

文章编号: 1002-0268 (2005) 04-0129-03

并联式混合动力电动汽车动力总成 控制策略的研究

李国岫, 李秀杰

(北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要: 在混合动力电动汽车中, 制定合适的控制策略和控制逻辑是优化能量流动、提高动力总成协调程度的核心, 是并联式混合动力汽车具有优良的经济性与排放性能的保证。本文综合分析了并联式混合动力汽车动力总成控制的几种典型控制策略, 介绍了基本思想、实现方法以及各自特点, 并对各种控制策略的控制效果进行了评价和分析。

关键词: 并联式混合动力汽车; 动力总成; 控制策略; 优化

中图分类号: U469.72

文献标识码: A

Study on Powertrain Optimal Control Strategy of Parallel Hybrid Electric Vehicles

LI Guo-xiu, LI Xiu-jie

(School of Mechanical Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 China)

Abstract: In HEV, the use of multi-power needs to control optimally to improve the economical performance and decrease the emission, it is highly required to ensure the optimal control of the entire vehicle, and the control strategy is the core of the control system. In the paper, several typical control strategies of powertrain are analyzed, the principle and the method of each strategy are introduced, and finally the effects of the strategies are evaluated.

Key words: Parallel hybrid electric vehicle; Powertrain; Control strategy; Optimization

0 引言

20 世纪 90 年代以来, 能源危机以及大气污染使汽车的节能与环保性能日益得到重视, 目前世界许多著名汽车生产厂商都将研究的重点转向了可实施性较强的混合动力电动汽车 (Hybrid Electric Vehicle, HEV)。

目前的 HEV 产品按照动力系统的结构可以分为 3 类: 串联式、并联式和混联式, 其中并联式混合动力汽车 (PHEV) 中的两个动力源 (即发动机和电机) 既可同时提供动力, 也可分别提供动力, 具有良好的灵活性, 同时所需要的动力电池容量要比串联式少很多。目前 PHEV 是混合动力汽车的研究热点。

在 PHEV 中, 多动力源的使用要求对动力总成进行协调控制, 在满足动力性要求的前提下提高 PHEV 经济性, 降低整车系统排放。PHEV 从控制的角度对整车的协调运行提出了更高的要求, 制定合适的控制策略和控制逻辑是优化能量流动、提高动力总成协调程度的核心。

目前 PHEV 应用的控制策略主要包括电力辅助控制策略、建立在固定循环上的全局优化控制策略、综合管理控制策略以及自适应控制策略等, 本文将对这些控制策略进行系统的综合分析和评价。

1 电力辅助控制策略

电力辅助 (Electric assist) 控制策略^[1]是并联式

混合动力电动汽车较为普遍采用的一种控制策略。其主要思想是：将发动机作为汽车的主驱动源，电力驱动系统作为辅助驱动源，电机对发动机的输出扭矩起削峰填谷的作用，同时将电池的 SOC 值保证在一定范围内。本控制策略应用于本田 Insight、雪铁龙 XSARA 等车型上，但在具体的实现上略有差别。

在电力辅助控制策略中，有 5 种典型的驱动工况（未包含启动和制动工况）。

(1) 混合驱动模式。

(2) 当 $SOC \geq SOC_{\max}$ 时，且驱动扭矩为中等负荷时的发动机单独驱动模式。

(3) 当 $SOC < SOC_{\max}$ 时，发动机以最大扭矩运行，利用多余扭矩为电池充电的模式。

(4) 当驱动扭矩小于发动机最小扭矩时，且 $SOC \geq SOC_{\min}$ 时的纯电动模式。

(5) 当驱动扭矩小于发动机最小扭矩时，但 $SOC < SOC_{\min}$ 时，发动机扭矩等于充电扭矩与驱动扭矩之和，在驱动的同时，为电池充电。

1.1 电力辅助控制策略的实现

(1) 当汽车行驶速度低于某一速度时，或当需要的扭矩低于发动机优化区域的最小扭矩点时，电机成为单一的驱动源，发动机关闭。

(2) 当工况需要的扭矩介于发动机优化区域的下限情况下，发动机单独工作。

(3) 当需要的扭矩超过当前转速对应的发动机的优化区域的最大扭矩时，发动机工作在此上限水平，电机作为辅助驱动源，提供峰值扭矩，实行混合驱动。

(4) 当电池荷电状态值较低时，发动机将提供大于需要的功率使发电机为电池充电。

(5) 制动时，电机进行制动能量的回收。

1.2 电力辅助控制策略的特点

控制目标简明，将发动机限制于优化工作区域，同时保证电池的荷电状态值。涉及并联式混合动力电动汽车所有的工作模式。比较好的考虑了充电的效率和力度：充电扭矩随荷电状态值的大小而变化；当工况需要扭矩较小时发动机可以提供较大的扭矩输出以保证充电强度。

发动机优化区域过大，受控制策略本身要求所限，不免会划分过大的优化区域，使控制较为粗略。对电池荷电状态值控制过严，这里使电池的状态成为一个较为主导的控制目标，而发动机也因为受电池的状态的制约较为被动。电力辅助控制策略的控制目标没有充分考虑排放问题。

2 建立在固定循环上的全局优化控制策略

尽管电力辅助控制策略简单易行，但是由于其不能对优化目标进行精确量化，因此控制精度不高。建立在固定循环下的全局优化控制策略^[2~9]就是在电力辅助控制策略之后出现的一种能够精确量化优化目标的控制策略。

2.1 基本思想

建立在固定循环上的全局优化控制策略是在已知驱动循环的前提下，在整个循环内对优化目标进行优化求解，从而确定发动机、电机的输出扭矩以及变速箱的传动比。建立在固定循环上的控制策略不能用于实时的控制，但可以作为对实时控制策略进行策略评估的参考。如果设目标函数为 $f(i)$ ，则实时控制的表达式为 $\sum_{i \in \Omega} \min f(i)$ ，而建立在固定循环上的控制策略的表达式为 $\min \sum_{i \in \Omega} f(i)$ ，其中， i 为采样时间， Ω 为 i 的范围。

2.2 控制策略的具体描述

目标：以整个循环内燃油消耗量最小为目标

$$\min_{T_h(i), k(t)} J = \sum_{i=0}^{N-1} C[\omega_h(t), T_{th}(t)] \cdot \Delta$$

其中， $C[\omega_h(t), T_{th}(t)]$ 可通过发动机的经济性 MAP 图获得。

约束条件：约束条件包括机械约束、结构约束、状态约束。以下分别进行说明。

(1) 机械约束

由发动机、电机本身的机械性能限值所确定的约束条件。即转速、扭矩的取值范围。

$$0 \leq \omega_e(t) \leq \omega_{e_max}$$

$$\omega_{th_min} \leq \omega_{th} \leq \omega_{th_max}$$

$$T_{e_min}[\omega_e(t)] \leq T_e(t) \leq T_{e_max}[\omega_e(t)]$$

$$0 \leq T_{th}(t) \leq T_{th_max}[\omega(t)]$$

(2) 结构约束

由于汽车传动部分存在变速箱、主驱动器，发动机、电机之间存在齿轮式耦合器，因此，在车速、发动机转速、电机转速三者之间存在一定的比例关系。另外，需求扭矩与发动机、电机扭矩之间也存在一定的加和关系。结构约束就是用来描述这些关系的。

$$\omega_w(t) = \frac{\omega_{th}(t)}{R[k(t)]} = \frac{\omega_e(t)}{r[k(t)] \times \rho}$$

$$T_w(t) = \eta_{gb} \times R[k(t)] \times [T_{th}(t) + \rho \times \eta_e \times T_e(t)]$$

(3) 电池状态约束

状态约束是用来确保电池在循环结束时，其 SOC

值仍保持在初始值附近。

2.3 全局优化控制策略的评价

此控制策略以燃油经济性为目标, 且要求将电池电量保持在初始值范围内, 因此具有良好的经济性, 且在一个循环中电池电量也保持在一个较好的范围内。此控制策略比电力辅助控制策略前进了一大步, 由于其对燃油消耗计算得更精确, 因此具有更好的控制效果。

此策略不能进行实时控制, 不能将其控制思想移植到实际的混合动力汽车控制器中, 因此其实用性不强, 但可以作为更优秀的控制策略的一个有益参考。

3 综合管理控制策略

以上阐述了建立在固定循环上的全局优化控制策略, 而此策略最根本的限制在于它是建立在固定的循环之上, 而对于不同的驱动循环, 或者对于实际的汽车行驶工况, 汽车的性能得不到优化。这使得人们不断探索新的控制策略, 从而实现 HEV 进行实时的优化控制。下面将先介绍综合管理控制策略。

3.1 基本思想

综合管理控制策略^[7]的主要思想是: 在某一工况下, 计算满足工况需求的发动机/电机的任一扭矩组合所对应的能量消耗, 求其最小值对应的发动机、电机的扭矩作为优化计算的输出。按照此方法对所有工况点进行计算, 将计算结果保存并制取与汽车行驶工况相对应的发动机、电机扭矩最优 MAP, 存储在控制器中, 以备实时调用。此策略考虑到了保持电池电量平衡的问题, 这一考虑是基于一个惩罚函数来实现的。

3.2 控制策略的具体描述

综合管理控制策略可以分为以下两个子控制策略: (1) 换挡控制策略; (2) 能量在电机—发动机之间分配的控制策略。

对于换挡控制策略, 采取的方案是: 在给定的车速下, 使用当前转速下的最高档, 即使用经济型换挡方式。于是可以定义出在相应的换挡规律下的发动机的新的效率 MAP 和扭矩限值。对于能量在电机—发动机之间分配的控制策略问题, 按照下述方法进行优化求解。

优化目标确定为瞬态燃油经济性。通过求解瞬态最低油耗来达到使全局油耗最小的目的。其中的油耗是电机的能耗折合为油耗后与发动机油耗的加和。由于此控制策略能够进行实时控制, 因此可以将求解全局油耗的最小值问题转化为求解每一瞬态工况点的油

耗最小值问题。

在汽车的行驶工况点上, 此控制策略需要对所有满足工况需求的发动机/电机的扭矩匹配方式进行计算, 来获取最优的电机 MAP, 因此可以采取离线优化制取 MAP 的方式来实现, 从而达到获取最优经济性能的目的。

约束条件为使 SOC 值全局保持在初始值附近的一定范围内。

3.3 综合管理控制策略的实现

综合管理控制策略实现的具体步骤:

(1) 在某一工况下, 计算所有满足此工况需求的发动机/电机扭矩匹配方式的油耗 (其中一个重要步骤是将电机的能耗折合成发动机的油耗, 且要考虑电机效率、充电、放电效率造成的能量损失。)而此时油耗最小值所对应的发动机/电机扭矩即为所求的扭矩。也就确定了 MAP 图中一点的位置。

(2) 对所有的工况点都进行上述的计算处理, 可获得一个在全局范围内的电机的最优 MAP。根据汽车需求扭矩等于发动机扭矩、电机扭矩的加和这一函数关系, 可以相应的确定发动机的最优扭矩 MAP。

(3) 由于电机的功率是电池提供的, 因此, 在优化的过程中要考虑到电池电量平衡的问题, 解决方法是通过当前 SOC 值与目标 SOC 值的差值对电机的 MAP 进行修正 (增加或减少相应的扭矩)。可以通过用一个非线性的惩罚函数来解决这一问题。在 SOC 目标值附近, 补偿系数比较小, 在 SOC 值上、下限值附近, 补偿系数比较大, 这样可以增大充、放电量, 使 SOC 值迅速回到目标值附近^[8]。

(4) 由于发动机的扭矩等于汽车需求扭矩与电机扭矩之差, 因此电机的扭矩 MAP 修正后, 可以对发动机的扭矩 MAP 进行相应的修正。将电机、发动机的 MAP 存储在汽车的控制器中, 进行实时的查寻、调用^[9]。

3.4 综合管理控制策略的特点

(1) 综合管理控制策略在样车上试验, 具有极好的燃油经济性能 (其效率是传统汽车的 1.5 倍), 电池电量也保持在合理的范围内。但是在综合管理控制策略中各种动力源的切换可能会更频繁, 于是对实际发动机、电机调速的问题, 以及造成动力切换过程中的能量损失问题也要考虑。

(2) 综合管理控制策略在制取电机的最优 MAP 图时, 可以采用离线的方法, 减少了在实际控制中的实时计算量, 因此降低了控制器对硬件的要求, 有利于降低成本。

(下转第 135 页)

6 汽车主动碰撞报警试验

本文通过实际的道路实验, 验证所采取措施的有效性。图6、图7是一组试验照片。试验时, 记录的信息有报警时刻、自车速度、相对距离、相对速度、转向角度、障碍物性质(人、机动车、自行车等)等, 试验既验证系统的可靠性, 又测试系统报警的准确率。因为目前还没有统一对报警系统性能评价的方法, 本文针对试验中的报警总次数, 根据多个驾驶员对每次报警的满意程度评价报警效果, 结果表明驾驶员满意的报警次数较其它报警系统有了较大的提高。

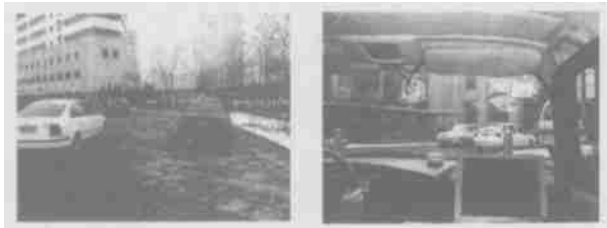


图6 弯道栅栏影响试验

图7 复杂路况转弯试验

7 结语

本文通过对目前报警中存在的问题进行技术改

(上接第131页)

(3) 综合管理控制策略在满足动力性能(需求扭矩)的基础上, 只考虑了经济性目标, 而没考虑排放等性能指标。

(4) 综合管理控制策略没有详细设计实际换挡规律, 而不同的档位下, 同一车速可以对应不同的发动机、电机转速, 因此需要考虑的范围不仅是某一确定的发动机、电机转速下的扭矩匹配问题了。

4 结束语

电力辅助控制策略比较简单, 易于实现, 但控制效果不够精确。建立在固定循环下的全局优化控制策略较电力辅助控制策略控制性能提高很多, 但仍受其本身的固有的特点所限, 即受驱动循环影响很大。综合管理控制策略可以进行实时控制, 经济性能很好, 但没有考虑排放问题。自适应控制策略有很好的经济性能和排放性能, 但并未把保持电池的荷电状态值作为一个控制目标, 而且必须进行实时计算求解, 因此, 对控制器硬件的处理能力要求较高。

参考文献:

[1] 梁龙. HEV 多能源动力总成控制系统仿真研究 [D]. 北京交通

进, 采取相应的技术措施和几种简单可行的方法, 降低了报警系统在复杂路况下尤其在转向、转弯、低速等行驶时所造成的误报现象, 减少了系统的误报率, 试验表明所采取的技术措施是有效的。报警系统在下列方面需进一步开展工作: (1) 降低产品成本; (2) 优化不同路况下的报警算法; (3) 完善适用于不同驾驶特征的报警系统。

参考文献:

[1] P Edgar An, Chris J Harris. An Intelligent Driver Warning System for Vehicle Collision Avoidance [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - PART A: System and Humans, 1996, 26 (2): 254-260.
[2] 桥本 佳幸, 里中 久志, 重松 崇. 突回避シスラムの開発 [A]. 自動車技術会学术講演会前刷集 943, 1994-05, 57-60.
[3] T J Ayres, L Li, D Schleuning, D Young. Preferred Time-headway of Highway Drivers [A]. Oakland, CA: IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings, IEEE Press 2001: 826-829
[4] 侯德藻, 李克强, 郑四发, 连小珉. 汽车主动碰撞系统中的报警方法及其关键技术研究 [J]. 汽车工程, 2002(5): 438-441

大学硕士论文, 2002

[2] Delprat S, Guerra T M, Rimaux J. Optimal Control of a Parallel Powertrain: From Global Optimization to Real Time Control Strategy [C]. Berlin: EVS18, 2001.
[3] Rimaux S, Delhom M, Combes E. Hybrid Vehicle Powertrain: Modeling and Control. Electric Vehicle Symposium [C]. Beijing: EVS16, 1999.
[4] Brahma A, Guezennec Y, Rizzoni G. Optimal Energy Management in Series Hybrid Electric Vehicle [C]. Chicago, Illinois: American Control Conference, 2000.
[5] Brahma A, Guezennec Y, Rizzoni G. Dynamic Optimization of Mechanical/Electrical Power Flow in Parallel Hybrid Electric Vehicles [C]. Proceedings of 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2000.
[6] Delprat S, Paganelli G, Guerra T M, Santin J J, Delhom M, Combes E. Algorithmic Optimization Tool for the Evaluation of HEV Control Strategies [C]. Beijing: Electric Vehicle Symposium, EVS16, 1999.
[7] Paganelli G, Ercole G, Brahma A, Guezennec Y, Rizzoni G. General Supervisory Control Policy for the Energy Optimization of Charge-sustaining Hybrid Electric Vehicles [J]. JSAE Review 22, 2001.
[8] Paganelli G, Ercole G, et al. A General Formulation for the instantaneous Control of the Power Split in Charge-sustaining Hybrid Electric Vehicles [C]. Ann Arbor, MI: Proc. AVEC 2000 5th Int Symp. On Advanced Vehicle Control, 2000.
[9] Rizzoni G, Guzzella L, et al. United Modeling of Hybrid-electric Vehicle Drivetrains [J]. Mechatron. IEEE/ASME Trans, 1999, 4 (3).