doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2022.02.011

基于遗传编程的变速器行星传动方案进化设计①

华尔天②* ** 何志国* 沈永康* 陈万前* 汤守伟*

(* 浙江工业大学先进制造研究所 杭州 310023)

(** 浙江水利水电学院先进水利装备浙江省工程研究中心 杭州 310018)

摘 要 自动变速器(AT)正向着高速、高功率密度、多挡化发展,其可行的理论传动方案数以指数函数形式增加,方案的综合及寻优变得极为困难。针对这一问题,本文结合进化设计理论,提出基于遗传编程的变速器行星传动方案进化设计方法,包括行星传动方案树型编码规则、种群初始化、基于信息公理的适应度评价、遗传操作等关键技术。在此基础上构建了原型系统,该系统包括设计知识库、设计模块、进化结果选择与转化 3 个模块,在实现设计流程的同时还具有机械干涉检测、挡位分析等功能,在一定程度上实现了智能设计。通过对比分析和实例应用,证实了该原型系统的有效性、合理性。

关键词 行星传动方案; 进化设计; 遗传编程(GP); 适应度评价; 原型系统

0 引 言

设计是制造的起点与关键,相对智能制造,智能设计的研究和应用有待加强[1]。进化设计作为智能设计中设计能力最高的层次,近年来随着进化算法和设计理论的不断完善得到广泛应用。华尔天等人[2]采用遗传编程代替再生运动链中的数综合,创新得到了结构、性能更合理的机构,实现了机构运动链的进化设计。刘汉等人[3]利用差分进化算法和矩量法对天线进行了优化设计,该方法相较于利用仿真软件优化,大大减小了工作量,提高了效率。苏建宁等人[4]运用拓扑理论和猴王遗传算法,构建出产品仿生形态进化设计方法,能够更好地在定量层面控制产品形态仿生设计,快速地获得多种方案。上述研究将进化设计运用到不同领域并取得了显著的成果,证实了进化设计的合理性、创新性。

自动变速器(automatic transmission, AT)按传动结构分为定轴式齿轮传动与行星式齿轮传动两种,行星式齿轮传动具有更为紧凑的结构、较大的传动比、较高的传动效率,所以得到更为普遍的应用[5]。自动变速器正向着高速、高功率密度、多挡化发展[6],为此通常需要将多个行星排连接起来,令其可行的理论传动方案数以指数函数形式增加,其复杂性也增加。针对变速器行星传动方案,邓涛等人[7]提出的基于机械创新设计的混合动力汽车行星传动方案设计方法,创新设计结果的实质仅是对现有方案的元件连接关系进行调整,其元件数量仍局限于现有方案。刘晋霞等人[8]和 Liu 等人[9]采用杠杆分析匹配法对行星传动方案进行设计,但杠杆分析法仅适用平面 2 自由度机构[10]。文献[11-13]将图论理论运用到变速器行星轮系的设计中,但目前行星传动方案设计的图论综合法还不十分成熟,相关研究并没有得出可行的传动方案,没有形成一套完整、有效、系统的方法[12]。此外,这些方法在方案筛选的时候更多依靠设计者的经验且需要对所有方案进行评价,其结果缺乏严密的理论推导,自动化程度不高。针对上述问题,本文应用进化设计理论,根据公理设计原理设计适应度评价函数,模拟生物进化过程,提出一种基于遗传编程(genetic programming, GP)的变速器行星传动方案进化设计方法,

① 国家自然科学基金(61772469)资助项目。

② 男,1963 年生,博士,研究员;研究方向:机构创新设计,进化设计,智能设计; 联系人,E-mail: het@zjut.edu.cn。

(收稿日期:2020-11-17)

通过仿真软件构建相应结构化的原型系统,并进行了实例验证,在一定程度上实现了自动变速器的智能设计。

1 设计模型的建立

1.1 进化设计理论

智能设计按设计能力分为 3 个层次:常规设计、联想设计和进化设计。常规设计常常只能解决定义良好、结构良好的常规问题,适应范围有限。联想设计需要借助其他事例和设计数据,收集大量的设计实例极为困难[2]。进化算法是借鉴生物界自然选择和自然进化机制的高度并行的、随机的、自适应的搜索算法,能够不受问题性质的限制(如连续、可导、凸性),有效地求解传统方法难以解决的复杂问题[14]。进化算法使得智能设计拓展到进化设计,其特点是:随机生成初始种群,对环境知识依赖少;通过交叉、变异等遗传操作继承优良个体的基因生成新种群,在设计方案适应度评价函数的作用下逐代向最优种群收敛,大量不良个体在进化过程中被淘汰,不需要所有个体参与评价,具备自动化、创新性潜能。

1.2 行星传动方案进化设计模型

进化设计的核心是构建基于进化算法的设计方案演化模型,包括设计要素的编码,进化机制的制定,解决设计方案的组合爆炸问题等。遗传编程(GP)[15]是进化算法的一个分支,1992 年由 Koza 提出并进行深入的研究。与一般遗传算法不同,GP 采取不定长的树型结构编码,具有动态改变大小、形状的能力,编码可以携带语义信息,能够描述层次化的问题,不必像其他进化算法必须通过编码预先定义解空间,适合处理“开放解”的创新设计问题。本文研究对象为变速器行星传动方案,其行星排、换挡元件数量动态可变,包含单双行星排、离合器、制动器等多种结构信息,常规定长字符串编码无法直接描述,而 GP 树型编码则能够完全满足要求。

为了能快速得到满足设计要求的行星传动方案,实现变速器传动方案的智能设计,本文建立了基于遗传编程的变速器行星传动方案进化设计模型。主要流程是:根据编码规则随机产生初始种群;然后对种群个体进行约束判定以及适应度评价,根据评价结果与终止准则,判断是否继续进行进化操作产生新的种群;当适应度评价结果通过时,对结果进行筛选与转化并结束设计过程。其设计流程图如图 1 所示。

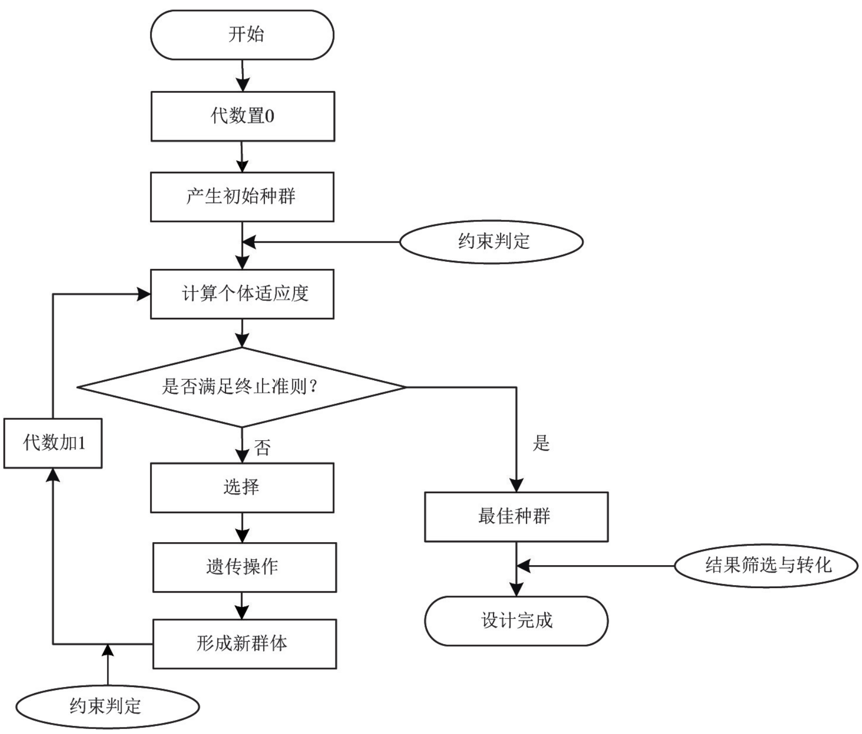


图 1 进化设计流程图

2　行星传动方案进化设计关键技术

2.1　树型编码规则

在进化设计中,模型的编码是一个关键问题。GP 采用不定长的树型编码来表达基因:末端叶子节点(即终止符集)表示参数;分叉(即函数集)表示对 2 个子叉进行运算。自动变速器行星传动方案由单排或多排行星齿轮机构与换挡元件(离合器、制动器等)组成。多排行星排组合可分为变结构与不变结构两种形式,变结构的形式为通过离合器实现行星排之间的连接,不变结构的形式为行星排之间的连接为固定连接。相比变结构形式,不变结构形式结构简单,换挡序列更容易确定。本文主要研究不变结构的形式。可定义终止符集: $T = \{PGT1、PGT2\}$,分别表示单星行星排和双星行星排,主要区别是行星轮个数不同,如图 2 所示。定义函数集: $F = \{d_{ij}, [d_{kl}, d_{mn}]\}$,其中 d_{ij} 表示前行星排构件 i 与后行星排构件 j 连接作为一个旋转整体,$[d_{kl}, d_{mn}]$ 表示前行星排构件 k、m 与后行星排构件 l、n 分别对应连接作为一个旋转整体,两行星排可以通过一个函数集算子实现串联或者并联连接。

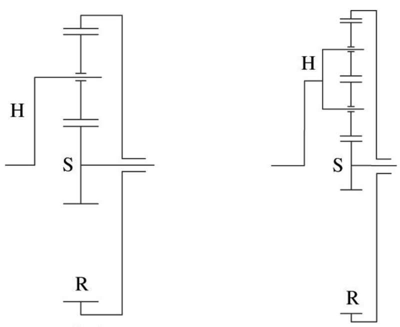
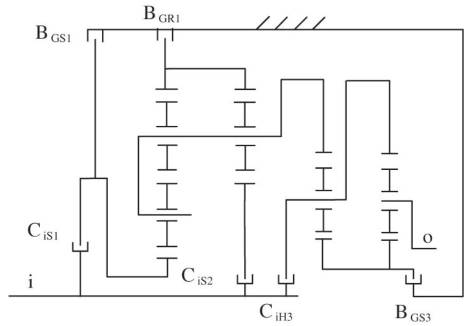
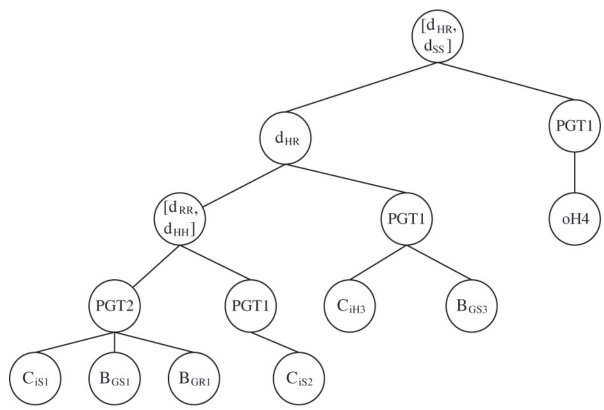


图 2　两种行星排示意图

通过终止符集和函数集便可以生成表示行星齿轮机构的树形编码,再在末端叶子节点处连接表示行星齿轮机构基本元件与输入构件、输出构件、机架之间连接关系的子节点便可表示自动变速器行星传动方案。图 3 为 ZF 9 速自动变速器的行星传动方案简图、树型编码,二者之间能实现相互转化。其中,图 3(b)所示为 ZF 9 速自动变速器树型编码,末端子节点中 C_{iS1}、B_{GR1} 分别表示连接输入构件与第 1 排行星排中太阳轮 S1 的离合器和连接机架与第 1 排行星排中齿圈 R1 的制动器,oH4 表示输出构件与第 4 排行星排中的行星架直接相连。



(a) ZF 9速自动变速器行星传动方案简图



(b) ZF 9速自动变速器树型编码

图 3　ZF 9 速自动变速器行星传动方案

2.2　初始化种群及约束判定

2.2.1　初始化种群

初始种群由众多初始个体组成,通过随机方法产生。为避免生成退化结构,应在函数集 F 中随机选出一个函数作为编码树的根节点,从根节点出发生成 2 个子节点,右节点从终止符集 T 中选择,左节点从 $F \cup T$ 中选择。若选出的是函数算子,则重复上述过程;若选出的是终止符,则停止生长,再在末端叶子节点处随机生成一级子节点得到初始个体,如图 4 所示。值得注意的是,一般变速器输出构件唯一确定,因此在生成一个表示基本元件与输出构件直接相连的节点后,不再生成此类节点,且该基本元件不再配置相应的换挡元件。

2.2.2　种群约束判定

为保证经过设计模型得到的解都是合理解,需

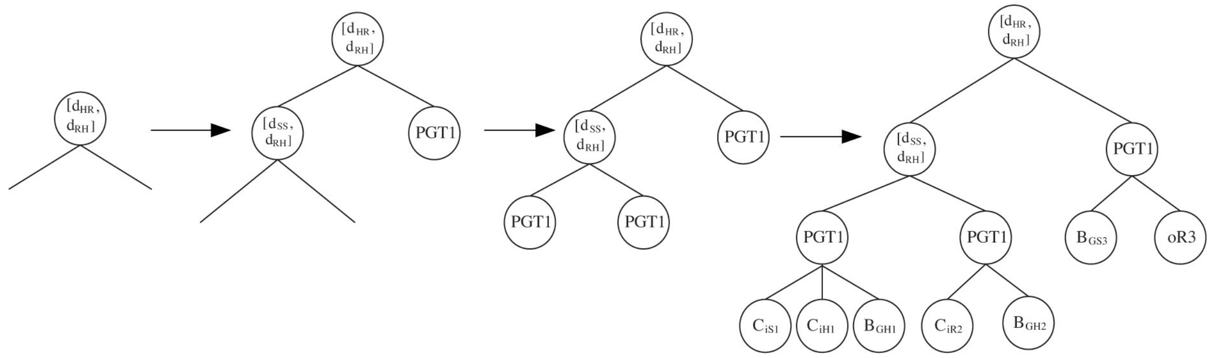


图4　初始个体生成过程示例

要事先确定设计约束,根据自动变速器行星传动方案一般要求得到以下4个设计约束。

(1)为了满足变速器的体积要求,需要约束编码树的长度,通过确定行星齿轮机构构件数、换挡元件数的设计范围进行约束。

(2)变速器传动方案解中构件连接无机械干涉。

(3)根据变速器的使用工况确定传动挡位数目,所设计的变速器传动方案需要能实现目标挡位。

(4)为了使换挡过程平顺,减少换挡振动和冲击,换挡序列要满足同类型档位两相邻挡位之间换挡时,只变换一个换挡元件[16]。

对于随机生成的初始种群以及进化得到的后代,需要经过可行性分析、挡位分析,判断其是否满足约束条件,将不满足约束条件的个体直接筛出,其步骤如下。

步骤1　首先根据树型编码统计种群个体的行星齿轮机构构件数、换挡元件数,判断其是否在设计范围内。

步骤2　树型编码可与其他图模型相互转化,采用D. M. P(Demoucron Malgrange Pertuiset)算法对变速器行星传动方案进行机械干涉检测,将不可行的方案筛选出去,相应研究已经较为成熟[17-18],本文不再赘述。

步骤3　对种群个体进行挡位分析,判断其能否同时满足约束条件(3)、(4)。

基于树型编码的挡位分析流程如下。

(1) 根据自由度公式计算行星齿轮机构的自由度,确定需要接合的离合器、制动器数目。

机构自由度公式如下:

$$W = 3N_C - 2P_L - P_H \tag{1}$$

式中,N_C 为运动构件数,P_L 为运动低副数,P_H 为运动高副数。

在行星齿轮机构中,$N_C = P_L$,PGT1含有4个运动构件、2个P_L,PGT2含有5个运动构件、3个P_L。两行星排串联连接减少1个运动构件,并联连接减少2个运动构件,则根据行星齿轮机构树形编码计算自由度得:

$$W = 2N_{\mathrm{PGT}} - N_{\mathrm{d}} - 2N_{\mathrm{p}} \tag{2}$$

式中 N_{PGT}、N_{d}、N_{P} 分别为行星齿轮机构中行星排PGT(包括PGT1、PGT2)、串联算子d、并联算子p的个数。

(2) 计算所有可能挡位的传动比,为方便计算,通常设输入构件转速为1,对于由 k 个行星排组成的变速器,各构件转速满足齐次线性方程组:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_1 \\ \boldsymbol{A}_2 \\ \boldsymbol{C}_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{S1} \\ n_{R1} \\ \vdots \\ n_{Hk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (i = 1,2,3,\cdots) \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{A}_1$ 为运动特性矩阵、$\boldsymbol{A}_2$ 为联接矩阵、$\boldsymbol{C}_i$ 为挡位矩阵,n_S、n_R、n_H 分别表示各行星排中太阳轮、齿圈、行星架的转速。

运动特性矩阵 $\boldsymbol{A}_1$,即描述各行星排构件运动关系的矩阵,行星排特性参数用 a 表示。单星行星排满足运动关系:

$$n_S + \alpha n_R - (1 + \alpha) n_H = 0 \tag{4}$$

双星行星排满足运动关系:

$$n_S - \alpha n_R - (1 - \alpha) n_H = 0 \tag{5}$$

对于由 k 个单星行星排组成的变速器,其运动特性矩阵为

$$
\boldsymbol{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_1 & -(1+\alpha_1) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha_2 & -(1+\alpha_2) & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & \alpha_k & -(1+\alpha_k) \end{bmatrix}_{k \times k}
$$

联接矩阵 $\boldsymbol{A}_2$,即描述各行星排构件连接关系的矩阵。根据树型编码中函数集节点可得到行星排之间连接关系,将 d_{ij} 中构件 i 记为 1,j 记为 -1,其他记为 0,则每 2 个连接构件将形成一个仅含有 1,-1,0 的行向量,最终形成的矩阵称为联接矩阵。图 2 中 ZF 9 速变速器联接矩阵为

$$
\boldsymbol{A}_2 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccccccc} S1 & R1 & H1 & S2 & R2 & H2 & S3 & R3 & H3 & S4 & R4 & H4 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}
$$

挡位矩阵 $\boldsymbol{C}_i(i=1,2,3,\cdots)$,是表示变速器在不同挡位时换挡元件接合状态的矩阵。每一行表示一个换挡元件接合,对应构件连接记为 1,其他为 0,制动器接合在前,离合器接合在后。图 2 中 ZF 9 速变速器换挡元件 C_{iS2}、B_{GS1}、B_{GS3} 接合时其挡位矩阵为

$$
\boldsymbol{C}_1 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccccccc} S1 & R1 & H1 & S2 & R2 & H2 & S3 & R3 & H3 & S4 & R4 & H4 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}
$$

根据式(2)可得每个挡位需要接合换挡元件的数量,遍历所有可能的组合可得全部可能的挡位矩阵。求解式(3)即可得到变速器各个结合方案输出构件的转速。有 3 种结果,转速为 0 时输出构件锁死为死挡,转速为 1 为直接挡,转速为包含 α_1、α_2、$\cdots$、α_k 表达式的独立挡和函数挡;死挡不满足条件需要删除。对于剩下的直接挡、独立挡及函数挡,利用深度优先遍历搜索法(depth first search, DFS)从中选择满足约束条件(4)的换挡序列。搜索得到的换挡序列,在合理范围(1.5 ~4.5)内[19]选择各行星排特性参数,若能实现目标挡位,则该传动方案为合理解,若无法实现目标挡位则该传动方案为不合理解。

2.3 基于信息公理的适应度评价函数

遗传编程适应度评价函数的好坏,直接影响遗传编程所得最佳个体的优劣[2]。信息公理是指在各功能需求相互独立的条件下,信息量最小的设计方案为最佳设计方案,可以不需要决策者给出指标的权重,避免了人为主观因素的影响。目前信息公理已广泛应用于产品、服务和制造系统等领域的方案评价中[20]。本文针对满足约束条件的多个变速器行星传动方案,采用信息公理建立适应度评价模型。

信息公理中信息量计算公式如式(6)所示。

$$
\begin{cases} I_i = \log_2 \dfrac{1}{P_i} = -\log_2 P_i \\ P_i = \dfrac{A_{\mathrm{cr}}}{A_{\mathrm{sr}}} \end{cases} \tag{6}
$$

式中,I_i 为满足某个功能需求的信息量,P_i 为满足某一功能需求的概率,A_{dr} 为该功能需求所规定的设计范围,A_{sr} 为满足该功能需求所能提供的系统范围。

变速器传动方案由行星齿轮机构(DP1)实现运动、动力输入到输出的传递功能(FR1),由换挡方案(DP2)实现换挡功能(FR2),则自动变速器的设计方程为

$$
\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \end{Bmatrix} \tag{7}
$$

式(7)显然满足独立公理。

行星齿轮机构属于机构的范畴,在计算机构信息量时,文献[2]以构件数(N_{C})、运动副数(N_{K})作为评价因子。运动构件数、运动副数越多,制造成本越高,机构形式越复杂,机构运动时的能量传递损失越大。换挡方案是将行星齿轮机构的构件通过换挡元件与输入、输出构件相连,并通过一定的换挡序列实现目标挡位。在满足约束条件的情况下,换挡元件数量越少越好,能够实现的前进挡位数(N_{F})越多

则表示变速器在复杂路况中的选择余地越大,因此计算换挡方案信息量的指标为:换挡元件数量(N_{sh})、能够实现的前进挡位数(N_F)。

上述指标中 N_C、N_K、N_{sh}、N_F 属性值都为具体的实数,在解方案通过机械干涉检测和挡位分析后,都可以通过解码得到,对于成本型指标 N_C、N_K、N_{sh},参考文献[27]得到信息量计算公式为式(8)。

$$I_{irc} = \frac{N_{02}}{N_{02} - N_{01}} \log_2 \frac{N_{02}}{N_{01} + N_{02} - N_i} \tag{8}$$

对于效益型指标 N_F,其信息量计算公式为

$$I_{ire} = \frac{N_{01}}{N_{01} - N_{02}} \log_2 \frac{N_{01}}{N_i} \tag{9}$$

式中 N_{01}、N_{02}、N_i 分别表示指标的最佳值、指标的最劣值、方案 i 的实际指标值。

将可行解的信息量作为适应度,则适应度评价函数为

$$f = I_{irc}(N_C) + I_{irc}(N_K) + I_{irc}(N_{sh}) + I_{ire}(N_F) \tag{10}$$

2.4 选择策略与遗传操作

选择决定了进行遗传操作的父代个体,选择策略影响进化的方向和效率。结合自动变速器行星传动方案设计的特点,本文采用锦标赛选择法,其特点在于以个体适应度的相对值为选择标准,能够有效地避免群体中个别或极少数特殊个体的影响,防止进化过程中发生早熟现象。

遗传操作是获得新种群的途径,是创新设计的源泉。在遗传算法(genetic algorithm, GA)和 GP 中,常采用交叉和变异操作来生成个体。与传统遗传编程编码不同,本文所设计的变速器行星传动方案树型编码包括函数集、终止符集、末端节点 3 种节点,因此遗传操作也要作相应的改进,本文遗传操作设计如下。

2.4.1 交叉

在 GP 中,交叉是生成新个体的活动,子代由 2 个父代个体提供不同的组成部分结合产生,在交叉时整个子树被交换,因此不管如何选择交叉点,所得到的子代在语义上都是合法的。图 5 所示为两变速器树型编码交叉示例,得到 2 个构型不同的变速器传动方案。

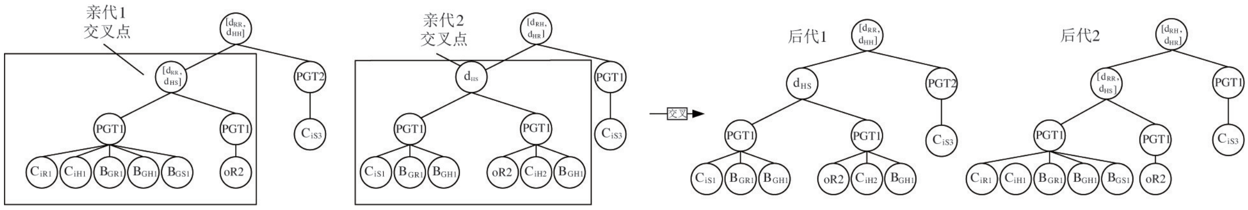


图 5 交叉示例

值得注意的是,交叉得到的子代虽然在语义上是合法的,但也会产生不符合变速器要求的结构,为提高进化效率,对交叉操作作以下规定。

(1)若一个父代个体进行交换的子树包含有描述行星齿轮机构构件与输出构件直接连接的节点,则另一父代个体进行交换的子树也应包含相同属性的节点。

(2)对于生成的子代需要进行末端节点融合,子代中可能会存在多个末端节点语义信息相同的情况,此时保留前排节点。如图 6,融合前的个体中 B_{GH1}、B_{GS2} 分别表示连接机架与行星架 H1 的制动器和连接机架与太阳轮S2的制动器,由于[d_{HR}, d_{SH}]

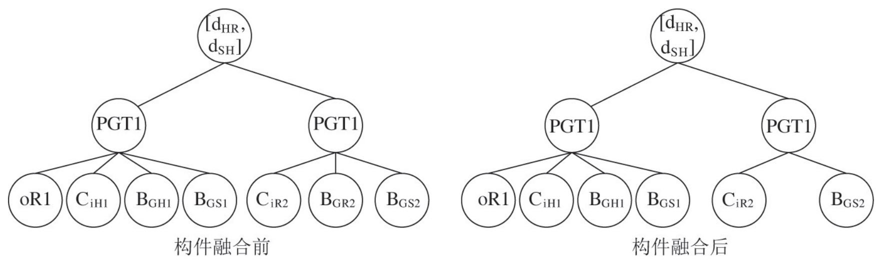


图 6 子代构件融合

表示H1与R2直接连接作为旋转整体,因此 B_{GH1}、B_{GR2} 实际为同一制动器,融合后仅保留前排的 B_{GH1}。

2.4.2 变异

交叉只能对现有基因进行排列组合,无法产生新的基因,极易发生“早熟现象”,而变异有利于形成群体结构的多样性。变异仅在单个父代个体上实施,结合传动方案编码树特点,其变异操作具体过程为:在父代个体中随机地选择某个节点,用相同属性的元素代替,其子代同样需要构件融合。如图7所示。

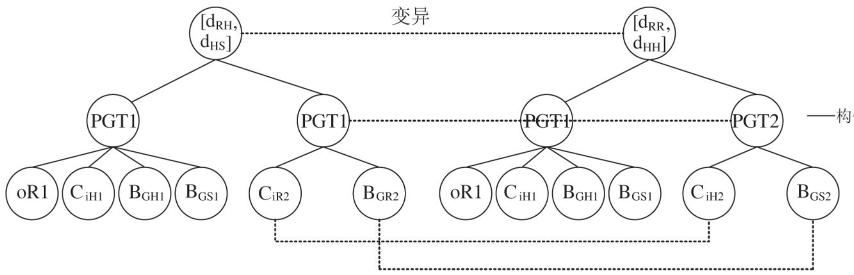


图7 变异操作示例

2.5 终止准则

根据图1设计流程图可知,若使设计停止则需给出终止准则。常见的几种终止准则包括:达到最大进化代数或最大计算次数;经过 n 代后个体适应度值没有得到改善;得到满足问题预先设定解。由于本文对所有可行解的适应度值分布缺乏了解,因此采用预设最大进化代数为终止条件。

3 基于遗传编程的变速器行星传动方案进化设计原型系统

在上述研究基础上,建立基于遗传编程的变速器行星传动方案设计人机交互原型系统,总体思路是基于设计流程,将系统分为功能相对独立的子模块,利用Matlab平台进行搭建连接,确定模块之间的逻辑关系、输入和输出对象。

3.1 系统功能

变速器行星传动方案设计人机交互原型系统需解决的问题是输入设计参数,利用人工智能、计算机图形处理能力和模拟生物进化算法相结合,通过反复迭代、评估、筛选,获得优良的变速器行星传动方案。该系统在能够完全实现设计流程的基础上,模块化的结构形式让其能够独立实现一些其他功能,如对行星传动方案进行机械干涉检测、挡位分析、信息量计算、同构识别等,这些独立功能为行星传动方案的分析提供了技术支持。

3.2 系统架构

设计人员根据相关设计知识以及变速器的使用工况分析设计约束,将行星传动方案各指标的设计范围作为参数通过人机交互界面输入,设定进化参数;系统通过设计模块以及设计知识库获得最佳种群,设计人员通过进化结果选择及辅助绘图模块完成变速器行星传动方案进化设计,如图8所示。

3.3 设计知识库

设计知识库主要包含3个部分。第1部分为模型库,由进化设计过程中树型编码的语义空间及构件库组成。语义空间对应树型编码与行星传动方案之间的转化规则;构件库用来存放不同结构形式的行星传动方案元件,供在进化计算中选择调用(如表1所示)。随着设计系统的使用,构件库的内容会不断增加,丰富行星传动方案的类型。第2部分为编码规则库,用来存放树型编码和行星传动方案其他图模型之间的转换规则,方便计算机实现进化结果转化、方案机械干涉以及同构识别。第3部分为数据库,用来存放输入参数等数据。

3.4 设计模块

设计模块为原型系统的关键功能模块包括综合模块、筛选模块及进化计算模块,其实现过程如下。

(1)综合模块需要实现的功能是2.2.1节的种群初始化,跟传统需要穷尽的综合方法不同,该模块根据输入参数随机生成设定个数的种群。该过程中,通过GPlab中的setterminals,setfunctions及setnodes 函数定义树型编码 3 种节点,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,随机生成初始种群编码传输至筛选模块。

(2)筛选模块的功能为筛除所生成种群中不满足约束的个体以及个体适应度计算;主要实现 2.2.2 节种群约束判定以及 2.3 节的适应度评价。

(3)进化计算模块是整个系统最关键的部分,通过 findnodes、swapnodes 等节点操作函数对编码结构执行 2.4 节中定义的交叉、变异进化运算规则;利用编码运算完成进化设计过程;扩展变速器行星传动方案,生成新生成的种群;结合筛选模块进行多次迭代,最终得到最佳种群,完成进化设计。

设计模块的子模块可以被单独调用,用以辅助设计人员分析行星传动方案。例如,单独调用筛选模块,用以行星传动方案机械干涉检测、挡位分析、信息量计算。

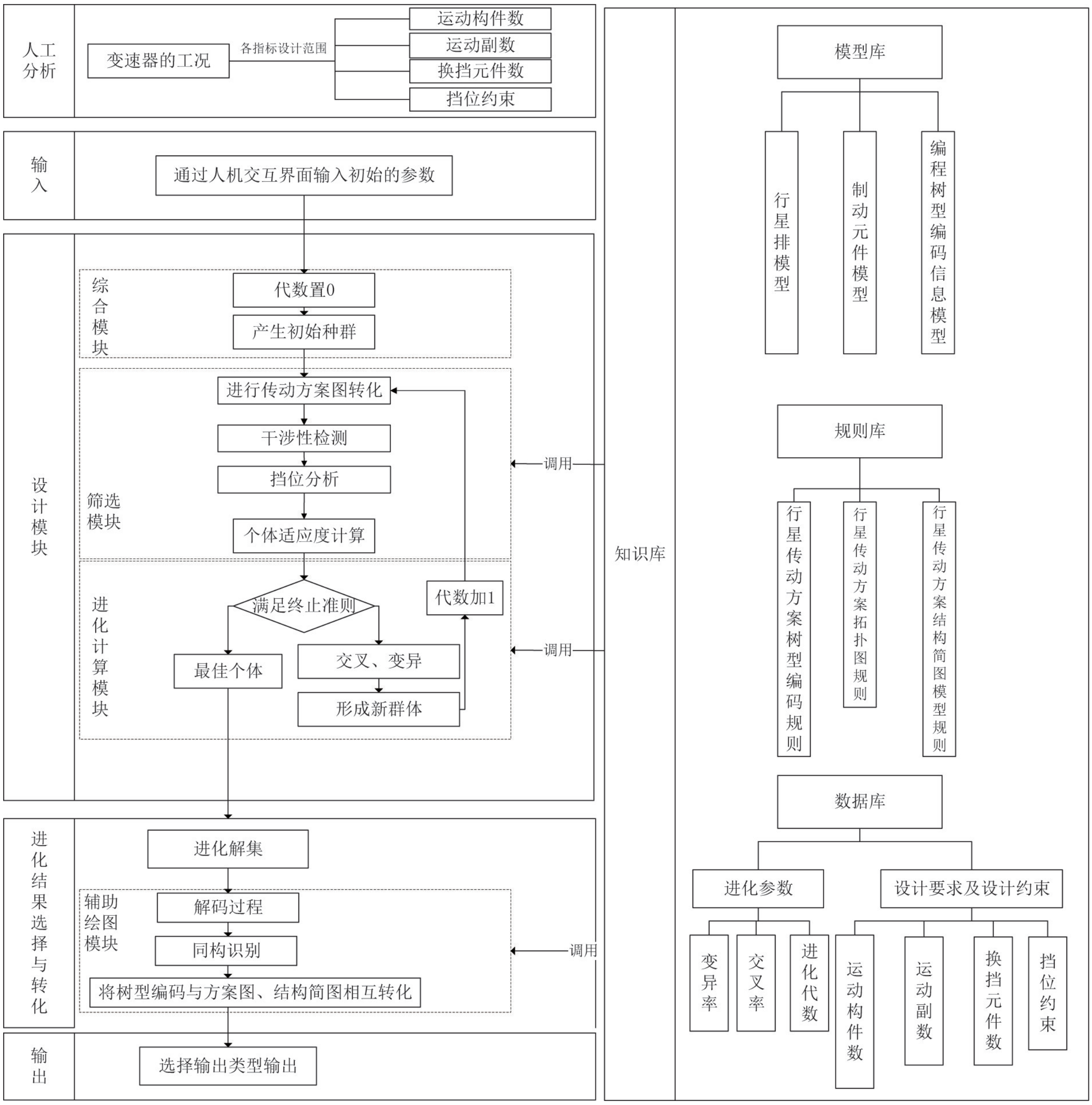
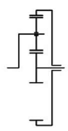
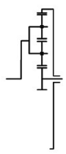
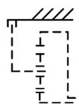
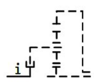


图 8　变速器行星传动方案进化设计原型系统

3.5　进化结果选择与转化

设计模块设计后获得进化解集,设计师根据实际情况选择优化解,通过辅助绘图模块输出所需类型行星传动方案图。

表 1　构件库及其编码信息

序号	机构元件	编码信息
I		PGT1
II		PGT2
III		B_{GH}
Ⅳ		C_{iH}
…	…	…

3.5.1　进化结果选择

进化解集中解的数目存在以下几种情况，针对不同情况进行结果选择。

(1)进化解集为唯一解，即有且仅有 1 个解满足筛选约束条件，直接输出。(2)进化解集中存在多个适应度值一样的解时，考虑到可能存在同构体的情况，系统内置了同构识别算法，通过知识库实现树型编码与拓扑图的转化，根据图论实现同构识别[21]；筛除同构体后，剩下的解理论上都是信息量最优的解，尽可能选择连接关系最简单的解作为自动变速器传动方案输出并转化。(3)进化解集无解即设计范围内无法得到可行的解，此时需要调整输入参数重新设计。

3.5.2　进化结果转化

进化结果转化是指通过辅助绘图模块解码及知识库中树型编码与其他图模型之间相互转化规则，系统按照设计人员选择的输出形式自动输出描述行星传动方案的图模型。

4　应用实例及结果分析

4.1　对比分析

为验证本文方法的有效性，利用本文方法对汽车五挡自动变速器行星传动方案进行设计。以 BMW 5HP-24H 五挡变速器的设计要求为输入条件，需要实现的各挡位传动比为：$i_1 = 3.57$、$i_2 = 2.20$、$i_3 = 1.51$、$i_4 = 1$、$i_5 = 0.80$、$i_{倒} = -4.10$[19]。五档变速器一般选择三排行星齿轮机构，输入设计约束参数为：$N_C \in [8,13]$，$N_K \in [14,22]$，$N_{sh} \in [5,9]$，$N_F \in [5,8]$。设定进化参数为：种群大小为 20，交叉概率为 0.5，变异概率为 0.3，进化代数设为 20。经过设计模块输出得到 11 个满足约束条件的最优解集，选择树型编码输出结果如图 9 所示。

分析结果可以发现进化所得的方案都为三行星排并联传动，在实现目标挡位的基础上能够扩展一个挡位实现 6 个前进挡，换挡元件都是 6 个，这些特点符合现今应用较为广泛的五挡变速器，其中方案图 9(a)为 ZF5HP-24、ZF5HP-30 变速器的行星传动方案。文献[22]利用杠杆分析法得到满足要求的五挡变速器有 39 种，六挡变速器有 16 种；与之相比，本文得到的结果去掉了跨排连接这类容易出现迂回线过多结构方案，筛除了只能实现 5 个前进挡的方案，保留了能够实现 6 个前进挡的方案，这与文献[19]得到的“从整体上看，5、6 挡自动变速器的综合评判结果比 5 挡变速器要好”的结论相符合，证明了本文方法的有效性。

4.2　案例应用

下面以玉米收获机自动变速器行星传动方案为例，利用本文原型系统对其进行设计，快速得到原型方案。玉米收获机作为大功率农用机械，其工况复杂，工作环境恶劣，外界载荷变化剧烈，在作业过程中需要频繁换挡。国内对于其变速传动大部分依然停留在手动换挡的机械变速箱上，操作较为复杂；少数开始采用无级变速器，此类变速器存在造价高、养护难等缺点[23]，因此可尝试采用行星式自动变速器。分析玉米收获机工况的变速器前进挡传动比范围为 0.42～4.2，后退挡传动比小于 －1.26。为了适应复杂的工况以及工作环境，玉米收获机自动变速器挡位设计要求为：至少能实现 5 个前进挡、3 个倒挡，前进挡相邻挡位传动比比值不大于 1.8，最大传动比范围为 3.8～4.2；输入设计约束参数为：$N_C \in [10,14]$，$N_K \in [18,26]$，$N_{sh} \in [5,9]$，$N_F \in [5,8]$。设定进化参数为：种群大小为 20，交叉概率为

0.5,变异概率为0.3,进化代数设为40。通过系统获得行星传动方案如图10所示。

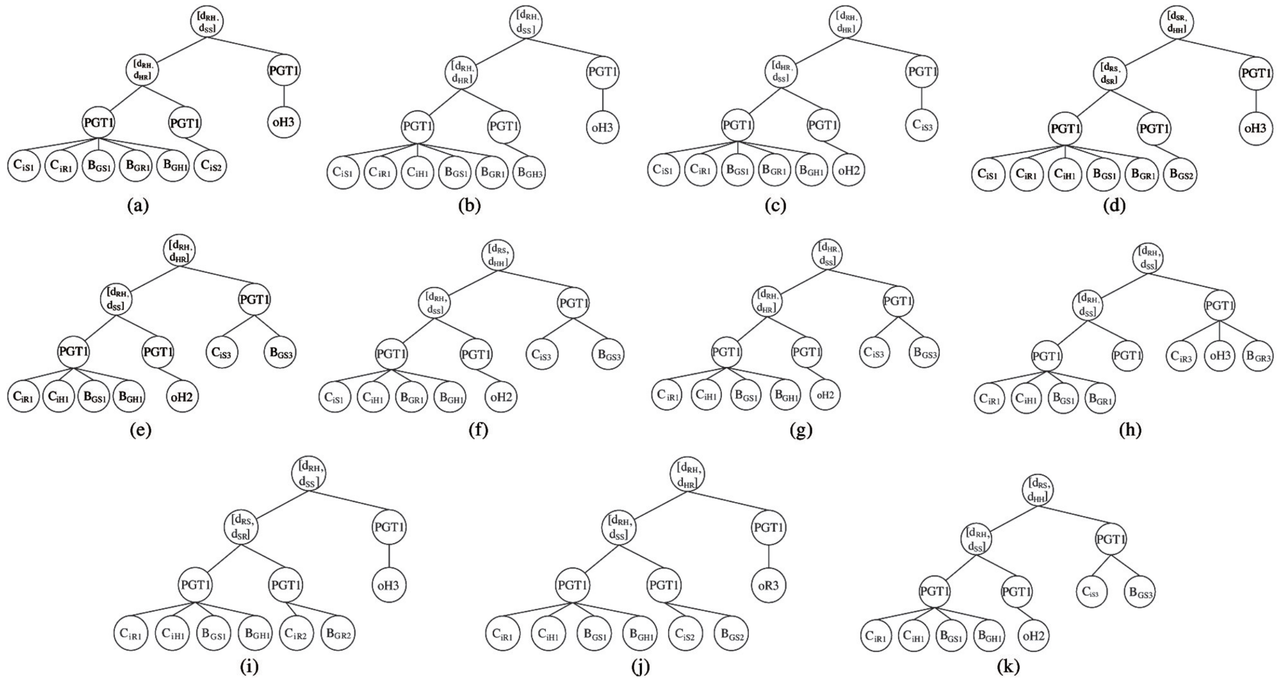
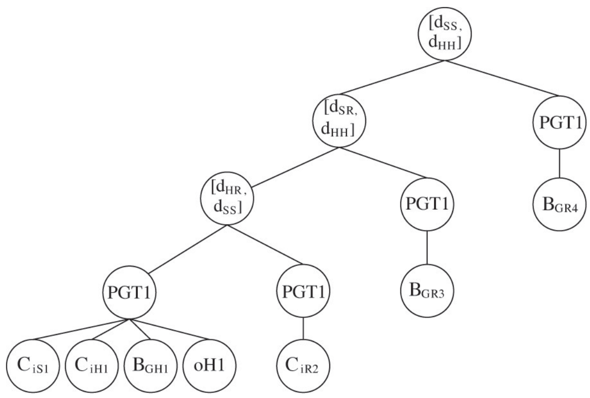
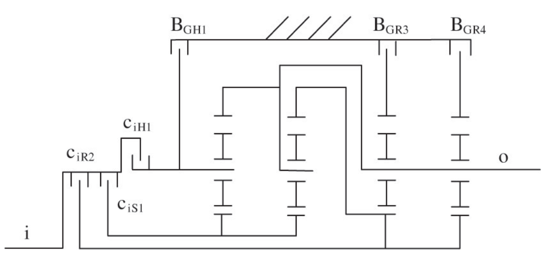


图9　系统输出结果



(a) 玉米收获机行星传动方案树型编码



(b) 玉米收获机行星传动方案传动简图

图10　玉米收获机行星传动方案

经过挡位分析可知该传动方案最多能够实现包括3个减速挡、1个直接挡、2个超速挡在内的总共6个前进挡以及3个倒挡,且仅需6个换挡元件、4个行星排。综合来看该方案信息量小,挡位可扩展性好,可作为玉米收获机自动变速器行星传动方案。

5　结　论

本文提出将进化理论运用到变速器传动方案设计过程中,建立了能够描述变速器行星传动方案的树型编码规则,给出了相应的遗传操作,基于公理设计理论建立适应度评价函数模型,采用遗传编程建立进化设计模型,并利用仿真平台构建原型系统,快速得到了满足约束条件且信息量小的行星传动方案。通过与杠杆分析法对比,结果表明本文方法能够大大缩小选择范围,减小了工作量。最后,以玉米收获机为例,通过工况分析,得到输入参数,应用原型系统输出得到相应行星传动方案。

本文研究为自动变速器行星传动方案进化设计提供了一种可行的方案,但仍存在一些需要深入研究并解决的问题。例如,本文从传动方案的角度出发进行进化设计,所得结果尚需结合实际的尺寸参数进一步设计;提出的编码规则仅针对不变结构形

式,针对变结构的行星齿轮机构时,函数集需要进一步扩展。

参考文献

[1] 陆继翔,余隋怀,陆长德. 面向工业设计的智能设计体系[J]. 机械设计, 2020,37(4):140-144
[2] 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
[3] 刘汉,康国钦,李凯. 基于差分进化算法设计的 MIMO 超宽带天线[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020,48(3):24-31
[4] 苏建宁,朱赫,杨文瑾,等. 基于拓扑理论的产品仿生形态进化设计方法[J]. 包装工程, 2020,41(10):129-135,149
[5] 王宏宇,房永,王德军. 汽车自动变速器原理及研发[M]. 北京:机械工业出版社,2014:35-36
[6] 符升平,李胜波,罗宁,等. 基于机构物-场理论的自动变速箱换挡变拓扑分析[J]. 吉林大学学报(工学版),2019,49(2):375-383
[7] 邓涛,周豪,唐鹏. 并联混合动力传动系统结构创新设计研究[J]. 汽车工程,2018,40(9):997-1004
[8] 刘晋霞,于鲁达,蔚东洋,等. 基于杠杆法的混合动力自动变速器设计研究[J]. 汽车工程,2017,39(7):782-788
[9] LIU J X, YU L D, ZENG Q L, et al. Synthesis of multi-row and multi-speed planetary gear mechanism for automatic transmission[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018,128(10):616-627
[10] 王惠英. 多挡自动变速器传动机构综合及分析[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院, 2015
[11] XUE H L, LIU G, YANG X H. A review of graph theory application research in gears[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(10): 1697-1714
[12] 薛会玲. 自动变速器行星齿轮传动方案设计及性能分析研究[D]. 西安:西北工业大学机电学院, 2017
[13] 符升平,李胜波,罗宁. 基于图论的自动变速器拓扑变换和传动特性分析[J]. 上海交通大学学报,2018,52(3):348-355
[14] 范衡,朱贵杰,李文姬,等. 进化计算在复杂机电系统设计自动化中的应用综述[J]. 自动化学报,2021, 47(7): 1495-1515
[15] KOZA J R. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection [M]. Massachusetts: MIT Press, 1992
[16] 马明月,刘艳芳,徐向阳,等. 基于遗传算法的 AT 换挡元件方案优选[J]. 北京航空航天大学学报, 2014,40(10):1372-1377
[17] 李宏才,闫清东,李慎龙. 行星传动方案结构几何矛盾图论判别方法[J]. 北京理工大学学报, 2010,30(9):1047-1050,1064
[18] 马明月,刘艳芳,徐向阳,等. 行星齿轮传动方案几何相容性的自动检测[J]. 汽车工程, 2014,36(5):603-607
[19] 何国旗. 轿车自动变速器机械传动方案研究[D]. 上海:同济大学机械工程学院, 2004
[20] 耿秀丽,董雪琦. 基于模糊信息公理的产品功能需求优化方案选择[J]. 中国机械工程, 2016,27(17):2348-2355
[21] 孙伟,李安明,孔建益,等. 基于改进哈明数的行星轮系机构同构判定新方法[J]. 机械传动, 2020,44(4):61-66
[22] 何国旗,王绍良,李兴华. 五挡变速器行星齿轮传动方案研究[J]. 中国机械工程, 2005(9):779-784
[23] 张荣祥. 大功率玉米收获机自动变速箱传动系统设计与研究[D]. 济南:山东大学机械工程学院, 2017

Evolutionary design of planetary transmission scheme based on genetic programming

HUA Ertian[**], HE Zhiguo[*], SHEN Yongkang[*], CHEN Wanqian[*], TANG Shouwei[*]
([*]Institute of Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)
([**]Advanced Water Conservancy Equipment Zhejiang Engineering Research Center,
Zhejiang University of Water Resources and Electric, Hangzhou 310018)

Abstract

Automatic transmission (AT) is developing towards high speed, high power density, and multi-gear, which leads to the increase of the number of feasible theoretical transmission schemes in the form of an exponential function, so it is very difficult to integrate and optimize the schemes. To solve this problem, in combination with evolutionary design theory, this paper proposes an evolutionary design based on genetic programming method for planetary transmission schemes, where key technologies are developed, such as tree coding rules for planetary transmission schemes, population initialization, fitness evaluation based on information axioms, and genetic operation. On this basis, a prototype system is constructed, which includes three modules: design knowledge base, design module, and selection and transformation of evolutionary results. In addition to realizing the design process, the system also has the functions of mechanical interference detection, gear analysis, etc., which realizes intelligent design to a certain extent. The validity and rationality of the prototype system are verified by the comparative analysis and practical application.

Key words: planetary transmission scheme, evolutionary design, genetic programming (GP), fitness evaluation, prototype system