



混合动力电动汽车的最佳能量控制策略设计

本文对一辆重型并联混合动力电动卡车进行了建模，并研究了其最佳能量控制。对并联式混合动力电动卡车的基本结构进行了前馈式建模，并对子系统或部件的必要动态特征进行了建模。动态编程（DP）技术被用来寻找最佳控制策略，包括换挡顺序以及在电池SOC维持约束下发动机和电机之间的功率分配。从基于DP的控制方案中提取了改进的控制规则，形成了接近最优的控制策略。仿真结果表明，从自然驾驶的统计数据来看，重型车辆循环的燃油经济性可以得到显著改善。

1. 简介

商业运输车辆，特别是重型卡车，在中国的社会主义建设中发挥着重要作用。在中国，一半以上的货物运输是由重型卡车承担的。越来越多的仅仅是汽油/柴油推进的卡车带来了一些负面影响，如过度的燃料消耗和严重的空气污染。为了减少对碳基燃料的依赖和有毒的排放，混合动力系统最近被广泛研究。由于双动力源的特性、复杂的配置和运行模式，混合动力汽车（HEV）的控制策略通常比传统发动机汽车更复杂。因此，在最终设计和物理样机制作之前，系统级的车辆仿真方法通常被用于实施精确的尺寸和匹配研究，以及开发有效的能量控制算法。

现有的混合动力汽车的能量管理和控制策略主要可以分为三类。第一类采用启发式控制技术，如规则/模糊逻辑来开发控制算法[1, 2]。其原理通常是基于“负载均衡”的概念，试图将内燃机运行在一个有效的区域，而电池作为一个负载均衡装置用来提供剩余的电力需求。

第二类方法是基于静态优化方法，通过最小化成本函数即时确定不同能源之间的有效功率分配。为了计算能源成本，电能被转化为等量的燃料[3, 4]。由于其相对简单的点式优化性质，有可能扩展优化方案，以解决同时存在的燃油经济性和排放优化问题[5]。

第三类HEV控制算法的基本机制在进行优化时考虑了车辆系统的动态性质[6-8]。在这种类型的动态优化中涉及到一个时间范围，而不是上述静态优化中的一个时间瞬间。因此，从动态优化中获得的功率分配算法在瞬态条件下更准确，但在计算上更密集。尽管

由于其预览性质和沉重的计算要求，动态优化不能在船上实现，它已被公认为是前两类算法的良好基准。

本文的主要目的是使用动态编程（DP）来解决重型混合卡车的最优控制问题。我们深入分析和讨论了基于DP的结果，从中提取了实时控制规则。我们采用了前馈仿真方案，以便能够研究现实瞬态条件下的车辆能量控制策略。可以发现，相对于基于静态优化的算法，所开发的基于规则的算法的性能可以得到显著提高。

本文的其余部分组织如下。在第2节中，建立了一个重型混合动力电动卡车模型，随后解释了基于规则的初步控制策略。第3节中介绍了DP程序和相应的优化问题。在第4节中，描述了已完成的基于DP的结果和实时控制规则，并对开发的控制策略的燃油经济性进行了评估。第5节中提出了结论。

2. 混合动力电动卡车模型

2.1. 车辆配置

车辆结构在图1中给出。该卡车采用前变速器并联混合动力配置，与后变速器类型相比，允许更小的电动机/发电机，更容易包装，并减少旋转损失[9]。柴油机WP7.210是由潍柴动力股份有限公司生产的。为了确保总峰值功率的可及性，选择了90千瓦的电动机/发电机，并选择了60安的锂离子电池作为车载储能装置。使用了一个9档自动机械变速器（AMT）。车辆及其部件的参数列于表1。

DI柴油发动机	7.0升，2000转/分时功率155千瓦，1300-1600转/分时功率90千瓦 最大功率: 90 kw
电机/发电机	最大扭矩：600 N-m 最大转速： 2400 rpm 容量：60Ah
锂离子电池	模块的数量。25 标称电压：12.5（伏特/模块）
AMT	9速。 GR: 12.11/8.08/5.93/4.42/3.36/2.41/1.76/1.32/1
车身重量	16000公斤

表1 混合动力电动卡车的参数。

图一

混合动力电动卡车的结构。

在MATLAB/Simulink环境中建立了一个系统级的HEV模型，如图2所示。该HEV模型是一个准确但适度的模型，适合于对燃油经济性的有效评估[10]。一些快速的动力学，如进气歧管填充和电机动力学，要比能量动力学快得多，因此被忽略了。

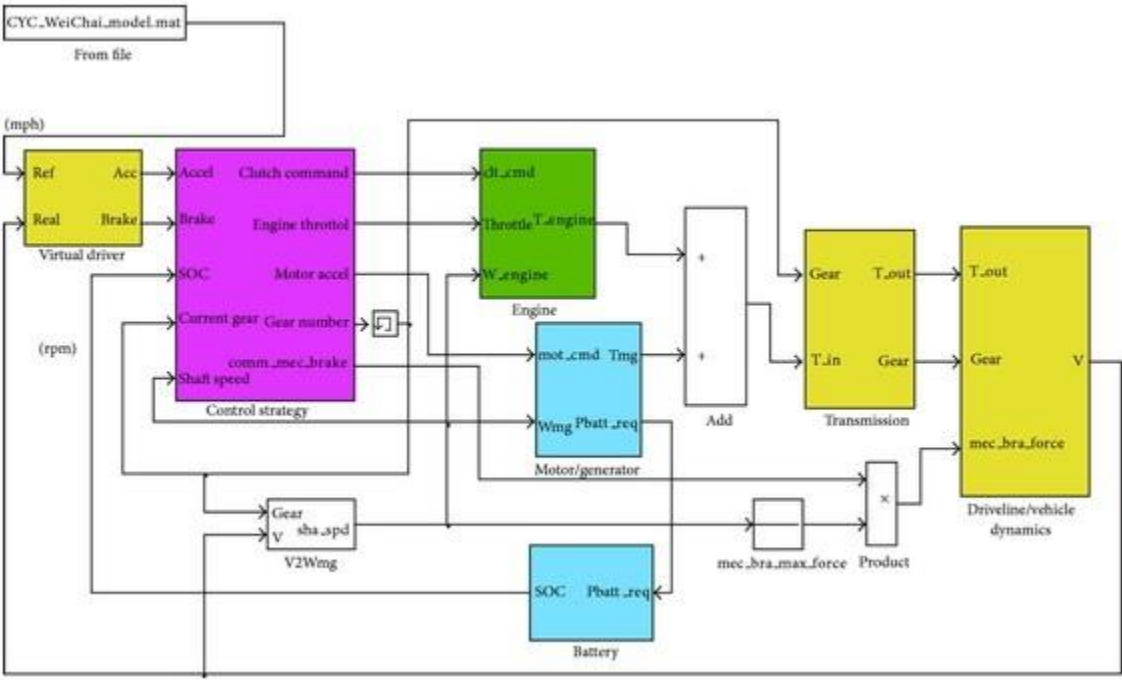


图2

Simulink中的HEV动力系统模型。

2.2. 初步的基于规则的控制策略

初步的基于规则的控制策略是基于静态优化算法设计的，最小化总的等效燃料消耗--每一步的燃料消耗和电池能量消耗率之和。等效燃料消耗成本定义为[11]，其中和分别代表发动机和电动机的燃料消耗，可以用以下公式计算：其中是电能到发动机燃料消耗的转换系数，其值被指定为.s是时间步长，代表电动机的功率，是由电池、变频器和电动机/发电机组成的电气系统的总效率。最佳控制可以通过解决以下方程得到。

这里，控制变量包括发动机油门和变速器齿轮数，可以用MATLAB中以.m文件形式编写的以下函数来解决，其中throt_opt和gear_opt分别是最佳发动机油门和变速器齿轮。

shf_spd是最终驱动的输出轴速度， req_power是要求的功率。

2.3. 燃油经济性评估

潍柴动力提出的自然驾驶时间表如图3所示。当初始和最终的电池SOC值不一致时，使用了[12, 13]中提出的电池SOC校正程序来校正燃油经济性。在初步的基于规则的控制策略下，混合动力电动卡车的燃油经济性达到了6.78英里/加仑（MPG）。然而，这种基于规则的控制策略是基于组件而不是基于系统的。因此，这种控制策略不是全局最优的。这促使我们使用DP作为分析和设计工具。

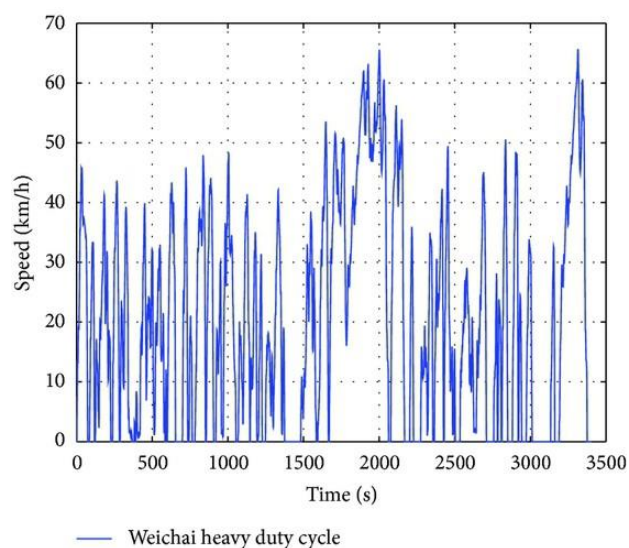


图3

潍柴动力股份有限公司的自然驾驶时间表。

3. 动态编程问题

DP是解决动态优化问题的有力工具，因为它保证了全局最优性，即使是有约束的非线性动态系统。给定一个驾驶周期，基于DP的算法可以得到最佳的操作策略，在不同的约束条件下使成本最小。

3.1. 模型简化

由于系统层面的动态是评估长期驾驶周期内燃油经济性的主要关注点，DP使用的模型中忽略了速度超过1赫兹的动态。对动态模式的分析决定了只需要模型的两个状态变量：变速器齿轮数和电池SOC。发动机油门和变速器换档指令被选为控制变量。主要子系统的简化情况描述如下。

3.1.1. 发动机

基于准静态假设[14]，发动机的动态被忽略了。油耗是两个独立变量的静态函数：发动机转速和发动机扭矩。发动机图显示在图4中。在此，我们假设发动机是完全预热的，这样就不考虑发动机温度的影响。

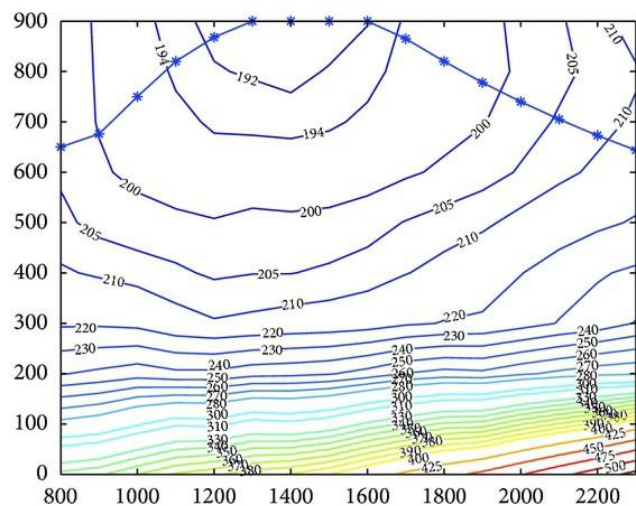


图4
发动机BSFC图。

3.1.2. 电机

与发动机类似，电机模型是利用实验数据建立的。电机效率是电机扭矩和速度的函数，如图5所示。考虑到电池功率和电机扭矩的限制，最终的电机扭矩变成哪里是要求的电机扭矩；和分别是电机和充电模式下的最大电机扭矩。

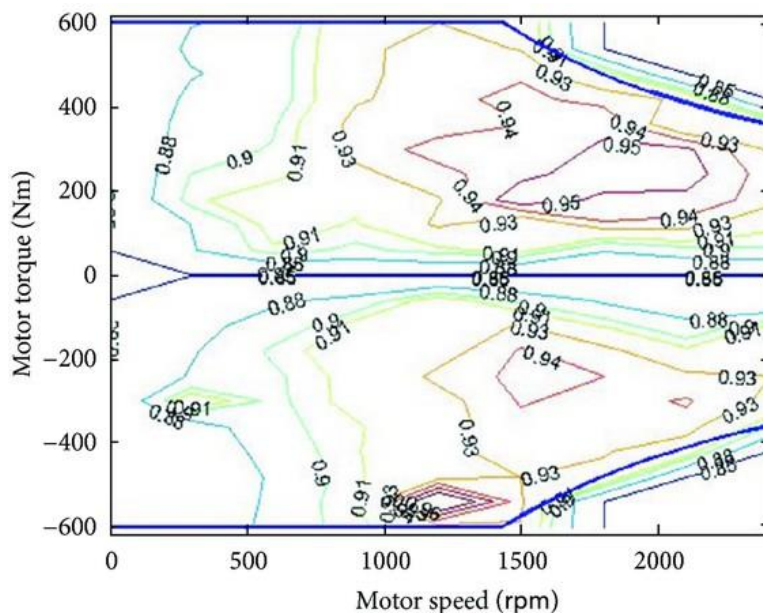


图5
电机效率图。

3.1.3. 电池

目标卡车选择了一个20kWh的电池，并采用了ADVISOR软件包中的等效电路电池模型。等效电路模型的原理图如下所示

在图6中。我们忽略了热效应和瞬态，因此电池模型中唯一的状态是SOC，如下所示：其中内阻和开路电压都是 电池SOC的函数。是电池最大电量，是终端电阻。

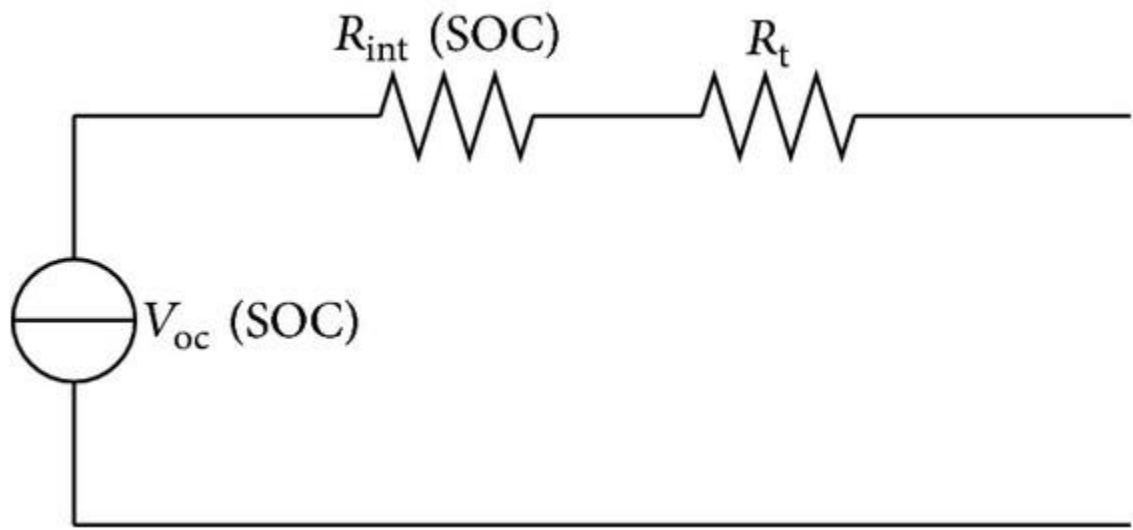


图6
内部电阻式电池模型。

3.1.4. 传动系统

传动系统被定义为从变速器输入轴到车轮的系统。以下公式用于描述变速器和最终驱动装置的齿轮模型：其中是变速器齿轮比，是最终驱动装置齿轮比，和分别是变速器和最终驱动装置的效率。是变速器输入扭矩，是变速器粘性损失系数，是变速器输入速度，是车轮速度。

使用离散时间动态模型模拟AMT的换档顺序：其中状态档位是档位号，对变速器的控制转变被限制为取值-1、0和1，分别对应降档、维持和升档。

3.1.5. 车辆动力学

通常的做法是只考虑车辆的纵向动力学。车辆纵向动力学被建模为一个点状质量，各种力被施加在其上：其中是摩擦制动力矩，和分别是滚动阻力和空气动力阻力，是动态轮胎半径，是车辆的有效质量，是车辆中旋转部件的等效惯量。

3.2. DP问题的提出

对于一个优化问题，选择最小化成本函数wheres服从这里，是空间中阶段的状态向量，包含变速器档位数和电池SOC；是控制向量，包括发动机油门和变速器换档指令；是预定干扰，这里是由驾驶计划决定的车轮转速；是代表系统动力学的过渡函数；是瞬时过渡成本；是最终阶段的成本。

在本文中，该控制问题的采样时间为1秒。成本函数为

最小化有以下形式：其中是燃料使用的瞬时成本，被调整为约束车辆的驾驶能力，避免过度换挡，是一个正的加权系数。如果没有对终端SOC的约束，优化算法倾向于耗尽电池，以达到最小的燃料消耗。因此，对SOC的终端约束被纳入成本函数中。在优化过程中，有必要施加以下不等式约束，以确保发动机/电池/电机的安全/平稳运行：其中是发动机转速，是电池的充电状态，和被选择为0.4和0.8，和分别是发动机和电机扭矩。

DP技术基于贝尔曼最优化原理，即如果我们首先解决只涉及最后一个阶段的单阶段子问题，然后逐渐扩展到涉及最后两个阶段、最后三个阶段的子问题，以此类推，直到解决整个问题，就可以得到最优策略。通过这种方式，全局动态优化问题可以被分解成如下简单的最小化问题序列[15]。

步骤，

步骤，其中是在从时间阶段开始的状态下的最佳成本-去向函数。它表示如果系统演化遵循当前状态下的最优控制法，从阶段到最终阶段的最优结果成本。

上述递归方程首先被向后求解，然后向前搜索以找到最优控制策略。最小化是在(14)所示的不等式约束下进行的。

4. 改进控制策略的发展

4.1. DP结果

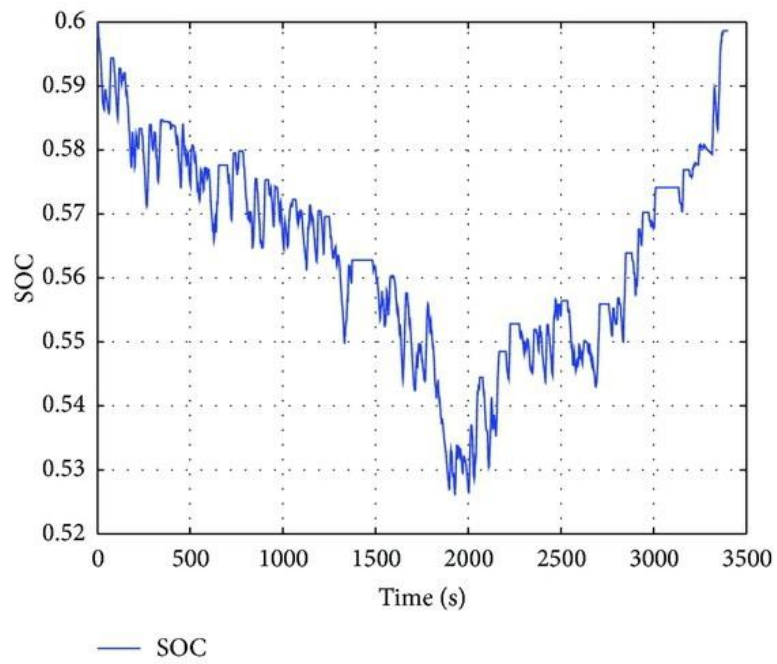
上述DP程序产生了一个关于(13)的最优解，其中换挡权重系数被选择来约束AMT换挡次数。可以发现，较大的值会导致换挡次数减少，但油耗较大。换挡次数和油耗的平衡关系如图7所示，并被选作后续分析的依据。

图7

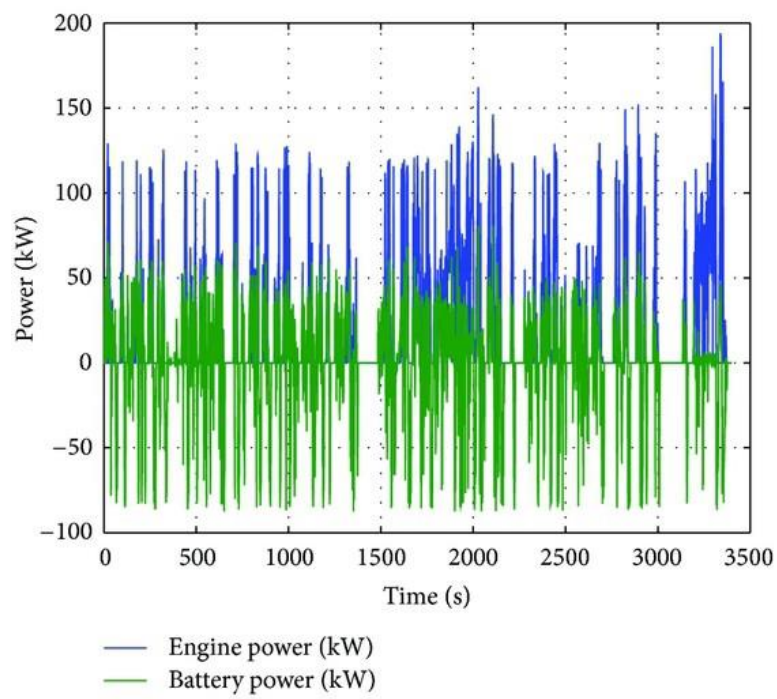
换挡次数与油耗的关系。

基于DP优化的车辆的仿真结果如图8所示。AMT主要在4档和9档之间换挡。由于(13)中所示的成本函数的惩罚，SOC在驾驶周期结束时增加到0.6附近。发动机的功率在1900秒后增加，显然是为了使SOC上升。可以看出，大部分的发动机工作点都落在高效率区域，在1400rpm之前的最佳油耗线附近和1400rpm之后的最大扭矩线附近。与初步的基于规则的控制策略相比，DP最优控制法下的燃油经济性提高了15.9%。

(a)

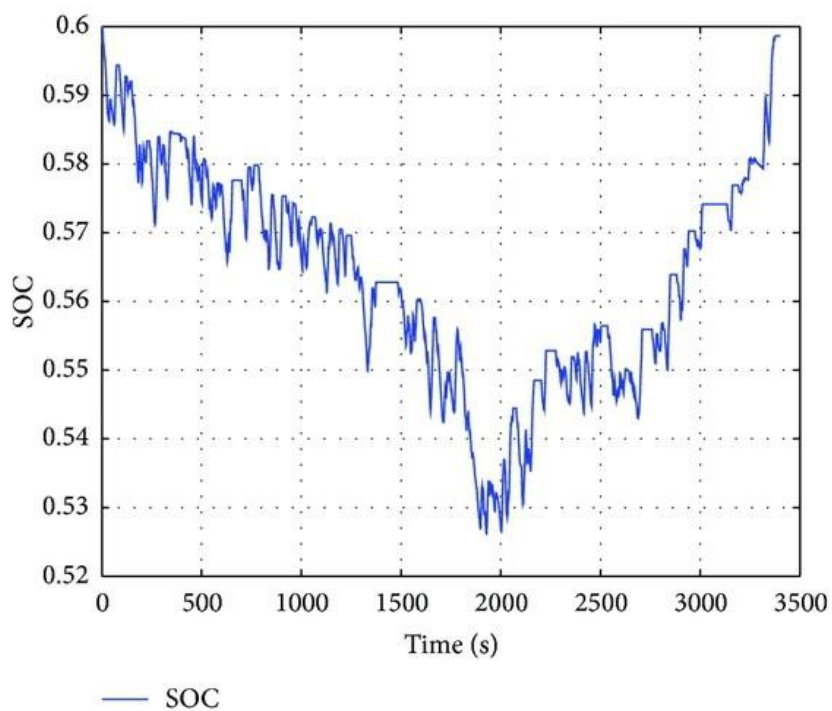


(b)

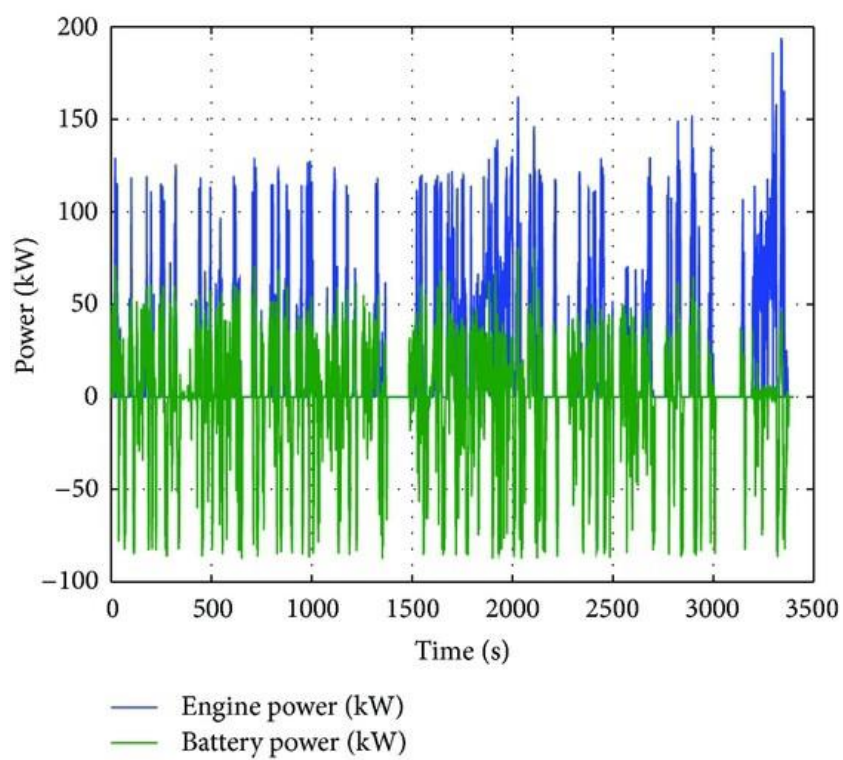


(c)

(d)



(a)



(b)

(c)

(d) 图8

基于DP的结果。

4.2. 改进控制策略的发展

DP控制策略并不适用于实际驾驶条件，因为它需要了解未来的速度和负载情况。然而，仔细分析基于DP的结果，能够帮助我们改进基于规则的初步控制策略。

首先，我们研究如何改进基于初步控制策略的功率分配。我们定义了一个功率分割率来量化动力系统中的正功率流，其中是发动机功率，是要求的功率。我们定义了四种正功率工作模式：(1)：纯电模式；(2)：纯发动机模式；(3)：动力辅助模式；(4)：充电模式。

如图9所示，通过绘制最佳PSR与变速器输入端扭矩需求的函数，可以找到增强的规则。值得注意的是，最佳策略在低扭矩区使用充电模式，在中扭矩区使用发动机模式，在高扭矩区使用动力辅助模式。为了提取一个可实现的规则，采用最小平方曲线拟合来接近最佳PSR点。图8中的红线显示了拟合的结果。

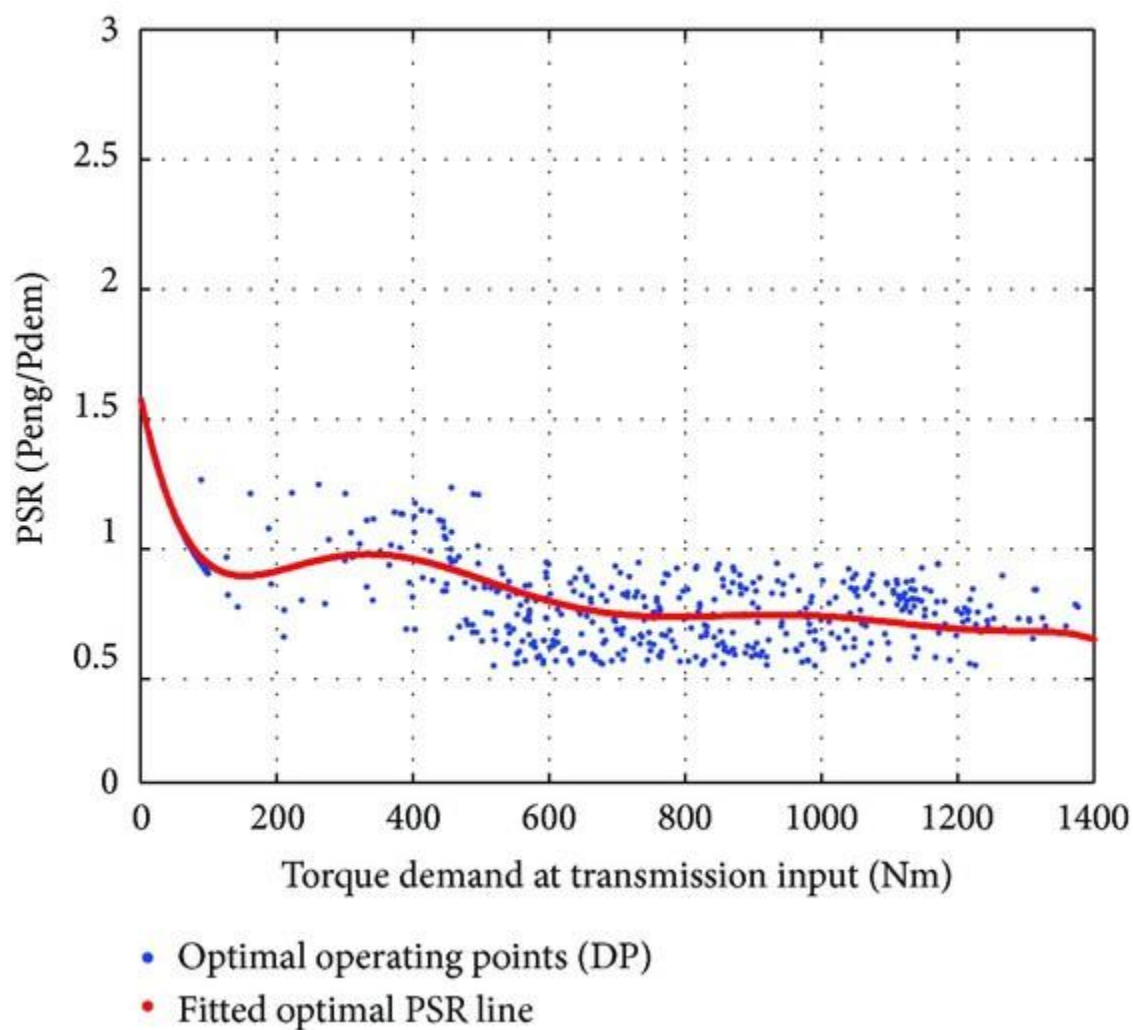


图9

基于DP的权力分割行为。

换挡计划对混合动力电动汽车的燃油经济性至关重要。在DP方案中，换挡指令是控制变量之一。基于DP的结果中的档位操作点是以功率需求与车速的关系形式绘制的（见图10）。可以看出，档位被分隔成不同的区域，相邻区域之间的边界代表了最佳换挡阈值。因此，可以在这些阈值的基础上得到换挡时间表。

图10 基于DP的齿轮操作点。

根据提取的规则，改进的基于规则的控制策略在MATLAB/Stateflow环境中被设计和实施。

4.3. 燃油经济性评估

初步的和改进的基于规则的控制策略，以及基准的DP控制策略，通过潍柴动力股份有限公司的自然驱动计划进行了比较。结果显示在表2中。很明显，与初步的控制策略相比，从基于DP的结果中提取的改进的基于规则的控制策略可以确保混合动力电动卡车有更好的燃油经济性。

	燃油经济性 (每美国加仑英里数)	改进
基于初步规则	6.78	-
改善基于规则的	7.45	9.9%
混合动力卡车(DP)	7.86	15.9%

表2 燃油经济性比较。

5. 结论

为研究最佳能源管理策略，建立了重型并联混合动力电动卡车的前馈模型。在静态优化算法的基础上设计了基于规则的初步控制策略。在简化模型的基础上，应用DP来解决全局最优能源控制策略。通过分析基于DP的结果，提取了适用于实时的改进的基于规则的控制规则。基于潍柴动力股份有限公司的自然驾驶时间表，对改进的基于规则的控制策略和由静态优化得出的初步策略进行了比较。结果表明，基于DP算法的改进型规则控制策略对混合动力电动卡车的燃油经济性有明显的提高。该算法

然而，DP行为的适当近似，是提取控制规则的关键过程，值得进一步研究。

鸣谢

作者对密歇根大学的Huei Peng教授在DP算法上提出的许多有益建议表示深深的感谢。这项工作得到了中国自然科学基金的支持（50905015）。

参考文献

B.M. Baumann, G. Washington, B. C. Glenn, and G. Rizzoni, "Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 5, no. 1, pp.58-72,

2000年。在这里查看。 [出版商网站](#) | [谷歌学术](#)

N.J. Schouten, M. A. Salman, and N. A. Kheir, "Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 10, no.3, pp.460-468,

2002年。在这里查看。 [出版商网站](#) | [谷歌学术](#)

A.Sciarretta and L. Guzzella, "Control of hybrid electric vehicles," IEEE Control Systems Magazine, vol. 27, no. 2, pp.60-70, 2007.View at: [出版商网站](#) | [谷歌学者](#)

G. Paganelli, G. Ercole, A. Brahma, Y. Guezennec, and G. Rizzoni, "A general formulation for the same. 第五届先进车辆控制国际研讨会（AVEC'00）论文集，安大略省。

Arbor, Minn, USA, 2000.View at: [谷歌学者](#)

V.H. Johnson, K. B. Wipke, and D. J. Rausen, "HEV控制策略对燃油经济性和排放的实时优化，" 在未来汽车大会论文集中，SAE论文编号。

2000-01-1543.查看。 [谷歌学者](#)

A.Brahma, Y. Guezennec, and G. Rizzoni, "并联混合动力电动车中机械电力流的动态优化", 在第五届国际研讨会上。

先进车辆控制（AVEC '00），美国明尼苏达州安阿伯市，2000.见。 [谷歌学者](#)

U.Zoelch和D. Schroeder, "混合动力汽车部件设计和评级的动态优化方法", 国际车辆设计杂志，第19卷，第1期，第1-13页。

1998年。在...查看。 [谷歌学者](#)

C.C. Lin, J. M. Kang, J. W. Grizzle, and H. Peng, "Energy management strategy for a parallel hybrid electric truck," in Proceedings of the American Control Conference, pp. 2878-2883, Arlington, Va, 美国，2001年6月。请看。 [谷歌学者](#)

J.M.米勒，《混合动力汽车的推进系统》，工程和技术研究所，英国斯蒂文纳奇，2004年。

S.-J. Hou, Y. Zou, and R. Chen, "Feed-forward model development of a hybrid electric truck for power management studies," in Proceedings of 2nd Intelligent Control and Information

处理（ICICIP '11），中国哈尔滨，2011.查看。 [谷歌学者](#)

J.刘, 动力分离式混合动力汽车的建模、配置和控制优化[博士论文], 密歇根大学, 2007。

D.L. McKain, N. N. Clark, T. H. Balon, P. J. Moynihan, S. A. Lynch, and T. C. Webb, "混合动力汽车和传统公交车的排放特性", SAE

Paper 2000-01-2011, 2000.View at:[谷歌学者](#)

汽车工程师学会, "测量混合动力汽车废气排放和燃油经济性的推荐做法", 混合动力汽车测试程序任务组SAE

J1711, 1998.View at:[谷歌学者](#)

I.Kolmanovsky, M. van Nieuwstadt, and J. Sun, "为燃油经济性和排放优化复杂的动力总成系统", 在IEEE国际控制会议论文集上。

应用 (CCA'99), 第833-839页, 1999年8月。[谷歌学者](#)

R.贝尔曼, 《动态编程》, 《普林斯顿数学地标》, 普林斯顿大学出版社, 美国新泽西州普林斯顿, 2010.查看。[Zentralblatt MATH](#) | [MathSciNet](#)