

燃料电池汽车动力总成控制策略

钟再敏，魏学哲，孙泽昌

(同济大学汽车学院，上海200092)

摘要：讨论了燃料电池汽车的动力总成负载均衡、动力蓄电池充电态闭环控制、燃料电池发动机功率的预测调节，以及电机回馈制动控制策略等问题；介绍了动力总成控制器的算法实现，并示例性地给出了实车转鼓测试结果。测试结果表明，针对电电混合动力总成提出的基本控制策略能充分考虑动力总成各组成部件的动力和经济特性，具有一定的实用价值。

传统内燃机汽车动力总成是通过燃烧将储存在燃油内的化学能转化为机械能输出，而燃料电池轿车动力总成则是通过所谓的“冷燃烧”反应，首先将化学能转化为电能，然后通过驱动电机将电能转化为机械能输出，或反过来通过电机的回馈制动功能将汽车行驶的动能转化为电能储存起来。因此，燃料电池汽车动力总成的控制有许多特有的命题需要深入开展理论和试验研究。本文着重从控制原理的角度对其中的几个问题展开讨论，最后结合某型燃料电池轿车动力总成的开发，简单介绍前述控制策略的算法实现和实车转鼓测试结果，对所提出的控制策略进行验证。

1 电电混合燃料电池汽车动力总成方案

现阶段，车载燃料电池发动机的冷车启动、动态响应慢和回馈制动能的储存三方面问题的存在，决定了燃料电池汽车动力总成配置中必须有一个车载辅助储能部件。现有燃料电池概念车中通常采用超级电容或动力蓄电池组完成上述辅助储能功能。根据不同技术特征，储能元件有高能量型和高功率型之分。一般来说，动力蓄电池有高功率型和高能量型的区别，而超级电容基本均作为高功率型储能部件使用。

图1给出了某型燃料电池轿车动力总成中采用的动力蓄电池作为辅助储能元件的电电混合燃料电池汽车动力总成原理结构图。

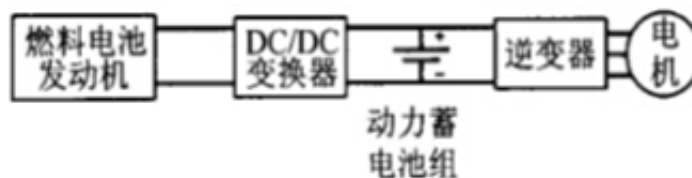


图 1 电电混合燃料电池汽车动力总成结构

Fig. 1 Block diagram of powertrain for battery assisted fuel cell hybrid vehicle

在上述动力总成结构中，采用电流闭环控制的DC/DC变换器与蓄电池组并联，将燃料电池发动机的电能输出变换到动力蓄电池组的电压等级，共同为电机及其驱动控制器供电。DC/DC变换器一方面作为燃料电池发动机的负载运行，另一方面作为电源与动力蓄电池组并联工作。该系统中功率动态分配主要通过控制如下3个控制参数实现：

(1)燃料电池发动机的输出功率上限。该值决定了给定时刻动力总成中化学能转化成电能的能力。燃料电池发动机的当前输出功率受当前燃料电池发动机的工作温度、氢/氧供应量等诸多工作条件的影响，而其中一些条件的改变表现为大惯性特性。因此，燃料电池发动机的瞬时功率输出能力由其当前工作状态决定，这就体现为发动机的输出功率上限。

(2)DC/DC变换器的输出功率。该功率代表了单位时间内动力总成中化学能实际转化成电能的多少。在前述燃料电池发动机输出功率限制下，发动机实际输出功率大小是由DC/DC变换器控制的，而DC/DC变换器的功率输出的动态响应要比燃料电池发动机快得多。

(3)电机及逆变器的输出功率。电机及逆变器的输出体现了电能与机械能相互转化的速度。电驱动状态下，电能转化成机械能输出；回馈制动模式下，机械能转化成电能储存到动力蓄电池组中。

2动力总成控制基本原理及实现

动力总成控制的基本原理就是根据驾驶员的指令输入，协调动力总成各主要部件共同工作，调节各环节能量转换的速率大小与方向，在兼顾经济性指标的前提下，实现驾驶员期望的动力性能。该控制功能的可靠实现主要依赖如下几方面具体控制策略的实施。

2.1 燃料电池发动机的负载均衡策略

电电混合的燃料电池汽车具有多种电能供应装置，汽车的瞬时负载如何合理地分配到不同的能源装置上，就是通常所说的负载均衡策略。实用的负载均衡策略是在考虑动力总成部件特性、能源经济性等诸多影响因素的基础上提出的。

在图1给出的动力总成结构图中，因为DC/DC变换器采用恒流控制，因此动力蓄电池组瞬时功率完全取决于电机逆变器所需直流功率和DC/DC变换器的输出功率之差。因为电机逆变器的输出基本趋势是跟随驾驶员的操纵指令变化的，所以，该动力系统中负载均衡主要是通过调节DC/DC变换器的输出功率实现的。

在负载均衡策略中，电机负载大小是计算DC/DC变换器输出功率的主要依据，目前常用的算法主要有惯性滤波和加权滑动平均算法2种。前者是通过调节燃料电池发动机的输出功率以满足车辆行驶阻力中的慢变分量需求，而后者是通过调节发动机的输出功率来平衡车辆行驶过程中平均阻力，以达到期望的经济性。

在样车动力总成控制器采用的加权滑动平均算法中，将逆变器的输出功率在过去给定时间内的加权滑动平均值，作为DC/DC变换器的电流设定依据。在加权滑动平均计算中，最近的数据权值相对大一些；随着数据变老，其权值变小。

2.2 电池充电态的闭环控制

电电混合的燃料电池汽车中的辅助供电部件(动力蓄电池组或者超级电容)的作用基本可以归纳为如下2种：提供附加瞬时功率(auxiliary power unit, APU)，增加续驶里程(range extender, RE)。而辅助供电部件的充电状态(state of charge, SOC)的闭环控制目标对于APU和RE有很大的不同。一般来讲，对于APU部件主要是保证其始终保持在最佳的充电态，这样才能保证随时可以提供所需的附加瞬态功率输出或吸收尽可能多的回馈制动能量；而作为RE使用的辅助供电部件充电态的控制往往更多考虑效率尽可能地高，避免能量的不必要转换，因此对RE的充电态干预不如APU强烈。

动力总成控制算法的任务之一就是根据既定的SOC控制目标，保证期望的SOC值。但SOC的调节必须通过电池实际电流大小来实现，因此实践中采用了图2中给出的SOC和电流的闭环控制结构。

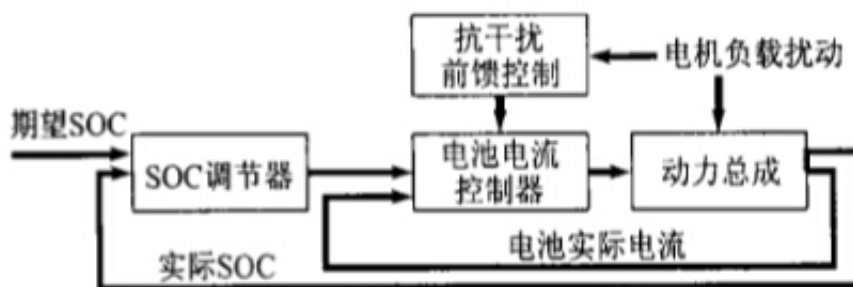


图 2 SOC和电池电流的闭环控制

Fig. 2 Double loop feedback control of battery SOC and battery current

前面提到了，动力蓄电池组和电机逆变器之间电压耦合的结果使得电池实际电流跟随电机负载变化，因此对于电池电流闭环控制来讲，电机负载是作为扰动引入到被控制对象(动力总成)上。在样车实践中增加了电机负载扰动(逆变器电流输入)检测，并通过抗干扰前馈控制环节补偿电池电流控制器的精度和调节速度。

2.3 燃料电池发动机功率的预测调节

燃料电池发动机负载均衡策略给出了燃料电池发动机和DC/DC变换器系统当前输出功率的设定大小。但是，燃料电池发动机的实际输出功率还必须考虑燃料电池发动机当前允许输出功率的限制，即燃料电池发动机的瞬时输出功率能力限制了其实际输出功率。因此，在保证经济性的前提下，为了提高燃料电池发动机的输出响应速度，可以在动力总成控制算法中通过预测调节，根据负载变化趋势提前调节发动机功率设定，从而提高燃料电池发动机的负载跟随能力。

在实践中，采用了根据加速踏板微分补偿和负载均衡算法输出超前控制2种预测调节环节。前者主要是从驾驶员的加速动作来判断其加速意图，在驱动电机负载电流变化之前就对燃料电池发动机的工作状态进行干预，从而改进整车的动力性；后者给出的燃料电池发动机功率预期值体现了既定的负载均衡策略，但正如前面讨论过的，该预期值要受到燃料电池发动机当前允许输出功率的限制，不能得到完全执行。但是，通过这里的“负载均衡算法输出超前控制”，可以对发动机当前允许输出功率进行干涉和预测调节，达到有效提高动力性能的目的。

2.4 回馈制动控制方法

具有能量储存部件的电动汽车具有一个传统汽车不具有的“回馈制动”特性，就是可以通过电机的电能回馈功能在制动过程中将汽车的动能转化为电能储存到能量储存部件中，以实现制动能的回收，达到节能的目的。

回馈制动的强度可以通过控制电机加以控制。现有的电动汽车回馈制动的操作控制有2种主要方式，一种是通过加速踏板控制，另一种是通过制动踏板控制。前者主要是考虑到目前汽车的制动系统仍然以机械方式为主，而回馈制动和机械制动机构的协同工作需要制动踏板进行较大的改动，因此，目前电机驱动的电动汽车大多采用一个电子加速踏板同时控制电机的加速和回馈制动；后者主要应用在一些安装了电助力制动装置的汽车上，但其控制和实现都比较复杂，可靠性也是必须考虑的问题，因此尚未得到推广。

在通过加速踏板控制回馈制动强度的应用中，一般选用加速踏板开始的一段区间作为回馈制动控制行程，依此控制回馈制动强度。该控制方法可操作性好，简单实用，但缺点是加速过程中踏板必须首先通过回馈制动行程，不符合传统内燃机汽车的驾驶习惯，驾驶员的主观感觉不好。

在样车实践中，笔者提出了仅通过加速踏板控制回馈制动强度的方法。与传统控制方法不同的是，该控制方法不设回馈制动行程，而是通过检测驾驶员放开加速踏板的速度通过滑动加权平均来控制回馈制动强度，再结合当前车速、辅助储能部件的当前充电态等状态信息控制电机回馈制动强度。该控制方法的优点是能够体现驾驶员的制动意图，模拟了传统内燃机汽车“发动机倒拖”的状态；缺点是不能精确控制回馈制动强度，但这可以通过认真的标定匹配工作加以弥补。

2.5 动力总成控制算法的实现及验证

结合某型燃料电池轿车的研制开发，参照前面讨论的燃料电池轿车动力总成控制原理，就完成了动力总成控制器的实现。其基本结构原理图如图3所示，驾驶员的指令输入和动力总成状态观测器的输出共同传给“动力总成状态调控模块”（powertrain state controller, PTSC），由“能量均衡控制模块”（energy balancing controller, EBC）根据PTSC的输出调节动力总成状态，实现既定的控制策略。

前面讨论到的燃料电池发动机负载均衡策略、充电态的闭环调节、电机回馈制动控制等算法均集中到PTSC中实现，而电池电流闭环控制、电机负载扰动前馈控制、燃料电池发动机功率的预测调节等策略则主要由EBC完成。

当然，上述控制功能只是动力总成控制器功能的一部分，其他一些必要的诊断、检测和状态维护等功能是动力总成控制器基本功能。比如PTSC的重要功能之一就是维护并实现如图4所示的动力总成驱动模式状态转移图。

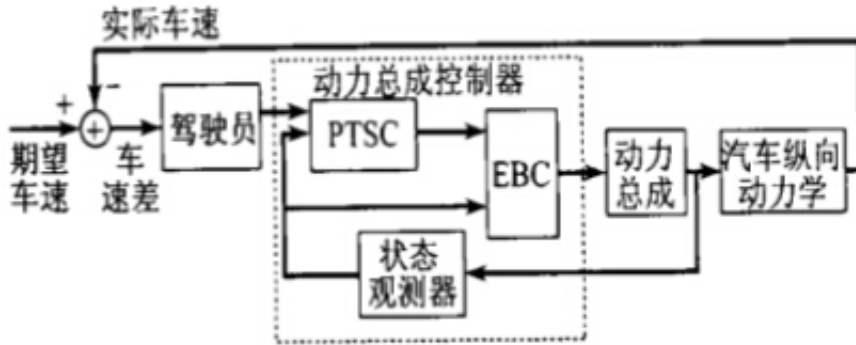


图 3 动力总成控制器结构原理图

Fig. 3 Block diagram of powertrain for fuel cell hybrid vehicle

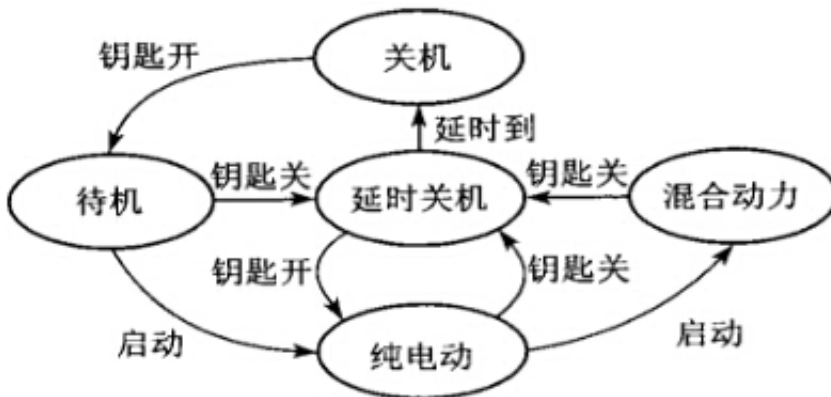


图 4 动力总成驱动模式状态转移图

Fig. 4 State transition diagram for fuel cell hybrid vehicle

图5给出了上述控制策略在某型燃料电池轿车实车转鼓测试中，载荷交替变化时负载均衡控制结果。其中，DC/DC的电流输出即代表了燃料电池发动机的实际输出功率，电机电流为车辆实际负载，而电池电流实际值体现了辅助能源的充放电状态。

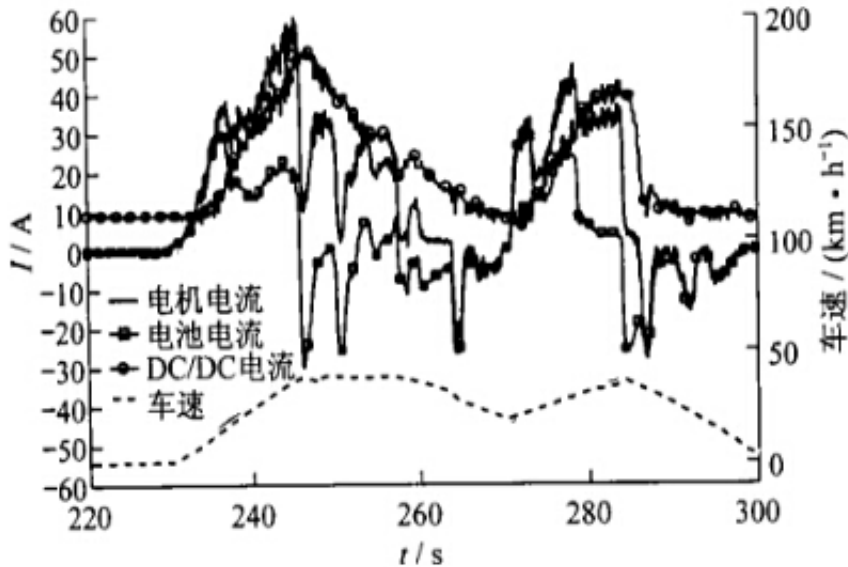


图5 负载均衡算法控制下的电流) 时间历程曲线

Fig. 5 Current profile as a result of load leveling algorithm

由图5可以看出，试验结果基本实现了既定的动力总成控制策略。在试验中，电机电流输出始终跟随驾驶员的指令，如图2中描述的，该电机电流实际值以扰动量的形式引入到动力总成中。在负载均衡算法控制下，燃料电池发动机和动力蓄电池作为APU使用时，分担电机负载电流中不同频率分量，在保证整车动力性的前提下兼顾整车的经济指标，并保持动力总成始终处于最佳工作状态。

3结论

本文重点讨论燃料电池汽车的动力总成控制中特有的一些问题，系统比较了现有的主要技术路线，也提出很多独有的解决方案，并给出实践中采用的可行性算法。具体涉及动力总成负载均衡、动力蓄电池充电态闭环控制、燃料电池发动机功率的预测调节，以及电机回馈制动控制策略等方面问题的解。样车转鼓测试结果表明，将上述控制策略和相应的控制算法应用于实践当中可以取得满意的控制效果，对类似开发工作有一定的参考价值。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/102038.html>