

逆变器谐波注入引发电池包单体电芯电压跳变问题研究

陈石人 黄勇 肖曦 杨凡 舒朝雷
(威马汽车科技集团有限公司, 成都 610000)

【摘要】针对某纯电动汽车在下线路试中高荷电状态(SOC)下出现制动失速、低SOC情况下满油门加速出现顿挫的问题,经分析确认是逆变器软件谐波注入电流信号参数不合理引发整车电网络系统的谐振,从而导致单体电芯电压跳变所致。对整车电网络系统谐振问题进行分析,建立整车电网络模型,计算谐振点,并优化了谐波注入策略,实车验证结果表明,采用优化策略时单体电芯电压跳变较小,且未引发新的NVH问题。

关键词:谐波注入 基尔霍夫电流定律 谐振点 整车电网络 纯电动汽车

中图分类号:U463.23*2 **文献标志码:**A **DOI:** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20220004

Research on the Problem of Battery Pack Voltage Jump Caused by Inverter Harmonic Injection

Chen Shiren, Huang Yong, Xiao Xi, Yang Fan, Shu Chaolei
(Weima Motor Technology Group Co., Ltd., Chengdu 610000)

【Abstract】In the road test, an electric vehicle was found brake stall under high SOC, and paused under low SOC when it was running at full throttle, it was found and confirmed that irrational current signal parameters injected by the harmonics of the inverter software triggered resonance of the vehicle electrical network, which caused voltage jump. The resonance was analyzed, and a vehicle electrical network model was established, and the resonance point was calculated, the harmonic injection strategy was optimized. Vehicle test shows that under the new strategy, the voltage jump has been reduced and it does not cause new NVH problems.

Key words: Harmonic injection, Kirchhoff's current law, Resonance point, Vehicle electrical network, Pure electric vehicle

【引用格式】陈石人,黄勇,肖曦,等.逆变器谐波注入引发电池包单体电芯电压跳变问题研究[J].汽车工程师,2023(11):19-24.

CHEN S R, HUANG Y, XIAO X, et al. Research on the Problem of Battery Pack Voltage Jump Caused by Inverter Harmonic Injection[J]. Automotive Engineer, 2023(11): 19-24.

1 前言

在纯电动汽车动力总成控制软件中,谐波注入被广泛应用。廖勇等^[1]应用谐波注入改善电流波形,抑制电磁转矩脉动;于吉坤等^[2-3]利用离散傅里叶变换进行永磁同步电机谐波分析,提出了一种谐波注入脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)方法,有效抑制了纹波电流;于慎波等^[4]用谐波注入法改善永磁同步电机的运动特性,降低电机

振动,并分析了转矩脉动抑制效果;Najmabadi等^[5]重点分析了注入电流灵敏度对电机转矩脉动消除的影响。

以上文献主要研究了谐波注入对电机总成自身的影响,未涉及其对纯电动汽车电网络的影响。卿宴伶等^[6]研究表明,在交-直-交电力机车系统中,为提高系统功率因数而提高高次谐波含量,容易引起高次谐波谐振。因此,在纯电动汽车整车电网络中,谐波注入很可能引发系统中如电池包、高低压

直流变换器(DC/DC)、车载充电器(On Board Charger, OBC)等部件的问题,如电池包单体电芯电压跳变^[7-10]。

本文针对某纯电动车型下线路试中单体电芯电压跳变过大引发制动失速和加速抖动等问题,分析问题产生的原因,并建立整车电网络模型,计算整车电网络系统谐振点,并对谐波注入策略进行优化,最后开展实车试验验证优化策略的有效性。

2 逆变器谐波注入问题分析

某纯电动车型在下线路试中,由于单体电芯电压跳变过大(>250 mV)引发系列问题:在高荷电状态(State of Charge, SOC)情况下出现制动失速,原因是单体电芯电压瞬间跳变到4 300 mV以上,能量回收功能被禁止;在低SOC情况下满油门加速时抖动,原因是单体电压瞬间跳变到3 200 mV以下,触发能量管理欠压保护,电机输出功率受限。

对问题进行定位,排除电池管理系统(Battery Management System, BMS)软硬件、单体电芯质量问题和整车电磁干扰后,发现搭载动力总成A时单体电芯电压无跳变,搭载动力总成B且仅逆变器软件版本低于V1.10时存在单体电芯电压跳变问题。因此,问题原因定位为动力总成B的逆变器软件。

整车单体电芯电压跳变情况如图1所示,2款动力总成相关参数如表1所示。

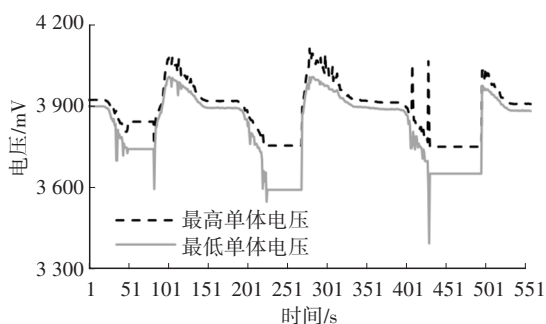


图1 单体电压跳变

表1 动力总成参数

参数	动力总成A	动力总成B
最高转速/ $r \cdot \min^{-1}$	10 600	16 000
峰值功率/kW	160	160
峰值扭矩/ $N \cdot m$	315	225
速比	9.126	12.410
工作电压范围/V	230~450	210~470
最大工作电流/A	450	396
电机类型	永磁同步	永磁同步

动力总成B的逆变器软件V1.10版本与更早的版本相比,最大差异是谐波注入参数不同。

2.1 整车电网络模型建立

逆变器软件的谐波注入参数不同,导致单体电芯电压跳变最可能的原因是谐波注入的频率与整车电网络系统谐振点重合,谐波电流幅值被放大,谐波含量提高。

纯电动汽车电网络可简化为由母线电容 C 、整车线束寄生电感 L 、动力电池内阻及寄生电感等组成,整车电网络确定后谐振点即确定,谐振点不会随电气参数的变化而改变。

为求解整车谐振网络的谐振点,首先需建立直流侧模型。完整模型涉及用电设备较多,模型非常复杂,现阶段主要关注电池和逆变器间的谐振问题,为此得到直流侧的简化模型如图2所示。将电池等效为由电阻、电感、理想电压源串联构成,线束等效为由电阻、电感串联构成,电容等效为由电阻、电感、理想电容串联构成,逆变器等效为理想电流源。

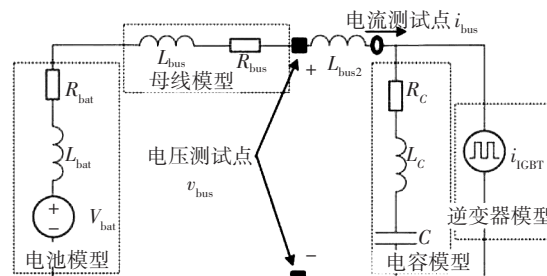


图2 交直流简化模型

由主电路拓扑工作原理可知,电路中含有直流量和交流量,而母线电容和系统寄生参数主要对交流量起作用,进一步化简模型,如图3所示。电池/母线模型可简化为由等效电阻和电感串联构成。

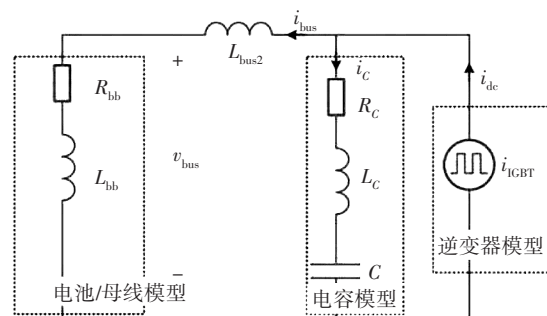


图3 交流简化模型

2.2 整车电网络参数计算

由图2和图3可知,电池包母线电流 i_{bus} 和母线电压 v_{bus} 可以通过测量电池包母线进行频谱分析得

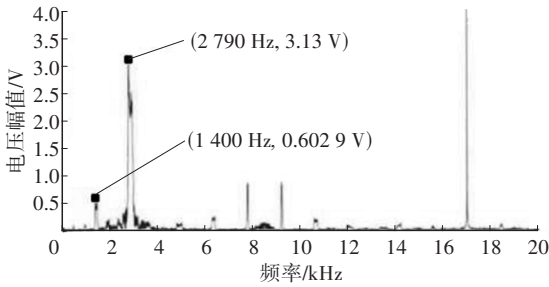
出,由于系统中逆变器模型电流 i_{dc} 作为谐波源不易测试,只能通过母线电流和电压波动来估算模型参数。电容已知,电容直流侧寄生等效电阻、等效电感对模型影响很小,本文通过估算求得交流简化模型中寄生电阻 R_{bb} 和寄生电感 L_{bb} :

$$\sqrt{R_{bb}^2 + (2\pi f_1 L_{bb})^2} \cdot i_{bus}(f_1) = v_{bus}(f_1) \quad (1)$$

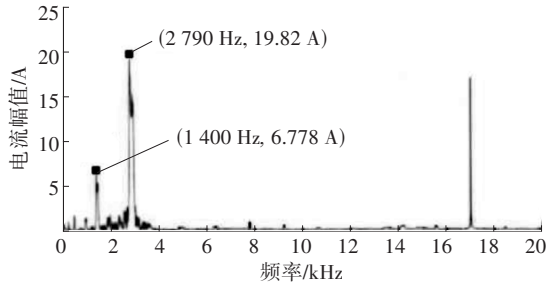
$$\sqrt{R_{bb}^2 + (2\pi f_2 L_{bb})^2} \cdot i_{bus}(f_2) = v_{bus}(f_2) \quad (2)$$

式中, $v_{bus}(f_1)$ 、 $v_{bus}(f_2)$ 分别为频率 f_1 、 f_2 下的电压; $i_{bus}(f_1)$ 、 $i_{bus}(f_2)$ 分别为频率 f_1 、 f_2 下的电流。

使用泰克TBS2000B示波器测试车辆正常行驶数据,选取其中一段数据进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)频谱分析,如图4所示。将此时1 400 Hz和2 790 Hz频率下的 v_{bus} 和 i_{bus} 代入式(1)和式(2),计算获得寄生电阻 $R_{bb}=46.5 \text{ m}\Omega$ 、寄生电感 $L_{bb}=9.1 \text{ }\mu\text{H}$ 。



(a) 母线电压幅频特性



(b) 母线电流幅频特性

图4 母线电压和电流幅频特性

2.3 谐振点及电流增益计算

根据电池系统与逆变器系统间的交流简化模型(见图3)和基尔霍夫电流定律可得复频域形式传递函数:

$$H_{bus\ i-i}(s) = \frac{i_{bus}(s)}{i_{dc}(s)} \quad (3)$$

$$H_{bus\ v-i}(s) = \frac{v_{bus}(s)}{i_{dc}(s)} \quad (4)$$

式中, $H_{bus\ i-i}(s)$ 为电流转移复频域传递函数; $H_{bus\ v-i}(s)$ 为电压转移复频域传递函数。

由于 i_{bus} 为电池包-母线模型测量电流,已经滤波,而 i_{dc} 为逆变器模型电流,为谐振源,二者比值作伯德(Bode)图,可以得到系统谐振点和电流增益。

电容模型和逆变器模型中,电阻、电容和电感均为已知固定值,根据图3可得:

$$i_{dc}(s) = i_{bus}(s) + i_c(s) \quad (5)$$

$$i_{bus}(s) = \frac{v_{bus}(s)}{R_{bb} + sL_{bb} + sL_{bus2}} \quad (6)$$

$$i_c(s) = \frac{v_{bus}(s)}{R_c + sL_c + \frac{1}{sC}} \quad (7)$$

$$v_{bus}(s) = i_{bus}(s)(R_{bb} + sL_{bb} + sL_{bus2}) \quad (8)$$

式中, R_c 为整车电网络电容模型电阻,约为 $0.2 \text{ m}\Omega$; C 为逆变器电容,约为 $370 \text{ }\mu\text{F}$ (整个电网络系统电容约 $407 \text{ }\mu\text{F}$); L_c 为电容模型电感,约为 20 nH ; i_c 为电容模型电流; L_{bus2} 为测量点后直流母线导线电感:

$$L_{bus2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{2l}{r} - 0.75 \right) \quad (9)$$

式中, μ_0 为母线真空导磁率,取 $1.25\ 664 \text{ }\mu\text{H/m}$; r 为直流母线半径,取 0.004 m ; l 为测量点后的直流母线长度,取 0.5 m 。

经计算, L_{bus2} 约为 0.477 nH 。

将式(5)~式(9)代入式(3)、式(4),可以分别得到:

$$H_{bus\ i-i}(s) = \frac{R_c + sL_c + \frac{1}{sC}}{R_{bb} + R_c + s(L_{bb} + L_c + L_{bus2}) + \frac{1}{sC}} \quad (10)$$

$$H_{bus\ v-i}(s) = \frac{R_c + sL_c + \frac{1}{sC} \left((R_{bb} + sL_{bb} + sL_{bus2}) \right)}{R_{bb} + R_c + s(L_{bb} + L_c + L_{bus2}) + \frac{1}{sC}} \quad (11)$$

将已知参数同时带入相应的传递函数,根据计算结果作Bode图,如图5所示。

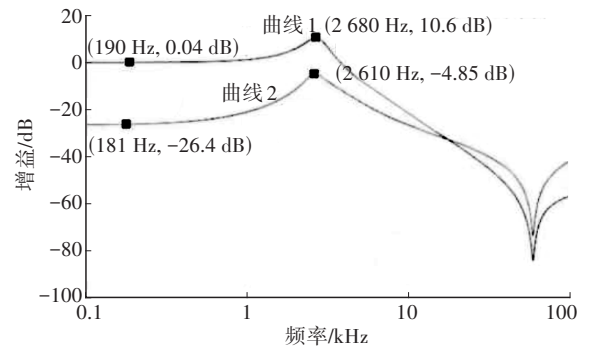


图5 Bode图

从图5中可以看出,电流的增益约为 10.6 dB ,系统谐振点约为 2.6 kHz ,谐振区间为 $2\sim 3 \text{ kHz}$,通过电流转移传递函数或者电压转移传递函数可以得

到几乎相同的谐振区。

3 谐波注入参数优化

谐波是频率为基波频率整数倍的一种正弦波。由于存在非线性元件和非线性负载,电网的电压或电流的波形包括频率为 50 Hz 的正弦波(基波)和与基波频率(50 Hz)成整数倍和分数倍频率的其他正弦波。

3.1 优化前逆变器软件谐波注入参数

单体电芯电压跳变所对应的 V1.09 版动力总成 B 逆变器控制器软件谐波注入参数如表 2 所示。

表 2 V1.09 版动力总成 B 逆变器控制器软件谐波注入参数

谐波阶次	谐波最高注入频率/Hz
驱动 24 阶	430
驱动 48 阶	430
驱动 144 阶	430
发电 24 阶	430
发电 48 阶	430

基波运行频率与转速的关系为:

$$60f = nP \quad (12)$$

式中, f 为基波运行频率; n 为电机转速; $P=4$ 为极对数。

由试验数据分析可知,单体电芯电压跳变问题出现在电机转速为 4 000~6 000 r/min 的区间,根据式(12)可以计算出此转速区间基波运行频率为 266.67~400.00 Hz。逆变器谐波注入的 6 倍和 12 倍频电流频率范围为 1.6~4.8 kHz,因此谐波注入的频率与整车电网络系统谐振点 2.6 kHz 重合,谐波电流幅值被放大,故 6 倍频和 12 倍频的谐波含量增大,导致母线电压和单体电芯电压跳变,如图 6 所示。

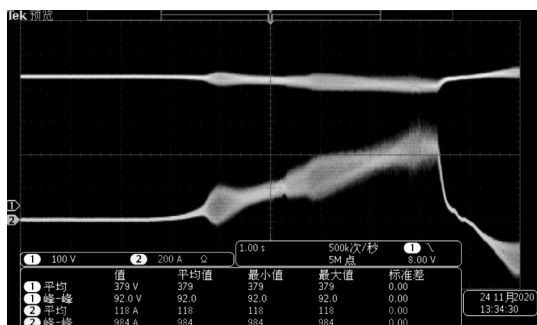
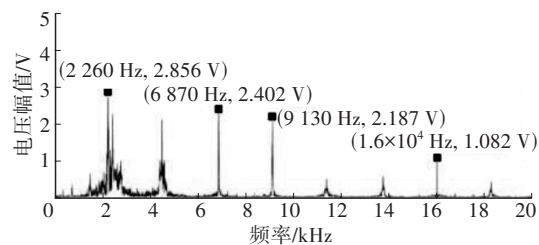
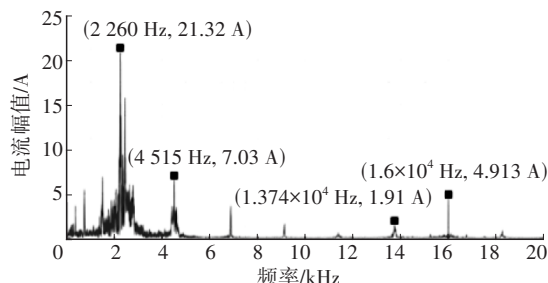


图 6 V1.09 版逆变器软件直流母线电流电压波形

选取该段数据中电流最大的一段进行 FFT 频谱分析,结果如图 7 所示,此时电机转速约为 5 650 r/min,根据式(12)可得此时基波频率约为 376.7 Hz,从图 7 中可以看出,该段数据 6 倍频(2 260 Hz/376.7 Hz≈6)电流谐波得到显著增强,同时,处于谐振区的谐波明显得到加强。



(a) 母线电压幅频特性



(b) 母线电流幅频特性

图 7 V1.09 版逆变器软件母线电压和电流幅频特性

3.2 优化后逆变器软件谐波注入参数

谐波注入频率与谐振点重合,谐波电流幅值被放大,导致母线电流和单体电芯电压跳变,因此,需要优化逆变器软件谐波注入的频率范围,避开整车电网络系统存在的固有谐振点,优化后 V1.10 版软件谐波注入参数如表 3 所示。

表 3 V1.10 版动力总成 B 逆变器控制器软件谐波注入参数

谐波阶次	谐波最高注入频率/Hz
驱动 24 阶	416.70
驱动 48 阶	226.67
驱动 144 阶	56.00
发电 24 阶	340.00
发电 48 阶	183.30

新的谐波注入频率参数不仅谐波注入含量降低,且最高 6 倍谐波注入频率为 2.5 kHz,未达到谐振点 2.6 kHz,基本避免了与整车电网络系统谐振点重合,优化了单体电芯电压跳变的幅值,如图 8 所示。

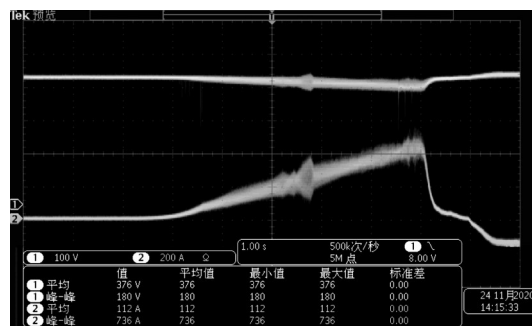
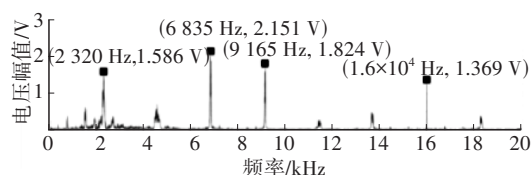


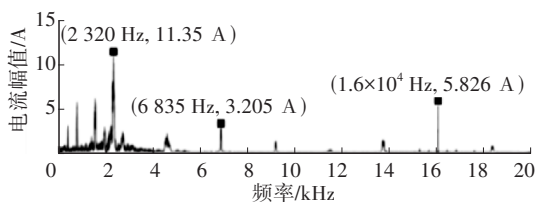
图 8 V1.10 版逆变器控制器软件直流母线电流电压波形

对该段数据同样选取电流最大的一段进行 FFT 频谱分析,结果如图 9 所示,此时电机转速约为

5 800 r/min, 根据式(12)可以计算出此时基波频率约为386.7 Hz。从图9中可以看出,较优化前,该段数据6倍频和谐振区电流谐波明显改善。



(a)母线电压幅频特性



(b)母线电流幅频特性

图9 V1.10版逆变器软件母线电压和电流幅频特性

3.3 实车验证

使用V1.10版本逆变器软件进行实车交叉验证,测试电池包单体电芯电压跳变并观察新的谐波注入参数是否会对整车其他性能如NVH、扭矩响应速度、扭矩控制精度等产生负面影响,电压跳变验证结果如表4所示。

表4 电压跳变验证结果

车辆编号	电池包	软件版本	单体电压跳变值/mV
01	电池包A	V1.09	296
		V1.10	87
02	电池包B	V1.09	287
		V1.10	89
03	电池包C	V1.09	138
		V1.10	37
04	电池包D	V1.09	260
		V1.10	80

从表4中可以看出,V1.10版软件可以很好地抑制单体电压跳变。同时,试验中没有新增NVH和驾驶性相关问题,问题得到解决。

4 结束语

纯电动汽车电池包单体电芯电压跳变问题,多从BMS软硬件和电芯一致性方向入手分析解决,本文针对某纯电动车型单体电芯电压跳变过大问题,排除相关可能性后,通过多次测试,将原因锁定为逆变器谐波注入参数不合理引发整车电网络系统谐振。通过建立整车电网络模型,计算整车电网络

系统谐振点,并对谐波注入策略进行优化,实车试验结果表明该优化策略有效,并得到以下结论:

a. 谐波注入方法在电机控制中应用时,需要考虑其对纯电动汽车三电系统其他部件的影响;

b. 不同的谐波注入参数对于纯电动汽车各方面性能的影响不同,在开发前期,应根据整车电网络系统的特性选择合适的谐波注入参数,以避免不必要的问题发生。

参 考 文 献

- [1] 廖勇,甄帅,刘刃,等. 用谐波注入抑制永磁同步电机转矩脉动[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 119-127.
LIAO Y, ZHEN S, LIU R, et al. Torque Ripple Suppression of Per-Manent Magnet Synchronous Motor by the Harmonic Injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 119-127.
- [2] 于吉坤,李立毅,杜鹏程,等. 高速永磁同步电机电枢电流谐波分析[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(5): 28-36.
YU J K, LI L Y, DU P C, et al. Harmonic Analysis of Armature Current for High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(5): 28-36.
- [3] 于吉坤,李立毅,杜鹏程,等. 基于谐波注入PWM的高速永磁同步电机纹波电流抑制方法[J]. 电气工程学报, 2017, 12(9): 1-10.
YU J K, LI L Y, DU P C, et al. High Speed Permanent Magnet Synchronous Motors Ripple Current Suppression Based on Harmonic Injection PWM[J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 12(9): 1-10.
- [4] 于慎波,薛镜武,夏鹏澎,等. 利用谐波注入法改善永磁同步电机的运动特性[J]. 机械设计与制造, 2021(11): 79-82.
YU S B, XUE J W, XIA P P, et al. Using Harmonic Injection Method to Improve the Motion Characteristics of PMSM[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(11): 79-82.
- [5] NAJMABADI A, XU W, DEGENER M. A Sensitivity Analysis on the Fifth and the Seventh Harmonic Current Injection for Sixth Order Torque Ripple Reduction[C]// 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Miami, FL, USA: IEEE, 2017: 1-8.
- [6] 卿宴伶,黄彦全,李辉,等. 车网耦合系统谐波谐振特性研究[J]. 电工技术, 2019(18): 145-151.
QING Y L, HUANG Y Q, LI H, et al. Research on Harmonic Resonance Characteristics of Locomotive-Network Coupling System[J]. Electric Engineering, 2019(18): 145-151.
- [7] 潘志亮,赵慧超,李帅. P2构型混合动力汽车电压控制功能算法研究[J]. 汽车技术, 2022(2): 1-7.

- PAN Z L, ZHAO H C, LI S. Research on Voltage Control Function Algorithm for P2 Hybrid Electric Vehicle[J]. Automobile Technology, 2022(2): 1-7.
- [8] 李鹏,高敏,耿兆杰,等. 锂离子单体电芯内部短路缺陷模拟及其早期预警特征研究[J]. 汽车技术, 2022(11): 35-40.
- LI P, GAO M, GENG Z J, et al. Study on Simulation and Early Warning Characteristics of Internal Short Circuit Defects in Lithium-Ion Single Battery Cell[J]. Automobile Technology, 2022(11): 35-40.
- [9] 宋娟娟,王尹琛,吴竟启,等. 永磁同步电机控制算法综述[J]. 汽车文摘, 2022(5): 33-43.
- SONG J J, WANG Y C, WU J Q, et al. Survey on the Control Algorithms for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Automotive Digest, 2022(5): 33-43.
- [10] 张祥. 电动汽车永磁同步轮毂电机无位置传感器控制方法综述[J]. 汽车文摘, 2021(4): 7-11.
- ZHANG X. Overview of Sensorless Control Methods for Permanent Magnet Synchronous Wheel Hub Motors for Electric Vehicles[J]. Automotive Digest, 2021(5): 7-11.
- (责任编辑 弦 歌)
- 修改稿收到日期为2022年9月20日。

《汽车技术》“智能电动汽车全域安全”专刊征稿通知

在“新四化(电动化、网联化、智能化、共享化)”背景下,智能电动汽车已然成为汽车工业的发展趋势。智能电动车不但可以为用户提供更加便利和优质的出行体验,还可为社会带来节能减排、交通拥堵缓解、道路安全提升等多重效益。然而,智能电动汽车的发展正面临着众多安全挑战,除传统的主被动安全外,还有诸如车辆起火及电池热失控、信息泄露及网络攻击、功能失效等新的安全问题。因此,迫切需要从更广维度来重新定义智能电动汽车安全,即全域安全。智能电动汽车全域安全包括:智能生命安全域、能源动力安全域及网络信息安全域。全域安全问题的解决程度,将成为衡量智能电动汽车发展水平的关键因素。

为更好地交流学术思想、分享研发经验、展示优秀成果,共同促进智能电动汽车全域安全水平的快速发展,《汽车技术》适时推出“智能电动汽车全域安全”专刊,并特邀湖南大学孙光永教授和张冠军副教授担任客座主编,欢迎全国高校、科研院所和企事业单位的科研团队踊跃投稿。

一、征稿主题(包括但不限于以下主题)

智能生命安全域:交通事故调查与分析、人体损伤生物力学、结构耐撞性分析与设计、先进主动安全功能、智能驾驶功能安全、乘员智能防护、弱势群体智能防护、主被动安全融合技术、先进安全测评技术

能源动力安全域:电池多尺度表征与建模、电池碰撞与防护、电池机械滥用与热失控、电池热分析与管理、电池状态监测与控制、先进电池测评技术

网络信息安全域:汽车网络安全、汽车信息安全、汽车数据安全

二、投稿须知

1. 请登录 www.qcjs.cbpt.cnki.net 在线投稿。

2. 论文具体要求见本刊主页“下载中心”栏目《作者指南》,在系统内稿件基本信息的中文标题前增加“【智能电动汽车全域安全专刊】”字样。

3. 热烈欢迎第17届国际汽车交通安全学术会议(INFATS 2023)参会代表积极投稿。

4. 投稿截止日期为2023年11月20日。

《汽车技术》编辑部