加原动件进一步控制执行构件的运动速率,细化其运动轨迹,以适应不同采摘环境下的设计要求,达到“一机多用”的目的。

综上,该原型系统能够根据设计要求快速运算得到欠驱机构的基本构型,再通过用户选择约束完成变自由度机构的设计,人机共同参与设计过程,改善了传统变自由度机构设计依赖于原机构、创新程度受到制约且效率不高这一问题。

6 结论

(1)将进化设计理论引入变自由度机构设计中,提出一种创新设计方法,扩展了变自由度机构的结构形式。

(2)根据运动任务将驱动杆件、执行件作为机构进化设计的不变量,对机构其余部分进行进化运算,并加入约束函数及编码规则实现定向进化,简化了进化过程。

(3)利用树图模型表述定向进化设计过程,进行变自由度机构的创新设计研究,并构建了一种原型系统,实现一定程度上的人机混合智能设计。

(4)以采摘机传动机构设计为例,验证了该原型系统的有效性及其合理性,为设计人员提供一种机构创新设计的工具化手段。

参考文献

- [1] 潘慧静. 变自由度机构类型和构态的分析与综合研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2010.
PAN Huijing. Analysis and synthesis on type and configuration of variable degree of freedom mechanism[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010. (in Chinese)
- [2] 李林,张鑑. 变自由度机构的分析和应用[J]. 山东轻工业学院学报(自然科学版), 1994, 8(3): 42-45.
LI Lin, ZHANG Jian. Analyses and uses of variable freedom mechnism[J]. Journal of Shandong Institute of Light Industry (Natural Science Edition), 1994, 8(3): 42-45. (in Chinese)
- [3] 曲志刚, 安子军, 杜秀菊. 变自由度机构的功能及应用研究[J]. 机械传动, 2001, 25(2): 6-8.
QU Zhigang, AN Zijun, DU Xiuju. Study on the application of mechanism with changeable degrees of freedom[J]. Mechanical Transmission, 2001, 25(2): 6-8. (in Chinese)
- [4] 郭宗和, 马履中, 杨启志. 基于变胞原理的变自由度机构拓扑型分析[J]. 中国机械工程, 2005, 16(1): 3-5, 9.
GUO Zonghe, MA Lüzhong, YANG Qizhi. Topological type analysis of the variable freedom mechanism based on the metamorphic principle[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(1): 3-5, 9. (in Chinese)
- [5] 苏昱景, 陈绪林. 基于变胞原理的变自由度机构的应用研究[J]. 重庆文理学院学报(社会科学版), 2015, 34(2): 81-83.
SU Yujing, CHEN Xulin. Applied research of variable freedom mechanism based on the metamorphic mechanism theory[J]. Journal of Chongqing University of Arts and Sciences (Social Science Edition), 2015, 34(2): 81-83. (in Chinese)
- [6] PFURNER M, KONG X, HUANG C. Complete kinematic analysis of single-loop multiple-mode 7-link mechanisms based on Bennett and overconstrained RPRP mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 73: 117-129.
- [7] 张学义, 高明玲. 可变自由度机构在农业机械中的应用[J]. 机械研究与应用, 1994(3): 17-19.
ZHANG Xueyi, GAO Mingling. Application of variable freedom mechanism in agricultural machinery[J]. Mechanical Research & Application, 1994(3): 17-19. (in Chinese)
- [8] 郭宗和, 马履中. 基于拓扑理论的变自由度机构分析与设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5): 97-100.
GUO Zonghe, MA Lüzhong. Analysis and design of variable freedom mechanism based on topological theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5): 97-100. (in Chinese)
- [9] 王才东, 王立权, 赵冬岩, 等. 变自由度螺栓夹紧机构设计及试验研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(13): 1743-1748.

- WANG Caidong, WANG Liquan, ZHAO Dongyan, et al. Design and experimental study of variable freedom bolt clamping mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(13): 1743 - 1748. (in Chinese)
- [10] CHAUDHURY A N, GHOSAL A. Optimum design of multi-degree-of-freedom closed-loop mechanisms and parallel manipulators for a prescribed workspace using Monte Carlo method[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 118: 115 - 138.
- [11] 康熙, 戴建生. 机构学中机构重构的理论难点与研究进展——变胞机构演变内涵、分岔机理、设计综合及其应用[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 57 - 71.
KANG Xi, DAI Jiansheng. Theoretical difficulties and research progress of mechanism reconfiguration in mechanisms——evolution connotation, furcation principle, design synthesis and application of metamorphic mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 57 - 71. (in Chinese)
- [12] 王明远, 杭鲁滨, 刘哲, 等. 含变自由度力复位组合柔顺副的汽车门锁机构[J]. 中国机械工程, 2020, 31(12): 1437 - 1443.
WANG Mingyuan, HANG Lubin, LIU Zhe, et al. Vehicle side door latch power release mechanism with variable DOF force-self-adaptive compliant joint[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(12): 1437 - 1443. (in Chinese)
- [13] 张武翔, 丁希仑, 戴建生. 一种变自由度机构构态变换的稳定性[C]//2007年中国智能自动化会议, 2007.
ZHANG Wuxiang, DING Xilun, DAI Jiansheng. Stability of configuration transformation of a kind of variable freedom mechanism [C]//2007 China Intelligent Automation Conference, 2007. (in Chinese)
- [14] 王峰, 安子军, 闫华军. 平面变自由度机构的形成方法与实现形式[J]. 河北科技大学学报, 2010, 31(3): 209 - 213.
WANG Feng, AN Zijun, YAN Huajun. Formative method and forms of planar changing degree of freedom mechanism[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2010, 31(3): 209 - 213. (in Chinese)
- [15] 侯红玲. 变自由度机构的构态变换研究[J]. 机械设计与制造, 2012(1): 134 - 136.
HOU Hongling. Studying of conformation of the variable freedom mechanism[J]. Machinery Design and Manufacture, 2012(1): 134 - 136. (in Chinese)
- [16] 包志炎, 王学斌, 计时鸣, 等. 面向定制产品进化设计的优势种群产生策略[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 404 - 413.
BAO Zhiyan, WANG Xuebin, JI Shiming, et al. Generating strategy of superior population for customization products evolutionary design[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 404 - 413. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180151&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.051. (in Chinese)
- [17] 张宗华, 赵霖, 张伟. 遗传程序设计理论及其应用综述[J]. 计算机工程与应用, 2003(13): 94 - 97.
ZHANG Zonghua, ZHAO Lin, ZHANG Wei. An introduction and survey of application of genetic programming[J]. Computer Engineering and Applications, 2003(13): 94 - 97. (in Chinese)
- [18] 许红. 遗传程序设计及其在机构创新设计中的应用研究[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷学院, 2007.
XU Hong. Genetic programming and its application research in creative design of mechanism [D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic Institute, 2007. (in Chinese)
- [19] 华尔天, 周猛, 李生辉, 等. 遗传编程的机构运动链进化设计[J]. 中国机械工程, 2019, 30(16): 1916 - 1924.
HUA Ertian, ZHOU Meng, LI Shenghui, et al. Evolutionary design of mechanism kinematics chain of genetic programming[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(16): 1916 - 1924. (in Chinese)
- [20] 李洪杰. 面向机构构型设计的进化设计原理和方法的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
LI Hongjie. Research on principle and method of evolutionary design oriented to mechanism configuration design [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- [21] 丁华锋, 黄真. 平面机构统一拓扑描述模型的建立及同构判别[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 99 - 103.
DING Huafeng, HUANG Zhen. Uniform topological representation model of planar mechanisms and isomorphism identification [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 99 - 103. (in Chinese)
- [22] 田启华. 基于公理设计的机械产品设计方法研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
TIAN Qihua. Research on approach of mechanical product design based on axiomatic design and its application [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [23] 张瑞军, 贾庆轩, 孟柳. 基于信息公理的设计方案模糊评价方法[J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(6): 25 - 29.
ZHANG Ruijun, JIA Qingxuan, MENG Liu. Fuzzy evaluation for design scheme based on information axiom [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012, 35(6): 25 - 29. (in Chinese)
- [24] 刘世豪, 杜彦斌, 姚克恒, 等. 数控机床进给机构智能设计优化系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 397 - 404.
LIU Shihao, DU Yanbin, YAO Keheng, et al. Intelligent design optimization system for feed mechanism of CNC machine tool [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 397 - 404. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170551&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.051. (in Chinese)
- [25] 张田会, 张发平, 阎艳, 等. 基于本体和知识组件的夹具结构智能设计[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(5): 1165 - 1178.
ZHANG Tianhui, ZHANG Faping, YAN Yan, et al. Intelligent fixture configuration design based on ontology and knowledge components [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(5): 1165 - 1178. (in Chinese)
- [26] 耿雷, 郭艳玲, 王海滨. 高丛蓝莓采摘机采摘系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 67 - 74, 81.
GENG Lei, GUO Yanling, WANG Haibin. Picking system design and experiment for highbush blueberry picking machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 67 - 74, 81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160310&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.010. (in Chinese)