混联式 HEV 能量控制系统鲁棒控制器设计*

胡春花^{1,2} 何 仁¹ 李 楠¹

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院,镇江 212013; 2. 镇江高等专科学校电子信息系,镇江 212003)

【摘要】 为了防止混联式混合动力汽车(HEV)能量控制系统由于干扰而发生工作模式之间误切换,利用鲁 棒控制理论,采用遗传算法选取加权函数,设计了基于混合灵敏度的 H_{*}鲁棒控制器。与 PID 控制器控制效果进行 仿真比较,调节时间减少了 41.3%,超调量降低了 14.7%,表明控制器提高了系统的稳定性和快速性;同时对外界 干扰和参数不确定性具有良好的抑制功能,提高了混联式 HEV 能量控制系统抗干扰能力,有效抑制了误切换,获 得了平稳的驾驶性能。

关键词: 混合动力汽车 混联式 能量控制系统 抗干扰 鲁棒控制 混合灵敏度 中图分类号: U469.7; TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)12-0062-05

Robust Controller Design for Energy Control System of Hybrid Electric Vehicle

Hu Chunhua^{1,2} He Ren¹ Li Nan¹

School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
 Department of Electronics and Information Science, Zhenjiang College, Zhenjiang 212003, China)

Abstract

To prevent energy control system from mistaking switching during its operation mode for seriesparallel hybrid electric vehicle (HEV) when interfered, a mixed sensitivity H_{∞} robust controller was developed. Weighted functions were determined based on genetics arithmetic. Compared with the PID controller under step response, the mixed sensitivity H_{∞} robust controller reduced the settling time by 41.3% and overshoot by 14.7%. It also could keep energy control system stable under the two factors of uncertain parameters and external interference. Mistaking switching operation was restrained effectively and more smooth driving performance was acquired.

Key words Hybrid electric vehicle, Series-parallel, Energy control system, Interference suppressition, Robust control, Mixed sensitivity

引言

混联式混合动力汽车(hybrid electric vehicle, 简称 HEV)能量控制系统是将传统汽车的发动机、 电动机和蓄电池进行有机整合,解决能源紧缺和环 境污染等问题^[1]。混联式 HEV 在行驶过程中,由于 能量控制系统的复杂性和外界环境变化的多样性, 其数学模型中必然包含不确定性,如参数不确定、高 阶模态不确定和各种干扰等因素,因此,混联式 HEV 在工作模式之间切换时必须考虑各种不确定 性因素和外界干扰的影响,保证能有效地抑制干扰。

H_{*}鲁棒控制方法由于抗干扰能力强而被广泛 地应用于各种控制领域^[2-7],但在混联式 HEV 工作 模式抗干扰领域却鲜有报道。本文在分析混联式 HEV 6 种工作模式及采用逻辑判断建立规则基础 上,引入混合灵敏度 H_{*}鲁棒控制方法,对混联式

通讯作者:何仁,教授,博士生导师,主要从事汽车机电一体化研究,E-mail: heren1962@163.com

收稿日期:2011-01-10 修回日期:2011-05-17

^{*} 江苏省科技成果转化项目(BA2010050)、江苏省汽车工程重点实验室开放基金资助项目(QC200904)和2008 江苏省"青蓝工程"基金 资助项目

作者简介:胡春花,博士生,镇江高等专科学校副教授,主要从事车辆性能仿真与最优控制研究,E-mail:hch@zjc.edu.cn

HEV 能量控制系统进行抗干扰设计。

1 系统结构

研究的混合动力汽车动力系统结构是通过行星齿轮机构实现的混联式动力传动系统^[11]。核心部件行星齿轮机构连接发动机、双电机(MG1和MG2),实现转矩(或动力)分配和无级变速等功能,结构如图1所示。发动机通过行星齿轮机构与驱动轴相连接,将一部分机械能传送至车轮。另一部分动力通过处于发电模式的电机 MG1 对电池充电或与电池电能混合输送至 MG2。MG2 主要实现助力和制动能量回收功能,且 MG2 通过减速器与行星齿轮相连接,在需求功率需要较大时,与前部分机械能以并联方式共同驱动车辆行驶。同时,根据行星齿轮机构的特点,通过调节太阳轮的转速实现转矩(或动力)合理分配,优化发电机工况点并实现无级变速。



据可能的各种工况,系统设置 6 种基本工作模 式:频繁起步和低速行驶时,为纯电机 MG2 驱动模 式;中速以下需要急加速时,发动机和电机 MG2 共 同驱动,为节气门开度小模式;高速行驶或中等 (重)负荷时,为发动机和电机 MG2 共同驱动,节气 门全开模式;制动或减速时,电机 MG2 以发电机工 作进行能量回收模式;行车中如电池 SOC 较低,发 动机带动电机 MG1 给电池充电模式;起步前或停车 后如果电池 SOC 很低,可以进行停车充电模式。

采用逻辑判断方法判定切换规则,主要规则如 下:

(1) 当车速 v 低于发动机的最佳功率区域最低 值 $P_{E_{min}}$,且 SOC 值 S_e 高于电池正常工作时的电荷 状态的最低值 $S_{e_{\perp}}$ 时, MG2 单独驱动,其中 $S_{e_{\perp}}$ 为 SOC 正常工作范围的最小值。

(2) 车速变化率 $\frac{dv}{dt}$ 较大(设定大于 10),需求功率 P 大于发动机高效区的最高值 $P_{E_{max}}, S_{e}$ 高于 $S_{e_{\perp}},$ 或车速介于发动机高效区最大转矩所对应的车

速和发动机高效区最小转矩对应的车速之间,即 $v_{E_{min}} \leq v \leq v_{E_{max}}$ 时,发动机和 MG2 混合驱动,且节 气门开度小。

(3)需求功率 P 大于发动机高效区的最高值 P_{E_max},车速 v 高于发动机高效区最大转矩所对应的 车速 v_{E_max},S_e高于 S_{e_L}时,发动机和 MG2 混合驱动, 且节气门开度大。

(4) 车速变化率 $\frac{dv}{dt}$ 为负, S_{e} 低于 $S_{e^{L}}$ 时,MG2 尽可能多地回收再生制动能量。

(5)*S*。低于*S*_eL,发动机驱动车辆且给电池充电,直至*S*。高于*S*_eL。

6种基本工作模式的功率分配如下:

(1) 纯电机驱动时

$$P = P_{MG2}\eta_{MG2}\eta_{T}$$

式中 η_{MG2} ——电机 MG2 工作效率,%
 η_{T} ——综合机械传动效率,%
(2)发动机和电机共同驱动时
 $P = (P_{E}\gamma + P_{MG2}\eta_{MG2})\eta_{T}$
式中 γ ——节气门开度,%
(3)再生制动时
 $P_{B_{B}Brake} = \beta\eta_{ch}\eta_{MG1}\eta_{T}P_{Brake}$
式中 $P_{B_{B}Brake}$ ——再生制动回收得的电池功率,kW
 β ——再生制动能量回收比,%
 η_{MG1} ——电机 MG1 工作效率,%
 η_{ch} ——电池充电效率,%
(4)发动机行车充电时
 $\begin{cases} P = P_{E}\alpha\eta_{MG1}\eta_{T} \\ P_{B_{T}Tatal} = (1 - \alpha)P_{E}\eta_{ch} \end{cases}$
式中 $P_{B_{T}Tatal}$ ——电池总功率,kW
 α ——发动机提供车辆行驶功率比,%

(5) 停车充电时

$$P_{\rm B}$$
 Total = $P_{\rm B}$ ch + $P_{\rm B}$ = $P_{\rm E}\eta_{\rm ch}$ + $P_{\rm B}$

式中 P_{B ch}——电池被充电的功率,kW

P_B——原剩余功率,kW

结合以上6种基本工作模式、功率分配和切换 规则,可建立对应每个基本工作模式时的切换关系 式。

2 混合灵敏度 H_a鲁棒控制

控制系统的鲁棒性是指被控对象在其参数或结构发生摄动时保持稳定的能力。具有加权混合灵敏度的控制结构如图 2 所示,其中 *P*(*s*)为增广的对象模型;*K*(*s*)为控制器模型;*W*₁(*s*)是为了抑制噪声和干扰对控制误差的影响而引入的性能加权函数;*W*₂(*s*)是为了抑制控制输入过大而引入的控制器输

出加权函数; W₃(s)是为了满足鲁棒稳定性而引入的模型摄动加权函数; G(s)为增广被控对象。





Fig. 2 Close loop structure based on mixed sensitivity





混合灵敏度 H_{*} 鲁棒控制设计问题就是寻找正则有理的控制器 K(s),使图 2 所示的闭环控制系统稳定且 H_{*} 范数限制在一个给定的小整数 γ 下,使从输入信号 $u_{1}(t)$ 到输出信号 $y_{1}(t)$ 的传递函数 $T_{y_{1}u_{1}}(t)$ 满足

$$\| T_{y_1u_1}(s) \|_{\infty} \triangleq \left\| \begin{bmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)R(s) \\ W_3(s)T(s) \end{bmatrix} \right\|_{\infty} < \gamma \quad (1)$$

式中,灵敏度函数 $S(s) = (I + G(s)K(s))^{-1}$;补灵 敏度函数 $T(s) = G(s)K(s)(I + G(s)K(s))^{-1}$;控制 器灵敏度函数 $R(s) = K(s)(I + G(s)K(s))^{-1} =$ $K(s)S(s), 其中, S(s) + T(s) = I_o W_1(s)S(s)$ 表示 性能要求, $W_2(s)R(s)$ 和 $W_3(s)T(s)$ 表示系统鲁棒 稳定性的要求。这样, 混合灵敏度就将系统性能要 求和系统的鲁棒稳定性要求转换为 H_x 范数意义下 的最优控制问题。

控制器设计思路:系统的开环幅频特性决定系统闭环特性,因此选择期望开环回路 L(s)(L(s) = K(s)G(s))作为 $W_1(s)$ 加权模型,运用鲁棒控制器设计的方法,就可设计出基于混合灵敏度的 H_s 鲁棒控制器,使系统的开环特性逼近 $W_1(s)$,得出理想闭环性能。设计时选定期望的回路幅频曲线 L(s),找出 L(s)奇异值上限 $\overline{\sigma}(L)$ 和其下限 $\underline{\sigma}(L)$,根据加权函数与回路 L(s)之间的关系(图 3),结合式(1),

设计出保证期望幅频特性的加权 $W_1(s)$ 和 $W_3(s)$, 适当考虑控制信号的大小设定 $W_2(s)$,则可设计出 控制器 K(s)。

3 能量控制系统 H_a 混合灵敏度鲁棒控制器

3.1 设计加权函数

灵敏度函数 S 是决定跟踪误差大小的重要指标,灵敏度越低,则系统的跟踪误差越小,这样系统响应的品质指标越好;而补灵敏度函数 T 是决定系统鲁棒稳定性的重要指标,它制约着系统输出信号的大小,在存在不确定时,有较大的加权会迫使系统输出信号稳定。二者的加权选择是相互矛盾的,选择时要结合系统特性综合考虑。

加权函数选择的总体要求:为了保证加权函数 的加入不影响系统本身的稳定性,一般要求选择的 加权函数是稳定且是最小相位的;由于 H_x控制器 的阶数是被控对象与加权函数之和,因此,为了便于 控制器运行,得到低阶次的控制器,在保证设计前提 下,尽可能选择低阶次的加权函数。

各加权函数的具体要求:

 $W_1(s)$ 的选择:在低频段的幅值应尽量高,以使 系统具有良好的跟踪性能和抗干扰能力,在高频段 通过合适选择增益 k_1 来调节系统的超调量, $W_1(s)$ 的剪切频率应小于系统剪切频率,要求具有低通特 性,即

$$W_1(s) = k_1 \frac{a_1 s + 1}{a_2 s + 1}$$
(2)

 $W_2(s)$ 的选择:在有效带宽内幅值应不大于灵 敏度函数 R(s),且为不增加控制器的阶数,选取常 数增益 k_2 ,即

$$W_2(s) = k_2 \tag{3}$$

 $W_3(s)$ 的选择:在高频段为了抑制高频噪声,其 幅值应较大,且具有高通特性,增加增益 k_3 值,即

$$W_{3}(s) = k_{3} \frac{s}{c_{1}s + 1} \tag{4}$$

利用遗传算法(genetic algorithm,简称 GA)确 定加权函数参数集合 $A = \{k_1, k_2, k_3, a_1, a_2, c_1\}$,这 样比依赖于设计者的经验采用试凑的方法更准 确^[9]。其设计思路为:从一个代表最优化问题解答 组初值(种群)开始进行搜索,种群由一定数量、通 过基因编码的个体组成,其中每一个个体为染色体, 不同个体通过染色体的复制、交叉或变异又生成新 的更能适应环境的染色体群,经过一代代进化,最终 收敛到一个最适应环境的个体上,求得问题的最优 解。

本文设定种群大小为50,二进制编码串长度为

22,交叉概率 0.25,变异概率 0.01,运行 60 代,获得 的加权函数集合为: *A* = {10,0.1,0.1,0.01,100, 0.0001}。

3.2 H_。混合灵敏度鲁棒控制器设计

某车型整车总质量为1360 kg,发动机排量为 1.5 L,车轮滚动半径为0.304 m,滚动阻力系数为 0.009,风阻系数为0.035,迎风面积为2 m²,MG1 最 大功率为37.8 kW,MG2 最大功率为50 kW,结合 6种工作模式及切换规则,其能量控制系统的开环 传递函数为

$$G(s) = -590.4s^{3} - 502.7s^{2} - 706s + 4\,180$$

$$s^{6} + 625.2s^{5} + 155.7s^{4} + 96.6s^{3} + 102.4s^{2} + 254.5s + 156$$
(5)

借助 Matlab 鲁棒控制箱,经编程计算,得到优 化的γ为1.8201,控制器为

 $K(s) = \frac{4\ 273.\ 383\ 1(s\ +\ 10\ 000)\ (s\ +\ 625)\ (s\ +\ 0.\ 581\ 3)\ (s\ -\ 0.\ 588\ 4)\ (s^2\ +\ 0.\ 835\ 3s\ +\ 0.\ 571\ 1)}{(s\ +\ 10\ 000)\ (s\ +\ 624.\ 9)\ (s\ +\ 234.\ 9)\ (s\ +\ 0.\ 01)\ (s^2\ +\ 2.\ 302s\ +\ 4.\ 751)\ (s^2\ +\ 5.\ 243s\ +\ 28.\ 9)} \tag{6}$

4 仿真结果分析

为验证 H_{*}鲁棒控制器性能,将其与 PID 控制器和无控制器这 3 种情况下的单位阶跃响应,在能量控制的稳定性、快速性和抗干扰方面进行仿真比较。因 PID 控制器不要求精确的受控对象的数学模型,其控制效果一般能满足工业控制要求。尤其近年来智能 PID 控制器的开发,其理论和实际应用更为广泛。

本文设计的 PID 控制器为

$$G_{c}(s) = 1.361 \left(1 + \frac{1}{4.967s} + \frac{1.69s}{6.572s+1} \right) \quad (7)$$

仿真结果如图4所示。在上升时间方面(设为 稳态值的 90%), PID 控制器上升时间为 0.209 s, 鲁 棒控制器上升时间为 0.265 s, 虽然慢了 0.056 s, 但 满足系统要求。在调节时间方面(设误差范围为 2%),PID 控制为 1.2 s,鲁棒控制器为 0.849 s,比 PID 控制快了 0.351 s,提高了 41.3%。在超调量方 面,PID 的峰值为 1.25, 对应的超调为 25.4%, 鲁棒 控制器峰值为 1.09, 对应的超调为 9%, 降低了 14.7%。但是无控制器的能量控制系统在受到单位 阶跃信号的干扰时,振荡剧烈,峰值达到1.62,超调 为 62%,调节时间为 3.69 s,比设计的 H_w鲁棒控制 器增加了 2.841 s,增加了 334.6%。仿真结果表明, 应用 H_a鲁棒控制器,系统的超调量减小,调节时间 减小,性能指标优于 PID 控制器和无控制器,能够有 效地防止能量控制系统发生误切换,提高了系统的 抗干扰能力。

*H*_{*}鲁棒控制器和回路*L*(*s*)的 Bode 图如图 5 所 示,灵敏度函数 *S* 和补灵敏度函数 *T* 的奇异值如 图 6 所示。图 5、6 与图 3 比较可以看出设计的控制 器满足式(1)。由于曲线的形状决定系统的抗干扰 能力,为减小高频噪声的影响,设计时希望在高频段 内尽快衰减。从图 6 中可以看出高频时衰减很快,



Fig. 4 Step response of H_{∞} robust controller



该系统有着较大的抑制带宽,因而能在更大范围内 抑制外界的干扰。

当不确定部分为叠加型模型 $\Delta_a(j\omega)$ 时^[10],则 使 $\Delta_a(j\omega)$ 奇异值的上限不小于 $W_2(j\omega)$ 的幅值;当 不确定部分为乘积型模型 $\Delta_m(j\omega)$ 时,则使 $\Delta_m(j\omega)$ 奇异值的上限不小于 $W_3(j\omega)$ 的幅值,这样确定了 $W_2(s)$ 和 $W_3(s)$ 后,即可确保对不确定部分的抑制, 再根据回路的需要确定 $W_1(s)$,就能使被控系统达 到预期的控制效果。



5 结论

(1)设计的基于混合灵敏度 H_x的鲁棒控制器 能够有效抑制混联式 HEV 能量控制系统行驶过程 中存在的多种干扰和参数不确定的摄动,且超调量 小,提高了系统的稳定性和快速性。

(2)利用遗传算法确定了各加权函数参数。

(3) 仿真结果表明控制器能有效地防止能量控制系统发生误切换,提高了系统的抗干扰能力。

Fig. 6 Singular values curves of S and T functions

参考文献

- 1 Powell B K, Bailey K E, Cikanek S R. Dynamic modeling and control of hybrid electric vehicle power train systems [J]. Control Systems IEEE, 1998, 18(5): 17 ~ 33.
- 2 Lu Hao, Li Yunhua, Tian Shengli, et al. Improved hybrid robust control method for the electromechanical actuator in aircrafts [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(4):443 ~ 450.
- 3 Zhou Tong, Xing Huawei. Robust control of a four axis HTS coil based maglev system [C] // Proceedings of the 24th Chinese Control Conference, Guangzhou, China, 2005:559 ~ 563.
- 4 王益群,曹栋璞,陈星,等. 热连轧卷取机踏步系统鲁棒 H_x控制研究[J]. 机械工程学报, 2002,38(10): 62~65.
 Wang Yiqun, Cao Dongpu, Chen Xing, et al. Robust H_x control of step-by-step system for coiler of hot continuous mill [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002,38(10): 62~65. (in Chinese)
- 5 孙建亮,彭艳,刘宏民,等. 基于测厚仪监控的厚控系统动态建模及其鲁棒 H_{*} 控制器设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 160~170.

Sun Jianliang, Peng Yan, Liu Hongmin, et al. Dynamic modeling of gauge control system based on thickness gauge and design of H_{∞} robust controller [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(6): 160 ~ 170. (in Chinese)

6 景鹏, 童朝南,彭开香,等. 基于分散鲁棒控制策略的冷连轧板形板厚多变量系统研究[J]. 控制与决策, 2010, 25(4):581~586.

Jing Peng, Tong Chaonan, Peng Kaixiang, et al. Distributed robust control for combined shape and gauge system in cold rolling process[J]. Control and Decision, 2010, 25(4):581 ~ 586. (in Chinese)

- 7 王幼民,司妙丽. 电液位置伺服系统干扰抑制问题的 H_{*}控制[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 164~166, 170.
 Wang Youmin, Si Miaoli. H_{*} control of disturbance attenuation problem for electro hydraulic position servo system [J].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 164~166, 170. (in Chinese)
- 8 Ismail Meric, Can Uygan, Ahu Ece Hartavi, et al. Propulsion system design of a hybrid electric vehicle [J]. International Journal of Vehicle Design, 2010, 52(1/2/3/4): 96 ~ 118.
- 9 蔡自兴. 智能控制原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- 10 李西秦,刘冰,范承德. 天然气发动机急速鲁棒控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 49~52.
 Li Xiqin, Liu Bing, Fan Chengde. Idle speed control of CNG engine based on robust control theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 49~52. (in Chinese)

(上接第106页)

- 12 Sudo S, Komatsu T, Kondo M. Pumpingplant noise reduction [J]. Hitachi Rev., 1980, 29(5):217~220.
- 13 Dring R P, Joslyn H D, Hardwin L W, et al. Turbine rotor stator interaction [J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1982, 104(4):729 ~ 742.
- 14 Jose Gonzalez, Carlos Santolaria. Unsteady flow structure and global variables in a centrifugal pump[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(9): 937 ~ 945.
- 15 Zhang Ye, Wang Xiaofang, Xu Shengli. Numerical analysis of pressure fluctuations caused by impeller diffuser interaction in a mixed flow reactor coolant pump [C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific, 2011(3):1~4.
- 16 Thakker A, Hourigan F. A comparison of two meshing schemes for CFD analysis of the impulse turbine for wave energy applications [J]. Renewable Energy, 2005,30(9):1404~1410.