基于 Simulink/Stateflow 的纯电动汽车整车高压上下电分步式控制策略设计

卢 雄, 王 全, 杨杰君, 文健峰
(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘 要:聚焦于提高纯电动汽车高压系统在上电、运行及下电过程中的安全性与可靠性,以整车域控制器为核心,基于 Simulink/Stateflow 环境设计一种分步式高压上下电控制策略。该策略针对车辆在行车、充电、24 h 监控及 DC/DC 自动补电状态下的特点实施精准的高压上下电管理,并在硬件在环测试平台上通过了有效性的验证。

关键词:纯电动汽车; 高压上下电; 控制策略; Simulink/Stateflow
中图分类号:U469.72⁺2 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-3331(2024)05-0015-07

Design of Step-by-step Control Strategy for High-voltage Power on and off of Pure Electric Vehicles Based on Simulink/Stateflow

LU Xiong, WANG Quan, YANG Jiejun, WEN Jianfeng
(CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: This paper focuses on improving the safety and reliability of the high-voltage system of pure electric vehicles during the power-on, operation, and power-off processes. Taking the vehicle domain controller as the core, a control strategy of step-by-step high-voltage power on and off is designed based on the Simulink/Stateflow environment. This strategy implements precise high-voltage power on and off management based on the vehicle characteristics during driving, charging, 24-hour monitoring, and DC/DC automatic power replenishment, and it has passed the verification of effectiveness on the hardware-in-the-loop test platform.

Key words: pure electric vehicle; high-voltage power on and off; control strategy; Simulink/Stateflow

在新能源电动汽车领域,高压系统作为车辆动力的核心部分,其安全性与可靠性的提升是行业关注的重点,因此高压电源管理系统的上下电控制策略非常关键。针对当前行业面临的电池管理系统(BMS)与动力总成控制器之间的协同控制效率不高、缺乏快速且安全的高压电路接通与断开机制,以及故障情况下保护措施不足等问题[1-3],本文基于 Simulink/Stateflow 开发环境,设计并实现一套既能严格满足安全标准,又能保障整车系统高效稳定运行的行业标准化高压上下电控制策略。

1 整车高压系统控制原理

在纯电动汽车中,整车域控制器(VDC)扮演核心角色,其被设计为常唤醒,负责统筹管理高压电源系统及动力系统的各项关键活动,包括但不限于车辆的高压上下电控制流程、驾驶决策控制、故障诊断处理及能量管理,整车电气连接示意图如图 1 所示。其中高压上下电作为纯电动汽车安全运营的重要基

收稿日期:2024-04-06。

第一作者:卢 雄 (1996—),男,工程师;主要从事新能源汽车整车控制与辅助驾驶控制软件开发工作。E-mail:925096526@qq.com。

石[4-5]，其控制策略的设计必须综合考量 BMS、控制总成（含电机控制器、整车 DC/AC、整车 DC/DC）、点火锁等多种电气部件的运作特性及其相互间的作用。

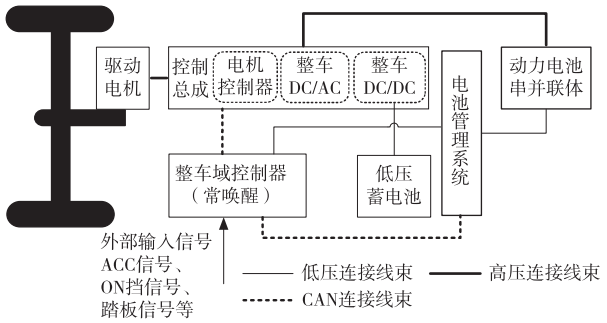

图 1 整车电气连接示意图

图 2 为整车高压系统电路原理图。当进行车辆高压上下电控制时，VDC 依据车辆的实际工况、电池状态和各用电负载的需求，遵循既定的安全规程，有条不紊地控制放电回路负极接触器 K1、预充电接触器 K4 以及主接触器 K5 的闭合与断开顺序。这一系列精密的控制旨在确保电力系统在接通与断开高压电源时能避免因电压突变造成的安全隐患，维持各部件间的有效通信与协调，从而保障电动汽车的平稳运行，并延长其使用寿命[6]。

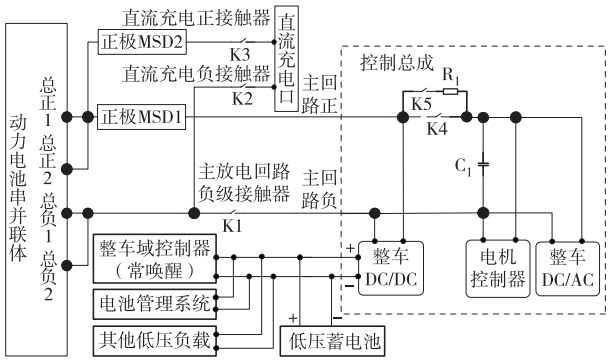

图 2 整车高压系统电路原理图

2 整车系统上下电控制策略

本文基于 Simulink/Stateflow 开发环境来搭建整车系统高压上下电控制策略模型，该模型共有 4 种高压上下电模式，各模式的优先级由高到低为充电模式、行车模式、24 h 监控模式、DC/DC 自动补电模式[7-8]。与传统的高压上下电控制策略的区别在于本文的策略不是“一步式”策略，即有多条分支路线，故称之为“分步式”策略。如图 3 所示，整车高压系统初始状态为待机状态，此时整车所有高压部件均为停机状态，所有高压接触器均为断开状态，同时所有高压上下电过程的故障标志均设计为无故障状态。为确保高压上下电过程中系统的安全性与可靠性，4 种模式之间禁止直接切换，必须经历待机状态后才允许进入其他模式，且必须在当前模式完成高压下电后才能进入待机状态。

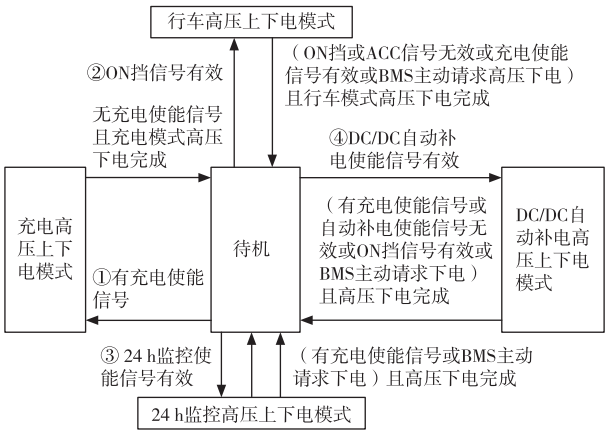

图 3 整车高压上下电控制分步图

2.1 充电模式高压上下电控制

在充电模式下，车辆 BMS 不仅需要与充电桩交互，还需要与 VDC 交互。考虑到市场上充电桩品质不同，其提供的 12 V 辅助电源（充电桩 A+端口）的稳定性难以保证，而且车辆低压负载要求持续稳定的 24 V 供电。因此当车辆充电时，VDC 需要控制主放电回路负极接触器 K1 闭合，以启动整车 DC/DC 提供稳定的 24 V 电力输出。当 VDC 检测到 CC2 信号（控制导引信号 2）有效且车速小于 2 km/h 时，则充电使能信号有效，此时 VDC 按照图 4 中的流程对车辆的高压上下电进行精细管控。

1）高压上电控制。充电模式高压上电控制流程中高压自检内容为：电池放电电流要小于 500 A，BMS 无主动下电请求，K1、K4、K5 均为断开状态，MSD 为闭合状态。若上电过程中发生故障，VDC 会记录发生的故障，直至故障消失，故障记录才会被 VDC 清除。若 4 s 内 K1 顺利闭合，则标志着充电模式高压上电控制过程完成。

2）高压下电控制。当充电使能信号消失或在充

电高压上电已完成的前提下，BMS 因检测到相关故障主动请求下电时，VDC 将切换至下电控制流程。在下电控制流程中，首先需要控制负载断开，当负载响应超时时，VDC 记录故障，同时继续执行下电控制流程，直至断开充电枪，标志着下电控制流程结束。

值得注意的是，在下电控制流程中，当 VDC 重新检测到充电使能信号有效，同时高压自检已通过且断开 K1 请求使能有效时允许重新走上电控制流程，以解决因拔枪后又快速插枪时上电响应延迟的问题。

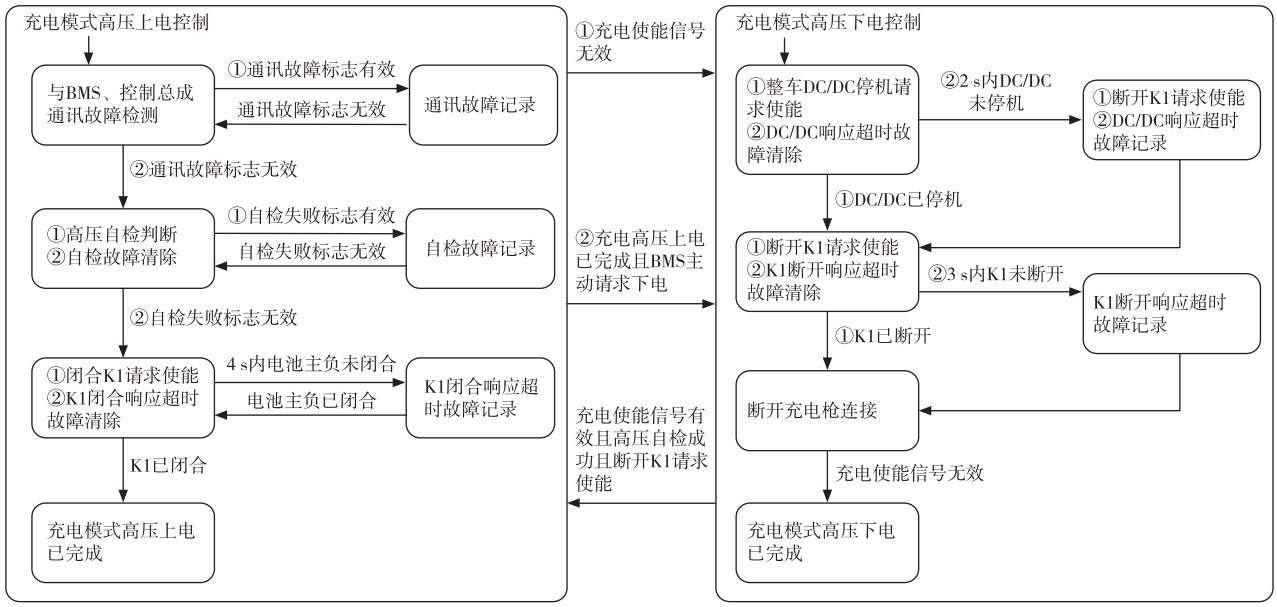

图 4　充电模式高压上下电控制模型图

2.2　行车模式高压上下电控制

当车辆充电使能信号无效且 ON 挡信号有效时，表示有行车意图，此时 VDC 不仅需要控制主放电回路的上电，还需要控制图 2 中的控制总成上电，这样电机控制器和整车 DC/AC 系统才能正常工作，驾驶员才能控制车辆行驶。VDC 按照图 5 对行驶车辆上下电进行精细管控。

1）高压上电前准备。行车模式高压上电前准备的主要目的是闭合 K1，以实现控制总成前端高压输入电源的顺利启动。此阶段的具体控制流程与充电模式高压上电控制流程一致，此处不再赘述。

2）高压上电控制。行车模式高压上电的核心目的是完成控制总成中电机控制器与整车 DC/AC 的高压上电。具体如下：当 K1 闭合后，VDC 给控制总成发送行车高压上电请求使能指令，控制总成需在 5 s 内自行完成高压预充过程（即 K5 闭合）及预充完成后 K5 断开、K4 闭合的过程，同时将 K4 的闭合状态反馈给 VDC。在上电流程中，当 K4 响应超时时，VDC 会记录为预充超时故障，且为确保整车行车高压上电的绝对安全，该故障只能通过下电的方式清除。若 5 s 内 K4 闭合且 K5 断开，则标志着行车模式高压上电控制过程完成。

3）高压下电控制。当 ON 挡信号无效或充电使能信号有效或 BMS 因检测到相关故障主动请求下电时，VDC 将切换至下电控制流程。在下电控制流程中，当车速大于 3 km/h 时，出于行车安全考虑（如需维持高压助力、DC/DC 正常工作），VDC 需要维持控制总成保持上电状态，只允许切断与行车安全无关的高压辅件（如电加热等）的电源，直至车速降低至 3 km/h 后才允许控制总成下电。同样，在下电控制过程中，首先需要控制负载断开，当负载响应超时时，VDC 记录故障，同时继续执行下电流程，直至 11 s 后或 K1 断开，则标志着下电控制流程结束。值得注意的是，在下电控制流程中，当 VDC 重新检测到 ON 挡信号有效，同时车速大于 3 km/h 且 BMS 未主动请求下电时，允许重新进入上电控制流程，以解决在下电控制流程中车速大于 3 km/h 时，重新开 ON 挡无法即时上电的问题。

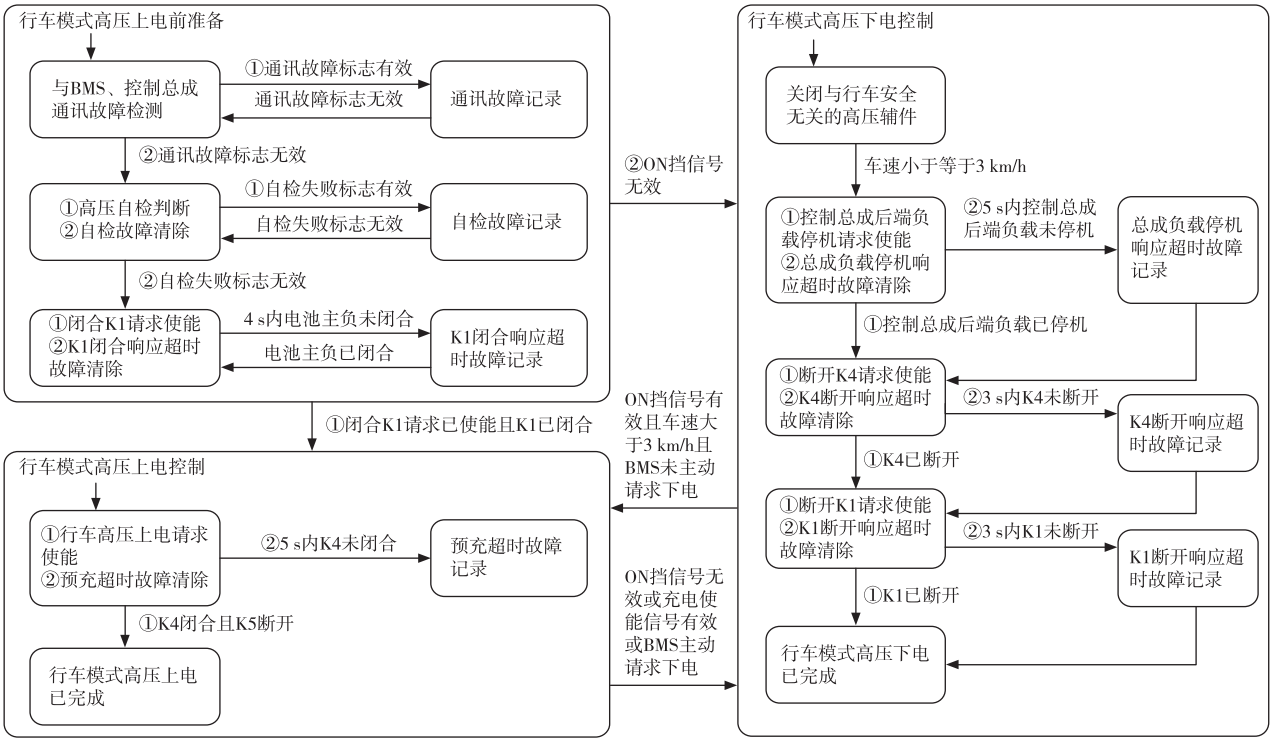

图 5 行车模式高压上下电控制模型图

2.3 24 h 监控模式高压上下电控制

为满足动力电池及其他关系安全的电气部件数据(如各电池单体温度、单体电压)定期上传至云端以支持车辆远程故障诊断的需求,整车 DC/DC 需定时向涉及数据监控与上传的相关电气部件(如 BMS、云智通终端等)供电。为此,设计了 24 h 监控模式下的高压上下电控制模型。

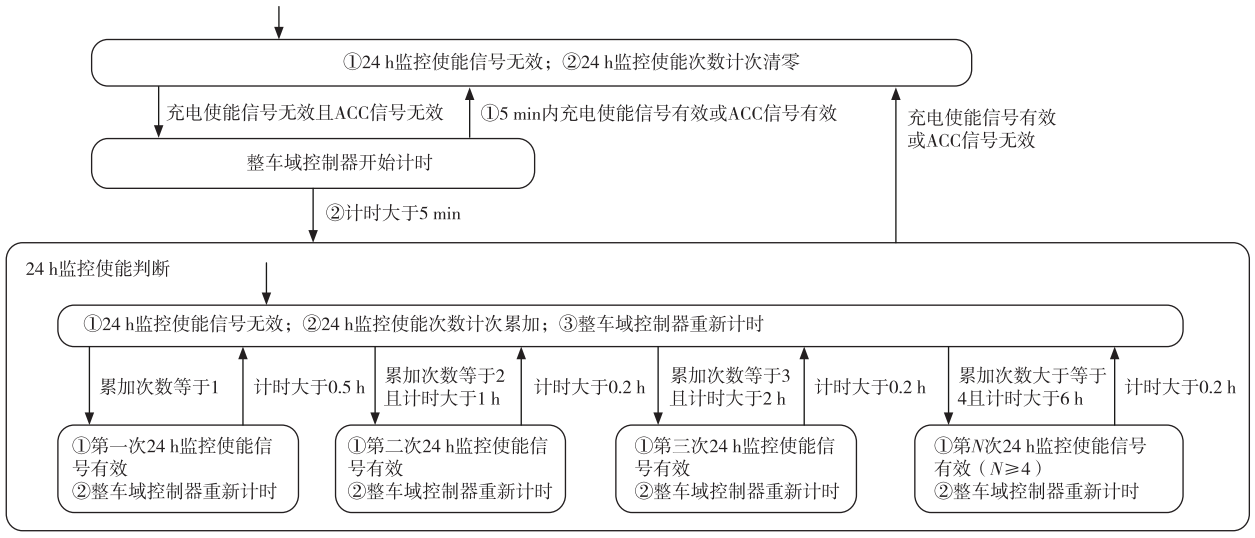

图 6 24 h 监控使能模型图

当车辆充电使能信号与 ACC 挡信号均无效时,VDC 开始按照图 6 所示的模型判断 24 h 监控使能信号的有效性。当 24 h 监控使能信号有效时,VDC 按照图 7 进行车辆上下电的精细管控。

1）高压上电控制。24 h 监控模式高压上电的主要目的是闭合 K1，以顺利启动控制总成前端高压输入电源。若 4 s 内 K1 顺利闭合，则标志着 24 h 监控模式高压上电控制过程完成。具体控制流程与充电模式高压上电控制流程保持一致，此处不再赘述。

2）高压下电控制。当充电使能信号有效或 24 h 监控使能信号无效或在 24 h 监控高压上电已完成的情况下，BMS 因检测到相关故障主动请求下电时，VDC 将切换至下电控制流程。相较于充电模式高压下电策略，24 h 监控模式下电策略仅省去了断开充电枪这一环节，其余下电控制策略与前者保持一致。

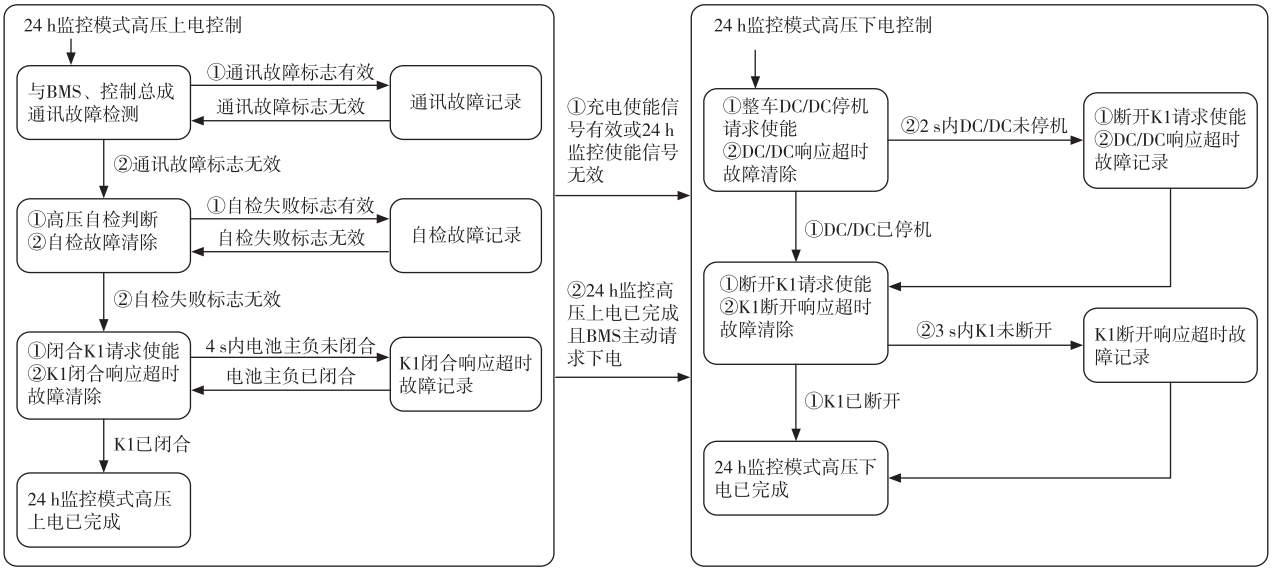

图 7　24 h 监控模式高压上下电控制模型图

2.4　DC/DC 自动补电模式高压上下电控制

随着车辆全生命周期管控需求的不断提升，越来越多的整车低压电器设备被设计为持续唤醒待机模式（如 VDC、云智通终端等）。为解决因负载消耗导致蓄电池频繁亏电的问题，设计了 DC/DC 自动补电模式高压上下电控制流程，即当蓄电池开始亏电时，VDC 控制整车 DC/DC 启动，给蓄电池充电 1 h。具体为：当车辆蓄电池电压低于 23.5 V，动力电池 SOC 高于 10%且充电使能信号与 ON 挡信号均无效后，VDC 开始按照图 8 所示的模型判断 DC/DC 自动补电使能信号的有效性。当 DC/DC 自动补电使能信号有效时，VDC 按照图 9 进行车辆上下电的精细管控。

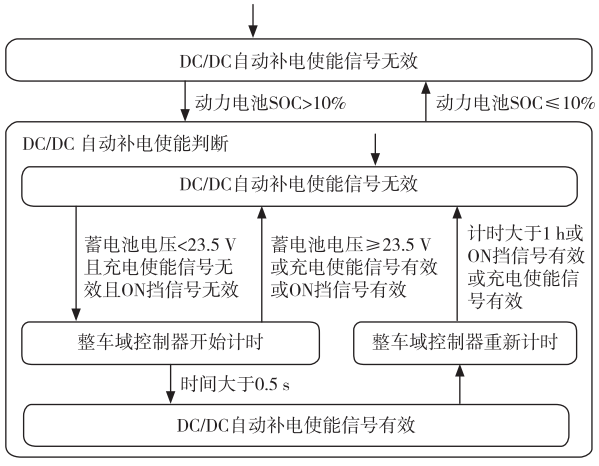

图 8　DC/DC 自动补电使能状态模型图

1）高压上电控制。DC/DC 自动补电模式高压上电的主要目的是闭合 K1，以顺利启动控制总成前端高压输入电源。若 4 s 内 K1 顺利闭合，则标志着 DC/DC 自动补电模式高压上电控制过程完成。具体控制流程与充电模式高压上电控制流程保持一致，此处不再赘述。

2）高压下电控制。当充电使能信号有效或 DC/DC 自动补电使能信号无效或在 DC/DC 自动补电高压上电已完成的情况下，BMS 因检测到相关故障主动请求下电时，VDC 将切换至下电控制流程。具体下电控制流程与 24 h 监控模式高压下电控制流程保持一致，此处不再赘述。

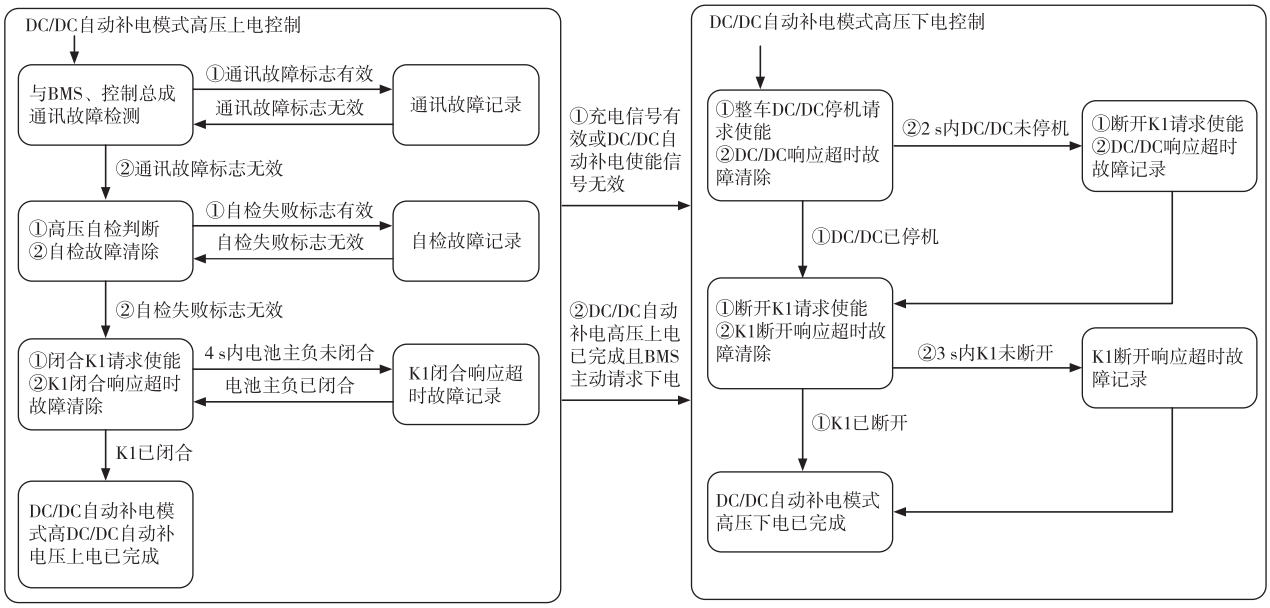

图 9 DC/DC 自动补电模式高压上下电控制模型

3 测试验证

为验证本文提出的分步式整车高压上下电控制策略的可行性与有效性,先将上述构建好的高压上下电控制模型通过自动代码生成工具转换为可执行的程序代码并进行编译,然后将编译后的二进制文件刷写到 VDC 中。之后利用硬件在环测试平台对上述 4 种模式下的高压上下电控制策略进行验证。通过对高压系统各阶段上下电行为的精细监控与数据分析,评判系统响应的时机准确性、顺序一致性、响应速度等关键指标,确保策略展现出预期的功能特性。

3.1 充电模式高压上下电控制测试

利用纯电动汽车硬件在环测试平台模拟实际充电场景,施加充电使能信号,系统同步采集反映高压系统动态行为的各项数据,得到如图 10 所示的结果。

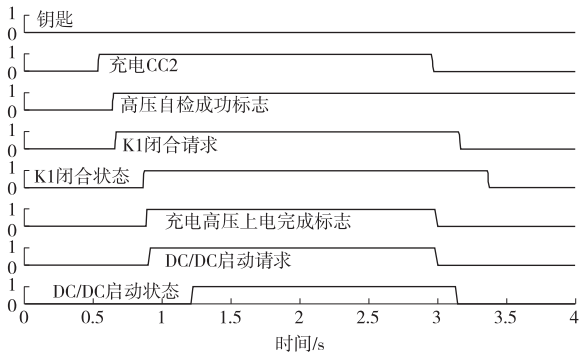

图 10 充电模式高压上下电测试结果

由图 10 可知,当充电使能信号有效 100 ms 后,通过高压自检,随后 VDC 给 BMS 发送闭合 K1 请求使能指令,200 ms 后 BMS 反馈 K1 已闭合,充电模式高压上电完成,整车 DC/DC 启动;当取消充电使能信号后,VDC 立刻给整车 DC/DC 发送停机请求使能指令,整车 DC/DC 在 150 ms 后反馈已停机,随后 VDC 给 BMS 发送断开 K1 请求使能指令,200 ms 后 BMS 反馈 K1 已断开,充电模式高压下电完成。整个过程符合设计预期。

3.2 行车模式高压上下电控制测试

借助纯电动汽车硬件在环测试平台模拟车辆进入行驶状态,给定 ON 挡使能信号,得到如图 11 所示的结果。

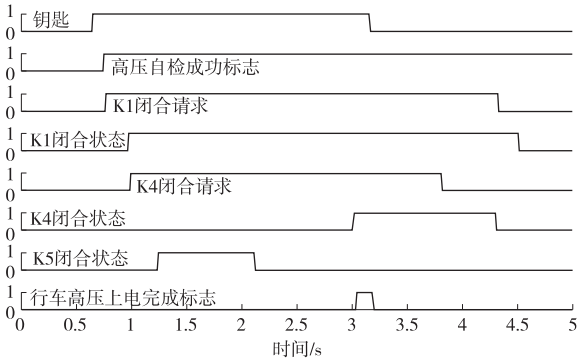

图 11 行车模式高压上下电测试结果

由图 11 可知,当 ON 挡信号有效 100 ms 后,通过

高压自检，随后 VDC 给 BMS 发送闭合 K1 请求使能指令，200 ms 后 BMS 反馈 K1 已闭合，然后 VDC 给控制总成发送行车高压上电请求使能指令，2.1 s 后控制总成完成预充过程并反馈 K4 已闭合，K5 已断开，行车模式高压上电完成；当 ON 挡信号消失，VDC 立刻给控制总成后端负载（如电机、整车 DC/DC、整车 DC/AC、电除霜、电加热等）发送停机请求使能指令，1.3 s 后控制总成后端所有负载及整车 DC/DC 反馈已停机，随后 VDC 给 BMS 发送断开 K1 请求使能指令，200 ms 后 BMS 反馈 K1 已断开，行车模式高压下电完成。整个过程符合设计预期。

3.3　24 h 监控模式高压上下电控制测试

利用纯电动汽车硬件在环测试平台断开 ACC 信号、ON 挡信号以及充电使能信号，5 min 后 24 h 监控使能信号被触发，系统进入 24 h 监控模式高压上下电控制流程，同步采集反映高压系统动态行为的各项数据，得到如图 12 所示的结果。

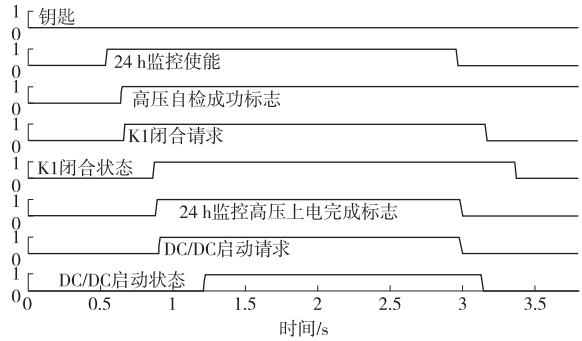

图 12　24 h 监控模式高压上下电测试结果

由图 12 可知，整个上下电过程与充电高压上下电模式基本一致，符合设计预期。

3.4　DC/DC 自动补电模式高压上下电控制测试

利用纯电动汽车硬件在环测试平台断开 ON 挡信号及充电使能信号，并将蓄电池电压降低至 22 V，随后同步采集反映高压系统动态行为的各项数据，得到如图 13 所示的结果。

由图 13 可知，当蓄电池电压低于 22 V 时 DC/DC 自动补电使能信号被触发，系统进入 DC/DC 自动补电模式高压上电控制流程，DC/DC 持续运行 60 min 后，系统进入 DC/DC 自动补电模式高压下电控制流程。整个过程符合设计预期。

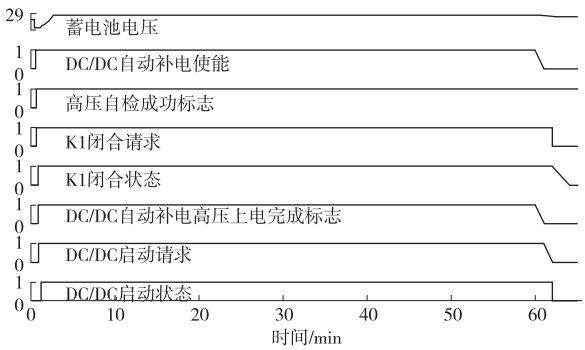

图 13　DC/DC 自动补电模式高压上下电测试结果

4　结束语

本文以提升纯电动汽车高压系统安全性与可靠性为目标，通过 VDC 及 Simulink/Stateflow 开发平台，设计了分步式高压上下电控制策略。该策略经测试验证有效，可确保全工况下高压上下电的安全、高效运行。为解决 BMS 与动力总成控制器协同、高压回路快速安全切换及故障保护等功能提供参考。

参考文献：

[1] 董朝闻，於德奎，张慧泉. 纯电动物流车整车控制器软件设计与试验[J]. 汽车电器，2024(2)：1-4.

[2] 王翔浩. 串联式混合动力矿用卡车整车控制策略研究[D]. 济南：山东交通学院，2023.

[3] 郭志培. 氢燃料重卡高压上下电策略的研究[J]. 机械工程与自动化，2022(4)：178-180.

[4] 陈经纬，李霞，孙庆乐. 基于 Simulink 的整车控制器软件系统开发[J]. 车辆与动力技术，2021(2)：33-38.

[5] 刘宝泉. 电动汽车高压电气系统及上下电控制策略研究[J]. 汽车工业研究，2020(2)：58-61.

[6] 宋海军，胡志敏，陈河. 新能源汽车上下电控制策略改进[J]. 汽车制造业，2021(Z1)：32-34.

[7] 田磊，赵静艺. 新能源电动车的上下电管理[J]. 科技风，2020(29)：7-8.

[8] 刘卫东，彭玉环，吴方义，等. 混合动力汽车高压上下电控制策略[J]. 汽车电器，2020(11)：9-11.