

可变动力传动机构型综合分析方法研究

邸立明 赵永生 牡丹阳

燕山大学,秦皇岛,066004

摘要:基于可变循环发动机模式切换的功能需求,提出一种针对相位和速比的可变动力传动机构的型综合设计分析方法。首先利用双排行星轮系架构设计出一种具备相位和速比同时可变特征的通用传动机构方案;然后通过构型设计、拓扑分析,得出功能结构相似的系列化机构方案,并利用粗糙集理论结合聚类分析法开展其型综合与分类研究;最后分析得到一类前排为单行星轮系、后排为双行星轮系的串联传动机构方案。此类方案可满足变循环发动机切换工作模式的需求,且具有紧急情况下中断动力传递的功能。研究表明,该设计分析方法能有效提高机构设计过程中的型综合与分类研究效率。

关键词:动力传动;模式切换;聚类分析;型综合

中图分类号:TH112;U464.134

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2016.03.006

Study on Type Synthesis Analytical Method of Variable Power Transmission Mechanism

Di Liming Zhao Yongsheng Du Danyang

Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

Abstract:Based on the function requirements of variable-cycle engine (VCE) mode switching, a type synthesis design analysis method of power transmission mechanism with variable phase and transmission ratio was proposed. A universal driving mechanism with double row planetary gear train (DRPGT) was firstly designed, and the phase and transmission ratio could be adjusted at the same time. Secondly, a series of the mechanism schemes with similar structures and functions were obtained by configuration design and topology analysis, the rough set theory was combined with cluster analysis to carry on the research of classification and type synthesis. Finally, a kind of series driving mechanism scheme with DRPGT was obtained, where the front row had one planet gear each group between the gear ring and sun gear, and the rear row had two outer gearing planet gears each group. This kind of scheme can meet the mode switching demands of VCE, and can interrupt the power transmission in case of emergency. Research results indicate that the design analysis method which is applied to classification and type synthesis of mechanism schemes is efficient.

Key words:power transmission; mode switching; cluster analysis; type synthesis

0 引言

机构方案的创新设计具有挑战性,而机构的型综合是发明新机构或对现存机构进行类型改进的基础,对确定机构结构形式具有重要工程意义。

在机器人及并联机构领域,机构型综合研究已得到充分重视和深入研究。文献[1-3]对欠秩少自由度并联机器人机构型综合理论和方法进行了系统研究,而文献[4-7]则基于运动解耦方法开展了并联机构型综合研究。在工程应用领域,文献[8]构造了一系列串并联形式的混联结构锻造操作机构型,文献[9]提出一种构造新型一维并联型远程运动中心机构的型综合方法,文献[10]面向生物工程微操作机器人开展了三自由度平动并联机构型综合研究。但传统机构型综合研究方法

在其他领域应用较少,尤其在以齿轮和杆件为主要特征的动力传动机构的设计中更为少见。机构型综合属于机构优化设计范畴,采用现代优化方法开展机构型综合研究显得很有必要,同时也是扩展型综合研究领域的一条崭新途径。

目前,越来越多机器产品具有不止一种工作模式,配合模式切换的相关动力传动机构对相位和速比等参数需求不同^[11-12]。文献[13-15]中可变循环发动机(variable-cycle engine, VCE)在模式切换前后,其两种工作模式对凸轮轴配气相位和曲轴与凸轮轴之间的速比需求不同,需专有机件完成相应的调节和切换工作。然而,此类动力传动机构由于功能耦合且部件众多,方案设计分析工作繁冗,成本耗费巨大。本文以VCE凸轮轴驱动切换机构(driving and switching mechanism, DSM)方案的设计与分析为例,基于方案部件属性约简和机构型综合技术,开展可变动力传动机构的设计分析方法研究。

收稿日期:2015-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51406174);河北省自然科学基金资助项目(E2014203066);燕山大学博士基金资助项目(B786)

1 DSM 功能需求与构型分析

根据文献[13-14]分析可知,VCE 的 DSM 应具备 2:1 和 1:1 两种速比的相互切换功能,应实现两种模式下配气相位的连续可变和紧急情况下中断发动机动力的功能。此外,因用于发动机凸轮轴驱动,机构应兼具结构紧凑、工作平稳和高效率传动等特点。

行星齿轮传动具有的诸多优点使其被广泛应用于机械传动领域。戴-克公司和马氏创新 2T4 公司分别利用单排行星齿轮机构实现了发动机凸轮轴的两级可变速比驱动。Philippe 等^[16]发明了一种用于发动机凸轮相位动态调节的单排行星齿轮机构,它利用耦合器控制行星轮系的锁死与解锁以实现相位调节。GM、戴-克、TOYOTA 和 MAZDA 等汽车公司也有类似的利用单排行星齿轮实现动态调节配气相位的机构。上海 SICAR 公司采用两组行星轮系架构,开发出可在任意转速下获得最佳凸轮轴相位的机构,非 VVT 双顶置凸轮轴机型可直接进行改装^[17]。所以,采用行星轮系架构实现 VCE 的 DSM 设计,具有较高的可行性。

1.1 双排行星轮系架构确定

单排行星轮系(single row planetary gear train, SRPGT)的运动学特性方程为

$$\omega_1 + \alpha\omega_2 - (1 + \alpha)\omega_3 = 0 \quad (1)$$

$$\alpha = Z_2/Z_1$$

式中, ω_1 、 ω_2 和 ω_3 分别为 SRPGT 太阳轮、齿圈和行星架的转速; α 为齿圈与太阳轮的齿数比; Z_1 、 Z_2 分别为 SRPGT 太阳轮和齿圈的齿数。

根据速比的当量齿数计算法,将行星齿轮机构太阳轮、齿圈和行星架的当量齿数分别记为 1、 α 和 $1 + \alpha$,则根据行星齿轮机构的具体工况,能很快推算出其速比。

当 SRPGT 输出部件与凸轮轴固定连接且曲轴与输入部件之间速比为 1:1 时,可通过锁死 SRPGT 实现曲轴与凸轮轴 1:1 速比传动,此时,输入与输出部件的转速和转动方向均相同。但若要实现总速比为 2:1 的减速传动,则根据当量齿数法分析得出,无论如何分配太阳轮、齿圈和行星架,都无法在 $Z_2 > Z_1$ 情况下满足输出部件的旋转方向与轮系锁死时 1:1 速比情况下的旋转方向一致。同样,分析曲轴与 SRPGT 输入部件之间速比为 2:1 的情况,得到同样的结论。因此,利用 SRPGT 无法设计出满足 VCE 模式切换工作要求的凸轮轴驱动机构,且在 SRPGT 锁死

情况下,无法实现相位调节,所以本文提出了图 1 所示的相位与速比可变的双排行星轮系(double row planetary gear train with variable phase and transmission ratio, DRPGT-VPTR)机构设计方案。双排行星轮系(double row planetary gear train, DRPGT)中除用于前后传递动力的共用一体部件外,剩余部件完全满足输入、输出和相位调节等功能的分配使用,并且部件分配具有一定互换性,利于从机构总体布置和部件结构等方面开展进一步优化设计。

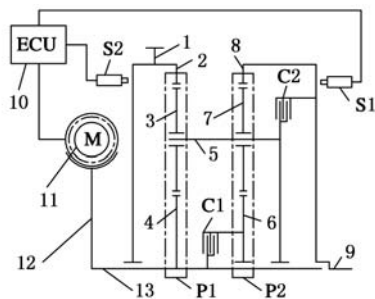


图 1 DRPGT-VPTR 的动力传动机构

1.2 DRPGT-VPTR 构型设计

图 1 所示为一种 DRPGT-VPTR 架构的传动机构方案,主要包括动力输入轮 1(凸轮轴链轮或皮带轮)、行星轮系 P1 和 P2、齿圈 2 和 8、太阳轮 4 和 6、行星轮 3 和 7、一体动力传递架 5、离合器 C1 和 C2、动力输出轴 9(接凸轮轴)、角速度相位传感器 S1 和 S2、电控单元 10、电机驱动蜗杆 11、蜗轮 12、相位控制轴 13 等。

图 1 所示机构具有输入与输出轴始终同向旋转、速比可变、动力传递可中断和双向可连续调节相位的特点。当电控单元 10 控制驱动蜗杆 11 保持静止、离合器 C1 接合且离合器 C2 分离时,蜗轮 12、相位控制轴 13、太阳轮 4 和太阳轮 6 同时保持静止,动力输入轮 1 输入的动力通过齿圈 2 带动行星轮 3 驱动一体动力传递架 5 同方向旋转,一体动力传递架 5 带动行星轮 7 驱动齿圈 8 同方向旋转,齿圈 8 带动动力输出轴 9 同向旋转实现某一固定速比的动力传递;当电控单元 10 控制驱动蜗杆 11 保持静止、离合器 C1 分离且离合器 C2 接合时,蜗轮 12、相位控制轴 13、太阳轮 4 同时保持静止,行星轮系 P2 通过离合器 C2 接合锁死,动力输入轮 1 输入的动力通过齿圈 2 带动行星轮 3 驱动一体动力传递架 5 同向旋转,一体动力传递架 5 带动锁死的行星轮系 P2 和动力输出轴 9 也同向旋转,实现另一固定速比的动力传递;当电控单元 10 控制驱动蜗杆 11 保持静止、离合器 C1 和离合器 C2 都保持分离时,蜗轮 12、相

位控制轴 13 和太阳轮 4 同时保持静止,动力输入轮 1 输入的动力通过齿圈 2 带动行星轮 3 驱动一体动力传递架 5 同向旋转,动力输出轴 9 的驱动阻力使齿圈 8 保持静止,一体动力传递架 5 带动行星轮 7 驱动太阳轮 6 同向空转,动力输出中断。速比一定情况下,电控单元 10 接收来自传感器 S1 和 S2 的信号,运算并输出控制信号使驱动蜗杆 11 正向或反向旋转,从而带动涡轮 12 旋转,太阳轮 4 因与涡轮 12 固接而同步旋转,使齿圈 2 与

齿圈 8 之间产生相位变化,从而实现动力输入轮 1 与动力输出轴 9 之间的相位连续调节。

为全面分析和优选满足 VCE 模式切换需求的 DRPGT 架构特征机构方案,在不考虑输入、输出部件转向改变与否的前提下,得到 12 种基于 DRPGT 架构具有同名部件一体传力、速比二级可变、相位连续可调和动力可中断等特征的机构方案,如表 1 所示。

表 1 DRPGT-VPTR 动力传动机构方案

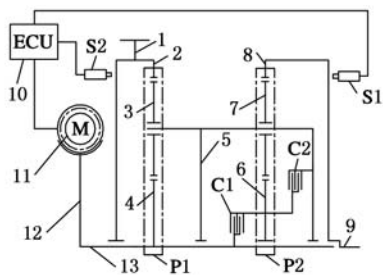
方案	输入部件	输出部件	一体化部件	调相部件	中断部件	速比挡位	C1	C2	变速方向	变速效果
1	P1_2	P2_8	一体化行星架	P1_4	P2_6	1 挡	—	×	同向	降速
						2 挡	×	—	同向	同/升/降速
						N 挡	—	—	无关	中断
2	P1_2	P2_6	一体化行星架	P1_4	P2_8	1 挡	—	×	同向	降速
						2 挡	×	—	同向	升/同/降速
						N 挡	—	—	无关	中断
3	P1_行星架	P2_行星架	一体化齿圈	P1_4	P2_6	1 挡	—	×	同向	升速
						2 挡	×	—	同向	同/升/降速
						N 挡	—	—	无关	中断
4	P1_行星架	P2_行星架	一体化太阳轮	P1_2	P2_8	1 挡	—	×	同向	升速
						2 挡	×	—	同向	同/升/降速
						N 挡	—	—	无关	中断
5	P1_4	P2_6	一体化行星架	P1_2	P2_8	1 挡	—	×	同向	降速
						2 挡	×	—	同向	同/升/降速
						N 挡	—	—	无关	中断
6	P1_4	P2_8	一体化行星架	P1_2	P2_6	1 挡	—	×	同向	一级降速
						2 挡	×	—	同向	二级降速
						N 挡	—	—	无关	中断
7	P1_2	P2_8	一体化太阳轮	P1_行星架	P2_行星架	1 挡	—	×	反向	升速
						2 挡	×	—	同向	同/升/降速
						N 挡	—	—	无关	中断
8	P1_行星架	P2_8	一体化太阳轮	P1_2	P2_行星架	1 挡	—	×	同向	升速
						2 挡	×	—	反向	升/同/降速
						N 挡	—	—	无关	中断
9	P1_行星架	P2_6	一体化齿圈	P1_4	P2_行星架	1 挡	—	×	同向	一级升速
						2 挡	×	—	反向	二级升速
						N 挡	—	—	无关	中断
10	P1_4	P2_6	一体化齿圈	P1_行星架	P2_行星架	1 挡	—	×	反向	降速
						2 挡	×	—	同向	同/升/降速
						N 挡	—	—	无关	中断
11	P1_2	P2_行星架	一体化太阳轮	P1_行星架	P2_8	1 挡	—	×	反向	升速
						2 挡	×	—	反向	降/同/升速
						N 挡	—	—	无关	中断
12	P1_4	P2_行星架	一体化齿圈	P1_行星架	P2_6	1 挡	—	×	反向	一级降速
						2 挡	×	—	反向	二级降速
						N 挡	—	—	无关	中断

注:“N 挡”表示动力传递中断的空挡;“×”表示离合器接合;“—”表示离合器分离;“同/升/降速”即同速/升速/降速,表示由 DRPGT 中两排行星轮系部件参数决定的可能变速效果。

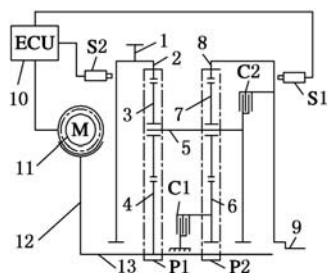
表 1 中方案 1 的结构简图即为图 1。表 1 中,“P1_2”表示前排行星轮系 P1 中的齿圈 2 部件,其他相关符号依此类推。“中断部件”表示后排行星轮系未锁死时的固定部件,因其通过离合器 C1 固定,因此只有当离合器 C1 分离时,机构

才能实现动力传递的中断。

根据离合器 C1 和 C2 连接部件的不同,表 1 中各方案又可得到诸多衍生方案,图 2 所示为方案 1 衍生出的子方案中的两种。型综合是开展结构设计和类型优选的基础^[18],本文仅对表 1 中 12



(a)



(b)

图 2 表 1 中方案 1 的衍生方案

种方案进行型综合研究。

2 基于粗糙集的 DRPGT-VPTR 方案分类

要准确描述表 1 中 12 种方案的结构及功能,信息量较大,直接对其进行功能分类十分困难。粗糙集(rough set, RS)理论研究的是不同对象组成集合之间的关系,能对分类条件属性信息进行有效约简,而又不影响对象的功能分类归属。故本文采用粗糙集理论对 12 种方案的不同部件进行特征描述,通过对特征描述参量组成集合的属性约简,实现高效分类。

定义信息系统 $T = (U, A, C, D)$, 其中 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为对象集(论域), A 为属性集合, 属性集 A 由条件属性集 $C = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 和决策属性集 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 组成, C 中的 $s_i = \{f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{ij}, \dots, f_{in}\}$, 条件属性 f_{ij} 表示对象 x_i 的条件属性 s_j 的值, D 中决策属性 d_i 表示对象 x_i 的决策属性值, 且有 $C \cup D = A, C \cap D = \emptyset$, 则 T 被称为决策系统或决策表。粗糙集应用二维决策表描述论域对象, 每个对象用一行来描述, 每种对象属性用一列来描述。

每种机构方案均为: 行星轮系 P1 三部件中, 一个负责动力输入, 一个负责相位调节, 第三个与行星轮系 P2 三部件中的同名部件固接, 负责将动力从行星轮系 P1 传递到行星轮系 P2。行星轮系 P2 中剩余的两个部件, 一个负责动力输出, 另一个通过离合器与固定部件接合或分离, 以实现动力的传递或中断功能。根据粗糙集理论, 定义

机构各部件条件属性 C 取值描述规则如表 2 所示。当条件属性 $s_1 \sim s_5$ 分别对应太阳轮、齿圈、行星架起作用时, 分别用 0、1、2 表示, s_6 对应行星轮系 P2 中不与离合器 C2 相连接的部件, 此部件若是太阳轮则为 0, 若是齿圈则为 1, 若是行星架则为 2。

表 2 条件属性 C 定义表

	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6
太阳轮	0	0	0	0	0	0
齿圈	1	1	1	1	1	1
行星架	2	2	2	2	2	2

本文 D 选取两个决策属性值 d_{i1} 和 d_{i2} 。 d_{i1} 表示机构输入与输出轴转向是否相同, 如果两种速比下转向均相同则用 1 表示, 若一种速比下转向相同, 一种速比下转向相反则用 2 表示, 若两种速比下转向均相反则用 3 表示。 d_{i2} 表示两种速比下的变速效果, 本文仅研究 DRPGT 的行星轮系 P1 和 P2 中同名齿轮部件采用相同设计参数的情况, 决策属性 D 的具体定义规则如表 3 所示。 d_{i2} 的十位数取值与相应 d_{i1} 相同, 描述输入、输出转向特征, 其个位数描述变速效果的不同组合情况, 组合次序不分前后。

表 3 决策属性 D 定义表

方	输入、	变速	d_{i1}	d_{i2}	方	输入、	变速	d_{i1}	d_{i2}
案	输出转向	效果			案	输出转向	效果		
01	同向	降速			07	反向	升速		
01	同向	同速	1	11	07	同向	同速	2	23
01	无关	中断			07	无关	中断		
02	同向	降速			08	同向	升速		
02	同向	升速	1	12	08	反向	升速	2	24
02	无关	中断			08	无关	中断		
03	同向	升速			09	同向	升速		
03	同向	同速	1	13	09	反向	升速	2	24
03	无关	中断			09	无关	中断		
04	同向	升速			10	反向	降速		
04	同向	同速	1	13	10	同向	同速	2	21
04	无关	中断			10	无关	中断		
05	同向	降速			11	反向	升速		
05	同向	同速	1	11	11	反向	降速	3	32
05	无关	中断			11	无关	中断		
06	同向	降速			12	反向	降速		
06	同向	降速	1	10	12	反向	降速	3	30
06	无关	中断			12	无关	中断		

各机构方案特征信息对应的系统决策表如表 4 所示。每个方案对应 3 种动力传动变速效果, 即 1 个对象可分为 3 个子对象, 且每个子对象具有不同条件属性。为了准确合理地反映分类决策信息, 本文采用了非常规的 2 个决策属性。本文令 $C = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\}$, $D = \{d_{i1}, d_{i2}\}$, 通过计算机算法编程^[19], 得到条件属性约简后的结果为 $C = \{s_1, s_2, s_4\}$ 。

表 4 机构方案特征信息系统决策表

U	C						D	
	s ₁	s ₂	s ₃	s ₄	s ₅	s ₆	d _{i1}	d _{i2}
01	0	1	2	1	0	0	1	11
01	0	1	2	1	0	1	1	11
01	0	1	2	1	0	2	1	11
02	0	1	2	0	1	0	1	12
02	0	1	2	0	1	1	1	12
02	0	1	2	0	1	2	1	12
03	0	2	1	2	0	0	1	13
03	0	2	1	2	0	1	1	13
03	0	2	1	2	0	2	1	13
04	1	2	0	2	1	0	1	13
04	1	2	0	2	1	1	1	13
04	1	2	0	2	1	2	1	13
05	1	0	2	0	1	0	1	11
05	1	0	2	0	1	1	1	11
05	1	0	2	0	1	2	1	11
06	1	0	2	1	0	0	1	10
06	1	0	2	1	0	1	1	10
06	1	0	2	1	0	2	1	10
07	2	1	0	1	2	0	2	23
07	2	1	0	1	2	1	2	23
07	2	1	0	1	2	2	2	23
08	1	2	0	1	2	0	2	24
08	1	2	0	1	2	1	2	24
08	1	2	0	1	2	2	2	24
09	0	2	1	0	2	0	2	24
09	0	2	1	0	2	1	2	24
09	0	2	1	0	2	2	2	24
10	2	0	1	0	2	0	2	21
10	2	0	1	0	2	1	2	21
10	2	0	1	0	2	2	2	21
11	2	1	0	2	1	0	3	32
11	2	1	0	2	1	1	3	32
11	2	1	0	2	1	2	3	32
12	2	0	1	2	0	0	3	30
12	2	0	1	2	0	1	3	30
12	2	0	1	2	0	2	3	30

粗糙集分析表明,通过相位调节、动力输入和动力输出部件的不同组合描述信息,就可以得到与决策属性分类信息一致的各机构方案,这样能大大提高机构部件功能分配、总体布局设计和方案优选的效率。此外,其机构特征的数值化描述为下文聚类分析打下了基础。

3 DRPGT - VPTR 方案聚类分析

基于决策表的量化分类过程依然需要人为介入且不够高效和直观。本文基于粗糙集分析,采用聚类分析法对机构方案开展自动化分类辨识研究,以提高优选设计过程分类的高效性、可靠性和直观性。鉴于针对本文众多机构方案的分类属于样品分类的本质,又因聚类分析结果应被视为试探性的且原始数据继承了粗糙集数据构建特征,变量属性构成复杂,所以本文分别采用系统聚类、快速聚类和二阶聚类 3 种方法分别对各机构方案开展 Q 型聚类分析。

3.1 数据构建及合理性判据确定

在表 4 左侧插入样品(机构方案)序号列 $n = \{1, 2, \dots, 36\}$,即可得到用于聚类分析的机构方案数值化原始数据,在此,U 表示机构方案属性兼方案标签列。显然,U 值相同的样品应被归到相同的类组,且决策属性 d_{i1} 和 d_{i2} 相同的样品应被分到同一类组,所以,可通过对比 3 种聚类方法分析结果与 U、 d_{i1} 和 d_{i2} 的自身属性分类是否相符,作为评价聚类结果合理与否的判据。

3.2 机构方案系统聚类分析

将 U、 $s_1 \sim s_6$ 、 d_{i1} 和 d_{i2} 根据方案标号 n 和方案标签 U 进行系统聚类分析,输出得到图 3 所示类间平均连接法聚类树状图。当分组超过 5 类组时,U 分别为 8 和 9 但 d_{i2} 均为 24 的机构方案被分配到不同的类组,这不满足合理性判据要求。

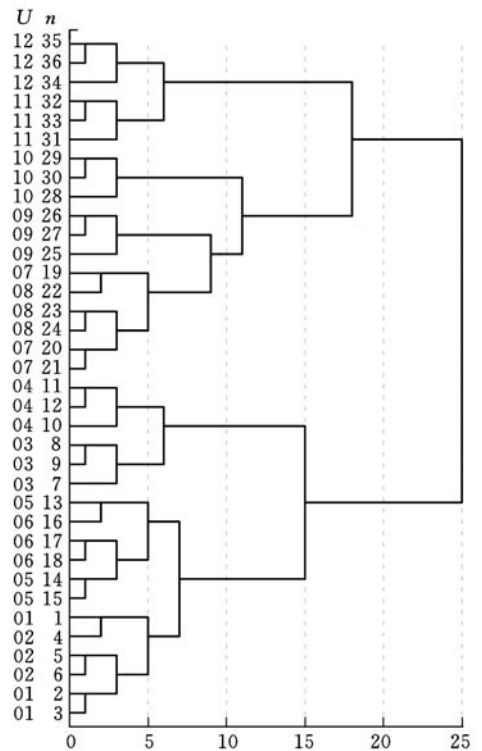


图 3 类间平均连接法聚类树状图

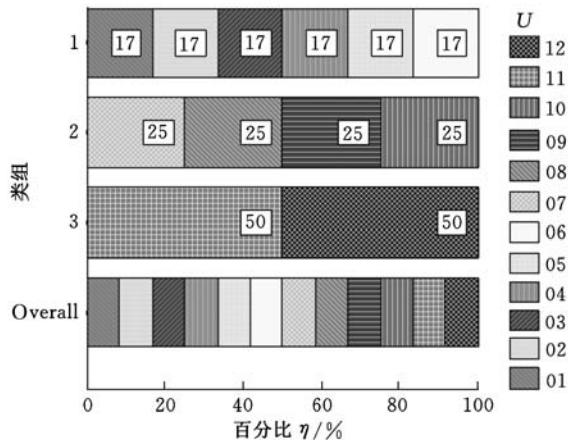
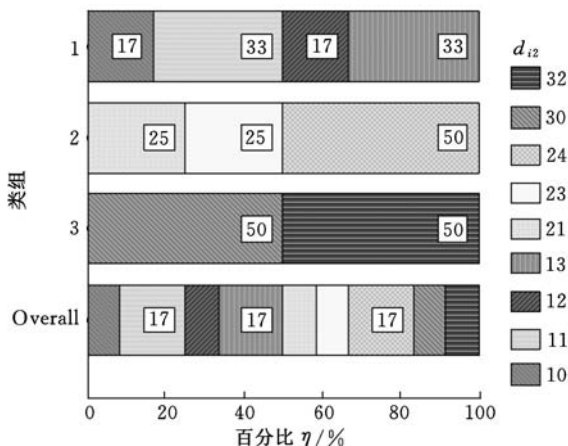
3.3 机构方案快速聚类分析

经快速聚类分析后,得到了与系统聚类相似的结论,仅当分组小于 3 类组时满足判据,所以快速聚类分析法也无法准确表达所有机构方案的科学分类。

3.4 机构方案二阶聚类分析

本文采用对数相似值(log-likelihood)作为二阶聚类分析的距离度量,聚类准则选取施瓦兹贝叶斯准则,得到的 3 类组聚类结果分别如图 4 和图 5 所示。

由图 4 中类间及类内百分比组成可以看出,

图 4 3 类组方案属性 U 二阶聚类图图 5 3 类组变速效果 d_{12} 二阶聚类图

当分成 3 类组时,方案属性 U 为 01~06 的样品为第 1 类组,这 6 种样品方案平均各占第 1 类组的 1/6(约 17%)组内构成。方案属性 U 为 07~10 的样品为第 2 组,这 4 种样品方案平均各占第 2 类组的 1/4(25%)组内构成。方案属性 U 为 11 和 12 的样品构成第 3 组,这 2 种样品方案平均各占第 3 类组的 1/2(50%)组内构成。在方案属性这一总类组中,12 种样品方案平均各占总类组(Overall 类组)的 1/12(约 8%),上述分析结果符合聚类结果合理性判据。

同理分析图 5 可知,基于变速效果 d_{12} 的聚类结果也满足合理性判据。采用相同方法分析其他类分组,结果都满足合理性判据要求。从凝聚性和分离性的 Silhouette 测量效果评价来看,聚类质量都在良好以上。

上述分析表明,采用二阶聚类法可以对各机构方案进行准确高效分类,当已知机构方案的构成属性特征时,可以迅速找到其所属分类和对应的决策属性,或在已知使用要求(决策属性)条件下,可以迅速通过其所属分类找到满足该决策属性的不同机构方案,从而提高方案优选设计效率。

4 VCE 的 DSM 方案设计

VCE 模式切换前后,机构输入、输出部件的旋转方向应保持不变。当 DRPGT 选用同名一体化部件在两行星轮系之间传力时,后排 SRPGT 是通过自身锁死与否实现两种速比切换的,前排 SRPGT 具有固定不变的输入部件、输出部件和相位调节部件。

在后排锁死情况下,整体传动效果等同于前排 SRPGT 的传动效果,由 1.1 节分析可知,只有前排太阳轮作为输入部件、齿圈作为输出部件、行星架作为相位调节部件一类方案可行,且速比为 2:1。当后排 SRPGT 未锁死情况下,因齿圈为输入部件,故需要行星架作为输出部件才能保证两种速比下的输出部件转向不变。又因要与前排 SRPGT 形成 1:1 的总速比,所以后排 SRPGT 应实现 1:2 的速比,而当后排齿圈作为输入时,仅当太阳轮为输出部件才能实现,但会使输出部件在速比切换前后出现反转现象。

行星架上具有单组两个相互外啮合行星齿轮的单排行星齿轮机构 SRPGT-D,因从齿圈到太阳轮的动力传递方向改变两次,从而使齿圈与太阳轮的转向一致。因此,采用 SRPGT-D 代替后排 SRPGT,从而满足 VCE 的 DSM 功能需求。SRPGT-D 的运动学特性方程为

$$\omega_s - k\omega_r + (k-1)\omega_c = 0 \quad (2)$$

式中, k 为行星齿轮特性参数,当 $\alpha = Z_r/Z_s$ 时,有 $k = Z_s/Z_r = 1/\alpha$; Z_r 、 Z_s 分别为 SRPGT-D 齿圈、太阳轮齿数; ω_s 、 ω_r 、 ω_c 分别为 SRPGT-D 太阳轮、齿圈和行星架的转速。

当 SRPGT-D 齿圈作为输入、太阳轮作为输出部件、行星架固定时,则由式(2)得出其速比为 $\omega_r/\omega_s = 1/\alpha$,即 SRPGT-D 要实现 1:2 的速比时,应使 $\alpha = 2$ 。因此,VCE 的 DSM 应采用前排 SRPGT 与后排 SRPGT-D 的串联结构设计,且前排太阳轮输入,齿圈输出,行星架进行相位调节,而后排齿圈输入,行星架利用离合器起到固定或中断动力的作用,太阳轮输出。满足上述条件的机构方案特征信息决策表如表 5 所示,各方案仅在后排负责锁死功能的部件上有所不同。其中一种可行方案如图 6 所示,图中 70 为双行星轮架,71 和 72 为双行星轮架 70 上相互外啮合的两个行星齿轮。

表 5 中 VCE 的各 DSM 方案,在保证速比和相位调节满足使用要求的基础上,还可实现紧急中断发动机动力的功能。针对行驶中的车辆,可

表 5 机构方案特征信息决策表

U	C						D	
	s ₁	s ₂	s ₃	s ₄	s ₅	s ₆	d _{i1}	d _{i2}
01	2	0	1	0	2	0	1	11
02	2	0	1	0	2	1	1	11
03	2	0	1	0	2	2	1	11

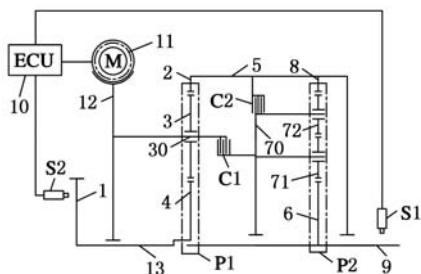


图 6 VCE 的 DSM 方案

综合考虑中断动力开关、手刹位置、制动踏板踩踏频率、车辆高速行驶工况转向盘转动频率等信号，迅速判断是否需要中断 DSM 的动力传递，且能在下次启动时自动恢复。

5 结论

(1) 提出利用双排行星轮系架构实现可变循环发动机的驱动切换机构方案，并采用粗糙集理论对各拓扑机构方案分类条件属性进行了有效约简，得出仅利用相位调节、动力输入和动力输出 3 个部件的属性描述信息就可得到与决策属性分类一致的方案分类结果。

(2) 基于粗糙集的机构特征数值化描述信息表，利用三种方法对各拓扑机构方案开展聚类分析结果表明，二阶聚类法的分类效果最佳。最终设计出一类前排为单排行星轮系、后排为行星架上具有单组两个相互外啮合行星齿轮的单排行星齿轮机构 SRPGT-D 的串联动力传动机构方案，该方案能满足可变循环发动机模式切换的工作需求。

(3) 粗糙集结合聚类分析法，可以有效简化繁杂的机构类方案的设计分析过程，能高效准确地完成其型综合与方案优选工作。

参考文献:

[1] 黄真, 李秦川. 少自由度并联机器人机构的型综合原理[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2003, 33(9): 813-819.
Huang Zhen, Li Qinchuan. Type Synthesis Theory of Lower-mobility Parallel Robot Mechanism [J]. Science China: Technological Sciences, 2003, 33(9): 813-819.

[2] 陈红亮, 罗玉峰, 杨廷力. 对称三自由度并联机器人拓扑结构型综合与分类[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 138-141.

Chen Hongliang, Luo Yufeng, Yang Tingli. Structure Design Sort of Parallel Robot Mechanism with Symmetric 3-DOF[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 138-141.

[3] 金琼, 杨廷力, 刘安心, 等. 基于单开链单元的三平移—转动并联机器人机构型综合及分类[J]. 中国机械工程, 2001, 12(9): 1038-1043.
Jin Qiong, Yang Tingli, Liu Anxin, et al. Structural Synthesis and Classification of the 4DOF(3T-1R) Parallel Robot Mechanisms Based on the Units of Single-Opened-Chain[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(9): 1038-1043.

[4] 曾达幸, 黄真. 基于螺旋理论的转动解耦并联机构型综合[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2011, 41(5): 585-591.
Zeng Daxing, Huang Zhen. Type Synthesis of the Rotational Decoupled Parallel Mechanism Based on Screw Theory[J]. Science China: Technological Sciences, 2011, 41(5): 585-591.

[5] 曾达幸, 胡志涛, 侯雨雷, 等. 基于螺旋理论的两转—移解耦并联机构型综合[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(1): 22-28.
Zeng Daxing, Hu Zhitao, Hou Yulei, et al. Type Synthesis of 2R1T Decoupled Parallel Mechanism based on Screw Theory[J]. Journal of Yanshan University, 2014, 38(1): 22-28.

[6] Briot S, Bonev I A. A New 3T1R Decoupled Parallel Manipulator for Pick-and-place Applications[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(4): 707-721.

[7] 蔡伟林, 熊涛, 尹周平. 基于螺旋理论的转动解耦调平机构型综合[J]. 中国机械工程, 2012, 23(18): 2213-2217, 2242.
Cai Weilin, Xiong Tao, Yin Zhouping. Type Synthesis of a Rotational Decoupled Leveling Mechanism Based on Screw Theory[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(18): 2213-2217, 2242.

[8] 许允斗, 姚建涛, 赵永生. 基于螺旋理论的锻造操作机构型综合[J]. 中国机械工程, 2011, 22(13): 1540-1545.
Xu Yundou, Yao Jiantao, Zhao Yongsheng. Type Synthesis of Forging Manipulators Based on Screw Theory[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(13): 1540-1545.

[9] 裴旭, 于靖军, 毕树生, 等. 一维远程运动中心机构的型综合[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 144-148.
Pei Xu, Yu Jingjun, Bi Shusheng, et al. Type Synthesis for One-dimensional Remote-center-of-motion Mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engi-

neering, 2009, 45(2): 144-148.

- [10] 于靖军, 毕树生, 宗光华, 等. 面向生物工程的微操作机器人机构型综合研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(3): 356-360.
Yu Jingjun, Bi Shusheng, Zong Guanghua, et al. Research on Type Synthesis of Micromanipulation Mechanisms for Bioengineering[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(3): 356-360.
- [11] Baccile A, Ceccarini D, Cheng L, et al. An Innovative Control System for a 2/4 Stroke Switchable Engine [J]. SAE Technical Paper, 2007011199, 2007.
- [12] RICARDO. Engine Uses Two and Four Stroke[J]. Professional Engineering, 2008(5): 55.
- [13] Di Liming, Sun Wanli, Shi Ying, et al. Cam Profile Optimization Design of Variable Cycle Reciprocating Piston Engine[J]. Hydromechanics Engineering, 2014, 42(6): 11-18, 45.
- [14] 邸立明, 李文跃, 赵永生, 等. 基于全转速综合性能评价的可变循环发动机配气优化[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 117-123.
Di Liming, Li Wenyue, Zhao Yongsheng, et al. Distribution Device Optimization of Variable-cycle Engine Based on Comprehensive Performance Evaluation in All Speed[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 117-123.
- [15] Di Liming, Yang Chunjing, Zhao Yongsheng. Mathematical Model for Closed-form Solution of Parameters of Cylinder Exhaust Port in Variable-stroke Engine [J]. Advanced Materials Research, 2010, 97-101: 2724-2727.
- [16] Philippe S F, Laffitte M, Peter B, et al. Variable Cam Phase Apparatus: US, 20070169731 [P]. 2007-7-26.
- [17] 邱显东, 骆军, 王燕文. 一种汽车发动机气门可变相位机构: CN 101338689-A[P]. 2009-01-07.
- [18] 周玉林, 李波, 高峰, 等. 二自由度球面并联机构 U_{P+R} 静力学分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(15): 2081-2087.
Zhou Yulin, Li Bo, Gao Feng, et al. Statics Analysis of a Spherical Parallel Mechanism U_{P+R} with 2-DOF[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(15): 2081-2087.
- [19] 张雪峰, 张庆灵. 线性时变周期系统的能控性与能稳定性问题[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4): 812-815.
Zhang Xuefeng, Zhang Qingling. Problem on Controllability and Stabilizability of Linear Time-varying Periodic System[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(4): 812-815.

作者简介: 邸立明, 男, 1981 年生. 燕山大学车辆与能源学院副教授、博士. 研究方向为发动机优化设计、机械传动. 获中国发明专利 7 项. 发表论文 10 余篇. 赵永生, 男, 1962 年生. 燕山大学机械工程学院教授、博士研究生导师. 牡丹阳, 女, 1991 年生. 燕山大学车辆与能源学院硕士研究生.

(上接第 289 页)

- [8] Lo C, Yuan J, Ni J. An application of Real-time Error Compensation on a Turning Center[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1995, 35(12): 1669-1682.
- [9] Lo C, Yuan J, Ni J. Optimal Temperature Variable Selection by Grouping Approach for Thermal Error Modeling and Compensation[J]. Int. J. Mach. Tools Manufact., 1999, 39(9): 1383-1396.
- [10] Lee J, Yang S. Statistical Optimization and Assessment of a Thermal Error Model for CNC Machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(1): 147-155.
- [11] 杨建国, 邓卫国, 任永强, 等. 机床热补偿中温度变量分组优化建模[J]. 中国机械工程, 2004, 15(6): 478-481.
Yang Jianguo, Deng Weiguo, Ren Yongqiang, et al. Grouping Optimization Modeling by Selection of Temperature Variables for the Thermal Error Compensation on Machine Tools [J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(6): 478-48.
- [12] 苗恩铭, 龚亚运, 成天驹, 等. 支持向量回归机在数控加工中心热误差建模中的应用[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 980-986.
Miao Enming, Gong Yayun, Cheng Tianju, et al. Application of Support Vector Regression to Thermal Error Modeling of Machine Tools[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 980-986.
- [13] Miao Enming, Niu Pengcheng, Fei Yetai, et al. Selecting Temperature-sensitive Points and Modeling Thermal Errors of Machine Tools[J]. J. Chin. Sco. Mech. Eng., 2014, 32(6): 559-565.
- [14] 吴诚鸥, 秦伟良. 近代实用多元统计分析[M]. 北京: 气象出版社, 2007. (编辑 苏卫国)

作者简介: 苗恩铭, 男, 1971 年生. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院教授、博士研究生导师. 主要研究方向为精密机械工程、精度理论、数控机床热误差补偿、机械热鲁棒性结构设计理论与应用技术. 出版专著 1 部, 发表论文 50 余篇. 刘义, 男, 1994 年生. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院硕士研究生. 高增汉, 男, 1990 年生. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院硕士研究生. 刘辉, 男, 1991 年生. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院硕士研究生.