基于高边开关的车身域控制器智能配电系统设计及应用

吴世杰[1] 刘波文[2] 吴伟斌[3] 邱雷[4] 卓盛龙[4] 文火生[4]

（1.比亚迪汽车工业有限公司，深圳 518118；2.澳门科技大学，澳门 999078；3.华南农业大学，广州 510642；4.同济大学，上海 200092）

【摘要】针对传统电源网络采用熔断器和继电器对整车进行保护的方式易导致电网失效，进而引发智能驾驶系统故障的问题，提出一种基于半导体的智能配电方法，将汽车低压电器车身域控制器中的熔断器和继电器替换为半导体高边开关芯片，以大幅延长控制器使用寿命，并结合多脉冲过流检测保护策略实现过流、短路、过温等故障条件下对系统的有效防护，从而杜绝电路主回路烧蚀，降低整车燃烧风险。试验结果表明，采用智能配电技术替代传统熔断器和继电器可实现对整车电源网络的有效控制，并具备寿命长、成本低、响应快、可靠性强的优势。

关键词：电子熔断器 高边开关芯片 熔断器 固态继电器 电流保护

中图分类号：U463.63 **文献标志码：**A **DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20260089

Design and Application of High-Side Switch Based Intelligent Power Distribution System in Body Domain Controllers

Wu Shijie[1], Liu Bowen[2], Wu Weibin[3], Qiu Lei[4], Zhuo Shenglong[4], Wen Huosheng[4]

(1. BYD Auto Industry Company Limited, Shenzhen 518118; 2. Macau University of Science and Technology, Macau 999078; 3. South China Agricultural University, Guangzhou 510642; 4. Tongji University, Shanghai 200092)

【Abstract】To solve the problem that vehicle power networks using fuses and relays for whole-vehicle protection easily suffer grid failure and further cause intelligent driving system faults, a semiconductor-based intelligent power distribution method is proposed. The fuses and relays in the body domain controller for automotive low-voltage electrical appliances are replaced with semiconductor high-side switch chips to significantly extend the service life of the controller. A multi-pulse overcurrent detection and protection strategy is further adopted to safeguard the system against overcurrent, short circuits and over-temperature to prevent main-circuit burnout and reduce vehicle fire risk. The results show that the proposed technology enables effective control of the vehicle power network while offering long service life, low cost, fast response and high reliability.

Key words: eFuse, High-side switch chip, Automotive fuse, Solid-state relay, Current protection

【引用格式】吴世杰，刘波文，吴伟斌，等. 基于高边开关的车身域控制器智能配电系统设计及应用[J]. 汽车工程师，2026(10): 42-48.

WU S J, LIU B W, WU W B, et al. Design and Application of High-Side Switch Based Intelligent Power Distribution System in Body Domain Controllers[J]. Automotive Engineer, 2026(10): 42-48.

1 前言

近年来，汽车电子零部件在整车中的占比持续提高，人工智能技术的不断渗透正推动汽车由“电动化”向“智能化”转变[1-2]。然而，电网失效会对自动驾驶和辅助驾驶相关功能产生严重影响[3]，因此

通信作者：邱雷（1986—），男，汉族，江苏连云港人，博士研究生，教授、博导，主要研究方向为电路与系统设计，qiulei@tongji.edu.cn；卓盛龙（1988—），男，汉族，福建福州人，博士研究生，研究员，主要研究方向为高速及高精度光电芯片设计，slzhuo@tongji.edu.cn。

取消车身域控制器中的熔断器和继电器是实现更安全、更智能、更可控的半导体智能配电方案的重要路径[4]。

与采用熔断器和继电器的传统配电技术相比，基于半导体器件的智能配电技术在多个方面展现出显著优势：熔断器通常仅能承受10^5次脉冲冲击，继电器开关寿命一般为2×10^5次，而半导体开关器件在开关10^{15}次后仍可保持性能无衰减[5]；传统配电技术保护功能单一、响应时间较长[6-7]，仅具备普通阈值保护功能，无法应对冲击电流并提供误动作后的恢复措施[8-9]，同时，感性负载产生的反向电动势无法实现续流，存在燃烧隐患[10]。

为解决上述问题，本文使用半导体高边开关芯片替代汽车熔断器和继电器，结合控制策略对冲击电流进行精确管控，防止过流、短路、过温等故障，实现对控制器和负载的有效保护[11]，杜绝电路主回路烧蚀现象，从而降低电动汽车燃烧风险。

2 系统总体方案设计

本文采用的集成式车身控制模块（Body Control Module，BCM）包括主控单元和13个电路模块，如图1所示，通过单个ARM处理器实现信号采集与模块控制。外部通信模块集成网关控制器（M4F核心直接控制交互），网关模块与外部控制器局域网（Controller Area Network，CAN）以不同网络速度交换标识符（ID）信息，例如高速250 kbit/s与低速125 kbit/s网络，经信息交换后发回相应网络。本文集成式车身控制器的网关连接CAN与局域互联网络（Local Interconnect Network，LIN）总线，在CAN侧对标准帧和扩展帧进行数据路由，在LIN侧按调度表完成信号级数据转发[12]，支持车载应用数据、诊断报文、调试和标定报文的路由，以及面向网络和电子控制单元（Electronic Control Unit，ECU）的数据映射（应用于车辆诊断口物理隔离方案）。车身域控制器网关模块通过接口9与外部网络连接，如图2所示。

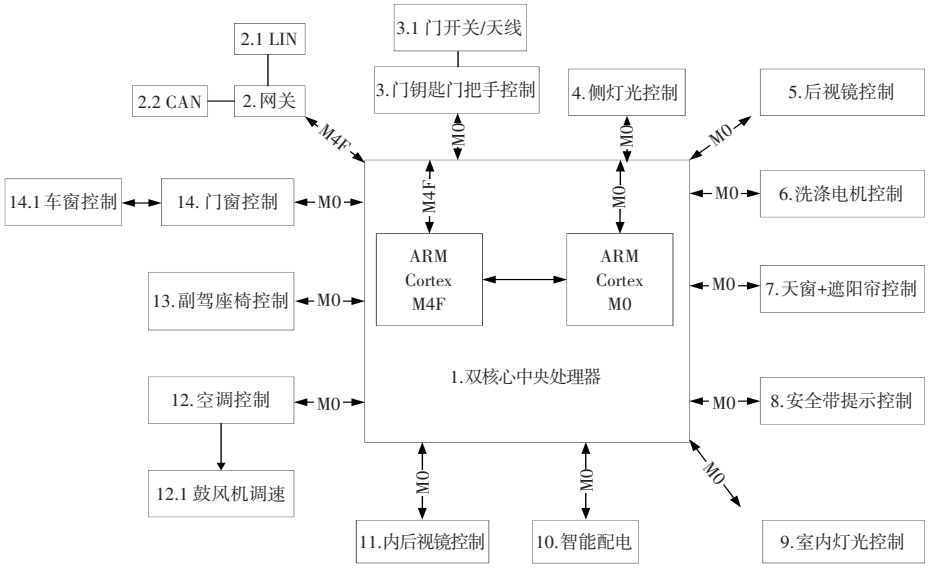


图1 智能车身域控制器内部模块框图

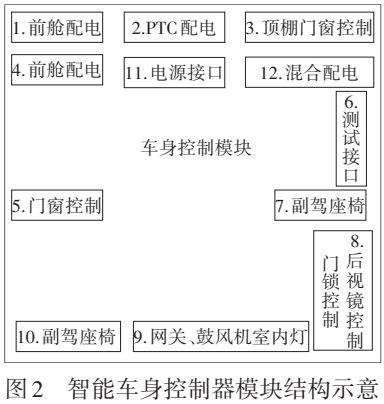


图2 智能车身控制器模块结构示意

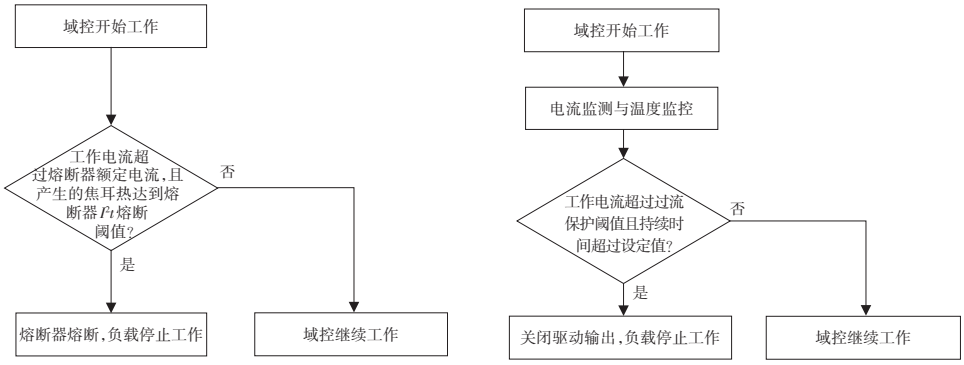
图2所示的模块集成了智能配电控制功能单元，内部包含驱动控制功率单元，实现智能配电控制及预配电控制逻辑，并借助接口1、3、4实现对前舱的配电。

3 智能配电技术方案

3.1 设计目标

本文根据负载大小选择合适的功率器件[13]：30 A及以下配电采用集成式高边开关芯片，30 A以上配电采用预驱芯片搭配功率金属氧化物半导体

场效应晶体管（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor，MOSFET）。采用微控制单元（Microcontroller Unit，MCU）直采方式进行模数转换，以确保保护功能快速响应。电压数据仅用于后台监测，电流和温度数据则用于实施保护策略。电流保护作为智能配电技术的核心，各配电回路根据设计负载对应的熔断器熔断曲线实现软件模拟熔断保护。与传统配电技术中“单一熔断参数、熔断后无法自恢复”的一次性保护机制不同，本文方案能够在线束熔断前实现过流保护及自恢复。两种方案的总体实施框架如图3所示。保护阈值的设计参考表1中的高边开关芯片，结合控制策略模拟不同规格熔断器的焦耳积分，并通过监测电流和时间实现过流保护。



（a）传统熔断器方案　　（b）软件保护方案

图3　配电技术框架

表1　不同额定电流熔断器熔断点的模拟

T/s	熔断点/A													
	5 A	7.5 A	10 A	15 A	20 A	25 A	30 A	40 A	50 A	60 A	70 A	80 A	100 A	200 A
10^{-2}	45	70	100	140	200	240	330		980		1 600	1 800	2 200	3 100
10^{-1}	18	26	37	60	80	100	130	320	380	480	530	640	750	1 250
10^{0}	7.5	12	16	26	35	45	55	140	160	200	240	260	340	500
10^{1}	6.5	10	14	21	28	35	43	80	95	130	155	180	230	330
10^{2}	6.2	9.5	13	19	26	31	37	60	72	90	110	140	180	300
10^{3}											100	120	160	270

3.2　硬件方案

目前，适用于智能配电[14]的高边开关主要分为两类：一类芯片集成了焦耳积分曲线，另一类仅提供单一熔断点参数，如图4所示。集成焦耳积分曲线的高边开关可选规格较为有限，而未集成该曲线的产品最大过流能力仅为20 A。据佐思汽研《2025车身（区域）控制器行业研究报告》，只有内阻小于2 mΩ的高边开关才能实现20 A的过流能力。采用单晶圆工艺能量密度高，但同样不支持集成焦耳积分曲线。

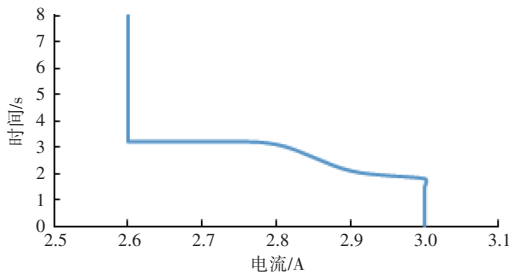


图4　未集成焦耳积分曲线的高边开关关断时间

因此，本文选用未集成焦耳积分曲线的高边开关，以Infineon BTS70xx系列为例，具体选型参数如表2所示。受限于器件本身的过流能力，高边开关的配电回路目前仅适用于二级配电场景。对于30 A以上的二级配电需求，需采用预驱搭配MOSFET的组合方案。目前可选的预驱芯片有2种，分别是ST VNF1048F及其国产替代型号EF1048Q，以及Infineon 2ED2410，两者配合MOSFET并联使用时，过流能力均可达到200 A以上。本文重点研究30 A以下的二级配电场景，以探讨高边开关替代传统熔断器的可行性。

传统方案中，熔断器仅具备单一的熔断参数，且熔断后无法自动恢复。相比之下，本文方案通过软件集成应用策略，预设最大焦耳积分值，在不超出该参数的前提下，可实现熔断点的线性调节，并支持熔断后的自恢复功能，从而显著提升系统的灵

活性和可靠性。

表2　高边开关芯片选型　　A

高边开关芯片型号	持续工作电流	冲击电流	替代熔断器额定电流
BTS7020-2EPA	5	61	5
BTS7008-2EPA	7.5	75	7.5
BTS7008-1EPP	11	67	10
BTS7004-1EPP	15	101	15
BTS7002-1EPP	21	115	20
BTS70015-1ESP	27	142	25
BTS70012-1ESP	31	170	30

如表3所示，基于理论计算分析，若选择过流保护参数为10 A的熔断器，可选用内阻为4 mΩ的高边开关芯片，将温升控制在30 ℃以下。其中，$R_{thj-amb(2L)}$表示2层印制电路板（Printed Circuit Board，PCB）（100 mm×100 mm×1.6 mm，铜厚2×70 μm）的热阻，$R_{thj-amb(4L)}$表示4层PCB（100 mm×100 mm×1.6 mm，铜厚2×70 μm+2×35 μm）的热阻。

表3　BTS7004-1EPP高边开关芯片温升计算

参数	取值	参数	取值
负载电流/A	10.00	内阻@150 ℃/mΩ	0.008
负载冲击电流/A	15.00	消耗功率/W	0.800
$R_{thj-amb(4L)}$/℃·W^{-1}	25.40	4层温升/℃	20.32
$R_{thj-amb(2L)}$/℃·W^{-1}	31.80	2层温升/℃	25.44
最高工作结温/℃	150.00		

图5所示为集成式高边功率开关芯片内部原理框图，芯片内部划分为采集模块、逻辑控制模块和功率模块。采集模块负责对电流、电压、温度进行采集，经内部信号调理后，由IS引脚输出相应电压信号，供微处理器检测。逻辑控制模块对输出通道进行控制：输入控制引脚IN0、IN1分别控制对应输出引脚OUT0、OUT1的开关状态；DSEL引脚用于检流通道切换控制，与MCU的通用输入输出（General Purpose Input/Output，GPIO）相连；DEN引脚用于诊断控制，同样连接MCU的GPIO，通过GPIO提供相应时序，可实现保护后的自恢复功能；GND引脚连接逻辑模块的信号地。功率模块由VS引脚接入电源，经内置功率管后，分别由OUT0、OUT1引脚输出。

图6所示为高边控制系统应用电路图。芯片的OUT1、OUT0管脚为输出端，IS为检流采样点，用于连接MCU的ADC输入；IN0、IN1为输出控制引脚，控制OUT0、OUT1的开启或关闭，并连接至MCU的GPIO；DSEL用于检流通道切换，连接MCU的GPIO；DEN用于诊断控制，连接MCU的GPIO，通过控制DEN的电平可实现保护后自恢复功能。

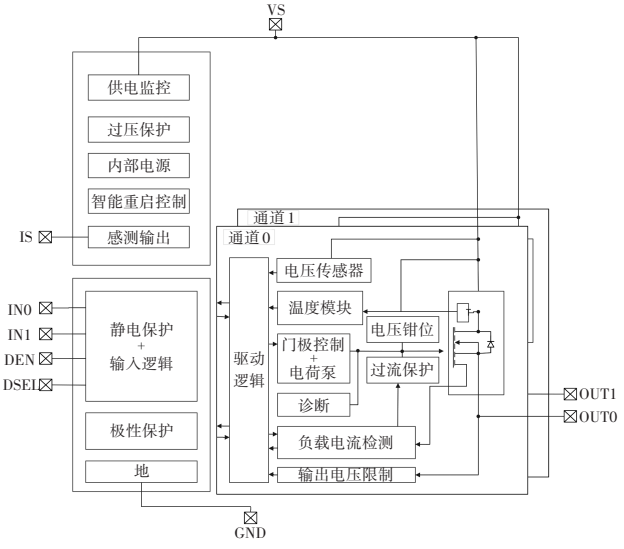


图5　集成式高边功率开关芯片内部原理框图

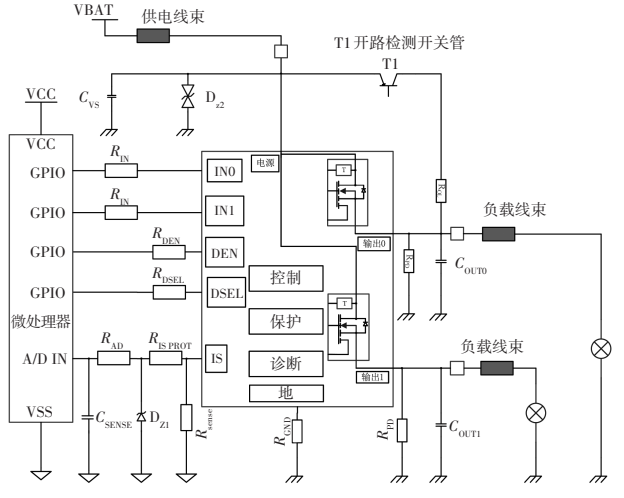


图6　集成式高边功率开关应用电路

4　软件方案

4.1　过流保护及动态功率分配

4.1.1　控制时序

图7所示为该高边开关控制逻辑器时序图：在第1个脉冲期间，按电流阈值执行I_A判定，并在该脉冲周期内完成2次持续40 ms的电流采集；间隔1 s后，第2个脉冲期间重复I_A阈值检测，并再次完成2次40 ms电流采集，根据过流策略判断是否触发过流保护；再延时1 s后，第3个脉冲切换为电子熔断器I^2t保护模式，检测电流阈值为I_{AA}。

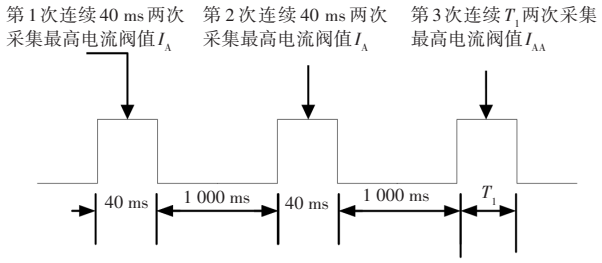


图7　高边开关控制逻辑器时序图

例如，当主回路电流大于19.5 A且脉宽持续时间T_1=1 000 ms时，检测到输出已进入保护状态，进一步将T_1调整为800 ms后，输出仍处于保护状态，随后同步减小I_{AA}阈值（如大于15 A），在T_1=800 ms条件下，检测输出恢复正常。通过不断调节I_{AA}与T_1的测试比值，并检测单位时间内各通道与总线路的电流关系，可在总功率不变的情况下使各支路获得最大电流供应，从而实现动态功率分配及电子熔断器功能。

图8所示为高边功率通道流程图，总电流通道对总电流进行双脉冲过流保护（阈值为I_A），并通过负载1、负载2对支路电流执行相同的双脉冲过流保护（阈值分别为I_{AA1}、I_{AA2}）。

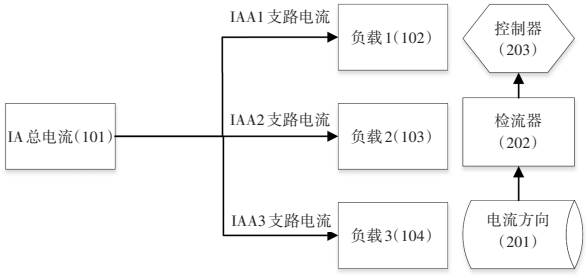


图8　配电功率通道流程

图9所示为同等硬件条件下实现过流保护算法试错策略的控制逻辑，针对分立式及集成式高边功率器件，采用固定脉冲宽度周期检测电流阈值I_A是否达到过流条件。例如，通道硬件过流保护阈值I_A设为38 A，并分为N路通道，I_{AA1}=I_{AA2}=6 A。当其中一路负载损坏或总通路电流达到临界保护点I_{AA}时，总通路执行I_A阈值试错过程：第1次脉冲检测若大于阈值设定（如20 A），则连续采集2次；隔1 s后进行第2次脉冲检测，若仍大于阈值设定（如20 A），则连续采集2次；隔1 s后进行第3次脉冲检测，调减I_{AA}值（如大于19.5 A）且T_1=1 000 ms，此时检测输出已保护，再次调整；当T_1=800 ms检测输出仍保护时，同步调减I_{AA}值（如大于15 A）并维持T_1=800 ms，此时输出恢复正常。通过不断调节I_{AA}与T_1的测试比值，并检测单位时间内各通道与总线路的电流关系，实现总功率不变条件下各支路的最大电流供应，实现动态功率分配，对所有支路IAA1~IAA3进行诊断，分别测试各通道电流是否超出设定阈值，进而控制每个通道的保护及恢复，可有效防止通道过流失效，并避免因总开关最大保护电流略小于支路负载长时间通过电流而引发的线路过热燃烧。

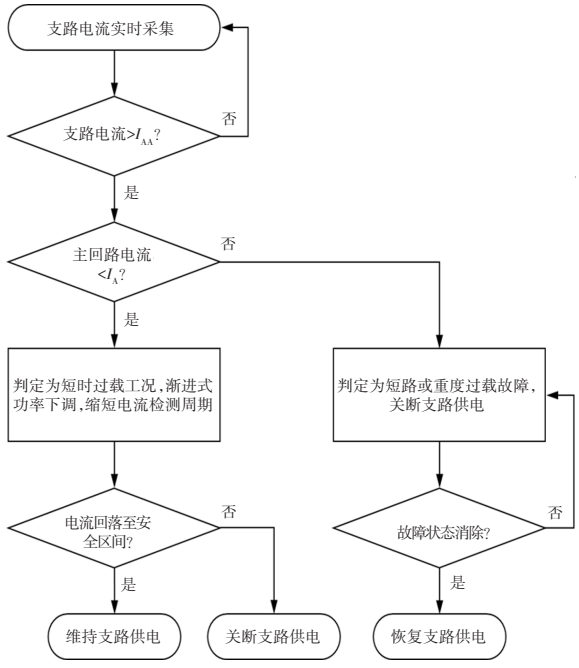


图9　配电控制逻辑器流程

4.1.2　控制流程

配电控制逻辑器流程见图9。系统首先通过检流器实时获取各支路的负载电流，并将采样数据送入两级阈值判别模块，完成故障分级判定。当支路电流大于过流阈值而主回路电流小于过流阈值时，判定为短时过载工况，系统启动渐进式功率下调闭环调节机制，同步缩短电流检测周期，持续迭代监测负载状态。若负载电流回落至安全区间，则维持支路持续供电，以避免启动冲击电流引起误保护。若多次调节后电流仍无法恢复至正常范围，则判定故障持续存在，系统关断该支路输出。当支路电流和主回路电流均超过过流阈值时，判定为短路或严重过载故障，系统立即切断支路供电；待故障消除、电流回归安全区间后，控制单元自动恢复支路输出。该分层防护架构兼顾瞬时负载波动容忍性与极端短路工况安全性，可依托预配置的阈值参数适配多种规格线束保护需求。通过软件算法替代多规格实体熔断器，可在实现多路负载动态功率分配

的同时，提升配电系统的自恢复能力与电源利用率。

总体而言，相对于传统方案仅具有单一额定熔断参数且熔断后不可自恢复的问题，本文方案改进了配电诊断控制策略，实现各支路动态智能功率分配，从而合理利用电源最大功率。

4.2 电子熔断器过流保护策略

过流保护是智能配电技术的核心[15]。过流保护功能需模拟熔断器的熔断曲线对线束实施保护，并确保在线束熔断前完成保护动作。为此，软件设计采用双重过流保护策略：第一重保护为模拟熔断器熔断曲线，当电流达到设定数值并持续预设时长后实施保护，如图9所示；第二重保护为模拟熔断器的焦耳积分实施过流保护，如表4所示。

表4 熔断器焦耳积分

额定电流/A	压降/mV	内阻/mΩ	焦耳积分/$A^2 \cdot s$
2	171	55.60	2.8
3	153	33.75	9.4
4	121	23.48	17
5	129	17.75	25
7.5	135	10.85	68
10	108	7.42	93
15	98	4.58	270
20	96	3.21	380
25	86	2.36	625
30	87	1.85	1 130

焦耳积分算法如图10所示，通过图9所示控制方法，可实现表4中熔断器对应的额定电流。通过预埋高边开关，可基于焦耳积分算法替代多种规格的实体熔断器。

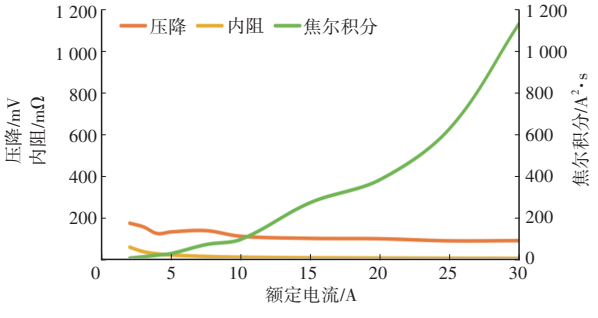


图10 熔断器焦耳积分曲线

按照两重保护设计原则制定的20 A保险过流保护策略见图8，其他规格熔断器的保护策略原理相同，仅需根据不同规格熔断器的熔断曲线、焦耳积分及电流采集范围设定相应保护参数。

5 电子熔断器试验验证

试验布置如图11所示：电源部分采用线性电源（型号为OWP2006H）；样件为车身域控制器（型号为HCHX-3622300），包含DC/DC电路、高边开关、微控制器等电路模块，主要负责电流检测、驱动输出控制及过流保护等功能；负载端使用电子负载（型号为CH8813+），可灵活调节负载大小，即域控工作电流的大小。试验开始前，各设备按图11方式连接，电子负载需先设定工作电流后再开启电源；试验开始后，样件根据检测到的电流实施各项保护策略，并据此控制驱动的输出与关断。



图11 智能配电带载测试连接装置

通过可编程电子负载模拟负载变化，利用示波器检测各配电回路的波形、工作状态及保护情况，测试电路是否符合设计要求。模拟熔断器保护策略的测试过程如下：

a. 若$I \geq 30$ A且持续1 000 s，则关断驱动电源；

b. 若$I \geq 30$ A持续800 s后，I降至25 A并持续300 s，则维持负载供电；

c. 若$I \geq 37$ A且持续100 s，则关断驱动电源；

d. 若$I \geq 37$ A持续80 s后，I降至30 A并持续30 s，则维持负载供电；

e. 若$I \geq 43$ A持续10 s，则关断负载电源；

f. 若$I \geq 43$ A持续8 s，I降至35 A持续3 s，则维持负载供电；

g. 若$I \geq 55$ A持续1 s，则关断负载电源。

试验结果表明，上述保护策略均能完成预设控制逻辑，实现配电保护和恢复功能。

6 结束语

本文针对传统熔断器和继电器在整车配电保护中存在的问题，基于高边开关设计了一套替代熔断器和继电器的智能配电方案通过控制高边开关模拟熔断器特性，实现动态功率分配和过流保护功能。经试验验证，该控制策略能够实现预设控制逻辑，完成车身配电保护和恢复功能。后续可通过硬件预埋和软件参数空中下载（Over The Air，OTA）方式修改不同电子熔断器的熔断阈值。验证结果表明，采用半导体高边开关替代汽车熔断器，并结合控制策略对冲击电流进行精确管控可有效防止过

流、短路、过温等故障，从而杜绝电路主回路烧蚀，显著降低由电器PCB烧蚀引发的电动汽车燃烧风险。

参 考 文 献

[1] 李国法，欧阳德霖，吴昊，等．高阶自动驾驶复杂场景智能感知关键技术和发展态势[J]．中国公路学报，2026，39(1)：289-312.
LI G F, OUYANG D L, WU H, et al. Critical Technologies and Development Trends of Intelligent Perception in Complex Scenarios for High-Level Autonomous Driving[J]. China Journal of Highway and Transport, 2026, 39(1): 289-312.

[2] 赵越．吉林越众汽车公司智能驾驶汽车竞争战略研究[D]．长春：吉林大学，2023.
ZHAO Y. Research on the Competitive Strategy of Jilin Yuezhong Automotive Company Intelligent Driving Vehicles [D]. Changchun: Jilin University, 2023.

[3] 文恺．最新汽车熔断器（保险丝）和继电器资料全书[M]．北京：化学工业出版社，2016.
WEN K. A Complete Handbook of the Latest Automotive Fuses and Relays[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.

[4] 杨晨．智能高边开关专用集成电路的设计[D]．兰州：兰州大学，2025.
YANG C. Design of Application-Specific Integrated Circuits for Intelligent High-Side Switches[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2025.

[5] ROUSSEAU B. 继电器和保险丝的理想替代品：全新大电流半导体开关[J]．电子产品世界，2017，24(2/3)：68-69+55.
ROUSSEAU B. Ideal Replacement for Relays and Fuses: Novel High-Current Semiconductor Switches[J]. Electronic Engineering & Product World, 2017, 24(2/3): 68-69+55.

[6] 陈志彤．智能电子保险丝模拟电路设计[D]．广州：华南理工大学，2023.
CHEN Z T. Design of Intelligent Electronic Fuse Analog Circuit[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.

[7] 尹志豪，余典儒，朱家峰，等．IGBT功率模块封装失效机理及监测方法综述[J]．电工电能新技术，2022，41(8)：51-70.
YIN Z H, YU D R, ZHU J F, et al. Review of IGBT Power Module Packaging Failure Mechanism and Monitoring Methods[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(8): 51-70.

[8] 唐俊，徐立浩，王喆，等．一种具有不可恢复的过流保护电路设计[J]．集成电路与嵌入式系统，2025，25(10)：61-65.
TANG J, XU L H, WANG Z, et al. Design of an Irreversible Overcurrent Protection Circuit[J]. Integrated Circuits and Embedded Systems, 2025, 25(10): 61-65.

[9] 袁应军．基于DSP的感应电动机智能保护器设计[D]．大连：大连海事大学，2008.
YUAN Y J. The Design of Intelligent Protector for Induction Motor Based on DSP[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008.

[10] 何筱荣，张小梅．汽车感性器件的危害与控制方法[J]．时代汽车，2017(4)：71-72.
HE X R, ZHANG X M. Hazards and Control Methods of Automotive Inductive Devices[J]. Auto Time, 2017(4): 71-72.

[11] 吕怡蕾．一种双通道高侧智能功率开关电路研究与设计[D]．成都：电子科技大学，2022.
LÜ Y L. Research and Design of a Dual-Channel High-Side Smart Power Switch Circuit[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.

[12] 孔令伟．车载CAN网络的网关设计方法研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2008.
KONG L W. Design and Implementation of Automotive CAN-CAN Gateway[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

[13] 李阳．一种高边功率开关的控制与驱动电路设计[D]．成都：电子科技大学，2016.
LI Y. Design of Control and Driving Circuits for High-Side Power Switch[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.

[14] SUI J P, ZHAO N N, DONG H M, et al. Research on Application of Intelligent High-Side Switch in Automotive Electronic Systems[J]. Automobile Digest, 2019(5): 18-25.

[15] 王贵奇．高边开关驱动器及其保护电路的设计[D]．成都：电子科技大学，2021.
WANG G Q. Design of Driver and Protection Circuit for High-Side Switch[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2026年7月28日。