

Circuit Breaker Design of Electric Car

Rutao ZHAO¹, Xichan ZHU¹, Zhixiong MA¹, Qiang HU², Jin ZOU²

¹School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai, China, 201804

²Academy of Sciences in JiangXi Province, Nanchang, China, 330000

Email: zrthit@163.com

Abstract: A circuit breaker was designed after analysis of the risks of electric safety during electrical vehicle crash. High voltage safety system and occupant restraint system were integrated in electric vehicle. Firstly, structural design of circuit was conducted, applying initiating explosive device. Energy was produced by gunpowder explosion, quickly cut off the high voltage circuit in 5 milliseconds when receiving the signal. Secondly, the appropriate mounting position of circuit breaker was found in electric vehicle. Ignition condition of the circuit breaker was found by full-width crash simulation analysis, which is 25~30km/h. Finally, multi-stage ignition control strategy was put up.

Keywords: electric car; electrical safety; circuit breaker; ignition condition.

电动汽车高压电路断电器设计

赵汝涛¹, 朱西产¹, 马志雄¹, 胡强², 邹晋²

¹同济大学汽车学院, 上海, 中国, 201804,

²江西省科学院, 南昌, 中国, 330000

Email: zrthit@163.com

摘 要:电动汽车在碰撞中存在短路风险, 为提高电安全性, 本文基于某电动汽车设计一款断电器。首先进行断电器的结构设计, 采用火工品技术, 利用火药爆炸产生能量, 迅速切断高压电路, 使得断电器可在接收到点火信号后 5ms 内完成切断电路动作。其次根据断电器的布置原则, 将其安装在电动汽车的高压母线与行李舱内电池的连接处。最后参考 C-NCAP 正面 100%重叠刚性壁障碰撞工况设置多组碰撞仿真, 找到该工况下断电器的点火条件为 25-30km/h, 提出断电器控制策略。

关键词:电动汽车; 高压电路; 断电器; 点火条件

1 引言

电动汽车市场化程度越来越高, 其碰撞事故的发生率也在增加。相对于传统燃油汽车, 电动汽车装有高电压的驱动系统, 因此它在碰撞安全性方面有独特的要求: 电安全性^[1-2]。电动汽车在碰撞事故中有可能发生高压电部件挤压破坏或者高压电线被拉断或剪断等情况, 这极有可能导致高压电路发生短路, 造成车内乘员触电伤害, 并引发起火、爆炸等危险状况。

为提高电动汽车电安全性, 降低短路风险, 关键在于设计合理可靠的保护措施。首先在电池中设计高压电安全管理系统, 其次是在碰撞等极端工况下提前切断高压电的连接即断电防护技术^[3]。当前电动汽车断电防护技术主要有两种, 一为熔断器和继电器技术, 另外一种是采用安全气囊电子控制单元 ACU (Airbag Control Units) 技术, 以火药作为切断高压电驱动系统电路的开关^[3]。

国内外针对断电器的已有研究和专利较少, 本文将电动车电安全系统与乘员约束系统相结合, 由约束系统 ECU 对碰撞进行判断, 输出碰撞信号给断电执行机构, 主动切断电动车电源, 预防电动车碰撞后着火及对乘员的电击。可有效改善电动汽车碰撞电安全性能, 提高断电系统的可靠性和敏感性。

2 断电器结构设计

*江西省科学院对外科技合作项目: 基于车身轻量化的前保险杠超高强度钢的研究与开发

2.1 断电器工作原理

断电防护装置处于常闭状态，在接收到控制系统发出的点火指令后，由点火具引爆火药的发生器，迅速断开开关装置，切断除应急系统（应急灯、电动门窗、紧急呼叫系统）之外的电源，避免由于碰撞造成的短路电击或火灾。其工作原理图如图 1 所示。

断电防护装置在车辆正常运行时，须保持可靠稳定的电连接，一旦接收到 ACU 发出的点火指令，则迅速断开断电防护装置，为了提高断电防护装置的反应速度，断电防护装置以火药为动力源，能够在 10ms 内完成动作，切断电动车的电路系统。

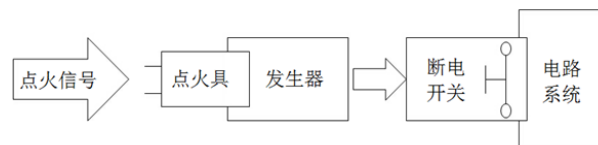


Figure 1. Schematic diagram of circuit breaker

图 1. 断电防护装置工作原理图

断电防护装置中的点火具，采用与安全气囊相同的点火具，其火药配方、产品结构、关键技术参数均沿用安全气囊用点火具。断电防护的发生器与安全气囊用气体发生器原理相同，由传火药、产气药逐级放大产生高压气体，高压气体在密闭的空间中，能量迅速聚集，在高能量作用下，快速推动活塞运动，断开断电装置导电片的机械结构。结构原理如下图 2 所示。

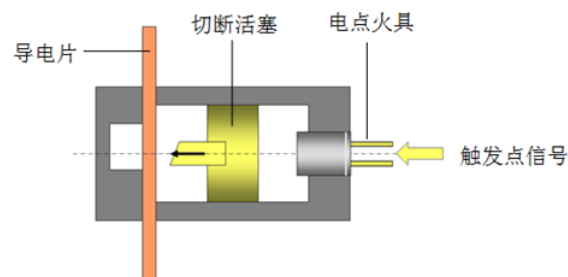


Figure 2. Structure schematic diagram of circuit breaker

图 2. 断电防护装置结构原理图

2.2 断电器结构及性能

断电器由五部分组成，分别为壳体、点火具、切断销、导电片和堵盖，如图 3 所示。点火信号触发点火具点爆火药推动切断销切断导电片，切断高压电回路的连接。

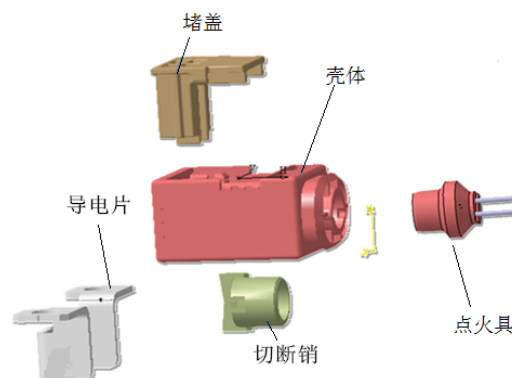


Figure 3. Dismantling diagram of circuit breaker

图 3. 断电器各部件拆解图

断电防护装置由低压电路回路进行控制，切断电动汽车高压回路，采用火工品技术，利用火药爆炸产生的能量，迅速切断高压电路。主要动力源是东方久乐公司具备专利的点火具产品，以高氯酸钾为氧化剂高速化学反应产生的能量完成执行动作。断电防护装置控制端布置于约束系统回路中（弱电回路）；执行端布置于高压电路中（强电回路），如图 4 所示。

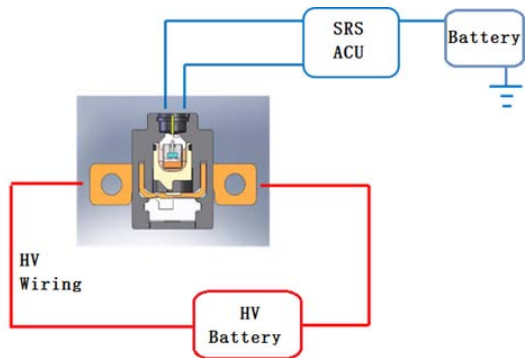


Figure 4. Control circuit principle diagram
图 4. 断电器控制回路原理图

根据本文设计要求，提出断电防护装置技术的要求指标与通过对断电防护装置工装样件的关键性能测试所得到的实际测试指标对比如表 1 所示，断电器样件如图 5 所示。

Table 1. Performance index of circuit breaker
表 1. 断电器性能指标

要求项 目	技术要求指标	实际测试指标
数值要 求	5ms 内完成切断电源动作	$\leq 5\text{ms}$ 断电时间
	1.2A/2ms 点火电流	1.2A/2ms 点火电流
	电点火具起爆压力为 15MPa	电点火具起爆压力 8Mpa
其他要 求	强电回路部份低导通电阻	$\leq 0.1\ \Omega$ 导通电阻
	强弱电之间高绝缘电阻	$\geq 10\text{M}\ \Omega$ 绝缘电阻
	防尘、防水密封技术	耐温热、粉尘、盐雾、振动



Figure 5. Circuit breaker
图 5. 断电器实物图

3 断电器在电动汽车中布置位置

3.1 电动汽车结构特点及有限元建模

本文使用的电动汽车模型是一辆基于内燃机汽车改装的纯电动汽车，大部分车身结构是沿用内燃机汽车的车身结构。电动汽车外形尺寸如图 6，轴距为 2640mm，车身质量为 1.505t。工作电压为 312V，电池能量为 19kW·h，电池组容量为 62.5A·h，续航里程为 100km。

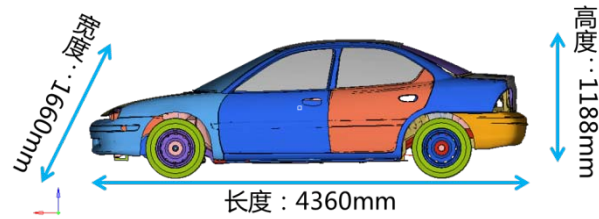
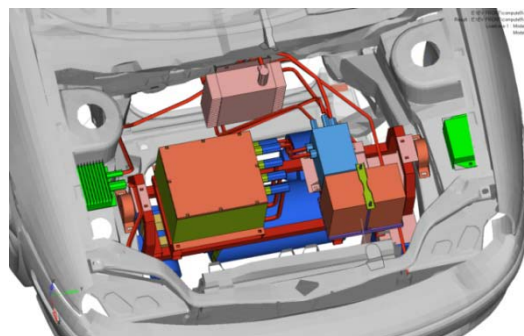


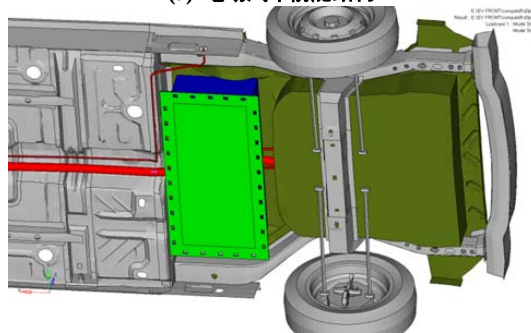
Figure 6. FEM of electric vehicle
图 6. 电动汽车有限元模型图

前舱区域，去除不需要的发动机模块和变速箱，安装一双横梁支架。利用螺栓将 PCU、高压接线盒以及蓄电池固定在支架的上方，将空调压缩机、电机以及充电器安装在支架的下方。DCDC 通过支架以及螺栓固定在电动汽车前舱的前围板之前。电动汽车中共装配两个电池模块，其中一个位于后排座椅地板下方，另一个安装在行李舱内，如图 7 所示。

选取 PCU、驱动电机、DCDC、后排座椅下电池以及行李箱内电池作为高压电部件进行考察，高压电部件之间的连接电线作为高压电线研究对象。

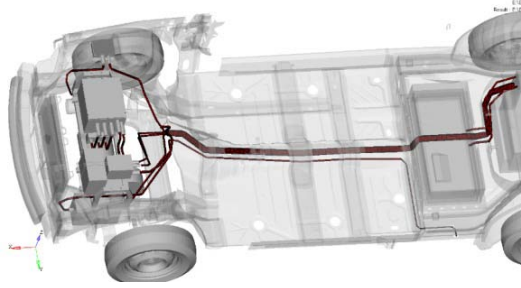


(a) 电动汽车前舱结构



(b) 电动汽车后座椅电池布置

(c) 电动汽车后舱电池布置



(d) 电动汽车高压电路布置

Figure 7. Diagram of high voltage components in electric car
图 7. 电动汽车高压电部件结构分布图

3.2 断路器布置原则

高压断路器控制高压电驱动系统的通断，工作状态应处于常闭状态。高压断路器布置原则如下：

1)、高压断路器控制电驱动系统中高压电部件的带电状态。正常行驶情况下，电动汽车的高压电部件能够正常工作，发生碰撞的极限工况下，断路器可以迅速切断动力蓄电池的电力输出，使高压电部件不带电。因此，高压断路器应布置在动力蓄电池输出与前舱高压电部件之间的高压母线上。

2)、本文设计的高压断电防护装置采用火工品技术，利用火药爆炸产生的能量切断导电片以断开电路连接，一旦碰撞发生使断路器起作用，不可手动或自动复位，只得更换新的断路器。因此，最好将断路器布置在方便人工更换的位置。

3)、动力蓄电池作为电动汽车的能量存储装置，考虑到整车尺寸及碰撞安全性因素，可用空间非常有限。为了尽量增加动力蓄电池的能量，应该尽量减少动力蓄电池包内除了电池单体或模组以外的其他零部件的数量。同时，需要保证动力蓄电池系统的维修便利性，尽量减少拆卸动力蓄电池包的次数。因此，高压断路器要与动力蓄电池系统内部结构隔离，避免维修或更换断路器时影响电池系统内部的防护等级。

3.3 断路器布置位置

高压电母线在动力蓄电池附近的布置情况如图 8 所示。高压电母线穿过中央通道后经过后座椅动力蓄电池上方与后舱动力蓄电池相连。后舱电池与后座椅下电池通过两根高压电线串联。

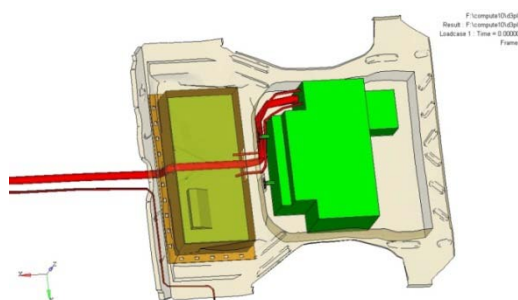


Figure 8. Layout of high voltage cable
图 8. 高压电线在后部布置情况

根据以上高压断路器在电动汽车上布置的原则，将断路器安装在电动汽车的高压母线与行李舱内电池的连接处，如图 9 中箭头所指位置。当碰撞发生需要断路器动作时，可以完全地切断动力电池的电力输出，防止高压电路短路事故的发生。

4 断路器点火条件与控制策略

高压断路器的点火条件是指在一定的碰撞条件下断路器必须点火，而在其他条件下不得点火。也就是说在一定的碰撞强度下高压断路器应该点火，而低于该强度时高压断路器不能点火。与安全气囊的点火条件类似，高压断路器的点火条件也用引爆速度来表示。这里的引爆速度并不是碰撞事故中的速度，而是指和碰撞事故强度相等效的固定壁障正面碰撞的等效初速度^[4]。例如：欧洲 ECER94 法规规定作为安全带辅助装置的安全气囊的点爆速度为:低于 20km/h 正面撞击固定壁障时不应点火,大于 30km/h 时必须点火,20-30km/h 时不作要求。

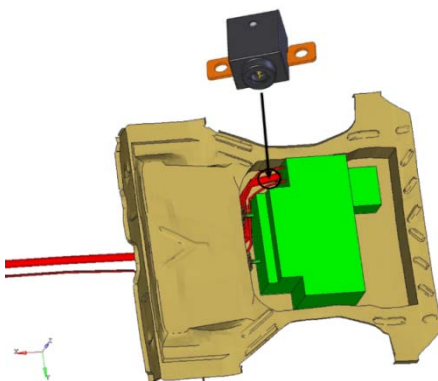


Figure 9. Layout of circuit breaker in electric car
图 9. 断路器在电动汽车中的布置位置

4.1 断路器点火条件

参考 C-NCAP 正面 100%重叠刚性壁障碰撞工况进行碰撞仿真，为了确定断路器的点火条件，设置一系列的初速度值，间隔为 10km/h，找到该工况下需要断路器点火的初速度以及在各速度值下各种碰撞短路风险发生的时刻。

电动汽车高压电安全风险包含两类：高压电部件安全风险及高压电线安全风险^[1]。我们将电动汽车的电安全性风险分为高压电部件的连接螺栓失效、连接支架的失效、高压电部件受侵入、高压电线受挤压、接口变形及高压电线受拉共 6 种短路风险，短路风险的评价方法在参考文献 1 中已经详细讨论。在不同速度撞击固定壁障碰撞中，得到的短路风险发生时刻如下表 2 所示。

Table 2. Short-circuit risk time under various crash velocities
表 2. 各初速度下短路风险发生时刻

速度(km/h)	螺栓失效	支架失效	部件侵入	电线挤压	接口变形	电线受拉
50	34ms	30ms	40ms	25ms	40ms	55ms
40	42ms	45ms	55ms	40ms	65ms	
30		65ms		55ms		
20						
10						

从以上分析中得知，正面 100%重叠刚性壁障碰撞工况的碰撞速度在 30km/h 及以上时，电动汽车的高压电路会发生一种或多种短路风险；碰撞速度在 20km/h 以下时，电动汽车的高压电路不会发生任何短路风险。

为了进一步缩小正面碰撞时高压断路器引爆的速度范围，又对电动汽车进行了 25km/h 速度下的正面 100%重叠刚性壁障碰撞分析。从碰撞仿真结果中来看，除了空调压缩机的高压电线在碰撞 60ms 处受到挤压之外，其他部位没有发生短路风险，如图 10 所示。

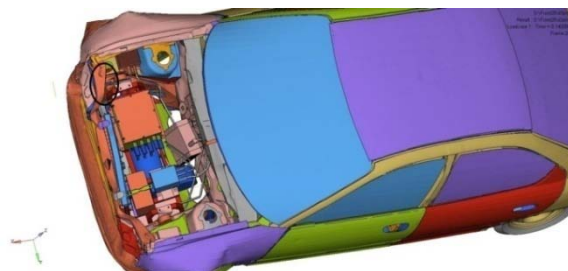
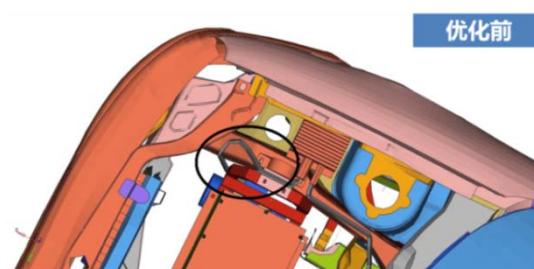


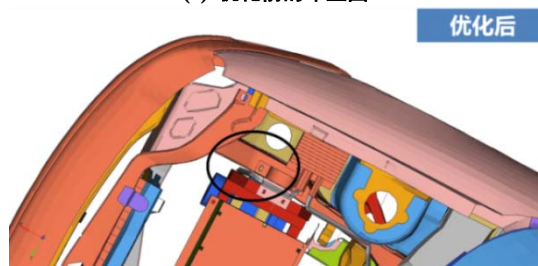
Figure 10. Crash simulation result under velocity of 25km/h

图 10. 25km/h 碰撞仿真结果

可以对高压电线的布置进行优化设计，将靠近前端位置的高压电线后移，可以避免高压电线在低速碰撞情况下被前端部件挤压到，并且不会影响到高压电线的有效连接。将空调压缩机的高压电线进行重新优化，改变布置位置，如图 11 所示。



(a) 优化前的布置图



(b) 优化后的布置图

Figure 11. Optimized layout for high voltage cable of air conditioner compressor

图 11. 空调压缩机高压电线优化布置

将充电器的高压电线进行重新布置优化，缩短前伸量，如图 12 所示。



(a) 优化前的布置图

(b) 优化后的布置图

Figure 12. Optimized layout for high voltage cable of charger

图 12. 充电器高压电线优化布置

对优化后的电动汽车模型进行 25km/h 速度下的正面 100%重叠刚性壁障碰撞仿真，分析高压电路的短路风

险。碰撞结果如图 13 所示。

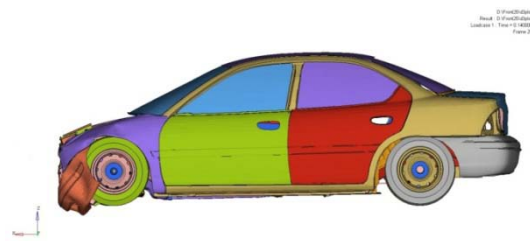


Figure 13. Simulation result of full-width rigid barrier crash under velocity of 25km/h
图 13. 25km/h 正面 100%重叠刚性壁障碰撞

从碰撞仿真结果中可以看出，25km/h 速度下碰撞使得电动汽车前端的保险杠发生后移，但是由于优化了高压电线的布置，所以不会挤压到高压电线。双横梁支架发生轻微的翻转，PCU 等上部高压电部件前倾，但是并没有受到侵入，外壳保持完整性。连接螺栓和支架应都没有发生失效，DCDC 的高压电线接口也没有发生弯折变形。前舱碰撞仿真结果图如图 14 所示。

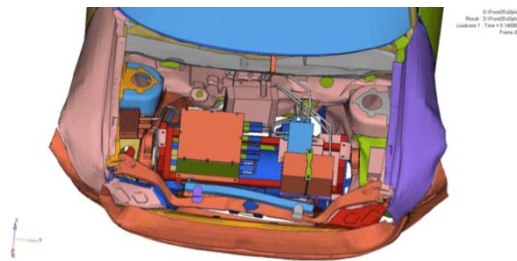


Figure 14. Fore cabin under crash velocity of 25km/h
图 14. 25km/h 前舱碰撞后情况

因此，对电动汽车的前端空调压缩机高压电线和充电器高压电线优化布置之后的 25km/h 速度下的正面 100% 重叠刚性壁障碰撞，不会产生电驱动系统的高压电短路风险。

综合以上分析，对正面碰撞各速度值下碰撞仿真结果作统计，找到各个碰撞速度下电驱动系统可能发生的短路风险及发生时刻，如下表 3 所示。

Table 3. Short-circuit risk time under various crash velocities
表 3. 各初速度下短路风险发生时刻

速度 (km/h)	螺栓失效	支架失效	部件侵入	电线挤压	接口变形	电线受拉
50	34ms	30ms	40ms	25ms	40ms	55ms
40	42ms	45ms	55ms	40ms	65ms	
30		65ms		55ms		
25 (优化前)				60ms		
25 (优化后)						
20						
10						

从表中我们可以看出，高压电线合理布置后，电动汽车在碰撞速度小于或等于 25km/h 时不会产生电安全性短路风险，断路器不能动作；当碰撞速度大于或等于 30km/h 时，高压电部件和高压电线有发生短路的风险，结合安全气囊的碰撞传感器信号来判断是否需要断路器断开高压电路。

4.2 断电器控制策略

整合高压电安全系统与乘员约束系统后，断电器与安全气囊共用一套电子控制单元。但是断电器与安全气囊的点火条件不同，因此需要开发双级门槛的点火策略，能够根据碰撞强度的不同，决定是点爆断电防护装置还是点爆安全气囊，这无论是成本还是安全性方面都是最佳的策略。并可在此逻辑基础上扩展到多级门槛，多级点火策略，能识别碰撞强烈程度，针对碰撞强度确定不点火、只点气囊、点气囊和断电器的多级点火方式。

5 结论

1)、本文将电动车电安全系统与乘员约束系统相结合，设计一款断电器，并由约束系统 ECU 对碰撞进行判断，输出碰撞信号给断电执行机构，断电器可在 5ms 内切断电动车电源；

2)、根据断电器的位置布置原则，将断电器布置在该电动汽车的高压母线与行李舱内电池的连接处；

3)、提出断电器的点火条件确定方法，通过设置多个碰撞初速度进行电动汽车的碰撞仿真分析，找到该电动汽车在正面 100%重叠刚性壁障碰撞工况下的断电器点火条件为 25~30km/h，并提出多级点火策略以待后续研究。

参考文献

- [11] 接桂利,朱西产,曹亦兴等. 电动汽车碰撞电安全性风险及仿真分析. 汽车技术,2015,(03): 42-46.
- [12] 王凯,李向荣,白鹏, 电动汽车在碰撞试验中的电气安全. 汽车安全与节能学报, 2012. 3(1): 34-37.
- [13] 郑荣良, 卓斌等. 电动汽车高压电安全诊断与控制策略的研究[J]. 汽车工程,2007 (29): 308-312.
- [14] 唐国强, 朱西产, 汽车安全气囊点火算法的研究[J]. 公路与汽运, 2009(02): 1-5