

基于二次型性能指标的混合动力汽车实时优化控制

夏超英[†], 张 聪

(天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 为解决混合动力系统实时优化控制问题, 本文提出了一种基于二次型性能指标最优的混合动力汽车功率分配优化方案. 通过合理的假设和近似, 建立了混合动力系统的线性模型, 并利用二次型最优控制理论将混合动力最优控制问题转化为二次型最优调节问题进行求解, 得到了一个结构简单的实时优化控制算法. 5种道路工况下的仿真结果表明, 本文提出的控制方法在未来道路工况未知的情况下能够实现混合动力系统的实时优化控制, 且节油率与离线计算以燃油消耗最小为性能指标的全局最优控制的节油率相近.

关键词: 二次型最优控制; 实时控制; 混合动力汽车

中图分类号: U463 文献标识码: A

Real-time optimization control for hybrid electric vehicles based on quadratic performance index

XIA Chao-ying[†], ZHANG Cong

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to solve the real-time optimization control problem for hybrid electric vehicles (HEVs), this paper proposes an optimal power split scheme based on the quadratic performance index optimization. Under several assumptions and approximations, a linear model of HEV is established. The control problem of HEVs is transformed to a quadratic optimal regulating problem, from which a real-time optimization control with simple construction is obtained. Simulation results under five driving cycles show that the proposed real-time method can achieve the optimization control for HEVs with the future driving conditions unknown. Furthermore, the fuel economy of this real-time method is found to be very close to that of the global optimal control calculated off-line aiming to minimize fuel consumption.

Key words: quadratic optimal control; real-time control; hybrid electric vehicle

1 引言(Introduction)

随着全球工业化程度的加深, 资源紧缺和环境问题日益严重, 使混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)逐渐成为重要的节能技术之一. HEV能量管理策略需要在保证车辆驾驶性能和电池荷电状态(state of charge, SOC)的同时, 协调发动机和电机间的能量流动以实现提高燃油经济性的目标, 是HEV发展和应用的关键性技术之一.

目前, 应用最为广泛的HEV能量管理策略是逻辑门限值控制方法^[1]. 这种方法通过设定电池SOC、汽车速度、需求转矩以及发动机转速和转矩等状态量的门限值来分配发动机和电机功率, 使发动机工作在最佳效率区. 随后, 有研究采用模糊控制解决HEV问题中扭矩分配的问题^[2]. 上述两种方法都是根据工程师的经验和知识来设定控制规则, 无法保证整体效率的最优. 为解决这一问题, 提出了以瞬时燃油消耗最小为性能指标的等效燃油消耗最小策略(equivalent con-

sumption minimization strategy, ECMS)^[3-4]. ECMS利用等效因子将每一时刻电池消耗的能量折算成等效油耗, 通过使发动机实际油耗和等效油耗之和最小来实现瞬时优化. 通常, ECMS的等效因子需要结合具体工况进行计算^[5], 对道路工况的依赖性较强. 为提高其对实际道路工况的适应性, 可对其进行在线估计或修正, 但需要通过通信设备收集未来的道路工况信息^[6-7], 没有实现真正意义上的实时控制. 从最优控制理论出发, 文献[8-9]提出了在已知工况的条件下, 采用动态规划(dynamic programming, DP)解决HEV全局最优能量管理问题, 但这种方法求解过程的计算量很大. 为了克服这个缺点, 可采用基于庞特里亚金最小值原理(Pontryagin's minimum principle, PMP)的方法来代替DP. 研究表明当电池SOC小范围变化时, 电池动态方程引入的协态变量为常值, 此时利用PMP可以得到全局最优解^[10]. 尽管DP和PMP能够提供全局

最优解,但付出的代价是要预知道路况的全部信息,这在实际中是十分困难的.因此,上述两种方法只能先结合典型工况进行离线计算,然后将结果进行简化处理或规则提取后应用到相应工况下行驶的汽车中,其效果不仅依赖于实际工况和典型工况的一致性程度,还和规则提取的质量紧密关联,只能做到次优.

本文将二次型性能指标最优算法用于HEV的优化控制问题,以得到简单的实时优化控制算法.为此,本文首先通过合理的近似简化,推导了以功率为控制量的HEV系统的线性模型,构造了一个二次型形式的性能指标,利用无限长时间调节器问题中黎卡提方程的解为常值的特点,并结合规则得到了定常的反馈控制律.最后,通过在不同工况下实时优化控制算法和以燃油消耗最小为性能指标的全局最优控制方法的对比仿真实验,验证了本文提出的实时优化控制在道路工况未知情况下的有效性.

2 基本假设(Basic assumptions)

本文对HEV能量分配控制的研究,基于以下几点基本假设:

1) 对于给定的发动机功率 $P_{ice}(t)$,通过无级变速器(continuously variable transmission, CVT)连续地改变传动比来调整发动机的工作点 $[\omega_{ice}(t), T_{ice}(t)]$,使其运行在燃油消耗最小的最优工作曲线上^[10];

2) 电机驱动系统具有足够的短时过载(过转矩或过功率)能力和弱磁调速范围,高效工作区宽广,可以满足控制算法对电机转矩和功率的需求,即在相当大的功率输出范围内,电机驱动系统的效率对于变速比调整引起的电机工作点的变化并不敏感;

3) 电池SOC在小范围内变化,其充放电效率始终维持在高水平^[5];

4) 与车辆加减速时间和电池充放电时间相比,发动机和电动机的动态响应时间很小,故忽略发动机和电动机的动态过程,只采用它们的静态效率模型^[11].

图1给出了符合上述假设条件的HEV动力耦合系统的例子.

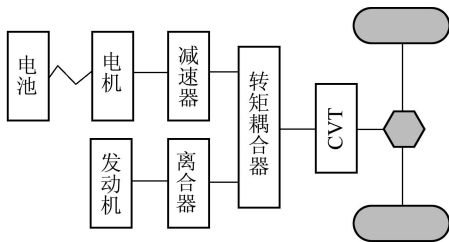


图1 并联混合动力系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of parallel hybrid electric vehicle

在实际过程中,将汽车踏板位置看作目标车速.实时控制算法根据目标车速和实际车速以及期望SOC和实际SOC计算出相应的发动机功率 $P_{ice}^*(t)$ 和电机功率 $P_{ess}^*(t)$,通过对发动机节气门和电机转矩的联调,

使发动机工作在由燃油消耗最小的最优工作曲线决定的最优工作点 $[T_{ice}^*(t), \omega_{ice}^*(t)]$ 上,且 $T_{ice}^*(t) \times \omega_{ice}^*(t) = P_{ice}^*(t)$,同时,电机转速由 $\omega_{ice}^*(t)$ 及传动机构的变速比决定,电机的转矩和转速的乘积等于电机功率 $P_{ess}^*(t)$.

3 对象参数和线性化模型的获取(Acquisition of object parameters and the linear model)

本文仿真实验针对的实际对象来自ADVISOR仿真软件中的HEV模型,主要技术参数如表1所示.其中,发动机为FC_SI41.emis,根据其效率MAP得到的发动机最优工作曲线如图2所示.

表1 HEV参数

Table 1 Parameters of HEV

汽车总重	1287 kg
发动机最大功率	41 kW
储能系统容量/电压	12 Ah/320 V
电机最大功率	49 kW
迎风面积	2.0 m ²
空气阻力系数	0.335
滚动阻力系数	0.009

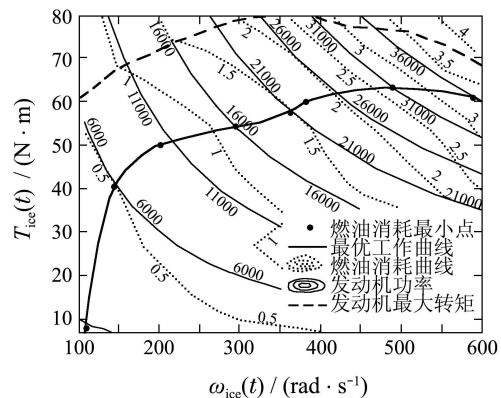


图2 发动机最优工作曲线

Fig. 2 Optimal operating line of the engine

根据假设1),发动机始终运行在燃油消耗最佳曲线上,此时其输出功率与燃油消耗率之间的关系为 $\dot{m}(P_{ice}(t))$ (如图3),仿真中涉及的控制算法的燃油消耗都是通过对整个工况下 $\dot{m}(P_{ice}(t))$ 曲线的积分得到的.

为应用二次型最优理论解决HEV系统能量分配问题,本文建立了HEV线性模型.在实际过程中,质量为 M 的HEV,其运行速度 v 和牵引力 F 之间的关系为

$$M \frac{dv}{dt} + F_r = F, \quad (1)$$

其中 F_r 为汽车在行驶过程中受到的阻力.将式(1)的左右两端同时乘以 v ,可得到汽车的功率平衡方程

$$\frac{1}{2} M \frac{dv^2}{dt} + F_r v = P_{ice} + P_{ess}, \quad (2)$$

其中: P_{ice} 为发动机功率, P_{ess} 为电机系统功率. 汽车在实际运行过程中克服阻力所需的功率(式(2)中的 $F_r v$)和车速之间的关系如图4中点线所示. 利用MATLAB中的曲线拟合工具箱cftool可将上述点线近似为抛物线 $f v^2$, 即克服阻力所消耗的功率近似与车速的平方成正比, 结合表1中的汽车参数可得 $f = 17.23$, 则理想化线性汽车动力学模型为

$$\frac{1}{2}M \frac{dv^2}{dt} + f v^2 = P_{ice} + P_{ess}. \quad (3)$$

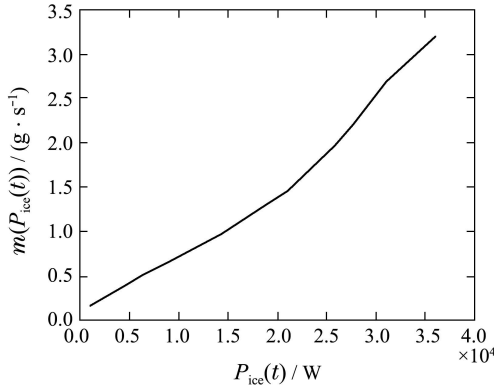


图3 发动机FC_SI41_emis的最佳燃油消耗曲线

Fig. 3 Optimal fuel consumption line of FC_SI41_emis

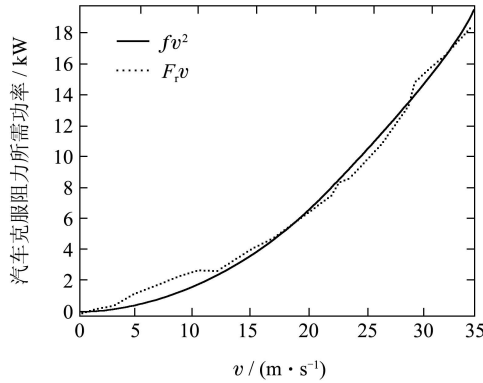


图4 汽车克服阻力所需功率与车速的关系

Fig. 4 Relation between vehicle velocity and the power to overcome resistance

另外, 储能系统由两个6 Ah/320 V镍氢电池组并联而成, 电池SOC状态量、电池开路电压 V 、电池总电量 E 及电池功率 $P_{bat}(t)$ 的关系为

$$\frac{dSOC(t)}{dt} \cdot E = - \frac{V(V - \sqrt{V^2 - 4RP_{bat}(t)})}{2R}. \quad (4)$$

当 $P_{bat}(t)$ 在 $[-30 \text{ kW}, 0]$ 和 $[0, 30 \text{ kW}]$ 区间内变化且电池 SOC 在 $[0.6, 0.8]$ 区间内变化时, 电池充放电效率 $P_{bat}(t) / (\frac{V(V - \sqrt{V^2 - 4RP_{bat}(t)})}{2R})$ 分别在 $[1.1056, 1]$ 和 $[1, 0.8026]$ 区间内变化 ($P_{bat}(t) \geq 0$ 表示电池放电, $P_{bat}(t) < 0$ 表示电池充电), 据此可将式(4)中的电池效率取为平均值

$$\eta_{bat} = \begin{cases} 0.9076, & P_{bat}(t) \geq 0, \\ 1.0545, & P_{bat}(t) < 0. \end{cases}$$

再根据假设2), 将电机效率 η_m 认为是常值, 则有

$$P_{bat}(t) = P_{ess}(t) / \eta_m \quad (5)$$

其中 $\eta_m = \begin{cases} 0.8816, & P_{bat}(t) \geq 0 \\ 1.1343, & P_{bat}(t) < 0 \end{cases}$, 则理想化线性电池电机系统模型为

$$\frac{dSOC(t)}{dt} \cdot E = - \frac{P_{ess}(t)}{\eta_{bat} \eta_m}. \quad (6)$$

若以 $x_1(t) = v^2(t)$, $x_2(t) = SOC(t) \cdot E$ 为状态量, 以 $u_1(t) = P_{ice}(t)$, $u_2(t) = P_{ess}(t)$ 为控制量, 由式(3)和式(6)可得HEV系统的状态方程为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (7)$$

其中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{2f}{M} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{2}{M} & \frac{2}{M} \\ 0 & -\frac{1}{\eta_{bat} \eta_m} \end{bmatrix}$, $\mathbf{x} =$

$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$, 此外, 根据实际意义, 系统中各个

变量需满足如下约束条件:

$$0 \leq P_{ice}(t) \leq P_{ice_max}, \forall t \in [t_0, t_f], \quad (8)$$

$$P_{ess_min} \leq P_{ess}(t) \leq P_{ess_max}, \forall t \in [t_0, t_f], \quad (9)$$

$$|\Delta SOC| = |SOC(t_f) - SOC(t_0)| \approx 0, \quad (10)$$

其中: P_{ice_max} 为发动机的最大功率, t_0 和 t_f 分别为初始和终点时刻, P_{ess_min} 和 P_{ess_max} 分别为电池电机系统的最大制动功率和最大驱动功率.

4 基于线性二次型调节器的实时优化控制 (Real-time optimization control based on the linear quadratic regulator (LQR))

由最优控制理论可知, 跟踪问题二次型最优控制的状态反馈律是时变的, 且是全程指令信号的函数, 因此只能通过离线计算得到. 而无限长时间调节问题的黎卡提代数方程解为常值, 能够得到定常的状态反馈控制律, 实现实时控制. 在下面的讨论中, 通过将图5所示的变速曲线近似成阶梯曲线的处理方法, 可以将跟踪问题转化为调节问题, 得到定常的实时反馈控制律.

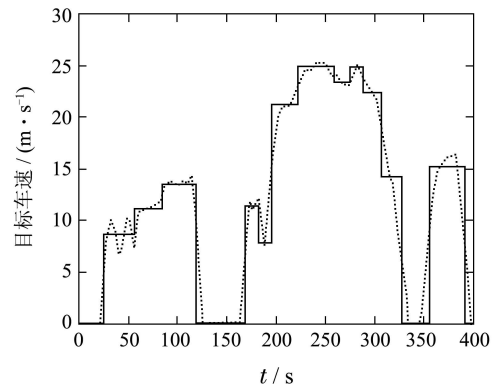


图5 道路工况的近似阶梯曲线

Fig. 5 Approximated step line of a driving cycle

为实现HEV良好的驾驶性、电池SOC保持性以及降低燃油消耗的目的,对HEV系统的状态方程式(7)构造二次型性能指标

$$J_{\text{LQR}} = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [\alpha_1(x_1(t) - r^2)^2 + \alpha_2(x_2(t) - x_{2e})^2 + \alpha_3(u_1(t) - k_1 r^2 f)^2 + \alpha_4(u_2(t) - k_2 r^2 f)^2] dt, \quad (11)$$

其中: r 为车速指令, x_{2e} 为期望的电池剩余能量, k_1 和 k_2 是为实现混合驱动和纯电动驱动两种驱动模式切换而设置的转换系数. 而非负常数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 为各项的权系数, 通过调整权系数的相对大小, 可实现对车辆的驾驶性能(第1项), 电池的剩余能量相对于期望值波动的大小(第2项), 发动机功率(第3项)和电机功率(第4项)相对于各自稳态值波动的大小进行控制, 抑制发动机和电机功率的大范围波动, 间接地达到降低油耗的目的. 在实际应用中, 可以根据不同的汽车工况预先确定各自的权系数, 并得到相应的控制律, 当相应的工况出现时, 实时地切换控制律从而实现更好的节油效果. 在本文提出的实时优化控制中, 将汽车工况划分为3种类型:

1) 当汽车在加速或匀速行驶过程中, 若汽车需求功率 $P_{\text{req}}(t)$ 大于或等于一定值 P_0 , 则 $k_1 = 1, k_2 = 0$ (表明稳态下驱动功率应该全部由发动机提供), 根据对汽车驾驶性、电池SOC保持性的要求以及发动机功率和电机功率范围来确定权系数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, 车辆运行在混合驱动模式;

2) 当汽车工作在制动工况时, 为避免出现 $P_{\text{ice}}(t) < 0$ 的情况, 应选择较大的 α_3 以限制发动机功率的大小. 显然, 当 $\alpha_3 \rightarrow \infty$ 时, 即可认为 $P_{\text{ice}}(t) \rightarrow 0$, 此时制动能全部由电池回收;

3) 当 $P_{\text{req}}(t)$ 小于一定值 P_0 时, 令 $k_1 = 0, k_2 = 1$ (表明稳态下驱动功率应该全部由电动机提供), $\alpha_2 = 0$, 即使车辆工作在纯电动模式下, 放开对电池SOC的约束. 下面以上述第1种工况类型为例, 说明HEV二次型最优控制问题的求解过程. 考虑控制量和状态量与其稳态值的差

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \tilde{u}_1 \\ \tilde{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r^2 f \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r^2 \\ x_{2e} \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (12)$$

显然, 上述偏差量满足与式(7)相同的状态方程, 即有

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + B\tilde{u}. \quad (13)$$

而二次型指标函数(11)(其中 $k_1 = 1, k_2 = 0$) 可用上述偏差量表示为

$$J_{\text{LQR}} = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [\tilde{x}Q\tilde{x}^T + \tilde{u}R\tilde{u}^T] dt, \quad (14)$$

其中权系数矩阵为 $Q = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & \alpha_2 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} \alpha_3 & 0 \\ 0 & \alpha_4 \end{bmatrix}$, 且满足 $Q \geq 0, R > 0$. 由二次型最优控制理论可知, 对于系统式(13), 当 $t_f \rightarrow \infty$, 且性能指标(14)取极值时, 最优控制为定常的状态反馈控制律

$$\tilde{u} = -R^{-1}B^TK\tilde{x}, \quad (15)$$

式中, 对称矩阵 $K^T = K > 0$ 是黎卡提方程

$$KA + A^TK - KBR^{-1}B^TK + Q = 0 \quad (16)$$

的常值解. 这样, 就将以式(11)为性能指标的最优控制问题转换成了以式(14)为性能指标的最优调节问题来求解. 由式(15)可知, 由调节问题得到的控制量是关于汽车当前状态和指令的函数, 与未来道路工况无关, 是一种实时优化控制方法.

5 仿真实验结果与分析(Simulation results and analysis)

5.1 LQR实时优化控制(Real-time optimization control with LQR)

将电池的初始状态设为 $\text{SOC}(t_0) = 0.7, P_0 = 5 \text{ kW}$. 在3种工况类型下, 二次型性能指标中各个权系数分别设定为:

1) 混合驱动工况时, $\alpha_1 = 300, \alpha_2 = 0.000005, \alpha_3 = 0.004, \alpha_4 = 0.001$, 此时, 黎卡提方程的解为

$$K = \begin{bmatrix} 352.6321 & 0.0753 \\ 0.0753 & 1.2539e-4 \end{bmatrix};$$

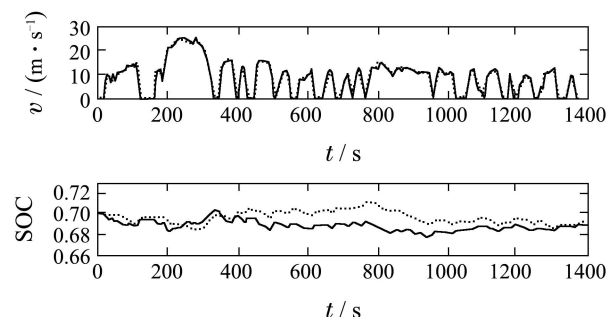
2) 制动工况时, $\alpha_1 = 300, \alpha_2 = 0.000005, \alpha_3 = 0.05, \alpha_4 = 0.001$, 此时, 黎卡提方程的解为

$$K = \begin{bmatrix} 825.0591 & 0.2707 \\ 0.2707 & 6.0545e-4 \end{bmatrix};$$

3) 纯电动工况时, $\alpha_1 = 200, \alpha_2 = 0, \alpha_3 = 0.1, \alpha_4 = 0.0005$, 此时, 黎卡提方程的解为

$$K = \begin{bmatrix} 197.5445 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

将上述结果代入式(15)得到控制量并将其作用于式(2)(4)–(5)构成的实际对象, 5种不同道路工况下的实时优化控制仿真结果如图6中的实线所示; 全局最优控制的仿真结果如图6中虚线所示.



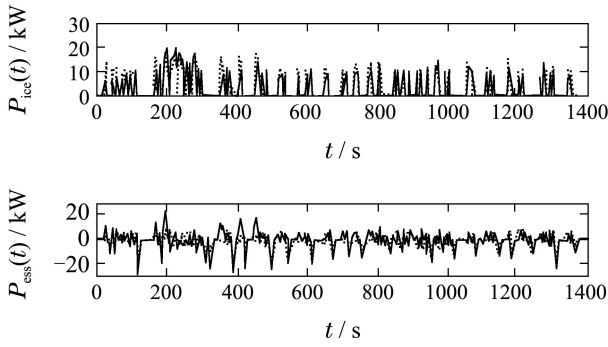


图 6 LQR实时优化控制和全局最优控制

Fig. 6 Results of LQR and global optimal control

5.2 全局最优控制(Global optimal control)

为了说明LQR实时算法对燃油经济性的改善作用, 本文进行了以燃油消耗

$$J_{FC} = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}(P_{ice}(t)) dt \quad (17)$$

最小为性能指标, 满足末端约束条件

$$SOC(t_f) = SOC(t_0), \quad (18)$$

且道路工况曲线事先已知的离线全局最优仿真实验. 具体做法是根据工况曲线, 利用式(2)计算出 $P_{req}(t)$, 并将 $P_{ice}(t)$ 表示成需求功率和电机功率的差, 即 $P_{ice}(t) = P_{req}(t) - P_{ess}(t)$, 这样系统的动态方程就只有由式(4)和式(5)构成的电池电机系统状态方程

$$\dot{SOC} \cdot E = - \frac{V(V - \sqrt{V^2 - 4RP_{ess}(t)/\eta_m})}{2R}. \quad (19)$$

故得到以 $P_{ess}(t)$ 为控制量、电池SOC为状态量及式(17)为性能指标的燃油消耗最小问题. 由最小值原理可得哈密顿函数

$$H = \dot{m}(P_{req}(t) - P_{ess}(t)) - \lambda(t) \cdot \frac{V(V - \sqrt{V^2 - 4RP_{ess}(t)/\eta_m})}{2R}, \quad (20)$$

且协态变量 $\lambda(t)$ 满足协态方程

$$\dot{\lambda} = - \frac{\partial H}{\partial SOC}. \quad (21)$$

根据假设3), 认为SOC小范围变化时 V 和 R 为常值, H 不是SOC的函数, 则有 $\dot{\lambda} = 0$, 即 λ 为常值. 当某

工况下的需求功率曲线已知时, 选择某常数作为协态变量^[12], 利用MATLAB中的指令fminbnd计算满足控制量约束(8)和(9)的发动机和电机功率曲线. 若将此电机功率作用在系统(19)所得到的 $SOC(t_f)$ 满足式(18), 则上述发动机和电机功率曲线为全局最优解^[10].

图7以UDDS(urban dynamometer driving schedule)工况为例, 给出了 ΔSOC 和 λ 的关系, 且全局最优控制的仿真结果如图6中虚线所示. 同样根据假设1), 发动机始终运行在燃油消耗最佳曲线上, 各工况下全局最优算法得到的燃油消耗也是根据图3给出的曲线得到燃油消耗率后经积分计算得到.

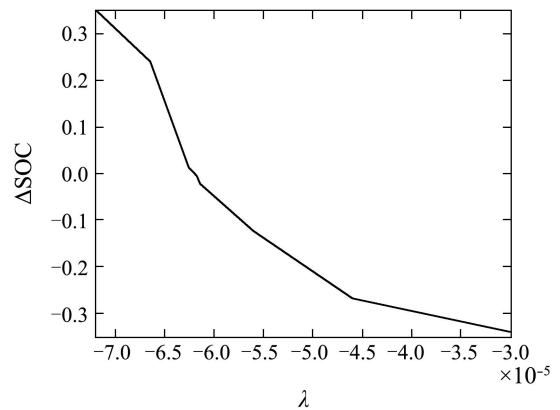


图 7 ΔSOC 和 λ 的关系曲线

Fig. 7 Relationship between ΔSOC and λ

5.3 实验结果分析(Simulation analysis of results)

从表2中5种道路工况下的仿真结果可以看出, 相比于传统汽车, 两种算法均能显著提高燃油经济性, 且本文提出的实时优化控制比以燃油消耗最小为性能指标的全局最优控制的节油率稍差, 两者节油率之差在10%以内. 值得注意到是, 在进行5种道路工况的仿真实验时, LQR实时算法均采用预先设定的同一组权重系数, 这说明该算法对于道路工况具有良好的适应性, 而全局最优算法在不同的道路工况下需要选择不同的协变量 λ (如表3) 以实现全局最优, 且从图7可以看出, $\Delta SOC = SOC(t_f) - SOC(t_0)$ 对 λ 的微小变化非常敏感, 这说明该算法对道路工况的适应性较差.

表 2 汽车的燃油消耗

Table 2 Fuel consumptions

循环工况	传统汽车	全局最优控制($SOC(t_0) = 0.7$)		实时优化控制($SOC(t_0) = 0.7$)		节油率之差/%
	油耗/(L · (100km) ⁻¹)	油耗/(L · (100km) ⁻¹)	$SOC(t_f)$	油耗/(L · (100km) ⁻¹)	$SOC(t_f)$	
UDDS	6.6	3.2438	0.6918	3.8306	0.6896	8.8909
CSHVR	7.9	3.0566	0.6967	3.7309	0.6920	8.5354
UDDSHDV	7.0	3.5328	0.6990	3.9125	0.6980	5.4243
INDIA_URBAN	7.7	3.2041	0.7017	3.8286	0.6882	8.1104
WVUSUB	6.8	3.0200	0.6922	3.5617	0.6889	7.9662

表3 全局最优算法中的 λ 值
Table 3 Values of λ in global optimal algorithm

UDDS	CSHVR	UDDSHDV	INDIA_URBAN	WVUSUB
$-6.166e-5$	$-6.185e-5$	$-6.114e-5$	$-6.329e-5$	$-6.328e-5$

此外,从图6中的速度跟踪曲线和电池SOC曲线可以看出,实时优化算法能够保证汽车的驾驶性和电池SOC保持性.同时,发动机的最大功率约为20kW,电池的最大充放电功率约为26kW,即电池会存在约7C的短时间充放电过程,两者均满足各自的约束条件,否则,可通过改变权系数使发动机功率和电机功率不超出各自的限值.

6 结论(Conclusions)

本文将HEV控制问题处理成兼顾HEV系统驾驶性、SOC保持性以及燃油消耗的二次型最优调节问题,得到了一种结构简单的实时优化控制策略.5种道路工况的仿真结果显示,本文提出的实时控制对道路工况具有良好的适应性,且与工况已知时离线计算的全局最优控制方法的节油率相差在10%以内.

参考文献(References):

- [1] LIN C C, PENG H E, GRIZZIE J W. Power management strategies for a parallel hybrid electric truck [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 38(11): 839 – 849.
- [2] 钟虎. ISG柴电混合动力汽车多能源管理策略研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
(ZHANG Hu. *Study on the multi-energy management strategy for ISG(Integrated starter/generator) parallel diesel Hybrid electric vehicle* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.)
- [3] SCIARRETTA A, BACK M, GUZZELLA L. Optimal control of parallel hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, 12(3): 352 – 362.
- [4] PAGANELLI G, DELPRAT S, GUERRA M T, et al. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains [C] // *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 2076 – 2081.
- [5] SERRAO L, ONORI S, RIZZONI G. ECMS as a realization of Pontryagin's minimum principle for HEV control [C] // *Proceedings of American Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 3964 – 3969.
- [6] KIM N, CHA W S, PENG H. Optimal equivalent fuel consumption for hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(3): 817 – 825.
- [7] MUSARDO C, RIZZONI G, STACCIA B. A-ECMS: an adaptive algorithm for hybrid electric vehicles energy management [C] // *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 1816 – 1823.
- [8] PEREZ V L, BOSSIO R G, MOITRE D, et al. Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2006, 73(1): 244 – 254.
- [9] 申彩英, 夏超英. 基于改进型动态规划算法的串联混合动力汽车控制策略 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(3): 427 – 432.
(SHEN Caiying, XIA Chaoying. Control strategy of series hybrid electric vehicle based on improved dynamic programming [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(3): 427 – 432.)
- [10] KIM N, CHA S, PENG H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on pontryagin's minimum principle [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(5): 1279 – 1287.
- [11] PISU P, RIZZONI G. A comparative study of supervisory control strategies for hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(3): 506 – 518.
- [12] DELPRAT S, LAUBER J, GUERRA M T, et al. Control strategy optimization for an hybrid parallel powertrain [C] // *Proceedings of American Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 1315 – 1320.

作者简介:

夏超英 (1958-), 男, 教授, 主要研究方向为控制理论与应用、自适应控制系统、电力电子技术及装置、电动汽车、混合动力汽车, E-mail: xiachaoying@126.com;

张聪 (1988-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为混合动力汽车最优控制, E-mail: zhangcong@tju.edu.cn.