静液传动混合动力车辆驱动系统优化匹配

王 昕[1,2], 姜继海[1,2], 于安才[1,2]

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150080 哈尔滨, wangxin197994@163.com;
2. 浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 310027 杭州)

摘 要: 为了解决通用优化算法无法有效计算静液传动混合动力车辆驱动系统优化匹配时设计变量具有复杂约束的问题,建立液压泵/马达排量与其转速范围的规则知识库,采用基于该规则知识库的自适应模拟退火遗传算法,对轮边驱动静液传动混合动力车辆的驱动系统关键元件及系统参数进行优化匹配.对优化后的混合动力车辆的节能和动力特性进行仿真分析,并采取能量对应方法对启动-制动-启动工况进行模拟试验.仿真和模拟试验结果表明,基于规则知识库的自适应模拟退火算法合理有效,优化后的混合动力车辆节能和动力性能均优于相应的传统车辆.

关键词: 静液传动混合动力;优化匹配;规则知识库;遗传算法
中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)07-0066-05

Optimal matching on driving system of hydraulic hybrid vehicle

WANG Xin[1,2], JIANG Ji-hai[1,2], YU An-cai[1,2]

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China, wangxin197994@163.com;
2. The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To solve the problem that general optimize algorithms couldn't effectively calculate the designed variables with complex restrictions, a hydraulic pump/motor displacements and their rotate speed restrictions rule based knowledge-base (RKB) was proposed, and the RKB adaptive simulated annealing genetic algorithm (ASAGA) was introduced to optimize the main components and system parameters of wheel drive hydraulic hybrid vehicle (WDHHV) driving system. The energy saving and propulsion characters of the optimized WDHHV were analyzed by simulation, and simulated experiments of the WDHHV with a start-stop-start working cycle according to the corresponding energy were carried out. All the simulation and simulated experiments results show that the proposed RKB ASAGA is reasonable and effective, and the energy saving and propulsion characters of the optimized WDHHV are all better than that of the traditional vehicle.

Key words: hydraulic hybrid; optimal matching; rule based knowledge-base; genetic algorithm

驱动系统主要元件及系统参数的匹配问题是静液传动混合动力车辆节能效果的主要影响因素之一[1].国内外很多研究工作表明,通过对系统关键元件的优化匹配,可以在不增加系统设计、加工和装配技术难度的条件下有效提升系统性能[2-4].常用的系统优化方法有直接法、通用算法以及改进的通用算法[2,5-6],其中设计变量的约束只能视为一个固定的区间或集合,当存在设计变量与其约束条件具有复杂或非函数映射关系时无法有效表达,造成优化结果无效.

为了解决上述问题,本文建立了液压泵/马达排量与其转速约束的规则知识库,采用基于该规则知识库的自适应模拟退火遗传算法对静液传动混合动力轮边驱动车辆的驱动系统进行优化匹配.

1 基于规则知识库的自适应模拟退火遗传算法设计

基于规则知识库[7]的自适应模拟退火遗传

收稿日期: 2010-03-22.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875054);浙江大学流体传动及控制国家重点实验室开放基金资助项目(GZKF-200803).
作者简介: 王 昕(1979—),男,博士研究生;
姜继海(1957—),男,教授,博士生导师.

算法以遗传算法为主体,通过自适应规则使进化后期的变异率提高,减少了早熟收敛的几率;以模拟退火的方法拉伸目标函数的适应度,使具有优秀基因的个体在交叉选择时保持其基因的优势,从而提高进化速度;通过规则知识库对不便于精确建模以及搜索可行域有规律变化的基因采取查表的方法获取可行解[8]. 基于规则知识库的自适应模拟退火遗传算法操作流程如图 1 所示.

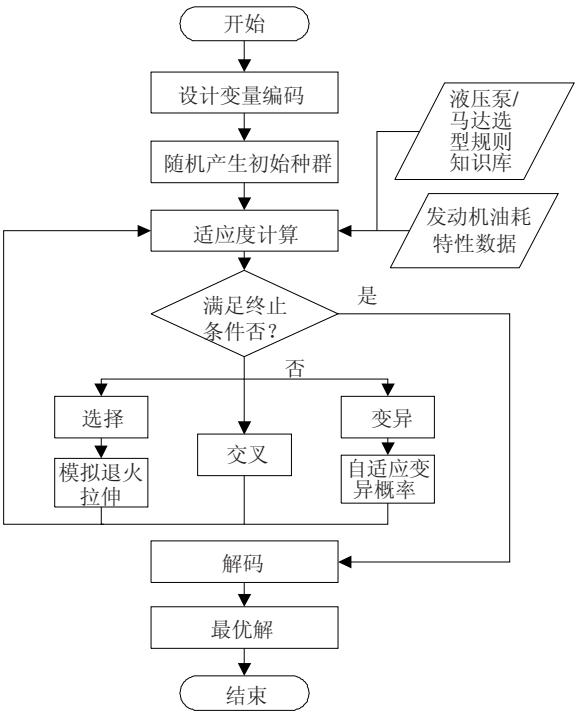


图 1　基于规则知识库的自适应模拟退火遗传算法流程

2　目标函数确定

2.1　能量回收能力

能量回收能力是混合动力车辆对制动能回收能力的一种反映,用可回收能量与车辆平均动能(某工况平均车速下的动能)之比来表示:

$$\eta_r = \frac{E_a}{E_k} = \frac{p_1 V_1/(n-1)\left[(p_1/p_2)^{\frac{1-n}{n}} - 1\right]}{0.5M(u/3.6)^2}.$$

式中:η_r 为能量回收率;E_a 为液压蓄能器可回收能量,J;E_k 为车辆平均动能,J;M 为整车质量,kg;u 为车速,km/h;V_1 为液压蓄能器充气压力下容积,m^3;V_2 为液压蓄能器最高压力下容积,m^3;p_1 为液压蓄能器充气压力,Pa;p_2 为液压蓄能器最高压力,Pa;n 为气体指数.

2.2　动力性能

汽车动力性能可以通过原地起步加速时间作为评价依据,

$$t_a = \int_0^u \delta M/[F_t - (F_f + F_w)]\,du.$$

式中:t_a 为加速时间,s;δ 为旋转质量换算系数;F_t 为驱动力,N;F_f 为滚动阻力,N;F_w 为空气阻力,N.

2.3　燃油消耗

车辆的燃油消耗与发动机的转矩和转速相关. 在静液传动混合动力轮边驱动车辆中,发动机的转矩和转速与传动系转矩和转速并无直接对应关系,二者通过功率耦联. 根据万有特性数据,可根据某一时刻车辆的功率选择出最低的油耗量. 该过程可表示为

$$Q \rightarrow Opt(T,\omega) \rightarrow P = f(M,u).$$

式中:Q 为油耗,L/100 km;$Opt(T,\omega)$ 为对最佳工作点进行查找的程序;P 为功率,kW.

2.4　目标函数

采用权重系数法将多目标优化问题转化为单目标优化问题,由于各优化目标数值和单位上的差异,需要进行归一化处理,即

$$F = a_1\frac{\eta_{rmax} - \eta_r}{\eta_{rmax} - \eta_{rmin}} + a_2\frac{t_a - t_{amin}}{t_{amax} - t_{amin}} + a_3\frac{Q - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}}.$$

式中,F 为目标函数,a_i 为权重系数.

3　优化实例

为验证优化算法的合理及有效性,根据实际运输车辆的性能指标配置相应的静液传动混合动力轮边驱动车辆,并对其驱动系统主要元件进行优化匹配. 原车主要参数如表 1 所示.

表 1　某型号运输车参数

参数	发动机额定功率/kW	车轮半径/m	整备质量/kg	最高车速/(km·h^{-1})	0~50 km·h^{-1}加速时间/s
参数值	206	0.6	9 000	100	20

参数	发动机最大扭矩/Nm	车外型尺寸/(mm×mm×mm)	满载质量/kg	最大爬坡度/%	巡航速度/(km·h^{-1})
参数值	1 100	8 970×2 490×2 890	19 000	30	50

静液传动混合动力轮边驱动车辆原理模型如图 2 所示. 根据所设计模型的工作原理,可以计算驱动系统主要元件参数的约束范围,即设计变量基因限值.

3.1　基因限值

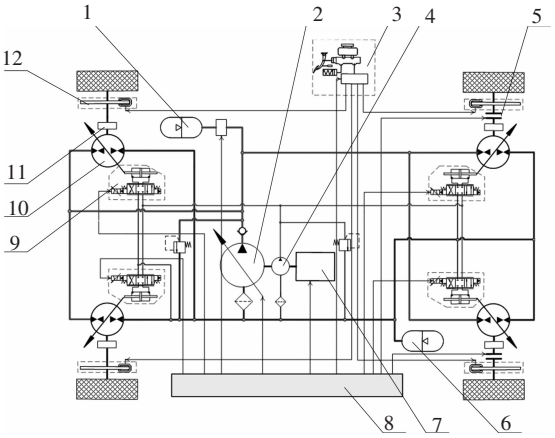
3.1.1　发动机

静液传动混合动力车辆可以使用液压蓄能器中储存的再生制动能量提供部分峰值功率,因而

在设计或选择静液传动混合动力车辆发动机时可以适当降低其后备功率. 发动机最佳功率点应该按照车辆通常行驶工况下的平均功率并增加部分裕量进行计算[9-10],即

$$P_e = (3\,600\eta)^{-1}(Mgfu + C_D A u^3/21.15)\lambda.$$

式中: P_e 为发动机功率,kW; η 为传动系效率; f 为滚动阻力系数; C_D 为空气阻力系数; A 为车辆迎风面截面积; λ 为功率裕量系数, $\lambda > 1$.



1—高压液压蓄能器;2—恒压变量泵;3—摩擦制动控制器;4—定量泵;5—后轮离合器;6—低压液压蓄能器;7—汽车发动机;8—中央控制器;9—液压泵/马达变量控制组件;10—液压泵/马达;11—减速器;12—摩擦制动器

图 2 静液传动混合动力轮边驱动车辆原理

由于车速和载重量通常在一定范围内变化,因此发动机平均功率是一个功率带. 为了获得较好的燃油经济性和排放性能,应使发动机燃油经济性较好的区域尽可能处于功率带的上下限中心位置.

3.1.2 恒压变量泵

恒压变量泵的最大流量应满足前后驱动轮液压泵/马达所需最大流量之和,最小流量应满足前驱动轮液压泵/马达最低稳定转速时所需流量之和

$$2V_{sfmax}\omega_{sfmin} \leqslant q_{cp} \leqslant (2V_{sfmax}\omega_{sfmax} + 2V_{srmax}\omega_{srmax}).$$

式中: V_{sfmax} 为前驱动轮液压泵/马达最大排量, m^3/rad; ω_{sfmin} 为前驱动轮液压泵/马达最低稳定转速,rad/s; q_{cp} 为恒压变量泵输出流量, m^3/s; ω_{sfmax} 为前驱动轮液压泵/马达最高转速,rad/s; V_{srmax} 为后驱动轮液压泵/马达最大排量, m^3; ω_{srmax} 为后驱动轮液压泵/马达最高转速,rad/s.

3.1.3 液压泵/马达

液压泵/马达是静液传动混合动力轮边驱动车辆的主要驱动和制动元件. 由液压泵/马达经过减速器直接驱动车轮并通过地面反作用提供车辆的驱动力必须满足车辆所需最大驱动力

$$F_{tmax} = \sum \frac{T_{simax} i_{wi}}{r_i} = \sum \frac{p_s V_{simax} i_{wi}}{r_i}.$$

式中: F_{tmax} 为车辆所需最大驱动力,N; T_{simax} 为某车轮液压泵/马达最大转矩,Nm; i_{wi} 为某车轮减速器传动比; r_i 为某车轮滚动半径,m; p_s 为系统工作压力,Pa.

3.1.4 液压蓄能器

液压蓄能器是静液传动混合动力车辆中除发动机外的另一动力源,其作用为存储和释放再生制动能量及吸收液压系统的压力脉动. 液压蓄能器的容积上限应该按照能够回收车辆最大动能计算,即

$$E_{amax} = -\int_{V_1}^{V_2} p\,\mathrm{d}V = \frac{p_1 V_1}{n-1}\left[\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-n}{n}} - 1\right] =$$

$$E_{kmax} = 0.5M(u_{max}/3.6)^2.$$

式中: E_{amax} 为液压蓄能器回收的最大能量,J; E_{kmax} 为车辆的最大动能,J.

相应的,液压蓄能器的容积应至少能够回收车辆在平均巡航速度下的动能,即

$$E_{amin} = -\int_{V_1}^{V_2} p\,\mathrm{d}V = \frac{p_1 V_1}{n-1}\left[\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-n}{n}} - 1\right] =$$

$$0.5M(u_{avg}/3.6)^2.$$

式中: E_{amin} 为液压蓄能器回收的最小能量,J; u_{avg} 为平均巡航车速,km/h.

液压蓄能器最高允许压力应低于系统峰值压力以保证系统安全性,充气压力应略低于系统工作压力,以便对压力在一定频率下的突变起到平滑缓冲的作用.

3.1.5 基因限值

根据上述参数分析和计算可得到如表 2 所示的设计变量基因限值.

表 2 设计变量的基因限值

变量	P_e/kW	V_s/(mL·r^{-1})	p_s/MPa	q_{cp}/(mL·r^{-1})	V_1/L	P/MPa
基因限值	123 ~ 206	71 ~ 750	18 ~ 30	250 ~ 1 000	40 ~ 150	18 ~ 25

3.2 其他优化参数设定

遗传初始种群规模 $N = 100$,最大终止代数为 100,采用浮点编码方式,交叉率设为 0.7,变异率根据式(1)计算. 权重系数根据优化重点进行调整,如表 3 所示.

$$P_m = \begin{cases} 0.3\dfrac{f_{max} - f}{f_{max} - f_{avg}} - \dfrac{\gamma N}{T(t)}, & f \geqslant f_{avg}; \\ 0.3 - \gamma N/T(t), & f < f_{avg}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_m 为变异概率; f_{max} 为个体最大适应度; f_{avg} 为个体平均适应度; γ 为比例系数, $0 < \gamma < 1$.

表 3　权重系数的设定

优化方案类型	α_1	α_2	α_3
折衷型	1/3	1/3	1/3
动力型	1/4	1/2	1/4
节能型	1/4	1/4	1/2

3.3　优化结果

在静液传动混合动力轮边驱动车辆系统模型基础上，利用 Matlab 语言编写代码进行优化. 优化过程中各子代最优值及平均值（以折衷型为例）如图 3 所示. 多次优化结果表明，在设定的进化代数目之内，目标函数均能够收敛于设定误差范围内，因此可以认为找到了最优解.

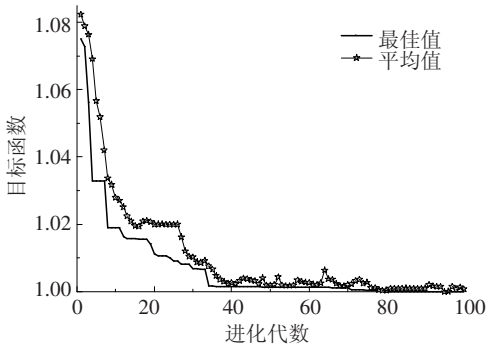


图 3　目标函数的优化过程

不同权重系数下的优化结果列于表 4 中（对数据进行了取整处理）. 可以看出，动力型采用稍大的液压蓄能器和最大的前后轮驱动液压泵/马达，在发动机功率上与原始车型基本相当；节油型前轮液压泵/马达较大，而后轮液压泵/马达较小，液压蓄能器容积最大，发动机功率则最小.

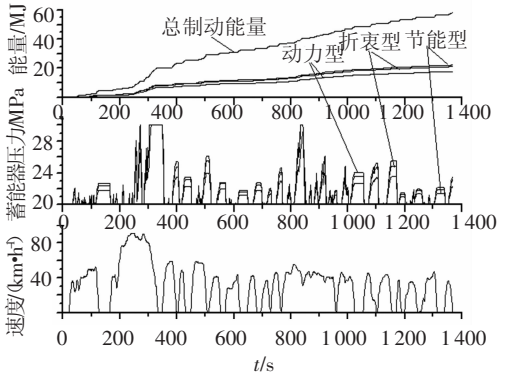
表 4　不同权重的优化结果

优化方案类型	P/ kW	q/ (mL · r^{-1})	V_f/ (mL · r^{-1})	V_r/ (mL · r^{-1})	V/ L
折衷型	180	778	107	118	109
动力型	200	926	173	156	80
节油型	150	556	163	96	140

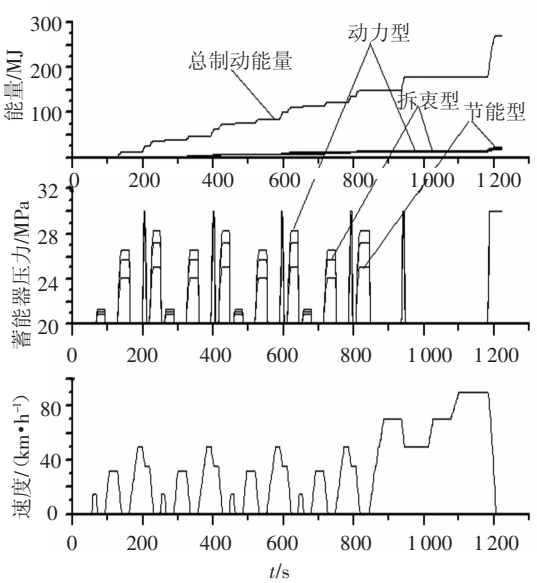
注：P 为发动机额定功率；q 为恒压变量泵排量；V_f 为前轮液压泵/马达排量；V_r 为后轮液压泵 / 马达排量；V 为液压蓄能器容积.

4　仿　真

对优化结果在不同道路循环工况下进行仿真得到混合动力轮边驱动车辆再生制动能量、蓄能器 SOC 状态等参数情况如图 4 所示. 由仿真结果可以发现，在典型的城市工况（UDDS）下，混合动力车辆再生制动所能回收的能量占制动总能量比例远大于包含高速工况（ECE + EUDC）时的比例；在各种工况下，节能型权重优化的混合动力车辆的能量回收比例均为最大，而动力型权重方式优化的混合动力车辆的能量回收比例最小. 上述结果符合混合动力车辆的节能机理，因此认为优化结果是合理的.



(a) UDDS 工况下仿真结果



(b) ECE + EUDC 工况下仿真结果

图 4　不同工况下混合动力轮边驱动车辆性能仿真

在 UDDS 工况下，根据不同优化权重配置的静液传动混合动力轮边驱动车辆的能量回收率、节油率、最大爬坡能力、加速时间，与作为参考的传统车辆相关性能进行比较，以数值最大者作为参考值取百分数，结果如图 5 所示. 可以看出经过优化的混合动力轮边驱动车辆相对传统车辆，节能效果和动力特性具有较大提高，表明了优化的有效性.

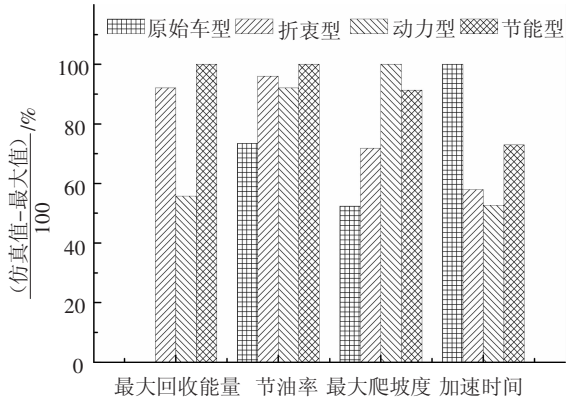


图 5　不同优化权重的车辆性能对比

5 模拟试验

在混合动力车辆理论研究阶段,采用模拟试验台进行半实物仿真,具有成本低、参数易于调节、安全性高、适用性广等优点. 为验证优化后混合动力车辆的能量回收率,设计了模拟试验. 模拟试验台系统原理如图6所示. 按照能量对应关系,令飞轮组转动动能与车辆动能相对应,并在飞轮转动轴上施加摩擦力以模拟由于质量增加带来的车辆负载增大的效果. 试验模拟启动—制动—启动工况的能量再生情况,在制动结束时关闭液压动力源,只使用液压蓄能器中压力能进行驱动. 试验曲线如图7所示. 从图7中可以看出,飞轮组加速和制动强度与设计性能一致;计算再生制动能驱动所能达到的转速,可以得到3种优化权重情况下混合动力车辆的能量再生效率分别为:动力型22.8%,折衷型36.8%,节能型40%,与仿真结果相符.

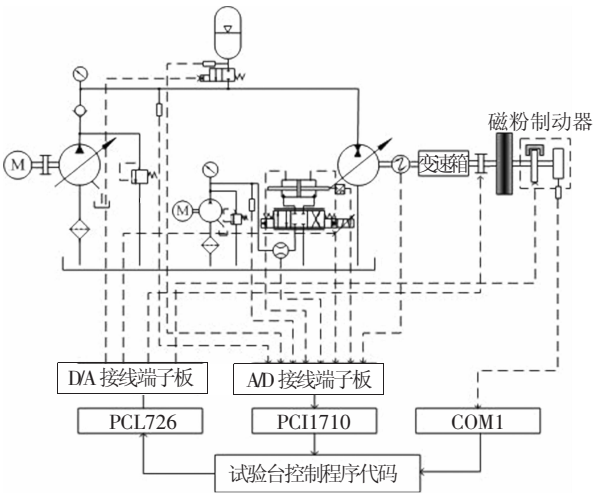


图6 静液传动混合动力系统模拟试验台

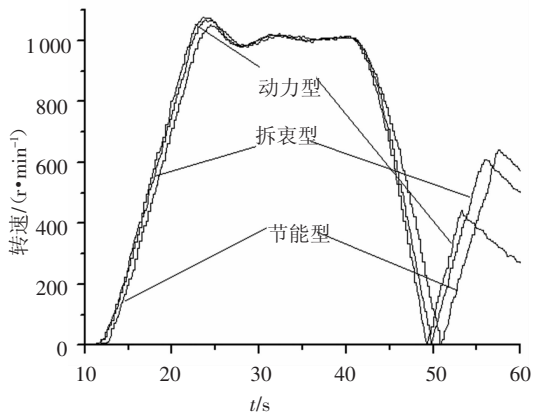


图7 启动—制动—启动工况模拟试验曲线

6 结 论

1)建立了液压泵/马达排量-转速范围规则知识库,设计了基于该规则知识库的自适应模拟退火遗传算法.

2)对匹配后的混合动力车辆性能进行计算机仿真及模拟试验验证结果表明,所设计的基于规则知识库的自适应模拟退火算法是合理和有效的,优化后的混合动力车辆节能和动力特性优于传统车辆.

参考文献:

[1] FILIPI Z, LOUCA L, DARAN B. Combined optimisation of design and power management of the hydraulic hybrid propulsion system for the 6×6 medium truck[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2004, 11(3): 372-402.

[2] SUN Hui. Multi-objective Optimization for hydraulic hybrid vehicle based on adaptive simulated annealing genetic algorithm[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23(1): 23-27.

[3] SUN H, JIANG J H, WANG X. Parameters matching and control method for hydraulic hybrid vehicle with secondary regulation technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition, 2009, 22(1): 57-63.

[4] 刘宇辉, 姜继海. 二次调节流量耦联系统功率匹配研究[J]. 南京理工大学学报,2007, 31(6): 701-705.

[5] YANG Meng, ALMAINI A E A, WANG Pengjun. FPGA placement optimization by two-step unified genetic algorithm and simulated annealing algorithm[J]. Journal of Electronics: China, 2006, 23(4): 632-636.

[6] 乐秀璠,覃振成,尹峰. 基于自适应模拟退火算法的多目标最优潮流[J]. 继电器, 2005 33(7): 10-15.

[7] LUANG Shangmin, DAI Guozhong. An algebraic approach to revising propositional rule-based knowledge bases[J]. Science in China Series F: Information Secinces,2008, 51(3): 240-257.

[8] 陈朝东,黄国兴,鲍钰. 基于加权产生式规则知识库的不一致性和冗余性研究[J]. 计算机科学, 2000, 27(8): 62-69.

[9] 王庆年,金启前,初亮. 传动系参数和控制参数对并联混合动力轿车性能的影响[J]. 吉林大学学报:工学版,2005,35(3): 243-248.

[10] 孙辉. 二次调节静液传动车辆的能量回收与再利用优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 56-60.

(编辑 杨 波)