

doi:10.11835/j.jssn.1000-582X.2013.08.004

纯电动汽车起步控制策略

胡建军, 杜 瑞, 吉 毅

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:为解决纯电动汽车起步时冲击度大和坡道起步易发生倒溜的问题,在满足驾驶员驾驶意图的基础上,提出了纯电动汽车的起步控制策略。将纯电动汽车起步分为无油门起步和有油门起步2种模式,并制定了相应的控制策略。对采用该控制策略下的纯电动汽车的起步性能进行了仿真分析。结果表明,所制定的策略能很好的满足车辆起步时平顺性及安全性的要求。

关键词:电动汽车;起步;控制策略

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)08-019-07

Control strategy for starting up of pure electric vehicle

HU Jianjun, DU Rui, JI Yi

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to solve the problem of large jerk and easy slipping down on the ramp in the starting process of the pure electric vehicle, starting up control strategy of pure electric vehicles is established on the basis of meeting the driver's driving intentions. The starting process of pure electric vehicle is divided into mode without throttle opening and mode with throttle opening. And corresponding control strategies for the two modes are formulated respectively. The starting performance of pure electric vehicle adopting the control strategy is analyzed. The results show that the strategy satisfies the requirements of smoothness and safety well in the starting process of the pure electric vehicle.

Key words: electric vehicle; start up; control strategy

在全球环境污染和能源短缺的双重压力下,以纯电动汽车为代表的新能源汽车的发展受到全世界的广泛关注。纯电动汽车具有低噪声、无污染、能量来源多样化、能量效率高等优点,是解决城市化进程中汽车问题的重要途径^[1-2]。电动汽车在起步过程中,道路状况和驾驶模式变化复杂,为了充分反映驾驶员的驾驶意愿,保证电动汽车起步时的安全性和乘坐的舒适性,对电动汽车起步过程的研究具有重要的理论价值和实用意义。

文献[3]针对纯电动汽车的无阻尼和有阻尼加速过程,根据起步加速时间的要求,分别研究了电机

在恒转矩和恒功率下的控制策略,但没考虑变转矩的控制情况。文献[4]通过对电动汽车起步加速过程中车辆与电机相结合的方式建模,采用车速与电流双闭环控制策略,使电机获得了良好的机械特性,在电机层面上完成了起步控制,但对驾驶员意图反映较少。文献[5-7]等主要通过电机进行精确控制来完成电动汽车的起步和驱动,而对车辆本身和驾驶员意愿考虑较少。文献[8]中提到的纯电动汽车怠速爬行功能指出了驾驶员释放制动踏板、不踩加速踏板汽车也能缓慢向前爬行,但在其文中控制策略的制定只是给定了1条曲线,至于该曲线是如

收稿日期:2013-02-11

基金项目:重庆市自然科学基金重点项目(CSTC,2011BA3019)

作者简介:胡建军(1973-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事车辆动力传动及其综合控制研究,(Tel)13996073282;
(E-mail)hujianjun@cqu.edu.cn.

何确定的、何时解除该功能以及该功能触发逻辑判断等问题并没有给出明确的阐述,存在着很大的局限性。

装备有液力机械式自动变速器的车辆在起步时具有起步平稳且能实现驻坡的优点^[9]。为了使纯电动汽车有着与装备有液力机械式自动变速器的汽车相媲美的起步性能,根据起步评价指标的要求,在对坡道起步过程中车辆受力变化进行分析的基础上确定了纯电动汽车起步时保持力矩与制动踏板间的关系。同时,为了防止无油门起步模式下速度过快而不满足驾驶员意愿的情况出现,提出了起步扭矩与车速间的关系。对有油门起步模式下的电机输出扭矩进行了确定,给出了整个起步过程的控制逻辑。在 Matlab/Simulink 环境下建立了起步控制的仿真模型,通过仿真分析来验证所提出控制策略的正确性。

1 纯电动汽车起步动力学分析

1.1 纯电动汽车起步受力分析

纯电动汽车的起步过程是指车辆由静止状态加速到某一速度 V 的过程。在起步加速过程中,整车受力情况如图 1 所示。

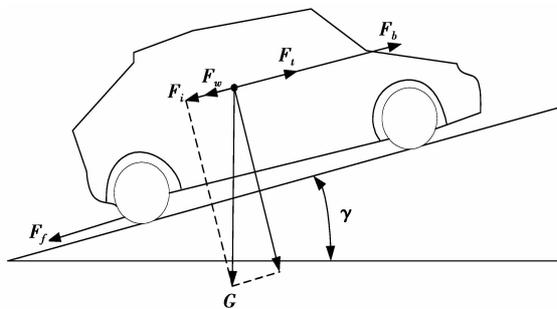


图 1 纯电动汽车起步加速受力图

如图 1 可知,纯电动汽车在起步加速过程中受力有汽车驱动力 F_t 、滚动阻力 F_f 、空气阻力 F_w 、坡度阻力 F_i 、制动力 F_b 等,其中

$$F_t = \frac{T_i}{r} = \frac{T_i \eta}{r}, \quad (1)$$

$$F_f = Gf \cos \gamma, \quad (2)$$

$$F_i = G \sin \gamma, \quad (3)$$

$$F_w = \frac{C_D A V^2}{21.15}, \quad (4)$$

$$F_b = \frac{\beta T_{umax}}{r}, \quad (5)$$

式中: T_i 为车辆驱动力矩; T 为电机输出转矩; i 为变速器传动比; η 为电动汽车机械传动效率; G 为车辆

的重力; f 为滚动阻力系数; γ 为路面坡度; C_D 为空气阻力系数; A 为车辆迎风面积; V 为车辆行驶速度; r 为驱动轮滚动半径; T_{umax} 为最大制动器力矩; β 为制动踏板开度。

1.2 电动汽车起步运动学方程

在电动汽车起步加速过程中,需要克服汽车的惯性力。汽车的本身质量分为平移质量和旋转质量 2 部分。起步加速时,平移质量和旋转质量均要产生惯性力矩。根据牛顿第二定律,电动汽车起步加速过程的运动学方程可表示为

$$F_t - \sum F = (\delta m_v + m_c) a, \quad (6)$$

$$a = \frac{F_t - \sum F}{\delta m_v + m_c}, \quad (7)$$

式中: $\sum F$ 为行驶阻力之和; δ 为汽车旋转质量换算系数; m_v 为汽车整备质量; m_c 为汽车装载质量; a 为汽车纵向加速度。

电机作为纯电动汽车的唯一动力源,驱动力均由电机提供。因此,有必要对电机在起步过程中的扭矩进行控制来实现车辆的平稳起步。

2 纯电动汽车起步控制策略

2.1 起步性能评价指标

车辆起步不仅要求平稳、快捷,而且要求满足驾驶员的起步意图(无油门起步、小油门起步、正常起步、大油门起步等),同时要求能适应外部行驶环境的变化以及车辆自身参数的变化^[10-11]。参照传统内燃机车辆的起步要求,纯电动汽车起步控制应该满足以下的功能要求

1) 坡道起步不倒溜;

2) 避免产生使乘员感到不舒适的抖动、冲击和在传动系中产生过大的动载荷;

3) 充分体现驾驶员慢起步、正常起步和急起步等起步意图^[10-11]。

根据纯电动汽车起步时的功能要求结合车辆运行的实际情况,起步品质主要由以下 3 个方面进行评价:冲击度、最大驻坡坡度和无油门下最大稳定车速。

2.1.1 冲击度

评价电动汽车起步平顺性的指标是冲击度,其推荐最大值为 10 m/s^3 ,它是车辆纵向加速度的变化率,即

$$j = \frac{da}{dt} = \frac{d^2 V}{dt^2}, \quad (8)$$

式中 j 为冲击度。

2.1.2 最大驻坡坡度

最大驻坡坡度是指电动汽车起步时不发生倒溜的最大坡度,用 i_m 表示。

由于所设计的纯电动汽车主要是在城市道路上行驶,根据《中华人民共和国行业标准——城市道路设计规范 CJJ 37-90》中的第 5.2.2 条的规定,机动车车行道最大纵坡度推荐值与限制值最大为 9%^[12]。因此,选取的最大驻坡坡度 $i_m=10\%$ 。

2.1.3 无油门下最大稳定车速

研究无油门(油门开度为 0)起步功能主要是模拟液力机械自动变速器的轿车在停车状态下驾驶员释放制动踏板、不踩加速踏板汽车也会缓慢向前行驶的功能^[8]。所以纯电动汽车无油门下最大稳定车速的确定也以内燃机汽车作为参考。由于装备有液力机械自动变速器的汽车在无油门下的最大稳定车速约为 5 km/h。因此,所设计的纯电动汽车无油门最大稳定车速为 5 km/h。

2.2 起步控制策略的制定

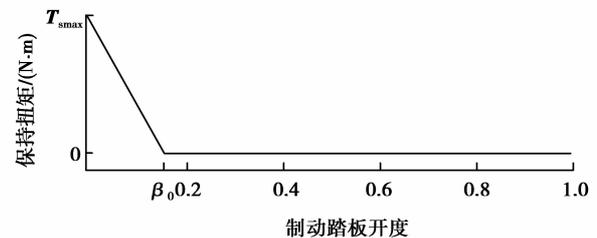
传统内燃机车辆主要是通过离合器或者液力变矩器来完成车辆的平稳起步^[13-14],而纯电动汽车起步则是通过控制电机发出适应车辆运行的扭矩来完成平稳起步^[15]。在无油门起步模式下,根据起步性能的评价指标,起步控制策略主要是在满足平顺性和安全性要求下解决 2 个问题:10%坡道内的起步不溜坡和平路起步不窜车。将坡道起步分为有无制动踏板信号 2 个阶段。

在有制动踏板信号的上坡起步阶段,由于车辆在坡道上,重力作用将使车辆有溜坡的趋势,随着制动踏板的释放,制动力会进一步减小,车辆将发生溜坡的现象^[16]。为了防止坡道溜车现象的发生,当制动踏板开度减小到一定值 β_0 后,电机应开始发出扭矩 T_s ,称之为保持扭矩^[16-17]。同时,该扭矩应随制动踏板开度的减小而不断增大。在制定策略时该保持扭矩与制动踏板的开度是线性相关的。当制动踏板完全松开后,该保持扭矩将达到最大值 T_{smax} 。另外,在 T_{smax} 的确定过程中,由于地面阻力系数的变化及对车辆安全性的考虑,在坡道起步时有制动信号的阶段,驱动力与制动力之和主要用以平衡坡道阻力。由于评价指标要求满载车辆能在 10%的坡度下实现驻坡,因此,在满载 10%的坡度下来确定 T_{smax} 。

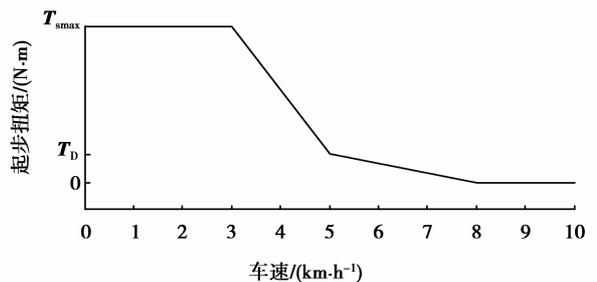
根据前面的控制策略,在无制动踏板信号且无油门信号时,电机扭矩将保持为 T_{smax} 。由于车辆不能自行识别是否处于坡道或是平路上,假若车辆在

平路或是下坡起步时, T_{smax} 产生的驱动力将会远远大于行驶阻力,从而使车辆不断加速,发生窜车的现象。所以,在此阶段有必要根据车速的变化不断调节电机扭矩。根据起步评价指标中的无油门下最大稳定车速为 5 km/h,在车速处于 0~3 km/h 时,电机扭矩保持为 T_{smax} 。当车速处于 3~5 km/h 时,为了避免车速达到 5 km/h 后电机扭矩的突然减小而产生较大冲击度,电机扭矩逐渐线性减小至 T_D (T_D 为空载车辆在平路上以 5 km/h 稳定车速行驶时所需的扭矩)。另外,为了防止下坡起步时电机所发出的扭矩使车辆产生过快的加速而造成危险,当检测到车速在 5~8 km/h 时,电机扭矩从 T_D 线性减小为零,当车速超过 8 km/h 后电机不会工作。这样的控制方式也能节约能量。

所提出的纯电动汽车无油门下起步控制策略如图 2 所示,包括有制动信号时保持扭矩与制动踏板开度的关系图和无制动信号时电机起步扭矩与车速的关系图。



(a)保持扭矩与制动踏板开度关系



(b)起步扭矩与车速间的关系

图 2 无油门下起步控制策略

有油门开度的电动汽车的起步控制策略分为①小油门起步, $0 < \alpha < 10\%$; ②正常起步, $10\% \leq \alpha < 40\%$; ③急起步, $\alpha \geq 40\%$ 。在有油门下起步时,车辆需要较大的驱动力来实现车辆的快速起步加速,为了避免驾驶员在踩下加速踏板时,电机输出扭矩反而变小的情况出现,有油门下起步时电机输出扭矩应不小于 T_{smax} ,且该扭矩随着加速踏板开度的增大由 T_{smax} 线性增加至电机的最大扭矩 T_{max} 。

有油门起步模式下的电机输出扭矩特性如图 3 所示。

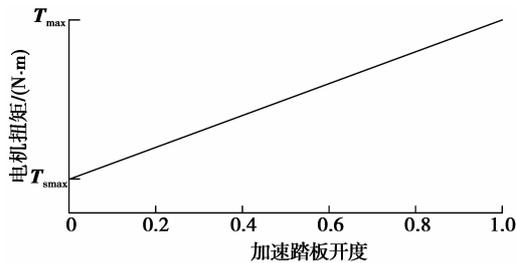


图 3 有油门起步模式下电机输出扭矩特性

2.3 起步控制流程

出于车辆安全性的考虑,在起步过程中,首先会检测车速,当车速超过 8 km/h 且无油门时,电机不会工作。综合前面的分析,所制定的起步控制流程如图 4 所示。

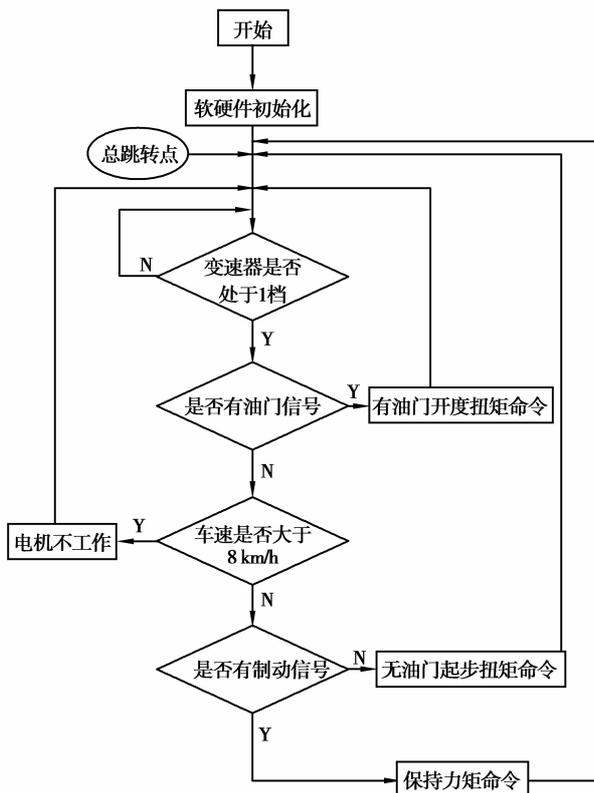


图 4 起步控制流程图

3 起步控制建模及性能仿真分析

以某款 A₀ 级轿车改造后的纯电动汽车为研究对象,变速器为 2 档机械式自动变速器,其中整车部分技术参数及仿真的路面条件见表 1。

表 1 整车部分技术参数及仿真的路面条件

参数名称	数值大小
整备质量/kg	950
满载质量/kg	1 100
车轮半径/m	0.262
一档传动比	9.56
二档传动比	4.07
滚动阻力系数	0.018
电机最大扭矩/(N·m)	150
旋转质量换算系数 δ	1.05
平均传动效率	0.9
最大制动器力矩/(N·m)	2040
路面附着系数	0.7

基于所制定的控制策略,确定最大保持扭矩 T_{smax} 为 32.7 N·m,开始产生保持转矩时所对应的制动踏板开度 β_0 为 0.14。

根据所仿真的车辆参数和路面条件,基于 matlab/simulink 环境下建立了起步控制仿真模型,模型为前向仿真模型,包括驾驶员模块、起步控制模块、汽车驱动力 F_t 计算模块及车辆动力学模块(见图 5)。驾驶员模块为模型的输入信号,主要输入起步时加速踏板、制动踏板的变化趋势以及档位和车速状态。上文所提出的无油门下的起步控制策略图 2 和有油门下的电机输出扭矩特性图 3 利用 simulink 中 Look_up 模块来实现,根据图 4 所给出的起步控制流程利用 simulink 中逻辑判断完成相应的逻辑建模,两者结合完成了起步控制模块的建模。汽车驱动力 F_t 计算模块是根据车辆本身的传动系统及相关的参数结合当前电机输出扭矩根据公式(1)所进行的数学计算。车辆动力学模块中包括车辆纵向动力学模块和轮胎模块。其中,轮胎模块采用了 advisor 软件中的模块。车辆纵向动力学模块则是根据汽车行驶动力学方程(6)、(7)等计算出车辆的加速度然后对其积分和微分完成速度及冲击度的计算。通过对仿真结果中的速度、冲击度及实际电机扭矩进行分析来评价起步性能从而来验证文中的控制策略及控制逻辑是否正确。基于所制定的控制策略分别针对车辆在良好路面无油门起步,小油门起步(取油门开度为 5%),正常起步(取油门开度为 20%),大油门起步(油门开度为 70%)4 种情况下纯电动汽车的起步控制性能进行了仿真分析。

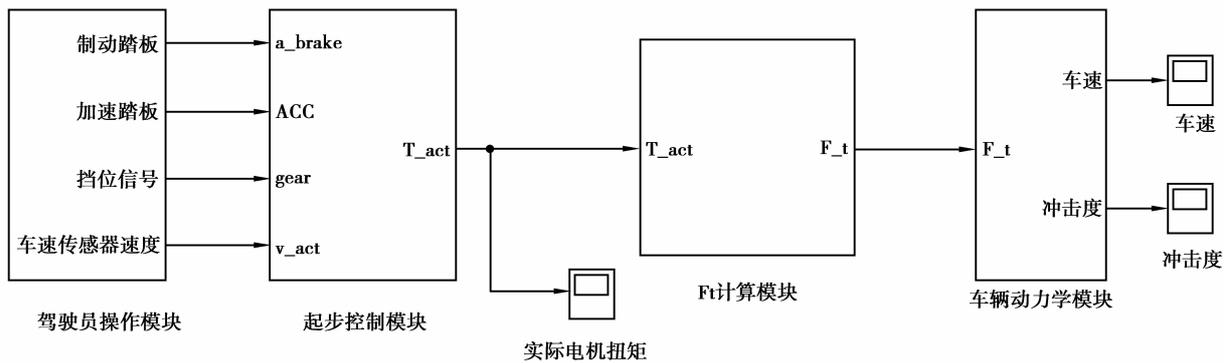


图 5 起步控制仿真模型

图 6 为无油门起步模式下制动踏板开度变化时的起步性能仿真结果。由图 6(b)可知,当无油门起步时,满载车辆能在 10% 坡度下实现驻坡,空载时整车的最大稳定车速为 5 km/h,满足了起步评价指标。从图 6(c)可以看出,电机输出的最大力矩不超过 T_{smax} ,且随着坡度及整车质量的增加,维持 T_{smax} 输出状态的时间增长。同时,空载车辆在 5% 的下

坡坡道起步时,车速超过 8 km/h 后电机不工作。在无油门起步模式下,整车冲击度均产生于车辆刚开始起步加速及车速超过 3 km/h 后电机起步扭矩下降的 2 个阶段,但 2 个阶段的车辆冲击度均不超过 4 m/s^3 ,起步的平顺性很好。

图 7 为纯电动汽车有油门模式下的起步性能仿真结果。

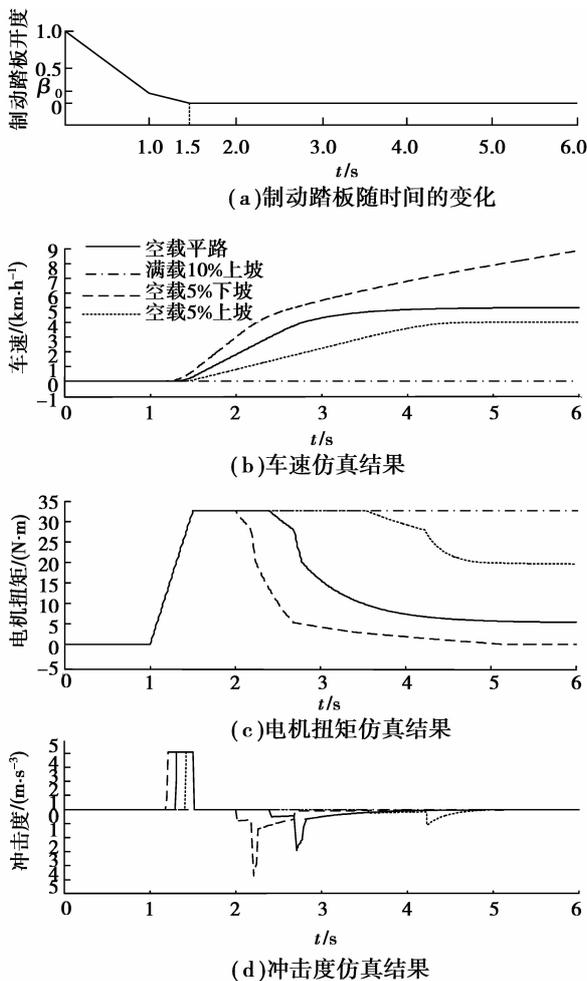


图 6 无油门起步下的仿真结果

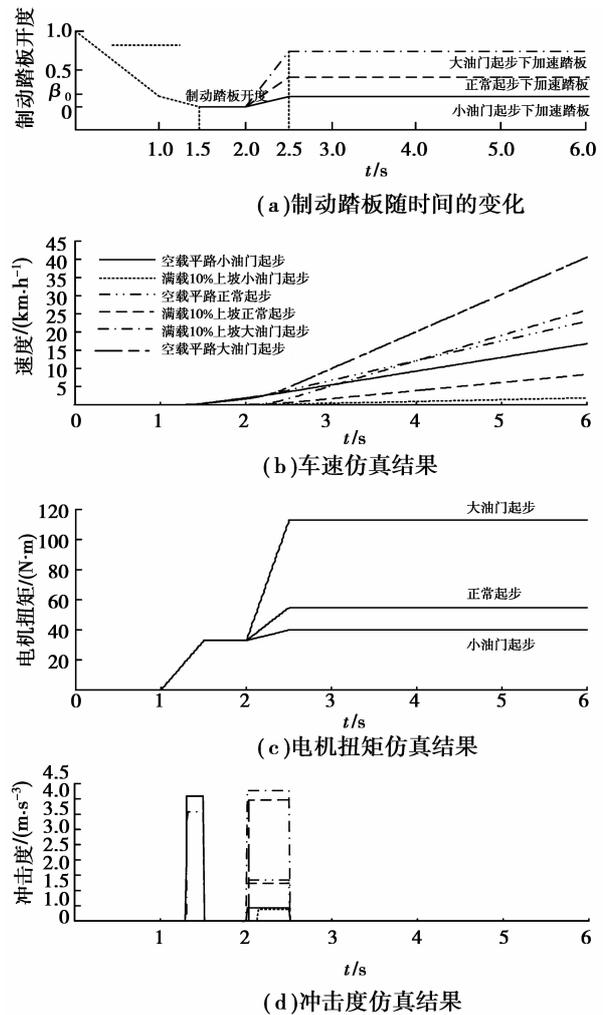


图 7 有油门起步下的仿真结果

由图 7(b)可知,无坡度起步时,车辆速度随着加速踏板开度的增加而不断增加;在 10%坡度小油门起步时,由于需要克服较大的坡度阻力,车辆起步速度较小,而正常起步和大油门起步时由于驱动力矩较大,速度增加较快;同时,由于前 2 s 车辆处于无油门起步阶段,速度增加很慢且不超过 5 km/h,这也符合驾驶员的意愿。图 7(c)反映的是电机扭矩变化情况,前 2 s 内电机扭矩按照无油门下起步策略发出,在第 2 s 时由于加速踏板的踩下,电机扭矩由 T_{max} 开始逐渐增加。有油门模式下整车起步的冲击度主要产生于车辆刚开始起步及加速踏板踩下后的 2 个阶段内,其中刚起步阶段的冲击度与无油门下的相同,加速踏板踩下后的冲击度也不超过 4.5 m/s^3 ,整个起步过程满足平顺性的要求。

4 结 论

1) 根据建立的起步动力学方程,以反映驾驶员的驾驶意愿和满足起步性能评价指标为要求,制定了纯电动汽车无油门起步和有油门起步 2 种模式下的起步控制策略。

2) 基于所制定的起步控制策略在良好路面条件下对纯电动汽车的起步性能进行了仿真分析。结果表明,所提出的控制策略充分反映了驾驶员的驾驶意愿,且能实现稳定的驻坡,起步冲击度不超过 4.5 m/s^3 ,控制效果理想。

3) 研究在对起步性能进行评价时是在良好路面情况下进行的。对于纯电动汽车在低附着系数下的起步控制需要跟牵引力控制系统联合来进行控制以达到车辆行驶的最佳状态,这是进一步的研究方向。

参考文献:

- [1] Franz G, Pavuza W. A 3-speed drive for small electric vehicle[C] // Energy Conversion Engineering Conference, July 27 -Aug. 1 1997; 2011-2013 VOL. 3
- [2] Kazunari Moriya, Yoshiaki Ito, Yukio Inaguma. Design of the surge control method for the electric vehicle powertrain[C] // Future Car Congress, June 2002, Hyatt Crystal City, VA, USA, SAE paper 2002-01-1935
- [3] 余建刚, 万淑芸. 电动汽车电动机起步加速控制研究[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2003, 17(1): 1-3, 8.
SHE Jiangang, WAN Shuyun. A study on the control of starting and acceleration for EV motor [J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2003, 17(1): 1-3, 8.
- [4] 汪贵平, 马建, 杨盼盼, 等. 电动汽车起步加速过程中的动力学建模与仿真[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(6): 98-102.
WANG Guiping, MA Jian, YANG Panpan, et al. Dynamic modeling and simulation of starting and acceleration for electric vehicle[J]. Journal of Chang an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6): 98-102.
- [5] Chau K T, Chan C C, Liu C. Overview of permanent magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2246-2257.
- [6] 邹渊, 孙逢春, 张承宁. 纯电动旅游客车驱动系统加速过程动态仿真[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(7): 575-578.
ZOU Yuan, SUN Fengchun, ZHANG Chengning. Dynamic simulation of the acceleration process of an electric touring transit bus [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(7): 575-578.
- [7] 卫国爱, 全书海, 朱忠尼. 电动汽车驱动用无刷直流电动机的控制与仿真[J]. 电机与控制应用, 2009, 36(1): 16-19, 31.
WEI Guoai, QUAN Shuhai, ZHU Zhongni. Simulation and control of brushless DC motor in electric vehicle drives[J]. Electric Machines and Control Application, 2009, 36(1): 16-19, 31.
- [8] 窦国伟, 刘奋, 程浩, 等. 纯电动轿车整车驱动控制策略开发实践[J]. 上海汽车, 2010. 05: 8-11, 31.
DOU Guowei, LIU Fen, CHEN Hao, et al. Drive control strategy development and practice of pure electric vehicle [J]. Shanghai Automotive, 2010. 05: 8-11, 31.
- [9] Sharon Liu, Thomas R. Bewley. Adjoint-based system identification and feed forward control optimization in automotive powertrain subsystem [C] // American Control Conference, 2003, 3(4-6): 2566 - 2571.
- [10] 程秀生, 冯巍, 陆中华, 等. 湿式双离合器自动变速器起步控制[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 18-22, 28.
CHENG Xiusheng, FENG Wei, LU Zhonghua, et al. Starting control based on wet dual clutch transmission [J]. Transactions Of The Chinese Society Of Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 18-22, 28.
- [11] Kong Huifang, Zhang Chongwei. A research of fuzzy control technology on AMT vehicle clutches [R]. Dalian: Intelligent Control and Automation, 2006.
- [12] 北京市市政设计研究院. CJJ37-90 中华人民共和国行业标准—城市道路设计规范[S]. 北京: 中国建筑出版社, 1991.
- [13] Dolcini P, Bechart H. Observer-based optimal control of dry clutch engagement [J]. Oil & Gas Science and Technology, 2007, 62(4): 615-621.

- [14] 吕济明. 双离合自动变速器坡道起步控制仿真研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
LV Jiming. Simulating study on vehicle hill-start control of dual clutch Transmission [D]. Jilin: Jilin University, 2008.
- [15] Lin Cheng, Zhou Hui, Sun Fengchun et al. Study on Intelligent control strategy of battery-electric bus based on the fuzzy comprehensive evaluation method [C] // IEEE Global Congress on Intelligent Systems 2009; 328-332.
- [16] Jae Seung Cheon, Jaewoo Jeon. Investigation of main control design factors to improve performance of cable puller type and caliper integrated type electric parking brakes[J]. SAE PaPer, 2009-01-3022
- [17] Lee Y, Chung H B, Chung C C, et al. A nonlinear proportional controller for electric parking brake (EPB) systems[J]. SAE Paper, 2007-01-3657

(编辑 侯 湘)

(上接第 18 页)

- [3] 纪跃波, 秦树人, 汤宝平. Wigner 分布干扰项抑制及其算法[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2001, 24(4): 26-30.
JI Yuebo, QIN Shuren, TANG Baoping. Repression of the interference in the wigner distribution and the algorithm[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2001, 24(4): 26-30.
- [4] 陈端, 刘树棠. 基于离散 GABOR 变换的抑制交叉项的新方法[J]. 西安交通大学学报, 1997, 31(09): 77-80.
CHEN Duan, LIU Shutang. A new method of suppressing cross terms based on discrete gabor transform[J]. Journal of Xi' An JiaoTong University, 1997, 31(09): 77-80.
- [5] 刘文彬, 郭瑜, 李之雄. 基于 Gabor 展开的 Wigner-Ville 分布的交叉项消除[J]. 振动与冲击, 2008, 27(10): 121-123.
LIU Wenbin, GUO Yu, LI Zhixiong. Removal of crossing-items of wvd based on gabor expansion[J]. Journal of vibration and shock, 2008, 27(10): 121- 123.
- [6] Mirela B, Isar A. The reduction of interference terms in the time-frequency plane [J]. Signals Circuits and Systems, 2003, 2: 461-164.
- [7] Pei S C, Ding J J. Relations between gabor transforms and fractional fourier transforms and their applications for signal processing[J]. IEEE Transaction on signal processing, 2007, 55(10): 4839-4841.
- [8] Khan N A, Jaffri M N, Shah S I. Modified gabor wigner transform for crisp time frequency representation[C]. International Conference on Signal Acquisition and Processing. 2009, 2009(14): 119-122.
- [9] Chen J. Time frequency based blind source separation technique for elimination of cross terms in wigner distribution [J]. Electronics Letters, 2003, 39 (5): 475-477.
- [10] Moreau E. A generalization of joint-diagonalization criteria for source separation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(3): 530- 541.
- [11] He Z Y, Yang L X, Liu J. Blind source separation using clustering-based multivariate density estimation algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(2): 575- 579.
- [12] Khandan F, Ayatollahi A. Performance region of center affine filter for liminating of interference terms of discrete wigner distribution [J]. Image and Signal Processing and Analysis, 2003(2): 621-625.
- [13] 吕宙. 基于 STFT 的 Wigner-Ville 分布交叉项抑制[J]. 航天电子对抗, 2010, 26(3): 27-29.
LV Zhou. Cross-terms suppression in wigner-ville distribution based on STFT[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2010, 26(3): 27-29.
- [14] Qian S E, Chen D P. Joint time-frequency analysis[J]. Signal Processing Magazine IEEE, 1999, 16(2): 52-67.
- [15] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

(编辑 侯 湘)