

并联混合动力电动汽车动力系统的参数匹配

彭涛 陈全世 田光宇 李海晨

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 针对典型的转矩复合结构并联混合动力电动汽车(PHEV), 提出了用工程分析与仿真校验相结合的方法, 对其动力系统中发动机功率、电动机参数、传动系速比和电池参数等主要参数进行匹配的原则、步骤, 并通过实例加以说明和验证。

关键词: 电动汽车 并联混合动力系统 参数匹配

中图分类号: U469.72.02

0 前言

混合动力电动汽车(HEV)的参数选择是一个多变量多目标优化问题, 只有在精确、完整的仿真模型的基础上, 经过反复的寻优计算才能达到最佳的效果。此外, HEV 的参数选择与其行驶工况和控制策略紧密相关。

在车辆设计初期, 有必要从车辆设计要求出发, 通过理论和工程分析, 辅以适当精度的仿真校验来匹配动力系统的主要参数(优化问题初值), 为建立更加精确的仿真模型和进行优化提供基础。

1 参数匹配的初始条件和要求

目前的 HEV 研究, 通常是从某一种成熟的常规车型出发, 对其动力系统进行改造和重新设计。参数匹配的初始条件包括了从原车型和设计目标获得的车辆和行驶参数, 尤其是预先估计的整车质量。本文实例使用的车辆和行驶参数见表 1。

表 1 车辆和行驶参数

整备质量 m_0 /kg	满载质量 m_q /kg	迎风面积 A /m ²	风阻系数 C_D
1 660	2 060	2.66	0.44
轴距 L /m	重心高度 h_g /m	车轮滚动半径 r_r /m	滚动阻力系数 f_r
2.75	0.7	0.343	0.012

HEV 参数匹配的要求主要包括基本的动力性要求和目标循环工况下的经济性和排放要求。本文针对的车型为轿车或多用途车辆(MPV), 因此城市和公路这两种循环工况在匹配中都应当考虑。

本文实例的动力性要求和选择的循环工况见表 2 和表 3。

表 2 基本动力性要求

混合模式最高车速 $v_{max}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	混合模式最大爬坡度 $a_{max}/\%$	0~80 km/h 加速时间 t_0/s
160	30	12

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 $v_{av}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	平均功率需求 P_{av}/kW
FTP72 城市工况	91.25	31.51	5.53
HWFET 公路工况	96.40	77.58	14.0

2 参数匹配的原则和步骤

PHEV 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情况下, 以燃油经济性为主要目标进行设计, 暂时不考虑排放。

PHEV 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, 本文主要针对有纯电动行驶模式的高“混合率”PHEV 结构(图 1)和基本的“电动机辅助能量管理策略”^[1](图 2)进行讨论。

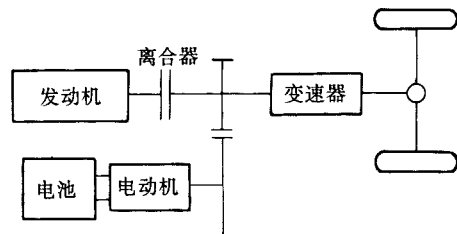


图 1 高“混合率”PHEV 结构

对于其他的 PHEV 结构和控制策略, 这里的方法也有借鉴作用。

PHEV 参数匹配的基本步骤是: 发动机功率→

电动机功率及转矩、转速范围→传动系速比→电池功率及容量。但其中有些参数需要前后协调考虑或在后面通过仿真加以校验。

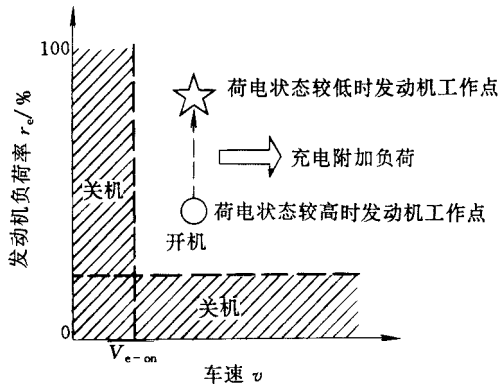


图2 电动机辅助能量管理策略示意图

3 参数匹配的方法

3.1 发动机功率的选择

选择发动机功率的原则是确保在 PHEV 的经济巡航车速 v_c 下, 发动机工作在万有特性图上经济性最佳的区域; 此时发动机单独驱动车辆并可以担负一定的充电功率。 v_c 和平路匀速阻力功率 P_c 的对应关系如下

$$P_c = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{m_a g f_r}{3600} v_c + \frac{C_D A}{76140} v_c^3 \right) \quad (1)$$

式中 η_T ——传动系效率
 m_a ——整车质量
 f_r ——滚动阻力系数
 C_D ——风阻系数
 A ——迎风面积

在计算 PHEV 的巡航功率 P_c^* 时, 还应当加上附件功率 P_{acc} (特别是有空调时)、1%~2% 的爬坡功率裕量 P_i 和 10% (经验值) 的充电功率裕量 P_{chr} , 即

$$P_c^* = P_c + P_{acc} + P_i + P_{chr} \quad (2)$$

综合考虑城市、公路两种工况, v_c 应大于等于公路工况的平均车速。加上空调、坡度和充电裕量, 巡航功率 P_c^* 实际是一个功率带。应保证这一功率带穿越发动机万有特性图上经济性较好的区域。

本文实例中经济巡航车速 v_c 定为 80 km/h, 巡航功率带 P_c^* 为 15~33 kW。选择某汽油机, 最大功率 P_{emax} 为 55 kW, 其万有特性及巡航功率带如图 3, 可见, 在发动机 2 000~3 500 r/min 的转速范围内, 巡航功率带对应的发动机经济性是比较好的。

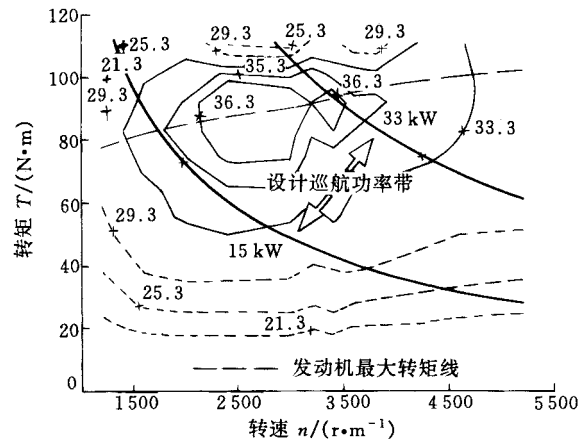


图3 PHEV 发动机功率的选择

3.2 电动机参数的选择

3.2.1 电动机功率的选择

电动机的最大功率主要从混合最高车速出发进行选择。发动机最大功率 P_{emax} 加上电动机最大功率 P_{mmax} 应满足混合最高车速的功率要求 P_{vmax} , 即

$$P_{mmax} \geq P_{vmax} - P_{emax} \quad (3)$$

实例中混合最高车速 160 km/h, P_{vmax} 为 82 kW。 P_{emax} 为 55 kW, 选择电动机额定功率 P_{mr} 为 25 kW, 最大功率 P_{mmax} 为 30 kW。

同时, 要验算电动机最大功率是否满足循环工况时的峰值功率要求和加速时的功率要求; 电动机额定功率是否满足纯电动驱动时的功率要求; 电动机作为发电机时是否满足整车能量管理策略中充电功率的需求。

3.2.2 电动机转矩和转速的讨论

电动机最大转矩的选择主要从纯电动动力性要求, 特别是纯电动最大爬坡度出发, 和传动系最大传动比协调考虑。电动机最大转速的选择可以从扩大恒功率区以改善车辆加速性能^[2]的要求出发, 和电动机减速比协调考虑。实例中电动机额定转矩 120 N·m (允许 1.2 倍过载), 最大转速 6 000 r/min。

3.3 传动系速比的设计

3.3.1 电动机轴到发动机轴速比的设计

电动机轴到发动机轴的速比应当由电动机的最高控制转速和发动机的最高控制转速之比决定。最高控制转速即换档策略限定的发动机和电动机的最高转速。实例中, 发动机最高控制转速 5 200 r/min, 电动机的最高控制转速 5 500 r/min, 电动机轴到发动机轴的速比为 1.06。

3.3.2 传动系最小传动比的选择

PHEV 的最小总传动比应从满足车辆最高车速出发进行选择, 不过这里的最高车速应为混合驱动时的最高车速。

如图 4，传动比取 i_2 时，阻力功率曲线和混合外特性曲线交于混合最大功率点，通常对应发动机最大功率点，最高车速最大。传动比取 i_1 和 i_3 时，最高车速都略有下降。

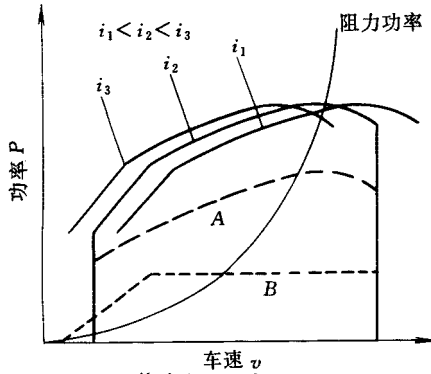


图 4 PHEV 传动系最小速比的选择

A——传动比 i_1 时发动机外功率线
B——传动比 i_2 时发动机外功率线

PHEV 中，由于充电功率需求是经常存在的，有较高后备功率的发动机可以依赖充电功率提高其负荷率，从而避免经济性的下降。因此，PHEV 的传动系最小速比可以选择 i_3 ，略大于 i_2 。

实例中考虑到高速轮胎滑动率的影响^[3]，设计最高车速 160 km/h 对应发动机转速 5 100 r/min，传动系最小传动比 $i_{min}=4.1$ 。

3.3.3 传动系最大传动比的选择

由于 PHEV 在启动和低速时一般由电动机单独驱动，而当电池荷电状态(SOC)过低时又只允许发动机单独驱动，所以最大传动比应根据电动机和发动机单独驱动时的最大爬坡度要求来设计，即

$$i_{max} \geq \frac{mg(f_r \cos \alpha_{max} + \sin \alpha_{max})r_r}{T_{max} \eta_T} \quad (4)$$

式中 i_{max} ——最大传动比
 α_{max} ——最大爬坡度
 r_r ——车轮滚动半径
 T_{max} ——动力源最大转矩
 η_T ——传动系效率

PHEV 发动机单独驱动时的最大爬坡度 α_{emax} 经常低于电动机单独驱动的最大爬坡度 α_{mmax} 。实例中， $i_{max}=14.6$ 时， $\alpha_{emax}=15\%$ ， $\alpha_{mmax}=28\%$ 。

3.3.4 变速器、主减速器传动比和 PHEV 换挡策略的初步讨论

PHEV 的换挡策略不仅是车速(或发动机转速)和转矩负荷的函数，也是电池 SOC 的函数。车速和阻力转矩一定时，若 SOC 较低，应减挡以保证有足够的充电功率；若 SOC 较高，则应加挡以提高发动机负荷率，由电动机提供足够的后备功率。实例 PHEV 采用 4 挡变速器，传动系速比范围 14.6/4.1，

V 采用 4 挡变速器，传动系速比范围 14.6/4.1，主减速比 4.1。

3.4 电池参数的选择

3.4.1 电池组功率的要求

PHEV 对电池组功率的要求是首要的。电池在 HEV 中用于功率调峰，应当经常工作在内阻较低的 SOC 范围内^[4]。而在 SOC 工作区内，不同的 SOC 对应不同的峰值功率，如图 5。在 SOC 工作区内电池组的峰值放电功率应大于电动机的最大功率；在 SOC 值较低而发动机必须开机的工作区内，电池组的峰值充电功率应满足整车能量管理策略的充电功率要求。

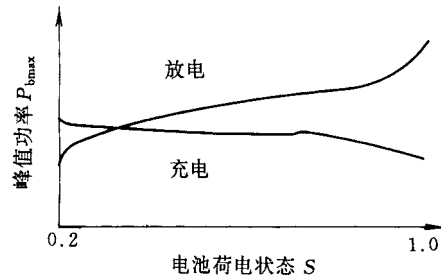


图 5 某 NiMH 电池峰值功率随 SOC 变化示意图

实例中，选用电池模块的电压 12 V，模块数为 14，SOC 工作区为 0.2~0.8(NiMH 电池 SOC 工作区较大)。峰值放电电流 200 A 时，电池组在工作区内峰值放电功率大于 30 kW；峰值充电电流 140 A(制动能量回收时)，SOC 值在小于 0.58(高于该值发动机可关机)的区域内，峰值充电功率大于 30 kW。

这样，在电池的 SOC 充放电工作区内，由整车能量管理策略决定的电动机的充放电功率要求就不会受电池功率的限制。

3.4.2 电池组总能量的要求

HEV 对电池组总能量(电压一定，其正比于电池容量)的要求主要来自持续加速和爬坡的工况^[5]，同时电池组总能量直接决定了纯电动续航里程。电池容量过小一方面会限制最大充放电电流，另一方面也会造成发动机开关频繁。电池 SOC 的变化难以直接分析，可先参照以往的设计对电池容量是否合适进行大致的判断。然后通过初步的仿真，校验电池的容量和能量。实例电池标准容量 45 A·h，电池组总能量 7.2 kW·h、重 118 kg。

4 匹配结果的分析

4.1 整车动力性的仿真结果

由表 4 可见，匹配的参数可以很好的满足整车动力性的要求。0~80 km/h 加速时间是在参数初步

选择后通过仿真获得的,若不满足要求,应当修改电动机或变速器参数。另外,实例 PHEV 的混合模式动力特性图(图 6)也是比较合理的。

表 4 实例 PHEV 动力性仿真结果

混合模式最高车速 $v_{max}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	混合模式最大爬坡度 $a_{max}/\%$	0~80 km/h 加速时间 t_0/s
159.1	>30	10.5

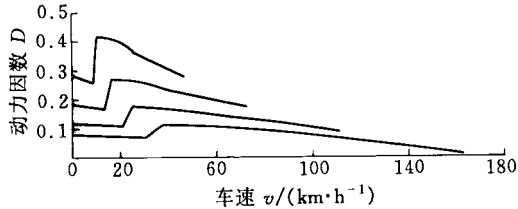


图 6 实例 PHEV 的混合模式动力特性图

4.2 发动机工作点的比较

PHEV 改善汽车经济性的核心就是改善发动机的工作点。这里比较了当动力性能相近时 PHEV 和常规汽车的发动机在 FTP-72 循环工况下的工作点,如图 7 和图 8 所示。可以明显看到,通过 PHEV 的能量管理,发动机工作点得到很大的改善。图 9

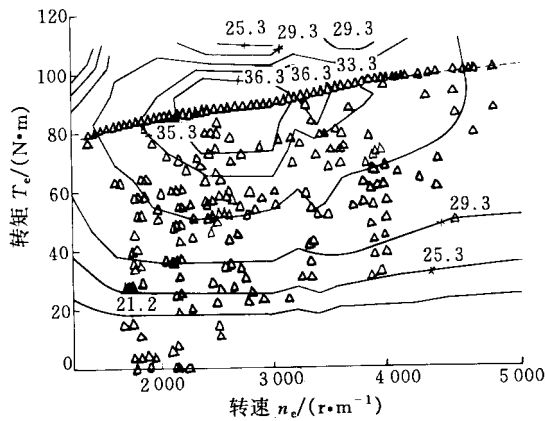


图 7 实例 PHEV 发动机的工作点

△——发动机工作点, 曲线——发动机最大转矩线

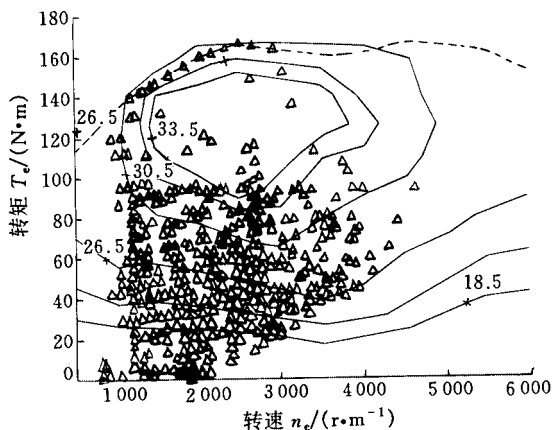


图 8 常规汽车发动机的工作点

和图 10 为对应的发动机相对效率(发动机实际效率/发动机最大效率)占其开机时间的比例图。可见 PHEV 发动机大部分时间处于高效区;而常规汽车的发动机除整体效率偏低外,在城市工况中有较大比例的时间处于低速或怠速状态,对应的发动机经济性较差。

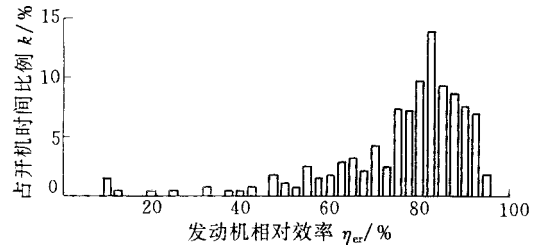


图 9 实例 PHEV 发动机的相对效率与时间比例的关系

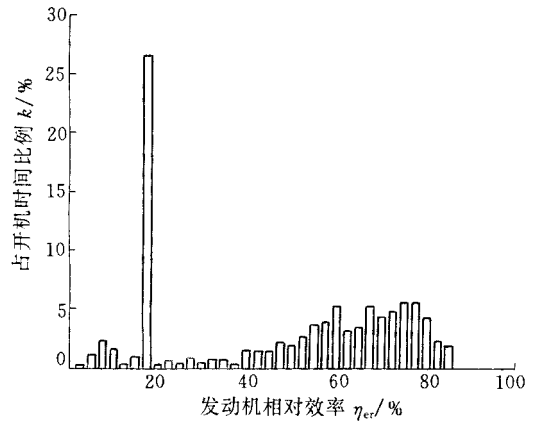


图 10 常规汽车发动机的相对效率与时间比例的关系

4.3 循环工况油耗的分析

车辆经济性的改善是 PHEV 参数匹配的是否合理的直接反映。对比实例 PHEV 和与其具有相近动力性的常规汽车在城市和公路循环工况下的油耗仿真值,如表 5。

表 5 实例 PHEV 和用于对比的常规汽车的油耗仿真值

工况	常规汽车	油耗仿真值 $Q_s/$ [L · (100 km) ⁻¹]	节油率 $\phi/\%$
FTP 72 城市	15.4	13.3	13.6
HWFET 公路	10.3	9.6	6.8

可见,在城市工况下,PHEV 的节油效果是比较明显的,这反映了常规车辆在城市工况下的工作条件比较恶劣。而在公路工况下,常规车辆的负荷率比较高,本身的经济性较好,PHEV 的经济性优势并不十分显著。

4.4 电池容量的校验(不开空调)

混合全力加速至最高车速: 电池 SOC 由目标值 S_{goal} 为 0.65 降至 0.49 而大于 0.2(SOC 工作区下限),可以保证混合最高车速的实现及在混合最高车速有

一定的行驶距离。

在纯电动车速范围内持续爬坡: 车速 20 km/h, 爬坡度 2.5%, SOC 值由 0.65 下降到发动机强制开机充电标志 $S_{e_on}=0.48$ 时, 持续里程 4.0 km, 说明有一定的低速持续爬坡能力。

纯电动续驶里程: 50 km/h 纯电动最大续驶里程 42.4 km。说明有一定的强制纯电动续驶能力。

4.5 电池 SOC 的平衡

PHEV 的使用和经济性的评价都要求电池的 SOC 在循环工况的始末能够实现基本平衡。这也是检验 PHEV 的参数匹配是否合适的重要内容。实例 PHEV 在公路和城市两种工况下的 SOC 平衡状态如图 11 和图 12。

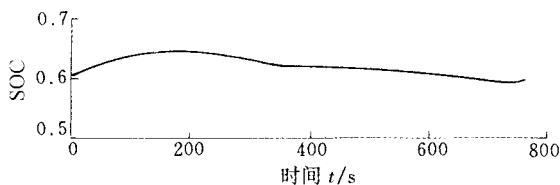


图 11 实例 PHEV 在 HWFET 公路工况下的 SOC 平衡结果

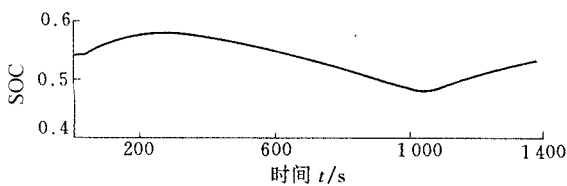


图 12 实例 PHEV 在 FTP-72 城市工况下的 SOC 平衡结果

在公路工况下, 车辆主要依靠发动机驱动, 由图 11 可见, SOC 的平衡点较高且波动较小(充电目标 SOC 值 S 为 0.65), 说明发动机有足够的功率满足巡航要求, 同时以小功率发电弥补加速时的 SOC 下降和附件等的电力消耗。而在城市工况下, 发动机主要在关机和在大负荷充电这两种状态下切换, 由图 12 可见, SOC 虽然波动较大, 但依然可以在其工作区内平衡, 说明电池组容量的选择是合适的。

5 结论

对 PHEV 这一复杂系统的研究必须借助仿真和优化才能达到提高车辆经济性和降低排放的目的。而对动力系统参数进行合理的匹配是 PHEV 仿真和优化得以深入的保证。

PHEV 动力系统参数的匹配不同于常规汽车、

纯电动汽车或串联混合动力电动汽车。遵循本文提出的原则和步骤, PHEV 的参数匹配可以通过理论和工程分析, 加上初步的仿真校验来实现。实例证明, 这种方法是有效的, 能够保证整车动力性目标的实现和经济性的改善。

参 考 文 献

- 1 Rimaux S, Delhom M, Combes E. Hybrid vehicle powertrain: Modeling and control. In: Chen Q ed. Proceedings of 16th International Electric Vehicle Symposium, 16th International Electric Vehicle Symposium, Beijing, 1999, Beijing: Electric Vehicle Association of Asia Pacific, 1999: 116~126
- 2 Ehasni M, Rahman K, Toliyat H. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(1): 19~27
- 3 杜兴山. 并联混合动力电动汽车动力系统的建模与仿真: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2000
- 4 李槟. 混合动力汽车中动力系统参数选择及电池特性研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1998
- 5 牟风涛. 混合动力汽车动力系统参数匹配与控制策略研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1999

PARAMETER MATCHING OF PARALLEL HYBRID ELECTRIC VEHICLE POWERTRAIN

Peng Tao Chen Quanshi
Tian Guangyu Li Haichen
(Tsinghua University)

Abstract: Aiming at parallel hybrid electric vehicles with torque addition couple configuration, philosophies of matching powertrain design variables combining engineering analysis and simulation are presented. Engine power, electric motor parameters, gear ratio of driveline and battery parameters can be determined. Validity of the methods is demonstrated by an example.

Key words: Electric vehicles Parallel hybrid powertrain
Parameter matching

作者简介: 彭涛, 男, 1977 年出生, 清华大学车辆工程专业硕士研究生。从事电动车与混合动力汽车系统建模仿真、控制策略及参数匹配研究。