

## Technical White Paper

## 驱动电动汽车和混合动力汽车中的高压接触器



Shuangbing Dong

Powertrain Automotive Systems

## 摘要

本文概述了电动汽车和混合动力汽车中的高压接触器，并介绍了几种驱动高压接触器的方法。

## 内容

1 引言.....	2
2 电动汽车和混合动力汽车中的接触器分布.....	2
3 上电序列.....	3
4 线圈类型和控制要求.....	3
5 线圈驱动实现.....	4
5.1 脉宽调制电流生成.....	5
5.2 可调电源电压方法.....	6
6 总结.....	6
7 修订历史记录.....	7

## 插图清单

图 2-1. 电动汽车和混合动力汽车中的接触器分布.....	2
图 3-1. 主接触器和预充电接触器的上电顺序.....	3
图 4-1. 具有三个阶段的线圈电流.....	3
图 5-1. 线圈驱动电路的实现示例.....	4
图 5-2. 脉宽调制电流生成.....	5
图 5-3. 使用可调电源电压生成电流.....	6

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

高压接触器，业内也统称为高压继电器，被广泛应用于电动汽车 (EV) 和混合动力汽车 (HEV) 中。它是一种机电开关器件，带有一个线圈，用于产生磁力，以便以机械方式操作电触点。然而，更常见的是将高压接触器用于电动汽车和混合动力汽车中的大功率应用。

高压接触器作为新能源汽车中的关键安全器件，需要具备耐高压、耐负载、耐冲击、强灭弧以及分断能力等基本功能。对线圈施加适当的电流（例如，使用 [DRV3946](#) 等 IC），可确保产生适当的磁力来驱动触点，以实现稳健操作。尽管车辆中有许多不同类型的接触器，用于实现不同的功能，但所有接触器线圈的驱动电流曲线都是类似的。

## 2 电动汽车和混合动力汽车中的接触器分布

出于安全原因，当车辆断电时，电池和牵引逆变器通过主接触器进行电气隔离。正极主接触器位于电池正极和牵引逆变器之间，而负极主接触器则位于电池负极和牵引逆变器之间。这两种接触器都是实现安全稳健性所必需的。带有串联限流电阻的预充电接触器与正极主接触器并联，用于在闭合主接触器之前对初始放电的直流链路电容器充电，以避免可能损坏电池、电源接触器和直流链路电容器的高浪涌电流。两个主接触器和一个预充电接触器构成了全混合动力汽车不可或缺的配置。

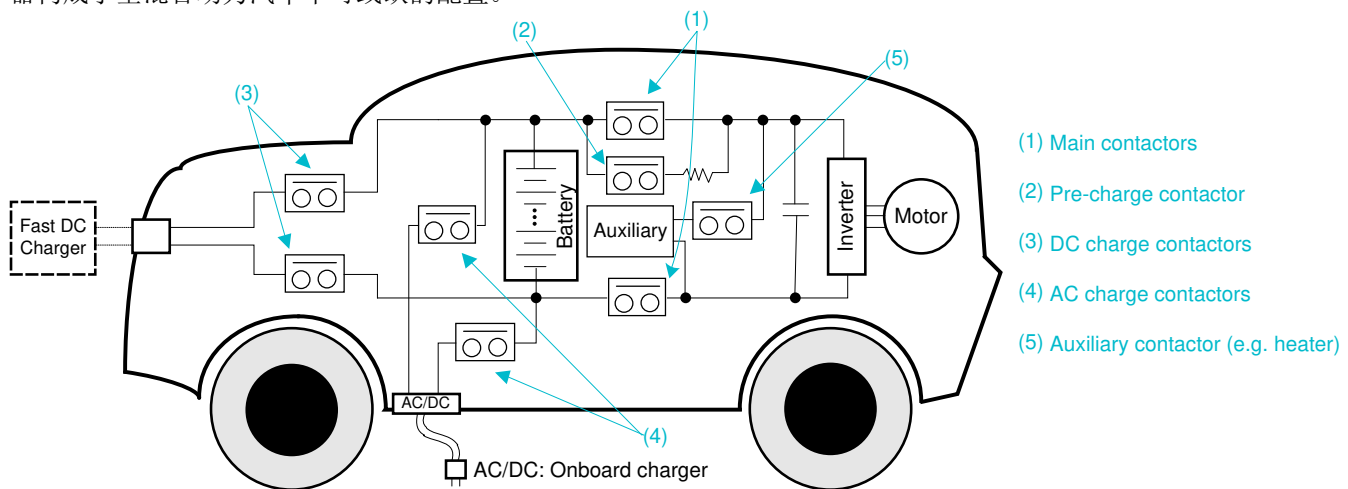


图 2-1. 电动汽车和混合动力汽车中的接触器分布

插电式混合动力汽车中插入了一对额外的交流充电接触器，用于在动力电池和车载充电器之间建立连接。车载充电器从交流充电器获取电力，并将交流电转换为直流电，以便为电池充电。

电池电动汽车中则插入了另一对直流快速充电接触器，用于在动力电池和直流快速充电设备之间建立连接。直流快速充电对于长途驾驶和大型电池电动汽车车队至关重要。因为没有内燃机产生余热，所以辅助接触器（例如乘客舱的电热器）必不可少。

主接触器、预充电接触器和直流充电接触器大多位于电池接线盒（或电池切断单元）内。交流充电接触器可能放置在与车载充电器相邻的电池配电单元中。

### 3 上电序列

牵引逆变器电机控制系统必须集成一大组滤波电容器，通常称为直流链路电容器，一旦主接触器在电容器完全放电时闭合，就会产生巨大的浪涌电流。因此，预充电功能必不可少，用于限制上电过程中的浪涌电流。带有限流电阻的接触器是预充电功能的最简单实现方式。

上电序列期间的过程示例如下：

1. 接到上电命令后闭合负极主接触器。
2. 闭合预充电接触器。
3. 闭合正极主接触器，直到直流链路电容器上的电压达到电池组电压的 90% - 95%。
4. 在正极主接触器完全闭合后打开预充电接触器。

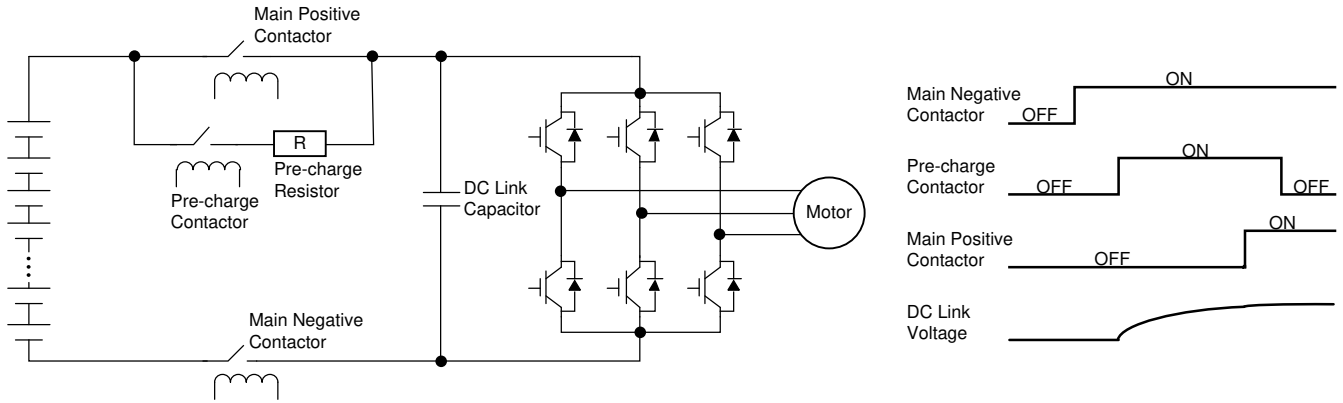


图 3-1. 主接触器和预充电接触器的上电顺序

此外，在闭合接触器之前，不得卡住触头，不允许出现绝缘漏电故障。系统级设计中必须实现接触器状态诊断和绝缘检测功能。

### 4 线圈类型和控制要求

线圈是高压接触器的关键元件，因为它可提供闭合触点所需的驱动力。流经线圈的电流会产生磁场，吸引动铁芯闭合触点，反之则断开触点。尽管市场上有多家高压接触器供应商，如 TE、Panasonic、GIGAVIC 等等，但所有接触器线圈的驱动电流要求都是类似的。如图 4-1 所示，电流曲线可分为三个阶段。第一阶段称为吸合阶段，电流应足够大并保持足够长的时间，以确保接触器在该阶段内闭合。第二阶段是保持阶段，在这个阶段中将保持较小的电流，以便有效地闭合接触器并使其保持闭合状态。最后一个阶段为电流快速衰减阶段，在这个阶段中，电流将以非常快的速度下降，以使触点断开。图 4-1 显示了电流曲线的三个阶段要求，拾取阶段和保持阶段的实际电流可以是具有最大值和最小值的 PWM 信号。

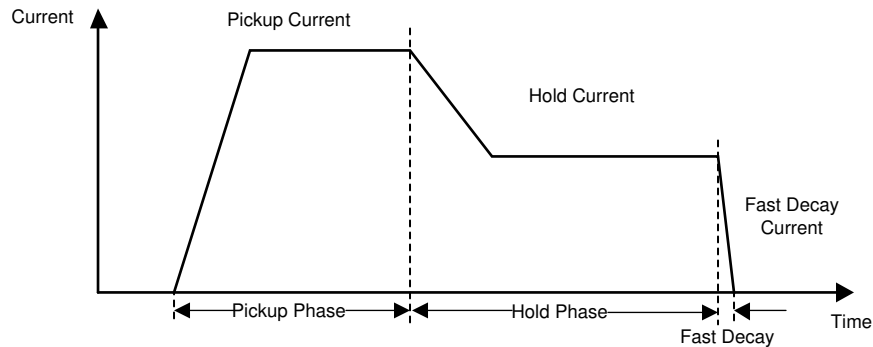


图 4-1. 具有三个阶段的线圈电流

一般来说，接触器供应商提供两种接触器线圈类型，一种是带有内部节能器的节能线圈，另一种是需要外部节能装置的非节能线圈。节能线圈将内部节能器与双线圈节能器、带电压反馈的脉宽调制和带电流反馈的脉宽调制等

方法中的一种集成在一起。只需给线圈的两个端子供电，就可以通过这个内部节能器自行产生所需的电流波形。非节能线圈则表示这只是没有任何内部电路的线圈，需要借助外部电路来产生所需的电流波形。

## 5 线圈驱动实现

从系统的角度来看，出于安全原因，最好同时使用高侧和低侧开关来驱动接触器线圈。如果仅使用高侧或低侧开关，线圈将始终处于通电状态，无法在发生短路故障时断开。故障与高侧开关上的电池短路和低侧开关上的接地短路有关。大电流流过线圈，无法断开，由此产生的高功耗可能会对线圈造成损坏。

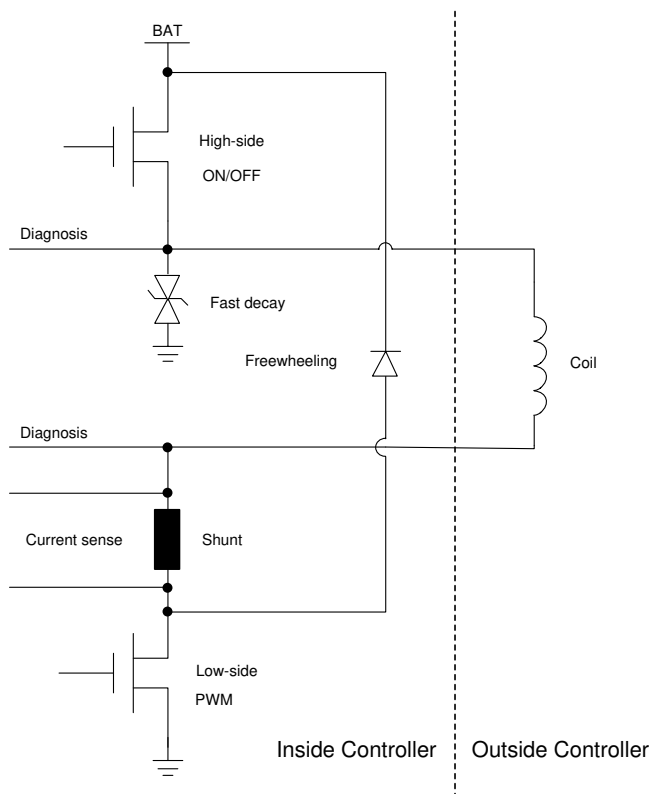


图 5-1. 线圈驱动电路的实现示例

要想实现某种电流曲线，就必须采用经过精心考虑的设计。否则，通过线圈的电流将达到由施加电压除以线圈电阻所得到的最大值。通常，每种规格中都规定了吸合阶段和保持阶段的最大和最小电流，以确保接触器能够正常工作。一些供应商更愿意针对每个阶段内的最小有效电流做出规定。这些电流远远小于由电源电压和线圈电阻所决定的电流值。这不仅有助于节省能耗，还能够延长接触器的使用寿命。

图 5-1 显示了如何使用高侧和低侧开关驱动接触器线圈。它由电池电压供电。高侧和低侧开关都可以进行 PWM 控制，但更适合使用低侧开关进行高达 25kHz 的高频 PWM 控制。高侧开关在这里发挥了开/关控件的作用，可以在低侧终端发生短路故障时保护线圈。续流二极管必不可少，因为在断开低侧开关时，通过线圈的电流不能突然中断。否则，线圈电感会造成非常大的电压尖峰，从而可能损坏元件。添加了一个快速衰减二极管，用于在高侧和低侧开关都断开时，在线圈上产生较大的反向电压。这个较大的反向电压可以让线圈电流迅速下降到零。而在汽车应用中，高侧和低侧终端的诊断功能都必不可少。

DRV3946-Q1 等完全集成式高功率接触器驱动器可以确保以简化的方式实施复杂的电流调节功能，实现所需的电流曲线。该双通道器件能够对拾取和保持阶段的电流进行编程，从而使其更稳健高效地驱动接触器。

### 5.1 脉宽调制电流生成

在工业中使用脉宽调制来生成所需的电流波形很常见。占空比是导通时间与信号周期的比值，它决定了控制频率下施加到线圈上的最大和最小电流。

通常有两种控制方法用于进行 PWM 控制。一种是电压反馈，另一种是电流反馈。电压反馈是电流的开环控制。它测量电源电压并相应地设置占空比。尽管这种实现方式的硬件电路简单，成本较低，但电流精度较差，为了确保正常工作，总是需要预留较大裕量。此外，还需要进行额外的预校准工作来获得不同接触器的电压占空比图。

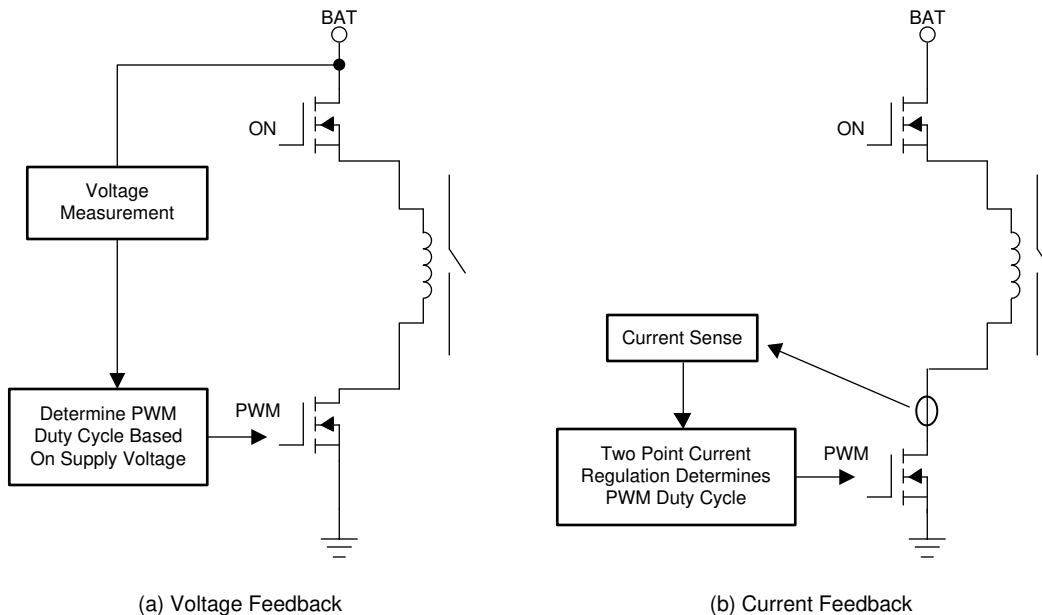
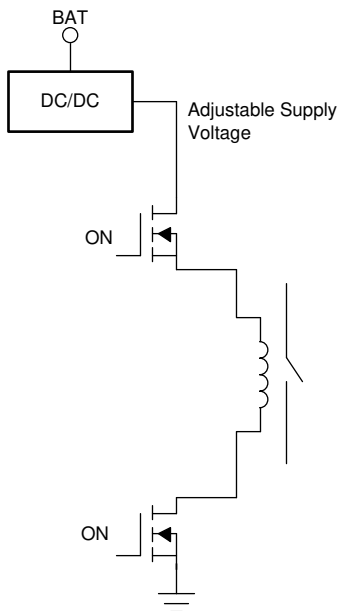


图 5-2. 脉宽调制电流生成

电流反馈是电流的闭环控制。它始终测量线圈电流，并根据电流直接切换开关。这可以确保较高的电流精度，让线圈电流与所需电流保持高度一致。此外，不再需要电压占空比图，节省了预校准工作。然而，这种电流反馈方法的成本可能比电压反馈解决方案的成本更高。**DRV3946-Q1** 具有支持闭环控制的集成电流检测功能，从而消除了电流反馈方法的成本。

## 5.2 可调电源电压方法

在上面的介绍中，使用了电池电压来驱动接触器线圈。但电池电压不是一个固定值，在正常运行期间，这个值会在一个很大的范围内波动。这就是引入专用 **PWM** 控制以获得所需电流的原因。因为电流是由施加的电源电压除以线圈电阻决定的，所以为线圈提供可调电源电压是另一种选择。**图 5-3** 显示了用于驱动接触器线圈的可调电源电压。直流/直流转换器是将电池电压转换为可调电源电压的理想解决方案。如果直流/直流转换器集成了使能/禁用控制，则可以省去高侧开关。



**图 5-3. 使用可调电源电压生成电流**

这更像是将 **PWM** 控制从线圈驱动开关转移到直流/直流转换器上。直流/直流输出电压取决于在所需电流下的线圈电阻。因此，拾取阶段和保持阶段的输出电压并不相同。同时，最好集成电流检测功能，以检查流过线圈的电流是否等于所需电流。

## 6 总结

电动汽车和混合动力汽车中广泛使用接触器来连接和断开电源线。驱动电路的线圈产生的所需电流曲线对于确保接触器的正常运行必不可少。由于存在高电流和高频率，务必要注意 **EMC** 问题。此外，一些客户已经在使用具有特殊控制和诊断功能的智能接触器。

同时，固态开关有取代机电接触器的趋势，以实现低噪声、高可靠性和长寿命。通常，接触器会因被焊接为闭合状态而失效，而固态开关的故障模式大多是开路。然而，固态开关也有一些缺点。目前固态开关的成本很高，并且由于内部阻抗，输出存在固定压降。此外，即使在关断模式下也存在漏电流。因此规定至少要在一个极上保留一个机电接触器，而在另一极上使用固态开关。

## 7 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

<b>Changes from Revision * (February 2021) to Revision A (July 2024)</b>	<b>Page</b>
• 更新了 <a href="#">节 1</a> .....	<a href="#">2</a>
• 更新了 <a href="#">节 5</a> .....	<a href="#">4</a>
• 更新了 <a href="#">节 5.1</a> .....	<a href="#">5</a>

## 重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司