

基于 DC-Link 的回路系统设计直接影响到驱动电机控制器及系统的工作，在设计上着重对高压线束或者铜排进行线缆、高压部件模型仿真，并完成系统的设计，按照功能样件进行台架测试，满足驱动能力要求。

□ 奇瑞商用车（安徽）有限公司 陈茜兵 程仁恒

驱动电机控制器 DC-Link 回路系统设计及应用

背景

驱动电机控制器的功能开发涉及很多领域的交互应用，尤其在 EMC 和电力电子技术上，如开关电源、数字驱动及隔离、模拟量采集和运算放大等，同时涉及高压回路的还有层叠母排的设计，如结构、材料及电气压力等。高压回路对杂散电感较为敏感，在不同状态下，如 IGBT 开启及带载状态不同，高压母线、三相线的共模电流均有大的差异，共模特性的共模电压和电流会影响传导和辐射，是后级轴电流腐蚀的根源。

基于 DC-Link 的回路系统设计直接影响驱动电机控制器及系统的工作，由于驱动电机控制器的功率设计方案不同，存在 IGBT 单管并联和模块，其中模块还有半桥和全桥模块，不同的电气架构及

PCB 设计布局、结构特点对功率器件 PWM 控制带来了挑战和风险，还有电应力的影响如 du/dt 和 di/dt ，因此需要采用合适的层叠母排和矩阵设计，对功率回路进行对称式布局，减少杂散电感，同时控制好互感，保证 DC+ 输入电感、桥臂间尤其单管 MOS 的 D 和 S 端，IGBT 的 C 和 E 端分别与其回路电感至 DC 端、相端输出端点一致性和对称性。

在目前如 SiC 的应用设计中，实际上当前除了 HPD 过渡沿用外，主要亮点在于单面和双面半桥塑封结构和单管并联的如斯达 T6 模块结构，即便是基于 Si 基 HPD 封装模块的功率器件内部虽然采用内部绑线焊接在晶圆上，代替外部的 PCB 铜箔及铜排，但是内部仍然是 5 管或 6 管并联芯片，同样的设计原理依然重点关注回路的对称和设计布

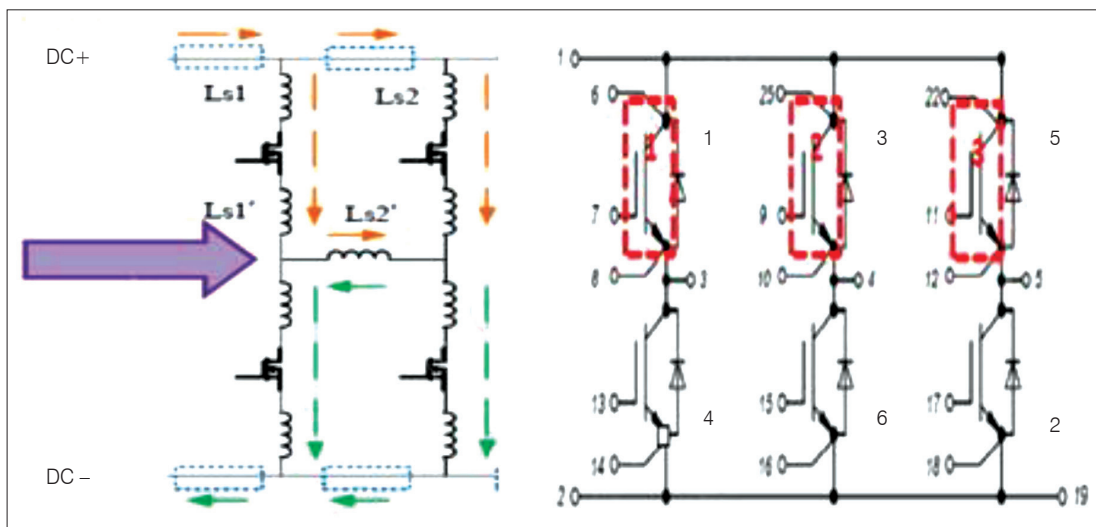


图 1 高压回路及功率器件对称性

局，对杂散电感等控制，需要考虑对 DC-Link 电压的采集控制及功率器件的回路间分布设计，如图 1 所示。

DC 及 UVW 共模特性

根据 IGBT 原理特性及应用，开管启动并带动负载，瞬间需要借助于 DC-Link 母线支撑电容的能量补充，同时对回路纹波电流抑制吸收，并降低脉冲电流冲击并对开关和电感引起的尖峰电压进行抑制，由于 IGBT 通过 PWM 产生高频随机载频发波，在不同的调制度和转速下，经过驱动电机输出后，三相输出的中性点电压相对于系统对地不为零，其值为三相输出电压平均数，在驱动电机控制器内部正负母线上及三相线上交流值会出现不同的峰值，影响 IGBT 的驱动控制，在开关作用下，不断工作于电动和发电模式，驱动电机及系统对地间容性状态变化影响轴及油膜的稳定性。

在 IGBT 未开管时，正负母线上交流峰峰值较小，一般在几十到几百毫安不等，取决于电气连接结构设计及高压电路单元设计，然而，一旦 IGBT 开管后，正负母线上交流峰峰值会出现数安培的电流，同时随着负载转矩从低转矩到高转矩及转速增加，会使测试结果发生变化。根据测试来看，转矩与交流峰峰值成线性关系，转矩对其影响较大，转矩越大峰值越大，转速对峰值影响很小，甚至无影响。

根据测试来看，三相线上交流峰峰值也是和转矩成正比，在不同负载转矩下，其数值是变化的，但是峰值转矩时，三相线上

的峰峰值是高于正负母线上的数值，如图 2 所示。

基于上述分析，在设计上着重对高压线束或者铜排进行线缆、高压部件模型仿真，由于当前集成化越来越高，从原理上减少了插接件线缆数量，如三相线由之前的插接件线缆变成短平的铜排连接，有效地缩短传递回路及降低输入电位差对地的输入传输的干扰，同时对 DC-Link 正负母线线缆如屏蔽效能进行仿真计算，减少共模辐射和传导及能量泄漏干扰外部和防止外部电磁对本身影响，使 DC-Link 正负母线与三相线隔离，增加共模电感，并优化 DC-Link 母线支撑电容整体的设计等。

DC-Link 电压采集设计及原理

从动力电池端输出并供电给驱动电机控制器输入端，也即动力电池总正和总负输出端连接到薄膜电容和 IGBT 的 C 端，这一连接作为广义上的 DC-Link，其回路涉及很多关联特性，与正负母线、薄膜电容、IGBT 及层叠母排密切相关，如果考虑到 EMC，还涉及共模电感及磁环等，需要对层叠母排结构和母线电压进行单元电路设计，结构设计着

重对薄膜电容和母排进行注塑一体化设计，优先定制薄膜电容及滤波能力，其容量依据如下：母线支撑电容以 IGBT 载波频率完成充放电，在正常一个周期提供 IGBT 导通为电机提供能量和控制器提供瞬时峰值功率及减少电流谐波影响，依据 IGBT 三相桥六路 PMW 控制，基于两电平拓扑的原理，在输入电量等效电容需求最大时也为最低要求容量，为电容完全放电，所需求的能量全部由 DC-Link 支撑电容提供。

基于计算参数，根据相应的电路单元匹配，进行测试优化，对纹波电流、脉冲电压进一步分析，修正参数，如果采用铝电解电容的，着重对温度及寿命的核算，通过纹波电流、温升等修正寿命衰减系数，达到设计周期内的容量与周期均衡。根据纹波电流测试结果进行优化，保证回路的电感及接触电阻、绝缘等问题，提升设计性能与原理设计一致性；对应于高压母线电压采集也即 DC-Link 母线采集，按照电压输入、信号转换隔离、信号分解及调理实现采集和运算，完成对 PWM 的发波控制，实现闭环，作为矢量控制的来源依据。其典型拓扑原理如图 3 所示。

根据上述采集策略，对电压



图 2 IGBT 开管时和带载时母线上交流峰峰值（左：开管，右：带载）

信号分解进行分压降压、对小信号进行隔离转换、对输出信号放大调理并进行故障诊断,其中根据目前业界普遍采用较多的是通过电阻分压方式实现高低压分压降低电压,根据 DC-Link 输入电压的特性,如 DC 0 ~ 500 V,进行降压电压设计,转换到 mV 级,如 ± 300 mV,具体的电压范围,需要根据动力电池的范围及过电压欠电压保护范围来定,其中转换输出的 mV 级电压范围需要根据隔离转换芯片来进行匹配,目前这类芯片比较丰富,有 AVAGO、ADI 等,还有一些厂家采集电阻分压时进行二次采集分

成两路,已达到功能安全的应用,另外,还有一些厂家采集高压母线电压后没有经过隔离模块转换,而是通过分压后进行差分运放进行转换,然后进行信号跟随滤波给 DSP 系统作为六路 PWM 发波控制的变量。图 4 左为采用分压降低电路电阻转换后的 mv 电压作为输入进入图中 VIN 端。最后通过运放信号调理输出 DC-VOUT。

图 4 右为差分方案,其为非隔离,绝缘电阻由电阻阻抗来保证。实际测试考核是理论处于常态温度下条件,如果在低温 -40°C 和高温 85°C 下,由于内

部 Y 电容及线路接线座等回路构成,阻抗受环境影响,其阻抗与 Riso 并联后为其热态绝缘电阻,因此设计存在一定的局限性和风险。

上述原理设计完成后,还需要对隔离模块信号输出进行仿真计算,图 5 为对输出的隔离模块信号进行仿真,波形自下往上依次为隔离输出信号 + 和隔离输出信号 - 以及运放输出信号,将其输出范围进行调理到 DSP 芯片阈值范围内,如 5 V 系统和 3.3 V 系统,其模拟量采集阈值存在差异,会导致信号无法正常使用,实现不了对其电压采集及达到对输出的控制目的,容易出现故障误报,需要对边界的阈值进行设定。

上述方案选型后,需要关注隔离模块的输入和输出供电,两种供电输入是高压类型,与 IGBT 是同类信号回路,一般其为 5 V 供电,根据设计其来源于 Flyback 反激电源转换而来,反激电源完成三路驱动上桥供电后其反激变压器的副边产生转换 5 V_HV 高压供电作为隔离模块电源,同步需要考虑驱动供电能力。输出 5 V 作为低压供电与低压系统形成回路,根据选择模拟量和数字量 GND。

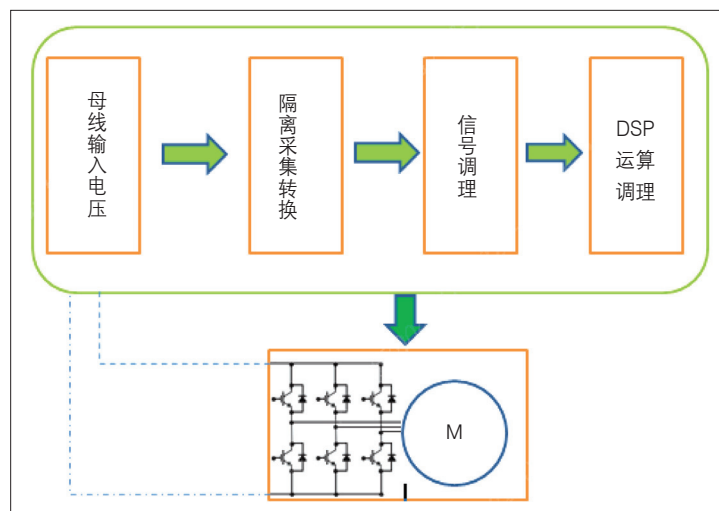
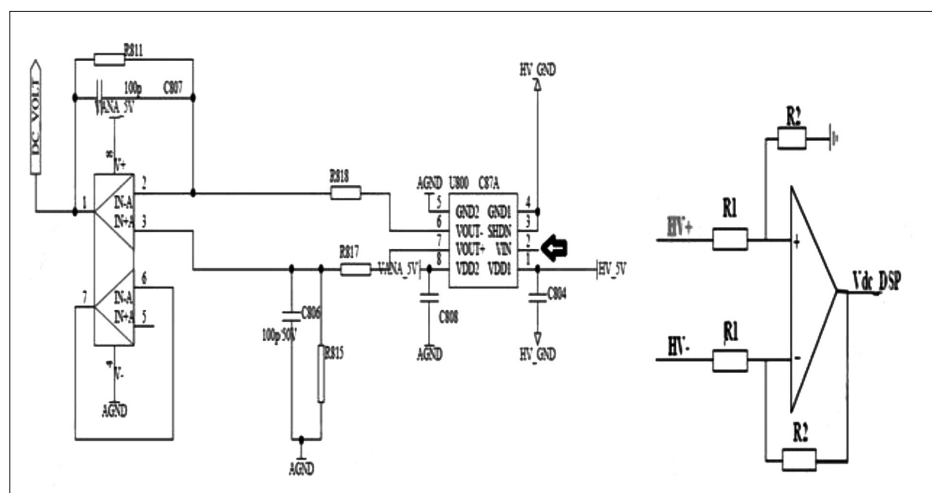


图 3 典型拓扑原理



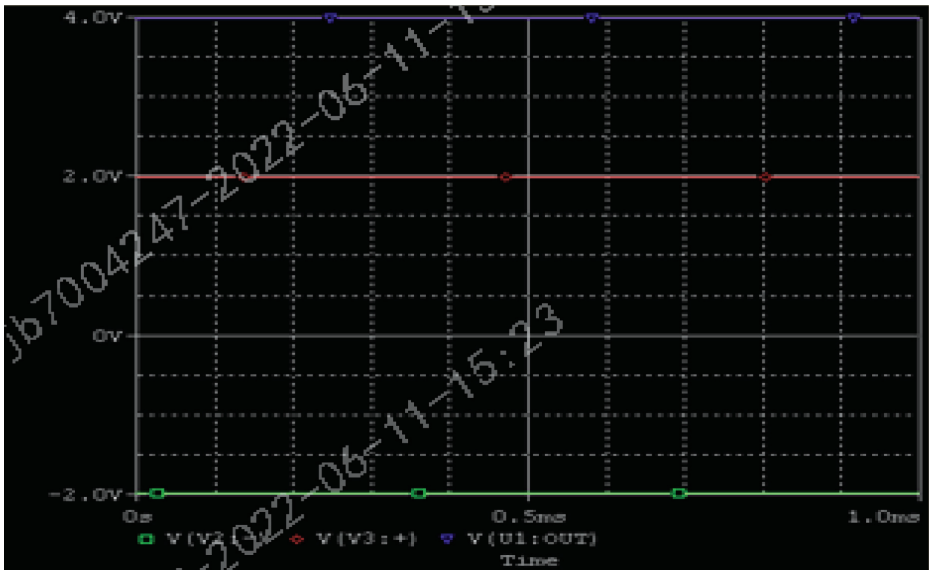


图5 信号转换仿真

阻而不满足整车高压绝缘耐电压要求，如 ACPL-C872，其满足 UL 1577 (5 000 Vrms/1min，绝缘电阻满足 $500\text{ V} > 10^9\text{ }\Omega$)。

根据 GBT18488.1-2015 电动汽车用驱动电机系统 - 技术条件 5.2.7.3 驱动电机控制器绝缘电阻要求为，驱动电机控制器动力端子与外壳、信号端子与外壳、动力端子与信号端子之间的冷态及热态绝缘电阻均应不小于 $1\text{ M}\Omega$ ，实际在产品开发中，目前远远大于这个值，由于现在整车的绝缘电阻要求不断提高，如高温 $20\text{ M}\Omega$ 、常温 $100\text{ M}\Omega$ 以上，要求高压零部件其回路组成均需要远远大于该值，几个高压部件，如 DCDC、OBC、MCU 及驱动电机、PDU 等，意味着要远大于并联回路的值，如何并联及设计需要根据电气架构来决定，实际上驱动电机控制器的绝缘电阻值为隔离模块绝缘阻值和回路电容及接线柱等并联后的电阻，因此，如果其中之一随温度变化变小随温度产生，将会对整机产生影响。

表 耐电压要求

最高工作电压 U_{dcmax}/V	试验电压 (均方根值) $/\text{V}$
$U_{dcmax} \leq 60$	500
$60 < U_{dcmax} \leq 125$	1 000
$125 < U_{dcmax} \leq 250$	1 500
$250 < U_{dcmax} \leq 500$	2 000
$U_{dcmax} > 500$	$1\,000 + 2U_{dcmax}$

2. 耐电压

根据 GBT18488.1-2015 电动汽车用驱动电机系统 - 技术条件 5.2.8.2.3 要求规定，驱动电机控制器动力端子与外壳、动力端子与信号端子之间，应能承受相应规定的试验工频耐电压，其中动力驱动电机控制器动力端子与外壳、动力端子与信号端子、信号端子与外壳间的工频耐电压试验持续时间为 1 min，无击穿现象，对应于漏电流由企业自行商定，目前业界比较认可 10 mA ，进行测试，同时根据规定指出，信号 GND 与外壳短接的控制器，只需要进行驱动电机控制器动力端子与外壳间的测试。对应要求在 400 V 系统平台，选择工作电压范围在 $250 \sim 500\text{ V}$ 档，按照 $2\,000\text{ V}$ 来进行

DC 转换实施测试，设计要求见表参数。

如果最高工作电压偏低，不是当前 Si 基 400 V 平台，如低压高速车型，如当前五菱 miniEV 及 QQ 冰淇淋的额定母线电压为 96 V ，需要根据最高电芯工作电压及满功率最高电压来计算，选择 $60 \sim 125\text{ V}$ 档位。需要试验交流 $1\,000\text{ V}$ 来进行耐电压，对漏电流进行规定，不超过当前主流规定的 5 mA ，目前实际应用当前漏电流选择限值由企业自行规定，一般不超过 10 mA 较多。

3. 电气间隙和爬电距离

根据 GB/T 16935.1-2008 低压系统内设备的绝缘配合 第 1 部分：原理、要求和试验，要求对绝缘部分进行单点单个测试电气间隙及爬电距离，将其测试结果与标准核对，按照最高工作电压进行设置。主要有 DC-Link 母线 BUS+ 对交流接线，交流输出线与接地，交流输出接线之间，功率器件引脚对散热器，BUS- 对地，BUS+ 与 BUS- 输入之间，BUS+ 和 BUS- 分别对地，反激电源供电的初级和次级，高压采样对地等。

4. 温升分布

因方案不同，对 DC-Link 回路结构导致系统回路温升存在差异，因此需要根据测试结果对仿真参数进行优化，保证仿真系统的参数准确性，对设计好的 DC-Link 设计功率器件及散热结构部分进行仿真测试，基于额定典型工况额定功率额定电流下温度分布，从高压各回路沿着 IGBT 输入和输出分布在额定的情况下，某一相位空间可能存在偏高趋势。

测试

通过上述设计完成系统的设计，按照功能样件进行台架测试。

1) 整机试验：参考 GB/T18488.2-2015 进行测试，考察功率器件极限运行能力，需要关注功能衰退、器件损坏。

2) 电压应力：在满足系统最高工作电压下，通过台架系统进行冷却水温 60℃ 入水试验，在保证基本功能情况下，需要满足峰值输出电流能力，监控尖峰电压，进行监测各个相位、关联器件、驱动芯片等状态。如在相间不平衡或短路时，尖峰电压稳定性及峰值，通过测试，考核杂散电感带来的关断尖峰电压预估范围值，进行测算，如图 6 所示，相间短路时，A 相尖峰 VCE 为 456 V。

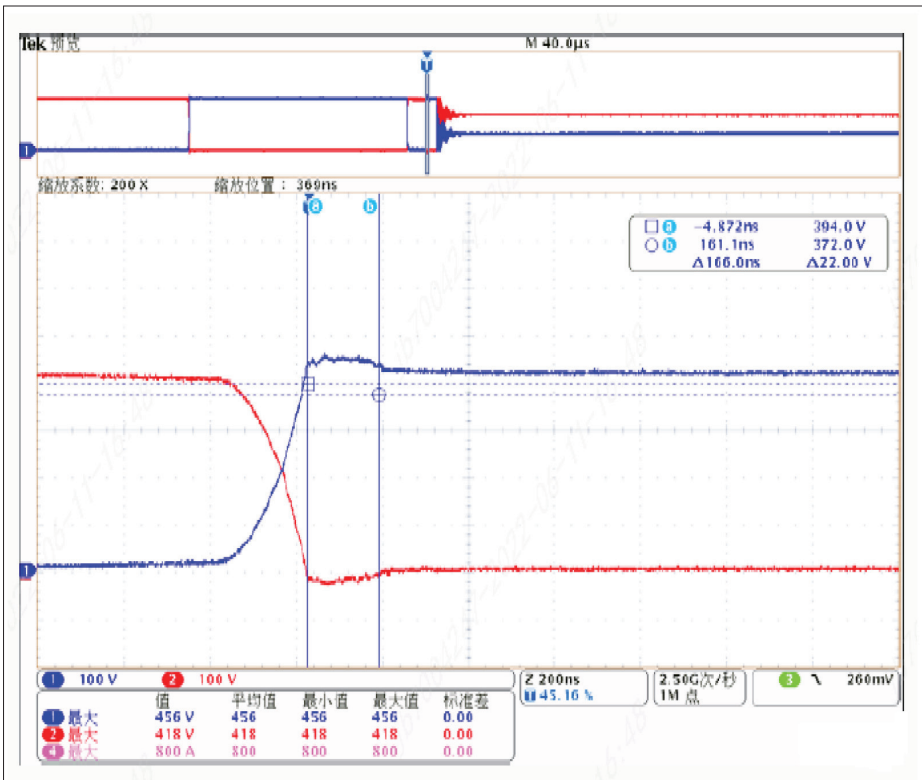


图 6 相间短路，A 相 VCE 尖峰

总结

相对于驱动电机控制器内部其他功能单元设计，DC-Link 回路系统复杂，与外部电压交互输

入，与内部 IGBT 等功率器件提供能量传递，并保证回路电气设计，满足驱动能力要求，通过层叠母排设计、薄膜电容设计、DC-Link

母线电压采集及供电设计，对高压电源的共模特性进行设计校核，通过 PWM 的谐波控制完成对驱动系统的系统管理。[AI](#)

(上接第 37 页)

据、整车能耗负载以及传动效率等数据，并进行修正，从而提高仿真的准确性。

结论

本文针对某轻型商用车产品，基于 Cruise 仿真软件，简要介绍了理论仿真分析基本流程和动力性经济性关键评价指标，并结合实际案例分析，得出本文研究产品的理论模型在最高车速、

最大爬坡性、超车加速性能以及等速油耗方面，精度可达 3%，但在起步加速性能和 NEDC 循环工况方面误差在 6% 左右，基本上可以满足理论分析需求，可以给新产品开发提供参考分析依据。同时，在对比分析过程中可以推断出模型中发动机响应与实际驾驶员换挡时机不匹配影响起步加速时间，动力链中发动机外特性曲线为台架稳态参数、传动

系数均为定值，而实车发动机运行工况均为瞬态参数，随工况的不同实时变化从而导致油耗计算值误差较大。这些关键影响因素为理论仿真模型精度提高指明了方向，未来通过同平台数据不断积累，各参数系数不断修正，逐步提高理论仿真模型精度，为后期产品更新迭代提供可靠的设计依据，最终达到缩周期、减费用，甚至替代试验的目的。[AI](#)