

文章编号:1000-582X(2003)11-0006-05

轻度混合动力汽车动力元件的选型与参数匹配

杨伟斌,秦大同,杨亚联,杨阳,舒红

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:在介绍了基于起动机/发电机一体化轻度混合动力汽车的结构及主要功能的基础上,结合其典型结构及动力辅助方式,对其动力系统内的发动机、ISA(Integrated Starter/Alternator)、电池和变速器进行了选型。并通过实例,利用 ADVISOR 软件和正交实验分析方法,在满足车辆动力性要求的前提下,以燃油经济性为主要目标,确定了动力系统各部件的具体参数,并进行了仿真比较分析。

关键词:轻度混合动力汽车;选型;匹配;仿真
中图分类号:U463.23

文献标识码:A

随着能源和环境对人类生活和社会发展影响越来越大,要求尽快改善人类生存环境的呼声日益高涨。为此,各种电动汽车脱颖而出,但由于蓄电池的能量密度与汽油相差很大,远未达到所要求的数值,而燃料电池技术亦尚未取得重大突破。在这种情况下,融合内燃机汽车和电动汽车优点的混合动力电动汽车(HEV)异军突起,在世界范围内成为新型汽车开发的热点。在电动汽车的储能部件——电池没有根本性突破以前,混合动力电动汽车是解决汽车排污和能源问题最具现实意义的途径之一^[1]。

依据基于任务分类的现代分类方法,混合动力汽车可以分为轻度混合型(Mild Hybrid Vehicle - MHV)、功率混合型(Power Hybrid Vehicle - PHV)和能量混合型(Energy Hybrid Vehicle - EHV)三类。在三类混合动力车型之中,尽管轻度混合动力汽车在降低油耗和改善排放方面的能力有限,但由于其对现有内燃机汽车的改造成本最低,而成为当前研究和开发的热点。

1 ISA 混合动力汽车的结构及主要功能

基于起动机/发电机一体化的混合动力汽车属于轻度混合型动力汽车,其结构如图1所示。它是将盘式一体化起动机/发电机(ISA)直接安装在内燃机曲轴输出端(ISA转子与曲轴固结),取代了飞轮以及原有的起动机和发电机,作为汽车的辅助动力源。

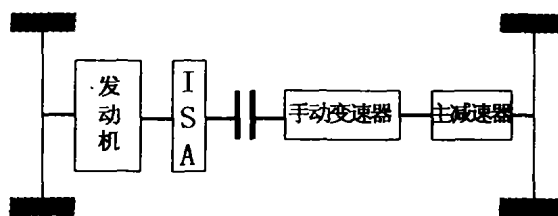


图1 基于ISA的轻度混合动力系统结构示意图

该系统可以实现发动机自动起停、电动助力、高效大功率电能输出和再生制动能量回收等功能,既可改善整车的燃油效率和排放性能,又可提高整车的动力性,ISA还可以作为有源飞轮实现内燃机曲轴的主动减震。

2 参数匹配的原则和步骤

混合动力系统参数选择与匹配是否合理直接影响整车性能的发挥,参数匹配的原则是针对给定的车型、目标工况和基本控制策略,在保证车辆动力性要求的前提下,以燃油经济性为主要目标进行设计。

参数初步匹配的方法根据所采用的混合结构和整车能量管理策略的变化而有所变化,笔者主要针对图1结构和以下基本控制策略进行讨论。

ISA作为电动机工况在短时间内(通常为0.1~0.2s)将内燃机加速至怠速转速,然后内燃机开始点火。

• 收稿日期:2003-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50305037);国家863计划资助项目(2001AA501300);重庆市科委攻关项目(7532)

作者简介:杨伟斌(1978-),男,陕西大荔人,重庆大学硕士研究生,主要从事混合动力电动汽车的研究。

当汽车较长时间处于停车状态,例如遇红灯时,内燃机一直处于怠速,控制系统会自动切断内燃机供油,令内燃机停止运行,同时ISA也停止工作,需起步时,ISA在短时间内完成起步任务。

当汽车加速或爬坡时,ISA工作在电动机工况,提供一部分辅助功率。

当汽车减速或制动时,ISA处于再生制动工况,将动能转换成电能,为车载电池充电。

参数匹配的基本步骤是:ISA的功率、转矩及转速范围——发动机的功率——电池的功率及容量——传动系的速比。其中有些参数需前后协调考虑或在后面通过仿真加以校验。

3 参数匹配的初始条件和要求

给定的车辆初始条件如表1所示。

表1 给定的初始参数

整备质量 m_0/kg	满载质量 m_a/kg	迎风面积 A/m^2
1 400	1 925	2.28
风阻系数 C_D	车轮滚动半径 r_r/m	滚动阻力系数 f_r
0.32	0.31	0.012

参数匹配的要求主要包括动力性要求和目标循环工况下的经济性和排放要求,针对的车型为多用途车(MPV),因此城市和公路两种循环工况在匹配中都应当考虑。

动力性要求和选择的循环工况如表2和表3所示。

表2 基本动力性要求

混合模式最高速	最大爬坡度	0~100 km/h
$v_{\max}/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	$a_{\max}/\%$	加速时间 t_0/s
175	30	17.5

表3 循环工况选择

工况	最高车速 $v_m/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	平均车速 $v_a/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
FTP 城市工况	91.25	31.51
HWEFT 公路工况	96.40	77.58

4 动力元件的选型与参数匹配

4.1 ISA 选型及参数匹配

4.1.1 ISA 的选型

由于ISA直接安装在内燃机曲轴动力输出端,取代了飞轮,这就决定了ISA的外形尺寸与普通电机不同。ISA的径向尺寸较大,轴向尺寸较小,以增加转动惯量并使得系统轴向布置更加紧凑。此外,由于ISA的转子与曲轴固结,转子不宜采用励磁绕组(径向尺寸较大,励磁绕组在较大离心力的作用下容易松脱),因此电机转子必须为永磁体。实践证明盘式直流永磁

无刷电机能满足上述要求,故选定该类型电机。

4.1.2 ISA 参数匹配

在整车动力性要求已经确定的前提下,整车所需的功率是一定的。其中,电动机功率所占比值越大,经济性就越好,但所需电池组数目也就越多。这样不但增加了整车的质量,而且增加了整车的制造成本。所以电动机功率的取值应在满足整个系统节能目标的前提下,从经济性和制造成本两方面均衡考虑。

在轻度混合动力汽车中,ISA的作用是在启动、加速和爬坡时,带动或辅助发动机工作,要求具有低速大转矩特性;在汽车轻载和减速时ISA又起到发电机的作用,对电池充电,使动能有效转化为电能。整个行驶过程中并不存在纯电动工况,所以无需大功率电动机。在已经开发成功的混合动力汽车中:本田Insight混合动力汽车ISA的额定功率为10 kW;戴姆勒克莱斯勒Dodge ESX3h混合动力汽车ISA的连续功率为3 kW,峰值功率为15 kW;Argonne国家实验室轻度混合动力汽车模型ISA的峰值功率为15 kW(内燃机最大功率为69 kW)。以此为参照,初步选定ISA的额定功率为10 kW,峰值功率为15 kW,其最大辅助和制动扭矩均为46.5 Nm,最高转速为6 500 r/min,额定转速2 500 r/min,其最大扭矩在发动机确定后还需验证。

ISA转矩特性图和效率特性图如图2和图3所示。

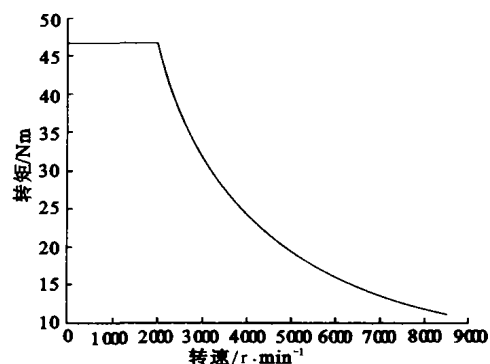


图2 ISA 转矩特性

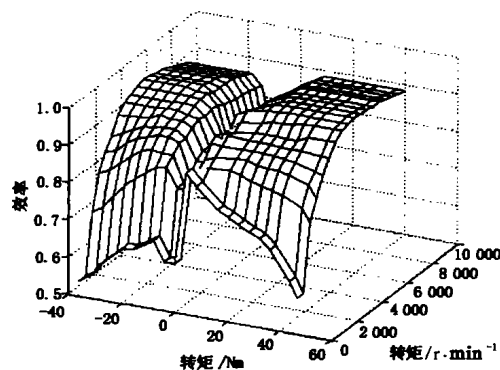


图3 ISA 效率图

4.2 发动机选型及参数匹配

4.2.1 发动机的选型

在适用于轻度混合动力汽车发动机的类型中,特种发动机是最具吸引力的发动机类型,但特种发动机的排放控制技术没有四冲程汽油机成熟,并且还存在着可靠性问题以及在开关模式下的寿命问题。对于近期的混合动力汽车而言,采用技术成熟的四冲程发动机并做适当的改进不失为一种实际而可行的方案。

4.2.2 发动机参数匹配

在轻度混合动力汽车中,发动机是主要的动力源,功率的选择主要从动力性和经济性两方面考虑。

发动机的动力性最主要是要满足最高车速时瞬时功率的要求,即

$$P_{emax} \geq P_{vmax} - P_{mmax} \quad (1)$$

$$P_{vmax} = (m_a g f v_{max} / 3600 + C_D A v_{max}^3 / 76140) / \eta_T \quad (2)$$

式中 P_{emax} 为发动机的最大功率; P_{mmax} 为电机的最大功率; v_{max} 为汽车的最高车速; η_T 为传动系效率。

轻度混合动力汽车在达到巡航速度时,发动机成为唯一的动力源,此时发动机单独驱动车辆并可担负一定的充电功率。巡航车速 v_c 和平均匀速阻力功率 P_c 对应关系如下:

$$P_c = (m_a g f v_c / 3600 + C_D A v_c^3 / 76140) / \eta_T \quad (3)$$

计算巡航功率时,还应考虑附件功率 P_{acc} (特别是有空调时), 1% ~ 2% 的爬坡功率裕量 P_i 和 10% 的充电功率裕量 P_{chr} 。

$$P_c^* = P_c + P_{acc} + P_i + P_{chr} \quad (4)$$

即 P_c^* 实际是一个功率带^[2]。

综合考虑城市、公路两种工况,经济巡航车速 v_c 定为 80 ~ 95 km/h,巡航功率带为 11.58 ~ 38 kW。

经济性就是要保证巡航功率带尽可能穿过万有特性的最佳工作燃油经济性区域。

根据以上结论,选定某汽油机,最大功率为 66 kW。通过台架试验,证明其起动所需扭矩与电机起动扭矩是匹配的。图 4 为所选发动机的特性曲线。

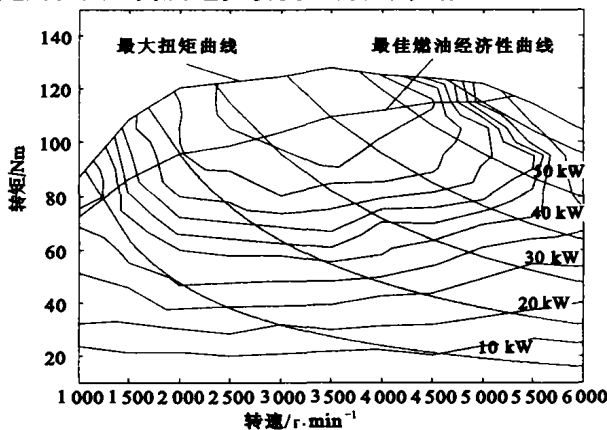


图 4 发动机万有特性图

4.3 电池选型及参数匹配

4.3.1 电池类型的确定

混合动力汽车所用电池的最大特点为非完全充电和非完全放电,电池经常处于放电和充电状态,经常有能量的消耗和补充,这会对电池的寿命造成一定的影响,但实验证明,上述因素对镍氢电池寿命影响并不大。镍氢电池具有很好的耐过充电特性和良好的使用安全性。其充电效率几乎达到 100%,有利于混合动力汽车的再生制动。而且随着技术的发展,镍氢电池的成本也得到了进一步降低,适用于混合动力汽车。故选用镍氢电池,电池组(由 6 个单体电池组成)充放电内阻特性和额定电压特性如图 5 和图 6 所示。

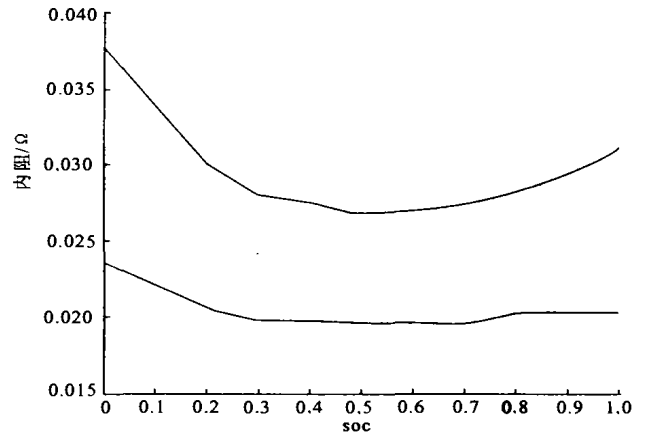


图 5 电池充放电内阻

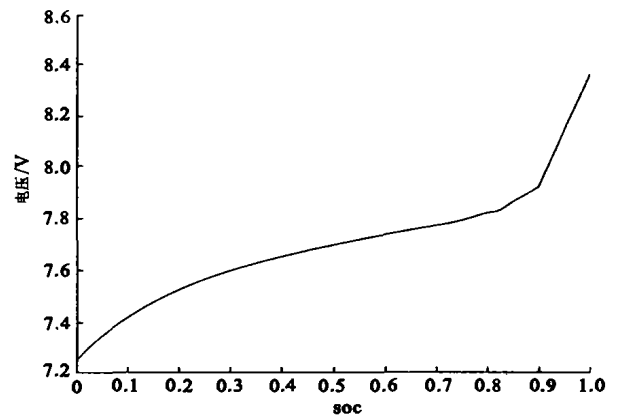


图 6 电池额定电压特性

4.3.2 电池参数匹配

为了获得较高的效率, SOC (电池荷电状态) 范围一般取在内阻值较小的范围内。由图 5 可以看出 SOC 在 0.2 ~ 0.8 比较合适,在此范围内额定电压的平均值为 7.677 V,内阻的平均值为 0.0278 Ω。

1) 电池个数的确定

电池个数主要从满足 ISA 额定功率方面考虑。由于额定电压为 E ,电阻为 R 的电池,其理论最大放电功

率为 $E^2/(4 \times R)$ 。

即应保证: $E^2/(4 \times R) \geq P_e$ 。

即 $(7.677 \times n)^2/(4 \times 0.0278 \times n \times 1000) \geq P_e$ 。(5)

式中 n 为电池个数; P_e 为电池的额定功率; 得到 $n \geq 20$ 取 $n = 20$ 。

2) 电池容量的确定

电池容量主要考虑在电池 SOC 规定范围内(0.2 ~ 0.8), 急加速和爬坡过程中其输出能量满足 ISA 能量的需求。

即 $Q \times (0.8 - 0.2) \times E \geq P_e t$ (6)

式中 t 为加速和爬坡时间的最大值; Q 为电池容量; 得到 $Q \geq 6.5 \text{ Ah}$ 取 $Q = 6.5 \text{ Ah}$

4.4 变速器选型及速比的确定

4.4.1 变速器类型的确定

就动力性而言, 档位数越多, 可增加发动机发挥最大功率的机会, 提高汽车的加速与爬坡能力。就燃油经济性而言, 档位数越多, 可增加发动机在低燃油消耗率区工作的可能性, 降低油耗^[3]。所以增加档位数会改善汽车的动力性和燃油经济性。综合考虑成本等因素, 选用 6 档手动变速器。

4.4.2 变速器速比的确定

1) 超速档速比的确定

6 档变速器的 6 档为经济档位, 最高车速档位为 5 档。所以 5 档速比 i_v 应具备下列要求。

i_v 选择首先应满足最高行驶车速 v_{\max} 要求

即 $i_v \leq 0.377 R_r N_{\text{cmax}}/v_{\max}$

式中 N_{cmax} 为发动机最高稳定转速; R_r 为车轮滚动半径。

另外, 为使发动机在最高车速时仍能发挥出最大功率, i_v 的选择还应满足

$i_v \geq 0.377 R_r N_{\text{ep}}/v_{\max}$ ^[4]

式中 N_{ep} 为发动机最大功率点对应的转速, 因此 $3.645 \leq i_v \leq 3.878$

2) 最大传动比的确定

最大传动比主要是根据最大爬坡度(I 档不助力)要求来设计, 同时必须考虑附着力的极限值。

汽车在最大爬坡度工况时车速较低, 可忽略空气阻力, 汽车的最大驱动力应为:

$$F_{\text{imax}} = F_f + F_{\text{imax}}$$

式中 F_{imax} 为最大驱动力; F_f 为滚动阻力; F_{imax} 为最大坡度阻力。

即 $T_{\text{iqmax}} i_{\text{gl}} i_0 \eta_T / r = G f \cos \alpha_{\max} + G \sin \alpha_{\max}$ (7)

式中 T_{iqmax} 为发动机的最大扭矩; i_{gl} 为变速器 I 档的传动比; i_0 为主减速器的传动比。

即要求: $i_{\text{gl}} i_0 \geq (G_f \cos \alpha_{\max} + G \sin \alpha_{\max}) r / T_{\text{iqmax}} \eta_T$ ^[5] (8)

轿车要求具有 30% 以上爬坡的能力, 即 $\alpha_{\max} = 16.7^\circ$ 。

选定最大传动比 $i_1 = i_{\text{gl}} i_0 \geq 14.3$

表 4 初选变速器的速比

档 位	I	II	III	IV	V	VI
传动比	11.425	7.181	5.397	4.407	3.656	2.986

根据整车总体布置对变速器结构尺寸的要求, 初步确定一变速器的各档速比如表 4 所示, 可见其 i_1 不合要求, 下面通过仿真进行优化和改进。

5 仿真及优化分析

利用 ADVISOR 软件对轻度混合动力汽车的性能进行仿真分析。ADVISOR 软件可根据汽车动力传动系统各总成的性能来估算给定行驶循环工况下汽车的动力性、燃油经济性和排放性能。

5.1 初步仿真分析

仿真是在对 ADVISOR 相关数据文件进行恰当修改的基础上进行的, 根据前面确定的各部件参数, 得出初步仿真结果。

表 5 初步仿真结果

最高车速/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	FTP 循环油耗/ $\text{L} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$
175.8	9.1
最大爬坡度/%	加速时间/s
22	18

初步仿真结果表明: 爬坡度、加速时间没有达到要求, 其经济性还有待进一步提高, 为了优化变速器速比, 采用正交分析方法进行分析, 考察其速比变化对各项性能的影响。

5.2 变速器速比的正交优化分析

表 6 为一 $L_{27}(3^{13})$ 标准正交表, 即试验次数(行数)为 27, 因子数(列数)为 13, 水平数为 3。其中第 1、2、5、9、12、13 分别为 I、III、VI、III、IV、V 的速比, 第 3、4 个因子考察 I、II 档的交互作用, 第 6、7 个因子考察 I、VI 档的交互作用, 第 8、11 因子考察 II、VI 档的交互作用。水平数(即表中对应的 1、2、3)为所对应每个档位的不同取值, 为了对所选变速器的速比进行改进, 各档速比的取值均在其值的上下浮动, 如: I 档速比分别为(12.5、13.5、14.5) II 档速比分别为(7.64、7.9、8.1)、III 档速比分别为(4.9、5.15、5.4)、IV 档速比分别为(3.95、4.15、4.4)、V 档的速比为(3.65、3.75、3.85)、VI(2.7、2.9、3.1)。

表6 考察各档速比变化对汽车性能影响的正交表

行数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	I档	II档	VI档				III档				IV档		V档
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

分析结果表明:爬坡度仅受 I 档速比的影响, I 档速比越大,爬坡能力越好,而且此时还可缩短加速时间并可改善燃油经济性。最高速度主要受 V 档速比的影响,在所确定的 V 档速比范围内, V 档速比越小,最高车速越大,而且此时还可以改善燃油经济性。加速时间受 III 档速比的影响较大,但其它各档速比对其也有影响。根据以上原则 I 档速比取附着着力所允许的最大值 14.9, V 档速比取所允许范围内的最小值 3.65。其余各档速比继续使用上述方法进行分析,最后在满足动力性的前提下,所确定的经济性最佳速比如表 7 所示。

表7 经过优化确定的传动比

档 位	I	II	III	IV	V	VI
传动比	14.907	8.027	5.483	4.487	3.655	2.991

5.3 匹配结果分析

5.3.1 整车动力性的仿真分析

由表 8 可见,匹配参数完全满足整车动力性要求。从动力性方面看,其匹配结果是比较合理的。

表8 动力仿真结果

混合模式最高车速 $v_m/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	最大爬坡度 $a_{\max}/\%$	0~100 km/h 加速时间 t_0/s
176.7	30.8	17.5

5.3.2 循环工况油耗分析

本实例轻度混合动力汽车和与其动力性相近的常规汽车在城市和公路循环工况下的油耗值对比分析如表 9 所示,比较的前提条件是两种车辆的 C_D 、 r_r 、 f_r 和变速器均相同。

表9 油耗对比分析

工况	常规汽车油耗	ISA HEV 油耗	节油率 /%
	$/\text{L} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$	$/\text{L} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$	
FTP	10.7	8.9	17.0
HWFET	7.6	6.7	11.8

5.3.3 电池 SOC 的平衡

要求电池 SOC 在循环工况的始末能够实现基本平衡。这也是检验 ISA 混合动力汽车参数匹配是否合适的

指标之一^[6]。在 FTP 循环中, SOC 的初始值为 0.700 0, 终值为 0.708 7; 在 HWFET 循环中 SOC 的初始值为 0.700 0, 终值为 0.706 7。基本满足要求, 由此证明匹配是合理的。

6 结 论

针对 ISA 混合动力汽车的结构特点, 对 ISA、发动机、电池及变速器进行了选型。根据动力性和经济性的要求, 确定了各元件的具体参数。并运用正交分析方法对变速器的速比进行了优化, 以使整车性能达到最优。最后利用 ADVISOR 软件对确定的 ISA 混合动力汽车的动力性和经济性进行了仿真评价, 并与动力性相近的传统车辆进行了对比, 表明 ISA 混合动力汽车的具有明显节油效果。

参考文献:

- [1] 杨妙梁. 混合动力汽车发展趋势[J]. 汽车与配件, 2002, 16(3): 17-19.
- [2] 彭涛, 陈全世. 并联混合动力电动汽车动力系统的参数匹配[J]. 汽车工程, 2003, 39(2): 69-73.
- [3] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 王庆年, 何洪文. 并联混合动力汽车传动系参数匹配[J]. 吉林工业大学学报, 2000, 30(1): 72-75.
- [5] 舒红, 秦大同, 杨为. 混合动力传动系参数设计[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1): 19-22.
- [6] EHSANI MEHRDAD, GAO YIMIN, BUTLER KAREN L. Application of electrically peaking hybrid(ELPH) propulsion system to a full-size passenger car with simulated design verification[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 1999, 48(6): 1779-1781.

(下转第 15 页)

Dynamic Characteristics of Electro-hydraulic Position System Controlled by Jet-pan Servo Valve

WANG Chuan-li^{1,2}, DING Fan², LI Qi-peng², XU Xian-liang¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Jet-pan servo valve has advantage of higher reliability, longer work life, better anti-contamination and less null shift, compared with nozzle flapper servo valve. Based on the introduction of the structure and principle of Jet-pan servo valve, the mathematic models of dynamic characteristics of electro-hydraulic position system controlled by jet-pan servo valve are established. Flow equations of deflection plate are derived and linearized. Its simulation model is also constructed by the use of Simulink Toolbox of Matlab. The model's dynamic characteristics are simulated. Simulation results obtained match basically that of the experiment.

Key words: jet-pan servo valve; position control system; mathematic model; dynamic characteristics; digital simulation

(编辑 成孝义)

~~~~~  
(上接第 10 页)

## The Component Type Choosing and Parameter Matching of ISA HEV

YANG Wei-bin, QIN Da-tong, YANG Ya-lian, YANG Yang, SHU Hong

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** This paper briefly introduces the structure and main function of a mild hybrid system based on ISA. The components of the whole powertrain system include ISA, engine and battery. Transmission is choosed according to its typical configuration and functions. In addition, the specific parameters of power and torque of ISA, engine power, the number and capacity of battery, the gear ratio of gearbox are determined according to the required performance and fuel economy. In order to achieve the design target, the Genichi Taguchi method is used to optimize the gear ratio. At the same time, the simulation of ISA mild hybrid vehicle is carried out and compared with conventional vehicle by using the ADVISOR software.

**Key words:** MHEV; parameters design; matching; simulation

(编辑 成孝义)