

12-12-2019

Control Optimization of Hybrid System with Hybrid Power Based on DP Algorithm

Deng Tao

School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074;

Haoyuan Yu

School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074;

Bin Xu

School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Control Optimization of Hybrid System with Hybrid Power Based on DP Algorithm

Abstract

Abstract: Aiming at the complexity and diversity of energy management for HEV(hybrid electric vehicle) with hybrid power, taking the State of Charge of power battery and ultracapacitor as state variable, the torque distribution ratio between engine and motor, and the power distribution ratio between power battery and ultracapacitor as control variables, the fuel economy and emission performance as objective function, *the Dynamic Programming (DP) control strategy for HEV with hybrid power is proposed. The working rules of the engine, motor, battery and ultracapacitor, are extracted from the results, and the rules of engine and motor and the fuzzy control of storage battery and supercapacitor are optimized.* The simulation results showed that the fuel economy performance and emission performance is increased by 13% and 27.74% respectively compared with the original control strategy, which proves the accuracy and validity of proposed control strategy for HEV with hybrid power.

Keywords

HEV, hybrid power, energy management, control optimization, simulation

Recommended Citation

Deng Tao, Yu Haoyuan, Xu Bin. Control Optimization of Hybrid System with Hybrid Power Based on DP Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(9): 1860-1867.

基于 DP 算法的复合电源混合动力系统控制优化

邓涛, 余浩源, 徐彬

(重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

摘要: 针对复合电源混合动力系统能量管理的复杂多样性, 以蓄电池和超级电容的荷电状态为状态变量, 以发动机、电机的转矩分配比和蓄电池、超级电容的功率分配比为控制变量, 将发动机燃油经济性和排放性作为目标函数, 提出基于动态规划算法(Dynamic Programming)的复合电源混合动力系统控制策略, 从结果中提取发动机、电机、蓄电池和超级电容工作规律, 对发动机、电机的规则控制和蓄电池、超级电容的模糊控制进行优化。结果表明: 通过 DP 算法优化后的系统发动机燃油经济性和排放性比原系统分别提高了 13% 和 27.74%, 说明优化后的控制的正确性和有效性。

关键词: 混合动力; 复合电源; 能量管理; 控制优化; 仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2019)09-1860-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0312

Control Optimization of Hybrid System with Hybrid Power Based on DP Algorithm

Deng Tao, Yu Haoyuan, Xu Bin

(School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

Abstract: Aiming at the complexity and diversity of energy management for HEV(hybrid electric vehicle) with hybrid power, taking the State of Charge of power battery and ultracapacitor as state variable, the torque distribution ratio between engine and motor, and the power distribution ratio between power battery and ultracapacitor as control variables, the fuel economy and emission performance as objective function, the Dynamic Programming (DP) control strategy for HEV with hybrid power is proposed. The working rules of the engine, motor, battery and ultracapacitor, are extracted from the results, and the rules of engine and motor and the fuzzy control of storage battery and supercapacitor are optimized. The simulation results showed that the fuel economy performance and emission performance is increased by 13% and 27.74% respectively compared with the original control strategy, which proves the accuracy and validity of proposed control strategy for HEV with hybrid power.

Keywords: HEV; hybrid power; energy management; control optimization; simulation

引言

复合电源混合动力系统能量管理有两个核心

问题: 一是动力系统功率分配问题, 即发动机和电机的功率分配, 以发动机在中高速下高效率运行和电机在启动、加速和爬坡等条件下作为辅助能源的基本原则^[1], 充分利用发动机和电机的各自特性, 实现整车燃油经济性和排放性的提高; 二是复合电源系统功率分配问题, 即蓄电池和超级电容的功率分配, 充分利用蓄电池高比能量和超级电容高比功率的特点^[2], 提高蓄电池循环使用寿命, 更有效的



收稿日期: 2017-06-30 修回日期: 2017-08-24;
基金项目: 国家自然科学基金(51305473), 中国博士后科学基金(2014M552317), 重庆市博士后研究人员科研项目(xm201432);
作者简介: 邓涛(1982-), 男, 江西, 博士, 教授, 研究方向为混合动力电动汽车控制; 余浩源(1994-), 男, 重庆, 硕士生, 研究方向为建模仿真; 徐彬(1990-)男, 江苏, 硕士生, 研究方向为混合动力汽车能量管理。

<http://www.china-simulation.com>

• 1860 •

回收制动能量, 达到提高整车燃油经济性的目的。

目前控制策略主要有基于规则控制策略^[3-4]、基于优化控制策略^[5-7]和基于自适应^[8]控制策略。如果在循环工况已知的条件下, 就是一个确定性动态系统的最优控制问题^[9], 可以采用基于优化控制策略可以采用基于优化控制策略中的全局优化, 如动态规划(Dynamic Programming)^[10-11]。由于动态规划方法对系统状态变量和目标函数没有太多限制, 适合发动机和电机等基于试验数据的数值模型, 且动态规划的迭代算法也适合用计算机来求解^[12]。因此, 本文建立复合电源混合动力系统动态规划模型, 将蓄电池和超级电容的荷电状态作为状态变量, 发动机、电机的转矩分配比和蓄电池、超级电容的功率分配比作为控制变量, 以发动机燃油经济性和排放性作为目标函数, 利用粗网格和插值法对维度进行简化, 先逆序求出各阶段代价矩阵, 再正序求出全局最优解。

1 研究对象

选取某款并联式复合电源混合动力汽车为研究对象, 结构如图 1 所示, 参数如表 1 所示。

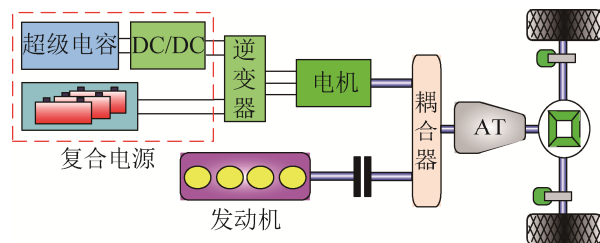


图 1 复合电源混合动力系统结构

Fig. 1 Structure of Hybrid System with Hybrid Power

2 复合电源系统动态规划控制

2.1 优化问题的建立

对于动态规划而言, 往往处理的问题都是离散化问题^[13], 因此要把复合电源混合动力系统离散化, 其系统方程为。

$$\mathbf{X}_{k+1} = T_k(\mathbf{X}_k, \mathbf{U}_k) \quad (1)$$

式中: k 为系统阶段; \mathbf{X}_k 为第 k 阶段系统状态向量; \mathbf{U}_k 为第 k 阶段系统决策向量。

表 1 整车参数和性能指标

Tab. 1 Vehicle parameters and technical indicators		
结构	参数	数值
整车	整车质量/kg	1750
	滚动阻力系数	0.009
	空气阻力系数	0.31
	迎风面积/m ²	2
发动机 (FC-SI41-emis)	最大功率/kW	62
	最大扭矩/Nm	105
电机 (MC-AC75)	最大功率/kW	60
	最大转速/(r·min ⁻¹)	7000
传动系统	传动系统效率/%	90
蓄电池 (NIMH)	额定电压/V	120
	额定容量/(A·h)	60
超级电容 (UC2-Maxwell)	额定电压/V	180
	额定容量/F	2 500
技术指标	最高车速/(km·h ⁻¹)	180
	15 km/h 最大爬坡度/%	30
	0~100 km/h 加速时间/s	12

动态规划算法是在循环工况已知前提下进行的, 选用 NEDC 循环工况, 首先从循环工况中读取需求车速, 换算成车轮需求转矩为:

$$T_v = (F_f + F_w + F_i + F_j)r \quad (2)$$

式中: F_f 为滚动阻力; F_w 为空气阻力; F_i 为坡度阻力; F_j 为加速阻力; r 为车轮半径。

经过主减速器和变速箱换算成需求转速和需求转矩, 动力系统的工况需求转矩为:

$$T_g = \begin{cases} \frac{T_v}{i_0 i_g \eta}, & T_v > 0 \\ \frac{T_v}{i_0 i_g \eta}, & T_v < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_0 为主减速器传动比; i_g 为变速器传动比; η 为传动效率。

发动机阻力矩和电机阻力矩分别为:

$$T_{e0} = I_e \alpha_e \quad (4)$$

$$T_{m0} = I_m \alpha_m \quad (5)$$

式中: I_e 为发动机转动惯量; α_e 为发动机曲轴角加速度; I_m 为电机转动惯量; α_m 为电机角加速度。

因此, 总需求转矩为:

$$T_{tot} = \begin{cases} T_g + T_c, & T_e = 0, T_m = 0 \\ T_g + T_c + T_{e0}, & T_e \neq 0, T_m = 0 \\ T_g + T_c + T_{e0} + T_{m0}, & T_e \neq 0, T_m \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中： T_c 为转矩耦合器的阻力矩； T_e 为发动机提供的转矩； T_m 为电机提供的转矩。

为了简化模型，忽略发动机启停对油耗的影响。要获得发动机的燃油经济性和排放性指标，可以通过发动机的燃油消耗量和排放量(转速和转矩的函数关系)，二维表插值得到发动机的瞬时燃油

消耗和 CO、HC 和 NO_x 的尾气排放，如图 2 所示，此时忽略发动机的动态响应和温度效应的影响。

忽略复杂的电机电磁学和温度效应等，只考虑电机的机械特性。根据电机的效率是电机转速和转矩的函数关系，可得到电机的效率，如图 3 所示。

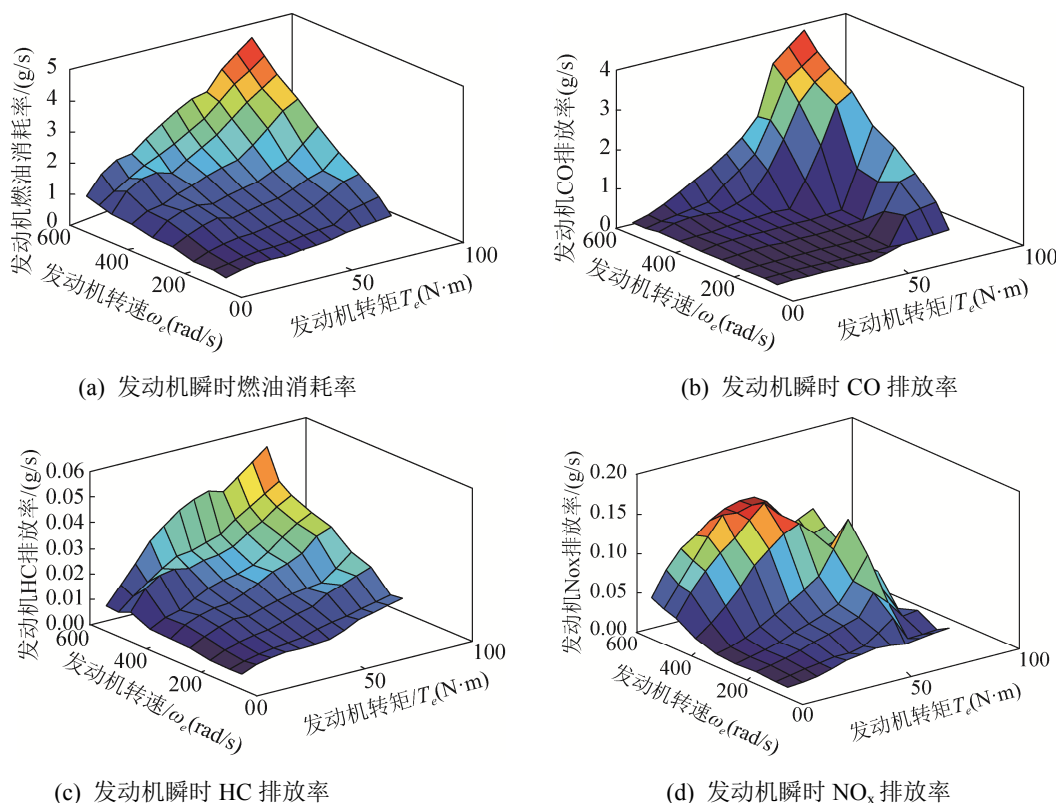


图 2 发动机瞬时燃油消耗率和排放率

Fig. 2 Engine instantaneous fuel consumption rate and emission ratio

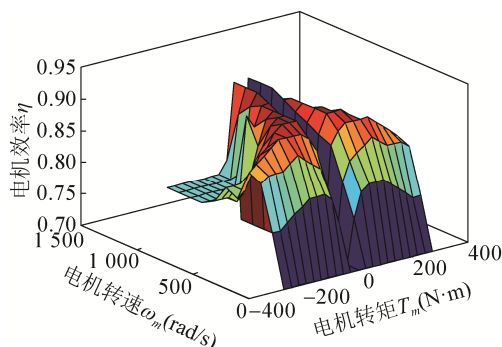


图 3 电机效率

Fig. 3 Motor efficiency

忽略蓄电池复杂的电化学反应和温度效应的影响，可计算蓄电池下一阶段的荷电状态为：

$$SOC_b(k+1) = f(SOC_b(k), P_b) \quad (7)$$

忽略超级电容复杂的电化学反应和温度效应

的影响，可计算超级电容下一阶段的荷电状态为：

$$SOC_u(k+1) = f(SOC_u(k), P_u) \quad (8)$$

2.2 动态规划模型

动态规划(Dynamic Programming, DP)算法一般分成 5 步^[14]：划分阶段、选择状态决策变量、确定状态转移方程、确定代价函数和建立目标函数。

(1) 阶段的划分

考虑阶段数越多计算量越大的问题，针对 NEDC 工况，设置每一秒为一个采样点，总共就有 1 185 个采样点，则系统阶段为 $k=0, 1, \dots, n$ 。

(2) 状态变量和决策变量的选择

选择蓄电池的荷电状态 SOC_b 和超级电容的荷

电状态 SOC_u 作为本系统动态规划模型的状态变量。决策变量也叫控制变量, 控制状态变量变化。

对于发动机和电机组成的动力系统, 选用一个取值范围在 $[-1, 1]$ 的 u_1 控制变量来简单有效分配发动机转矩、电机转矩和制动转矩, 如式(9)所示。

$$\begin{cases} T_e = (1-u_1)T_{tot}, & \omega_e > 0, T_{tot} > 0 \\ T_b = (1-u_1)T_{tot}, & \omega_e > 0, T_{tot} < 0 \\ T_m = u_1T_{tot}, & \omega_e > 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: T_b 为制动器制动力矩; ω_e 为曲轴转速。

当 $u_1=1$ 时, 电机单独提供动力; 当 $u_1=0$ 时, 若动力系统的总需求转矩大于 0, 则发动机单独提供动力, 否则制动器独自消耗制动能量; 当 u_1 在 $(0, 1)$ 之间时, 若动力系统的总需求转矩大于 0, 则发动机和电机共同提供动力, 否则制动器和电机共同消耗动力系统的总需求转矩; 当 u_1 在 $(-1, 0)$ 之间时, 若动力系统的总需求转矩大于 0, 则发动机单独提供动力, 还要给复合电源充电, 否则不可行。

对于蓄电池和超级电容组成的复合电源系统, 本文选用一个取值范围在 $[0, 1]$ 的 u_2 控制变量来分配蓄电池和超级电容的功率。蓄电池和超级电容的功率分配公式如下:

$$\begin{cases} P_b = u_2P_m \\ P_u = (1-u_2)P_m \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_b 为蓄电池提供功率; P_u 为超级电容提供功率; P_m 为电机提供功率。

当 $u_2=1$, 蓄电池单独提供电机需求功率; 当 $u_2=0$, 超级电容单独提供电机需求功率; 当 u_2 在 $(0, 1)$ 之间, 蓄电池和超级电容共同提供需求功率。

通过以上分析, 复合电源混合动力系统动态规划模型的状态变量和控制变量分别为:

$$X(k) = \begin{bmatrix} SOC_b(k) \\ SOC_u(k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $SOC_b(k)$ 为第 k 阶段蓄电池荷电状态; $SOC_u(k)$ 第 k 阶段超级电容荷电状态。

$$U(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $u_1(k)$ 为第 k 阶段动力系统转矩分配系数; $u_2(k)$ 为第 k 阶段复合电源系统功率分配系数。

状态变量和控制策略满足下列约束条件:

$$\begin{cases} SOC_{bmin} \leq SOC_b(k) \leq SOC_{bmax} \\ SOC_{umin} \leq SOC_u(k) \leq SOC_{umax} \\ SOC_b(0) = SOC_b(n) \\ SOC_u(0) = SOC_u(n) \\ \omega_{emin} \leq \omega_e(k) \leq \omega_{emax} \\ \omega_{min} \leq \omega_m(k) \leq \omega_{max} \\ T_{emin} \leq T_e(k) \leq T_{emax} \\ T_{min} \leq T_m(k) \leq T_{max} \\ P_{bmin} \leq P_b(k) \leq P_{bmax} \\ P_{umin} \leq P_u(k) \leq P_{umax} \end{cases} \quad (13)$$

式中: SOC_{bmin} 、 SOC_{bmax} 分别为蓄电池最小、最大荷电状态; SOC_{umin} 、 SOC_{umax} 分别为超级电容最小、最大荷电状态; $SOC_b(0)$ 、 $SOC_b(n)$ 分别为蓄电池始末荷电状态; $SOC_u(0)$ 、 $SOC_u(n)$ 分别为超级电容始末荷电状态; ω_{emin} 、 ω_{emax} 分别为发动机最小、最大转速; ω_{min} 、 ω_{max} 分别为电机最小、最大转速; T_{emin} 、 T_{emax} 分别为发动机最小、最大转矩; T_{min} 、 T_{max} 分别为电机最小、最大转矩; P_{bmin} 、 P_{bmax} 分别为蓄电池最小、最大功率; P_{umin} 、 P_{umax} 分别为超级电容最小、最大功率。

(3) 状态转移方程的确定

两个状态变量对应两个状态转移方程: 蓄电池荷电状态转移方程和超级电容荷电状态转移方程。

蓄电池荷电状态转移方程为:

$$\begin{cases} SOC_b(k+1) = SOC_b(k) - \frac{I_b(k)}{3600C_b} \\ I_b = \frac{V_{boc} - \sqrt{V_{boc}^2 - 4R_bP_b}}{2R_b} \eta_b \end{cases} \quad (14)$$

式中: I_b 为蓄电池电流; C_b 为蓄电池最大容量; V_{boc} 为蓄电池开路电压; R_b 为蓄电池充放电内部电阻; η_b 为蓄电池充放电效率。

超级电容荷电状态转移方程为:

$$\begin{cases} SOC_u(k+1) = \frac{(V_{uoc}(k) - V_{umin})C_u - I_u(k)}{(V_{umax} - V_{umin})C_u} \\ I_u = \frac{V_{uoc} - \sqrt{V_{uoc}^2 - 4R_uP_u}}{2R_u} \eta_u \end{cases} \quad (15)$$

式中: V_{uoc} 为单体超级电容开路电压; V_{umax} 为单体

超级电容最大工作电压； $V_{u\min}$ 为单体超级电容最小工作电压； I_u 为超级电容电流； C_u 为单体超级电容最大容量； R_u 为超级电容充放电内部电阻； η_u 为超级电容充放电效率。

通过以上分析，复合电源混合动力系统的状态转移方程组为：

$$\begin{cases} SOC_b(k+1) = SOC_b(k) - \frac{I_b(k)}{3600C_b} \\ SOC_u(k+1) = \frac{(V_{uoc}(k) - V_{u\min})C_u - I_u(k)}{(V_{u\max} - V_{u\min})C_u} \end{cases} \quad (16)$$

(4) 各阶段代价函数的确定

当系统处在 k 阶段时，在状态变量组已知的情况下，每一组的控制变量就会产生一个代价，称为阶段代价，记为 $v_k(x_k, u_k)$ 。为了提高整车燃油经济性和排放性，选择代价函数为：

$$v_k(x_k, u_k) = \alpha f_k(x_k, u_k) + \beta e_k(x_k, u_k) \quad (17)$$

式中： $f_k(x_k, u_k)$ 为第 k 阶段发动机瞬时燃油消耗量，通过前文二维查表等计算可获得； $e_k(x_k, u_k)$ 为第 k 阶段瞬时发动机排放量； α 、 β 分别为燃油经济性和排放性的权重因子。

第 k 阶段的瞬时发动机排放量为：

$$e_k(x_k, u_k) = 5H_k(x_k, u_k) + 5N_k(x_k, u_k) + C_k(x_k, u_k) \quad (18)$$

式中： $H_k(x_k, u_k)$ 为第 k 阶段 HC 瞬时排放量； $N_k(x_k, u_k)$ 为第 k 阶段 NO_x 瞬时排放量； $C_k(x_k, u_k)$ 为第 k 阶段 CO 瞬时排放量。三者均通过前文二维查表等计算可获得。

(5) 目标函数的建立

目标函数是衡量整个系统在执行某一策略所产生效果的优劣程度函数，对于本系统，它就是各阶段代价值的和。所以复合电源混合动力系统的目标函数为：

$$J_k(x_k) = \alpha \sum_{i=0}^k f_i(x_i, u_i) + \beta \sum_{i=0}^k e_i(x_i, u_i) \quad (19)$$

3 基于 DP 规则提取的控制策略

3.1 基于 DP 改进的动力系统控制策略

在原车采用的是电机辅助策略，即基于规则的

逻辑门限控制策略。本文通过动态规划模型寻找到的全局最优解，分析其结果，找到动力系统工作规律，对逻辑门限控制策略进行优化。

图 4 为动态规划系统中发动机和电机的工作点分布。当车速在 10 km/h 以下时，主要以电机来提供所需转矩；当车速大于 10 km/h 时，发动机主要工作在 40~60 N·m 之间，不足由电机来提供；全程放电区间，电机所提供的转矩基本都在 20 N·m 以下，而充电区间电机转矩波动较剧烈，充分体现了制动时复合电源回收制动能量的能力强。

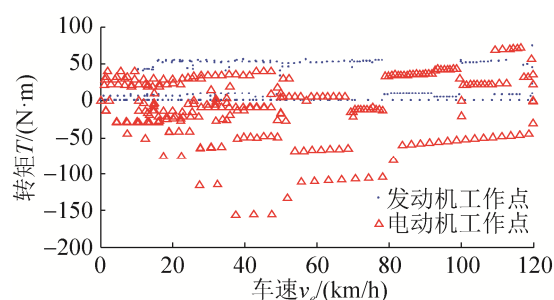


图 4 动态规划系统中发动机和电机的工作点分布
Fig. 4 The working point distribution of engine and motor

由此得到对电机辅助规则策略优化的规律：起步阶段采用纯电动驱动，而且车速低于 10 km/h 时，主要以电机来提供转矩；在车速高于 10 km/h 时，尽量使发动机在 40~60 N·m 区间工作，不足转矩由电机来提供，多余转矩用于给复合电源充电；制动时，复合电源系统尽量多回收制动能量。

3.2 基于 DP 改进的复合电源系统控制策略

为了分析动态规划最优解中复合电源最佳工作状态，可以通过蓄电池和超级电容在不同车速下所提供的功率比例来分析。定义蓄电池功率比 R_b 和超级电容功率比 R_u ：

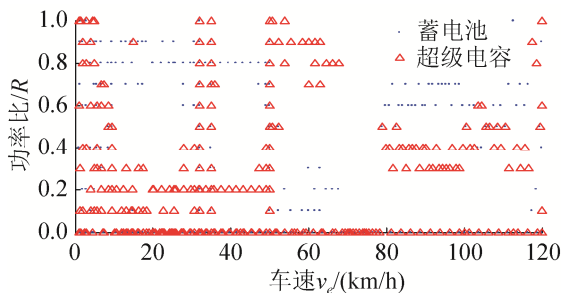
$$\begin{cases} R_b = \frac{|P_b|}{|P_b| + |P_u|} \\ R_u = \frac{|P_u|}{|P_b| + |P_u|} \end{cases} \quad (20)$$

图 5 为复合电源充放电时，蓄电池和超级电容提供的功率比分布情况。不仅包括复合电源放电提供能量，还包括制动时和发动机提供能量给复合电

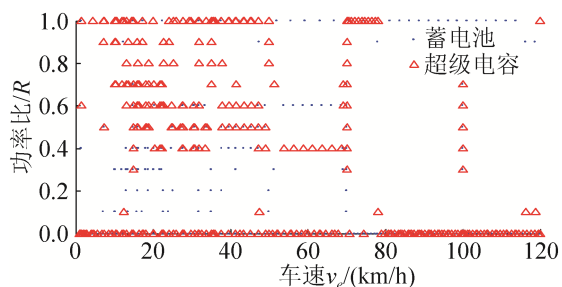
源充电情况。制动时, 只要复合电源荷电状态没满就给复合电源充电。

在复合电源放电时, 蓄电池放电功率比要大于超级电容, 以蓄电池放电为主; 当车速大于 80 km/h 时, 蓄电池和超级电容放电功率比相差不大。在复合电源充电时, 超级电容的充电功率比大于蓄电池, 以超级电容充电为主。在车速 70~80 km/h 时, 超级电容单独充电; 在车速大于 80 km/h 时, 以蓄电池充电为主。

通过以上分析, 得到复合电源系统优化规律: 复合电源放电时, 当车速低于 70 km/h 时, 以蓄电池放电为主; 当车速大于 70 km/h 时, 超级电容和蓄电池共同比例提供。复合电源充电时, 当车速低于 70 km/h 时, 以超级电容充电为主, 大部分的再生制动能量由超级电容来吸收; 当车速大于 70 km/h 时, 以蓄电池充电为主, 为了使蓄电池达到设定的荷电状态值。



(a) 复合电源放电时, 蓄电池和超级电容工作点分布



(b) 复合电源充电时, 蓄电池和超级电容工作点分布

图 5 充放电时蓄电池和超级电容提供的功率比分布
Fig. 5 The power ratio distribution of battery and ultracapacitor when charging and discharging

4 仿真分析

通过从动态规划算法仿真的结果提取规律, 分

别对发动机、电机的动力系统和蓄电池、超级电容的复合电源系统的控制策略做了相应优化, 对仿真结果进行对比分析, 如表 2 所示。

表 2 3 种系统下燃油经济性和排放性对比
Tab. 2 Comparison of fuel consumption and emission

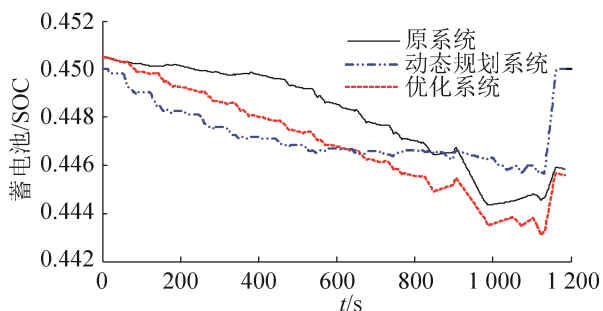
系统分类	油耗/ (L·100 km ⁻¹)	发动机排放/ (g·km ⁻¹)
原系统	6.654	32.7560
动态规划系统	5.401 (18.83%↓)	15.4493 (52.84%↓)
优化系统	5.789 (13%↓)	23.6681 (27.74%↓)

通过优化后的复合电源混合动力系统燃油经济性和排放性比原系统分别提高了 13% 和 27.74%。可以看出, 优化后的复合电源混合动力系统在燃油经济性和排放性上得到了较大提升, 验证了动态规划系统对复合电源混合动力系统的优化具有指导意义。但相对于动态规划系统还是有一定差距, 这是因为动态规划方法求得的是全局最优解, 而规则控制方法很难达到最优。动态规划方法计算量大不适用与实车控制, 而规则方法简单易于实车控制。

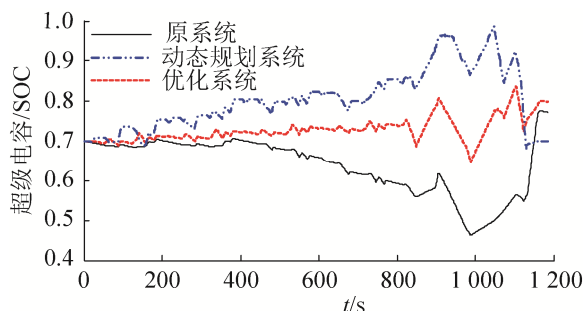
图 6 为 3 种系统下蓄电池 SOC 和超级电容 SOC 的变化情况。可以看出, 优化系统蓄电池 SOC 的始末值差在 0.005 之间, 满足蓄电池荷电状态平衡要求。优化系统的蓄电池 SOC 和超级电容 SOC 的变化在原系统和动态规划系统之间, 更接近动态规划系统的最优解, 相对原系统有很大提升。

图 7 为 2 种系统下蓄电池电流变化情况。优化后电流变化更加合理有效, 起伏波动相对于原系统更加均匀。最大充放电电流比原系统要大, 这是因为优化系统中电机提供的需求功率要比原系统的大, 为了使发动机能够更好的工作在高效区域, 提高发动机燃油经济性。

图 8 为优化系统中发动机和电机的转矩分布情况。可以看出, 发动机转矩主要工作在 40 N·m 和 60 N·m 之间, 电机作为辅助只提供很少的转矩, 减少发动机在低转矩或高转矩下低效率区域工作, 回收更多的制动能量, 与动态规划系统最优解相吻合。



(a) 3 种系统下蓄电池 SOC 对比



(b) 3 种系统下超级电容 SOC 对比

图 6 不同权重系数下蓄电池和超级电容电荷状态变化
Fig. 6 SOC of battery and super capacitance for different weight coefficients

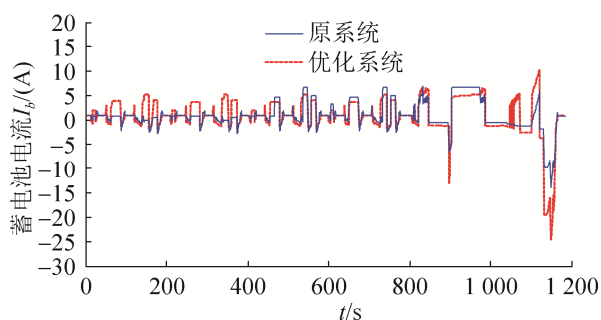


图 7 2 种系统下蓄电池电流变化
Fig. 7 Battery current of the two systems

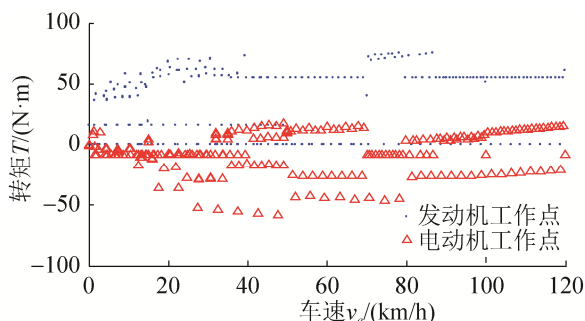
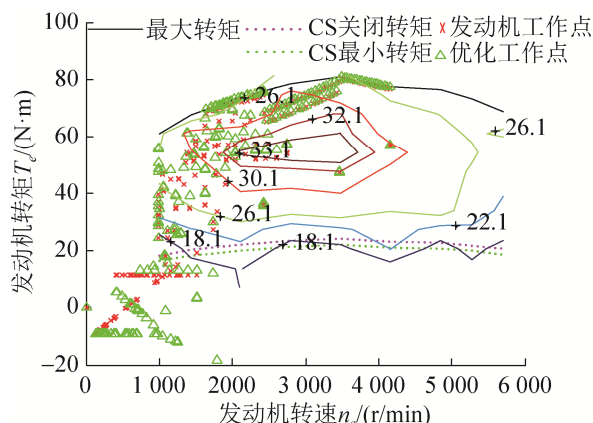


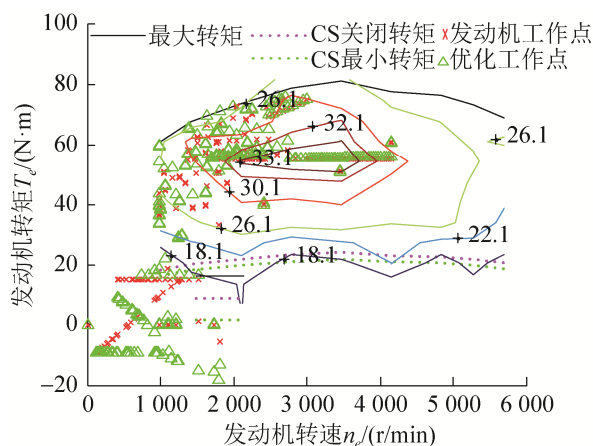
图 8 优化系统中发动机和电机工作点分布
Fig. 8 The working point distribution of engine and motor

图 9 为原系统和优化系统的发动机工作效率点

对比。可以看出，优化系统发动机工作在 33.1% 高效区的点明显增多，这些点是发动机转矩在 40 N·m 和 60 N·m 之间工作所产生的。发动机平均效率由原系统的 25.38% 提高到 26.82%，这是整车燃油经济性提高原因所在，说明通过动态规划系统提取规律优化后的复合电源混合动力系统工作更加高效。



(a) 原系统发动机工作效率点分布



(b) 优化系统发动机工作效率点分布

图 9 2 种系统下发动机工作效率点对比
Fig. 9 Comparison of engine efficiency points

5 结论

(1) 对发动机、电机、蓄电池、超级电容等模型进行简化，建立复合电源混合动力系统动态规划模型，把蓄电池和超级电容的荷电状态作为状态变量，发动机、电机的转矩分配比和蓄电池、超级电容的功率分配比作为控制变量，以发动机燃油经济性和排放性作为目标函数，通过状态方程转移函数和目标函数求出各阶段代价矩阵。

(2) 优化结果表明, 在满足约束条件和主要性能指标情况下。通过优化后的复合电源混合动力系统发动机燃油经济性和排放性比原系统分别提高了 13% 和 27.74%。

(3) 优化系统得到蓄电池和超级电容的电流要大于原系统的电流, 这就说明动态规划中电机提供的需求功率要比原复合电源系统大, 使发动机能够更好地工作在高效区域, 是提高燃油经济性的原因所在。

参考文献:

- [1] 于远彬. 车载复合电源设计理论与控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Yu Yuanbin. Study on the Design Theory and Control Method Issues of Synergic Electric Power System on Bus [D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [2] Wang L, Li H. Maximum Fuel Economy-Oriented Power Management Design for a Fuel Cell Vehicle Using Battery and Ultracapacitor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications (S0093-9994), 2010, 46(3): 1011-1020.
- [3] 秦大同, 叶心, 胡明辉, 等. ISG 型中度混合动力汽车驱动工况控制策略优化[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 86-92.
Qin Datong, Ye Xin, Hu Minghui, et al. Optimization of Control Strategy for Medium Hybrid Electric Vehicle with ISG at Drive Condition [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 86-92.
- [4] 曲晓冬. 混合动力车用复合电源匹配与控制理论研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
Qu Xiaodong. Research on Matching and Control Theory of Hybrid Power Supply for Hybrid Electric Vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [5] 王琪. 混合动力汽车复合电源能量管理系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
Wang Qi. Research on Energy Management System of Hybrid Power Supply [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015.
- [6] Gao J P, Zhu G M G, Strangas E G, et al. Equivalent fuel consumption optimal control of a series hybrid electric vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, (S0954-4070), 2009, 223(8): 1003-1018.
- [7] 魏寒冰, 秦大同, 段志辉, 等. 重度混合动力汽车燃油经济性和排放性多目标优化[J]. 汽车工程, 2011, 33(11): 937-941.
Wei Hanbin, Qin Datong, Duan Zhihui, et al. Multi-objective Optimization for the Fuel Economy and Emissions of Full Hybrid Electric Vehicle[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(11): 937-941.
- [8] Abdul-Hak M, Al-Holou N. ITS based Predictive Intelligent Battery Management System for plug-in Hybrid and Electric vehicles[C]. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC '09). Dearborn, MI, USA: IEEE. IEEE Xplore, 2009: 138-144.
- [9] 吴沧浦, 夏元清, 杨毅. 最优控制的理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
Wu Cangpu, Xia Yuanqing, Yang Yi. The Theory and Method of Optimal Control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [10] 张炳力, 张平平, 赵韩, 等. 基于离散动态规划的 PHEV 燃油经济性全局最优控制[J]. 汽车工程, 2010, 32(11): 923-927.
Zhang Bingli, Zhang Pingping, Zhao Han, et al. Fuel Economy Global Optimal Control of PHEV Based on Discrete Dynamic Programming[J]. Automotive Engineering, 2010, 32(11): 923-927.
- [11] Bin Y, Reama A, Cela A, et al. On Fast Dynamic Programming for Power Splitting Control of Plug-In Hybrid Electric Vehicles[C]. Dsc 2009. Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Conference, Hollywood, California, USA: Dynamic Systems and Control Division, 2009: 229-236.
- [12] 张潇华. 插电式混合动力汽车复合电源系统集成优化方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
Zhang Xiaohua. Research on Integrated Optimization Method of Hybrid Power System for Plug-in Hybrid Electric Vehicle [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [13] 张炳力, 代康伟, 赵韩, 等. 基于随机动态规划的燃料电池城市客车能量管理策略优化[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(17): 4664-4667.
Zhang Bingli, Dai Kangwei, Zhao Han, et al. Optimized Energy Management Strategy for Fuel Cell City Bus Based on Stochastic Dynamic Programming [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(17): 4664-4667.
- [14] 滕宇, 梁方楚. 动态规划原理及应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2011.
Teng Yu, Liang Fangchu. Dynamic Programming Principles and Applications [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2011.