

精通电机驱动的电流通流、衰减模式和刹车

戴观祖 Garrick Dai

Shenzhen OEM

直流（有刷）电机和步进电机驱动的最重要性能指标就是效率、振动和噪音。而对这些性能影响非常大但又往往容易疏忽的就是续流 **Current Recirculation** 的控制，通过深入理解续流以及各衰减模式 **Decay Mode** 的优缺点和适用性，以据此进行更为复杂灵活的续流控制，就更能够适应不同参数的电机，从而达到效率、振动和噪音的最佳平衡。本文从电机等效电路角度去分析和解释不同续流模式，易于从本质上理解掌握。同时本文也进一步解释电机的刹车机制，以及容易造成混淆的刹车和续流的区别和分析。

内容

1	直流（有刷）电机和步进电机驱动拓扑	2
2	什么是电流通流	2
3	电流通流的衰减模式	3
3.1	慢衰减.....	3
3.2	快衰减.....	3
3.3	混合衰减..	4
4	电机及续流阶段的等效电路.....	5
5	电机 Brake 刹车及与 Decay 续流的差异理解.....	7
6	小结	8
7	参考文献	8

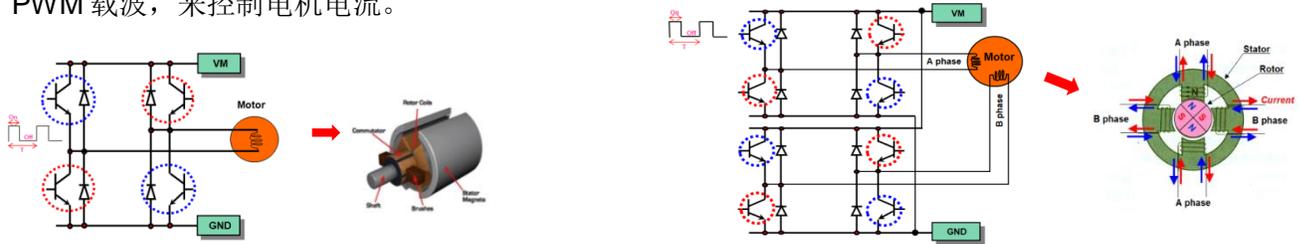
图表

图一	直流和步进电机驱动拓扑.....	2
图二 A	续流、异步和同步续流	2
图二 B	关键参数说明	2
图三	慢衰减 Slow Decay	3
图四	快衰减 Fast Decay	4
图五	混合衰减 Mixed Decay	4
图六	电机（一相）等效电路	5
图七	慢衰减等效电路.....	6
图八	快衰减等效电路.....	6
图九	惯性运转 Coasting	7
图十	刹车 Braking	7
图十一	刹车阶段波形	8

表一 续流各模式对比 5

1, 直流（有刷）电机和步进电机驱动拓扑

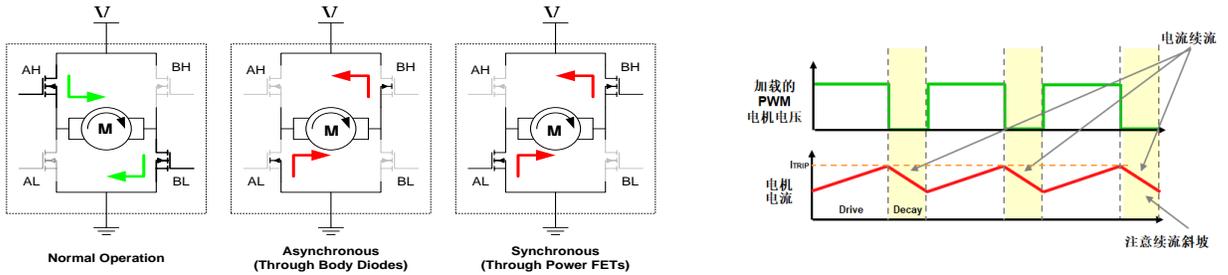
如下图一左边，直流有刷电机由一个全桥电路驱动单个电机线圈。通过同时打开蓝色虚线框 FET 驱动管或红色虚线框 FET 驱动管可分别控制电机的正反转，而通过在 FET 驱动管加载不同 Duty 的 PWM，可对电机调速（本文图中 PWM 仅为示意，并非只是一路）。类似的，典型的（两相）步进电机有两个电机线圈，如图一右边示意图，由两个全桥电路分别控制两个电机线圈 A 相和 B 相，通过在 A、B 相加载相位差 90 度 PWM 波来控制步进电机的转速，A、B 相相位超前或落后 90 度控制电机方向，而在在每步驱动内加载不同 Duty 的（频率更高）PWM 载波，来控制电机电流。



图一 直流和步进电机驱动拓扑

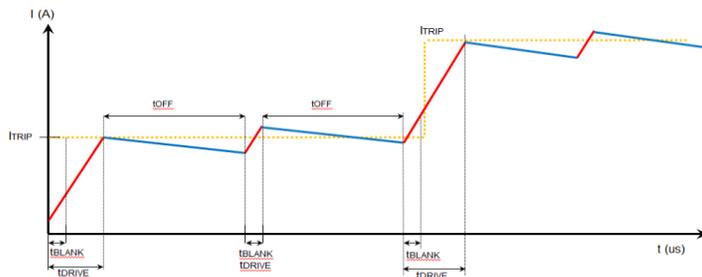
2, 什么是电流续流

以直流有刷电机为例，如下图。首先 AH,BL 的 FET 打开，电流从 VM 由左往右到地，这是电机驱动阶段 Driving/Drive。然后关闭所有 FET，此时电机的线圈电感效应，电流会继续从左到右流动并衰减 Decay。而电流衰减有两种途径，一是通过 FET 的体二极管衰减，如图二中间示意，由地到 VM，这是异步衰减。二是通过打开 BH、AL 的 FET，电流还是由地到 VM，这称为同步衰减。这种异步衰减和同步衰减的途径就是电流续流 Current Recirculation。显而易见，异步衰减经过 FET 体二极管，压降大所以损耗 (2*I*Vd) 也大，而同步衰减经过 FET 的 Rds(on)，一般内阻较小所以损耗 (I^2*Rds(on)*2) 也小。后文主要以同步衰减来说明。



图二 A: 续流、异步和同步续流

为方便下文展开，先介绍下电机驱动和电流衰减的几个关键参数 - ITRIP、tDRIVE、tBLANK、tOFF。下图中黄虚线 ITRIP 就是本时段内系统/驱动芯片设定的电流，ITRIP 按照电机驱动算法或电流控制而变化，下图就是往上台阶增长例子。tDRIVE 是驱动阶段的时间，这里需要注意起始有个 tBLANK 时间（一般几个 us 以内），主要是为了避开（驱动阶段）驱动管打开时刻的 Overshoot 等噪音毛刺，系统/驱动芯片会强制忽略掉这段时间而不检测相电流等。经过 tBLANK 后就是剩余的驱动阶段。当然有些情形下 tDRIVE 只有 tBLANK 时间而直接省略后续。tOFF 是电流整个续流时段。所以 tDRIVE+tOFF 就是加载的 PWM 的周期。PWM 周期可以是固定的或可变的，取决于系统需要。



图二 B: 关键参数说明

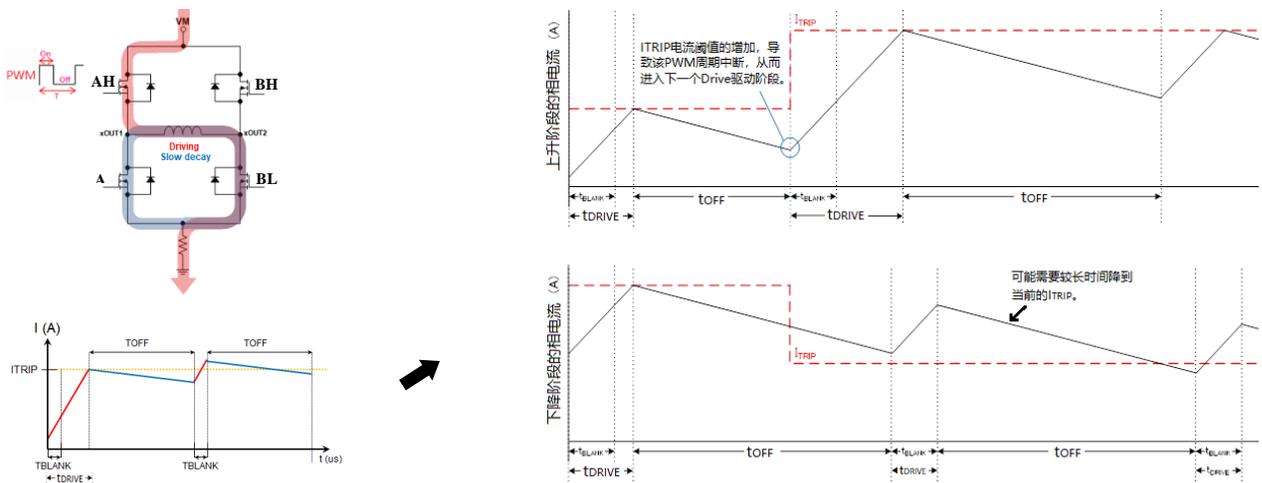
3. 电流续流的衰减模式

电流续流一般有三种控制模式 --- 慢衰减 Slow Decay、快衰减 Fast Decay 和混合衰减 Mixed Decay。这里的所谓“快”“慢”是指续流期间电流衰减的相对快慢。

3.1 慢衰减 Slow Decay

首先正常驱动阶段 Driving 如图三左红色电流方向（AH、BL 打开），然后关掉 AH、BL，并打开下桥臂的 AL、BL 两个驱动管，电流继续从左往右经过线圈顺时针闭环慢衰减，如图蓝色电流。

对应的电机相电流（下文简称相电流）波形是先驱动阶段（Driving）上升，如图三左下，当相电流上升到预设的 ITRIP 阈值或以上时，就进入续流阶段。可以理解的是，若经过 tBLANK 时间后相电流已经到达（或超过）ITRIP 阈值时，就没有后续的 Driving 阶段而直接进入续流阶段，如图三左下波形图的第二个 PWM 周期。所以 tBLANK 也是驱动信号 PWM 最小的 ON 时间。综上，慢衰减模式主要是通过下桥臂的两个驱动管来续流，相电流的纹波相对较小。



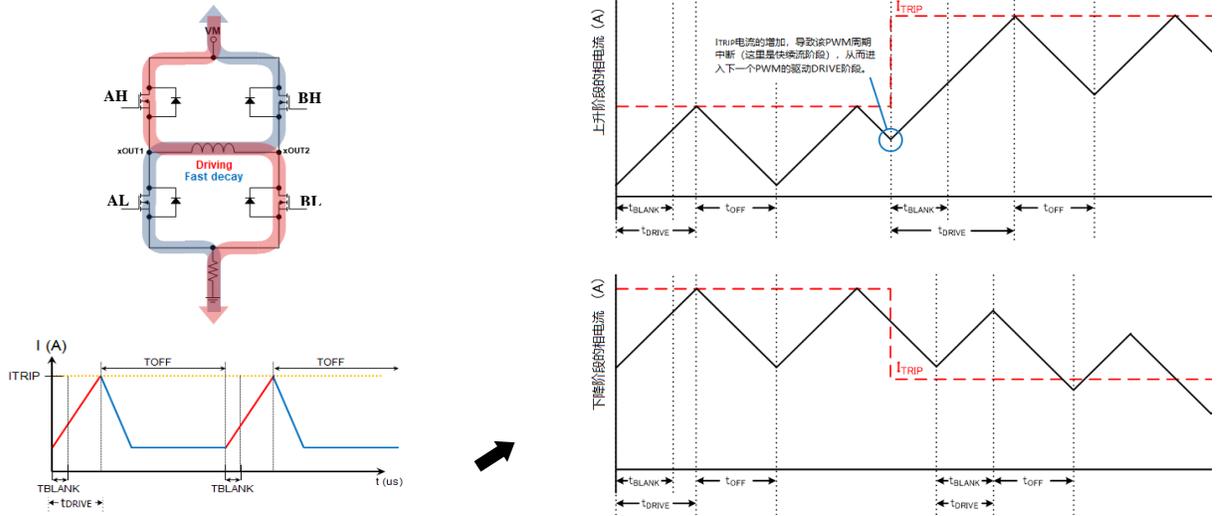
图三：慢衰减 Slow Decay

当相电流处在上升或下降期间（ITRIP 处于变大或变小的时期），慢衰减模式下的相电流变化如图三右所示。在相电流的上升期，ITRIP 增大会导致该 PWM 周期内续流提前结束从而进入下一个 PWM 的驱动 Driving 阶段。同理，在相电流的下降期 ITRIP 减小时，也会导致该 PWM 周期里的续流时间 toff 需要拉长以达到当前的 ITRIP，这在可变周期的 PWM 控制技术常见。当然图中只是示意，对于每个 ITRIP 台阶变化，相电流也可以经过多个 PWM 周期调整到达下个 ITRIP。

3.2 快衰减 Fast Decay

还是先正常驱动阶段 Driving，如图四红色电流方向（AH、BL 打开），然后关掉 AH、BL，并打开斜对称的 BH、AL 两个驱动管，电流继续从左往右经过线圈、从地端到电源 VM 端快衰减，如图中蓝色电流方向。

对应的相电流波形如图四左下，是先 **Driving** 驱动阶段，然后快衰减直到零，并保持（如把全桥驱动管都关掉），不会出现反向电流。当然图中只是举例示意，并不一定是快衰减都能在续流时间内到零。快衰减模式主要是通过斜对角的两个驱动管来续流，快衰减模式下相电流的纹波相对较大。

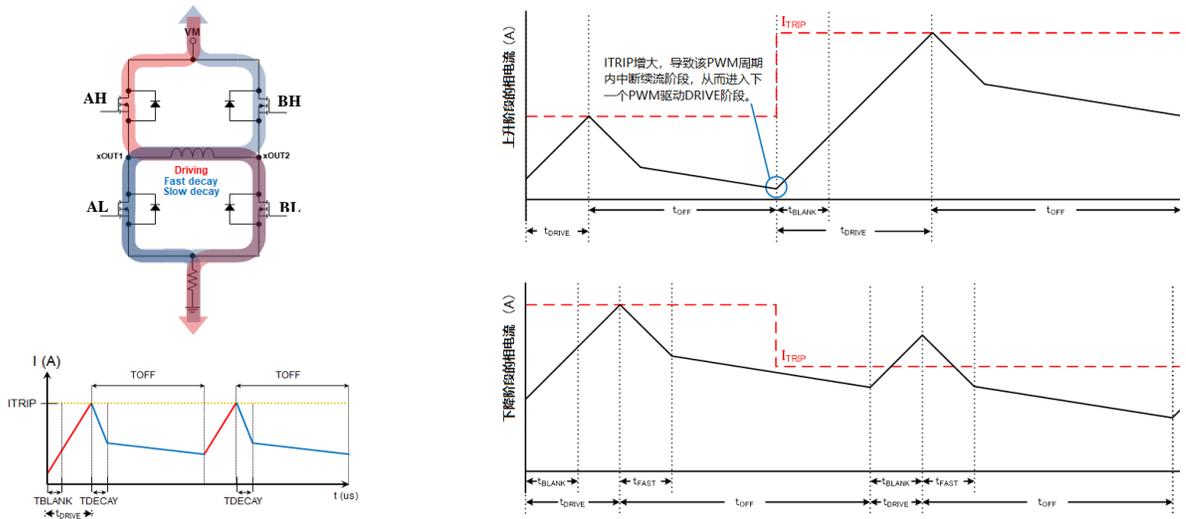


图四：快衰减 Fast Decay

当相电流处在上升或下降期间（ I_{TRIP} 变大或变小时），快衰减模式下的相电流变化如图四右所示。在相电流的上升期， I_{TRIP} 增大会导致该 PWM 周期内的续流需要提前结束（相比慢续流提前更多），从而进入下一个 PWM 的驱动 **Driving** 阶段。另外在相电流的下降期 I_{TRIP} 减小时，快续流相对于慢续流更快达到当前的 I_{TRIP} ，从而可能不需要延长续流时间 t_{OFF} 。

3.3 混合衰减 Mixed Decay

顾名思义，先正常驱动阶段 **Driving** 如图五红色电流方向（AH、BL 打开），然后关掉 AH、BL，并打开斜对称的 BH、AL 两个驱动管快衰减，经过一段时间 T_{DECAY} 后，关掉 BH 并打开 BL（此时 AL 保持打开），电流继续从左往右经过线圈顺时针的慢衰减。对应的相电流波形是先 **Driving** 驱动阶段，然后先快衰减，持续 T_{DECAY} 时间，接着切换到慢衰减。混合衰减模式下相电流的纹波介于快衰减和慢衰减之间。 T_{DECAY} 时间可根据电机及应用场景来设置调整。



当相电流处在上升或下降期间（ I_{TRIP} 变大或变小时期），混合衰减模式下的相电流变化如图五右所示。在相电流的上升期， I_{TRIP} 增大会导致该 PWM 周期内的续流需要提前结束（介于慢衰减和快衰减之间），从而进入下一个 PWM 的驱动 Driving 阶段。另外在相电流的下降期 I_{TRIP} 减小时，混合衰减介于快衰减和慢衰减之间达到当前的 I_{TRIP} 。

图五：混合衰减 Mixed Decay

同时无论哪种续流模式， t_{BLANK} 时间是无法取消或提前的（但可动态调整），是 t_{DRIVE} 的开始部分，也就是最小 ON Duty。统筹考虑 t_{BLANK} 、 t_{DRIVE} 、 t_{OFF} 、 T_{DECAY} 及 PWM 周期等时间的控制，来确保相电流有效地、及时地控制到当前设定的 I_{TRIP} 阈值，以达到精确的快速响应的电流环控制。综上，相对来说，慢衰减较为适合相电流上升期，快衰减较为适合相电流下降期，而混合衰减介于两者之间。下表一是三种衰减模式的优缺点对比。对于简单电机驱动系统而言，选取一个合适的衰减模式固定即可。对于相对复杂的控制，可以在相电流上升和下降期，采用不同衰减模式，而对于更复杂控制，可以进一步控制 PWM 周期、 T_{BLANK} 、 t_{DRIVE} 、 t_{OFF} 等时间来达到最优化效果。

慢衰减 Slow Decay	快衰减 Fast Decay	混合衰减 Mixed Decay
相电流纹波小	相电流纹波大	相电流纹波适中
较长 t_{OFF} 时间，可能产生可听的低频噪音	较短 t_{OFF} 时间，可能导致开关损耗增加	适中的 t_{OFF} 时间 频率和性能的权衡
相电流下降较慢，可能扭曲相电流波形(如正弦)	相电流下降较快，适合于相电流下降期	相电流下降相对较快，适合于相电流下降期
适用于低电感电机	适用于大电感电机	介于之间

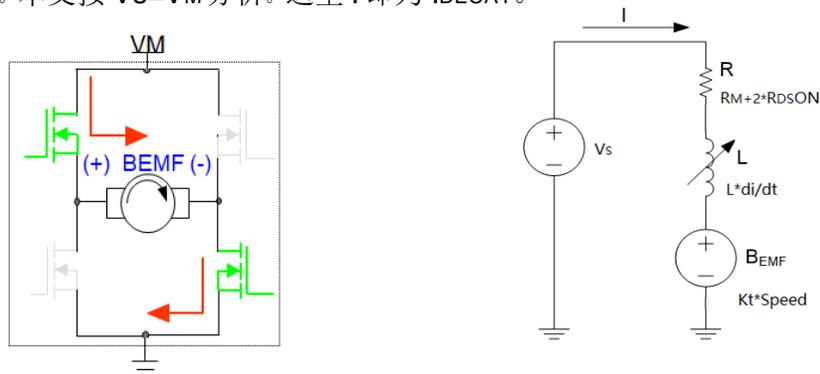
表一：续流各模式对比

最后补充一点，如果考虑到驱动信号 PWM 的 Dead time 死区时间，那么在正式的电感衰减之前会有一段死区时间阶段，在这个阶段所有驱动管是关闭的，相电流会通过驱动管的 Body Diode 或外部 Diode 来异步衰减（如前述），当然死区时间一般很短（几个 us 或 ns），影响不大，本文分析忽略。

4. 电机及续流阶段的等效电路

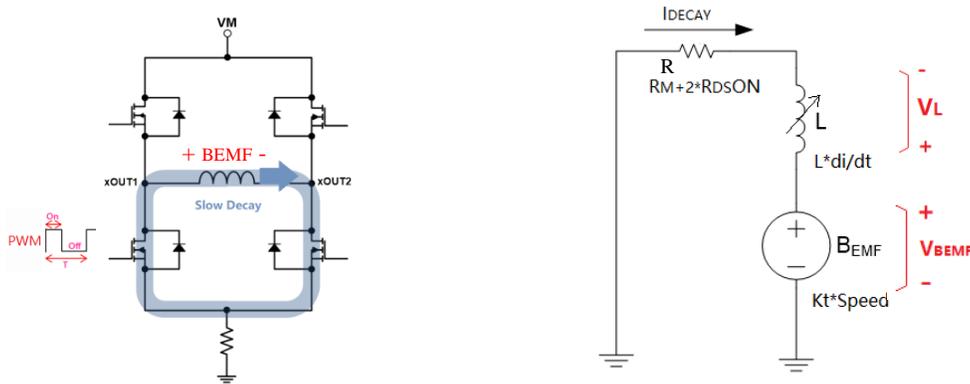
以有刷电机单线圈为例，如下图。电机本身可以等效于三部分组成：线圈内阻 R_M 、线圈电感 L 和电机反电动势 B_{EMF} 。其中 B_{EMF} 电压等于电机反电动势常数 K_t 乘以转速（Hz），也就是和电机转速成正比。图中也考虑进去两个驱动管的内阻 $R_{DS(ON)}$ ，所以 Driving 驱动阶段的基本等效电路如下图右，等效公式：

$V_s = I * R + L * di/dt + V_{BEMF}$ 。本文按 $V_s = V_M$ 分析。这里 I 即为 I_{DECAY} 。



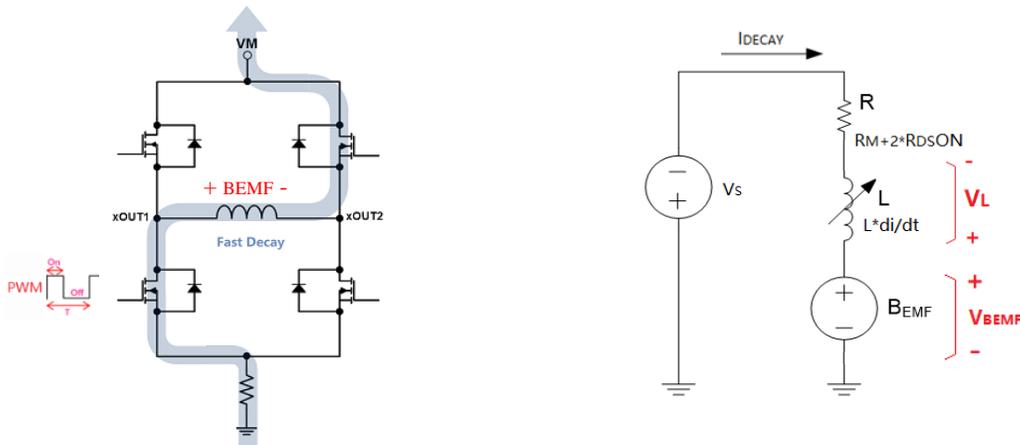
可以理解的是， $I \cdot R$ 电压一般较小，当电机处于启动或低转速期间时，反电动势很小，大部分电压会加载到 $L \cdot di/dt$ ，电流急速上升。而当电机处于最高转速时，反电动势最大，电感电压则最小，电流变化斜率相对较小。

在续流阶段，也就是 PWM 周期的 OFF 时间段内，电机转速变化不大，反电动势变化不大（或略微降低）。对于慢衰减续流，如下图，相当于 V_s 接地，此时慢衰减的电感电压 $V_L = L \cdot di/dt = I \cdot R + V_{BEMF}$ ，但极性反向，所以续流电流是下降的。相比于 Driving 驱动阶段的电感电压 $V_L = V_s - I \cdot R - V_{BEMF}$ ，在中低转速下 V_{BEMF} 不大，慢衰减阶段的电感电压较小， I_{DECAY} 下降斜率较（Driving 驱动阶段）缓慢。



图七 慢衰减等效电路

对于快衰减续流，如下图八等效电路，需要注意，此时 V_s 反向加载于电机，快衰减阶段的电感电压 $V_L = L \cdot di/dt = V_s + V_{BEMF} + I \cdot R$ 。相比于 Driving 驱动阶段的电感电压（ $V_s - V_{BEMF} - I \cdot R$ ）较大，更是比慢衰减阶段的电感电压（ $I \cdot R + V_{BEMF}$ ）大很多，所以 I_{DECAY} 下降速度最快，也就是称之为“快”衰减。这也说明了上文提到的快衰减较适合大电感电机，而慢衰减较适合小电感电机。

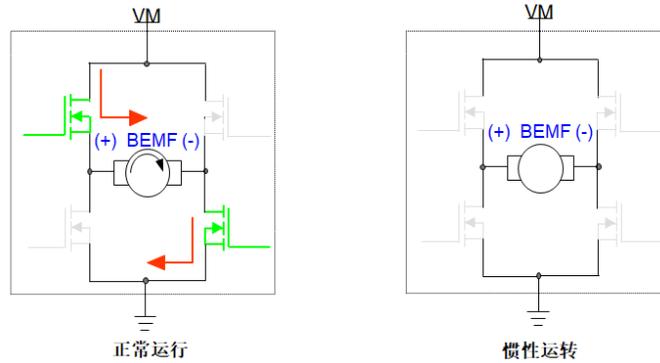


图八 快衰减等效电路

5. 电机 Brake 刹车及与 Decay 续流的差异理解

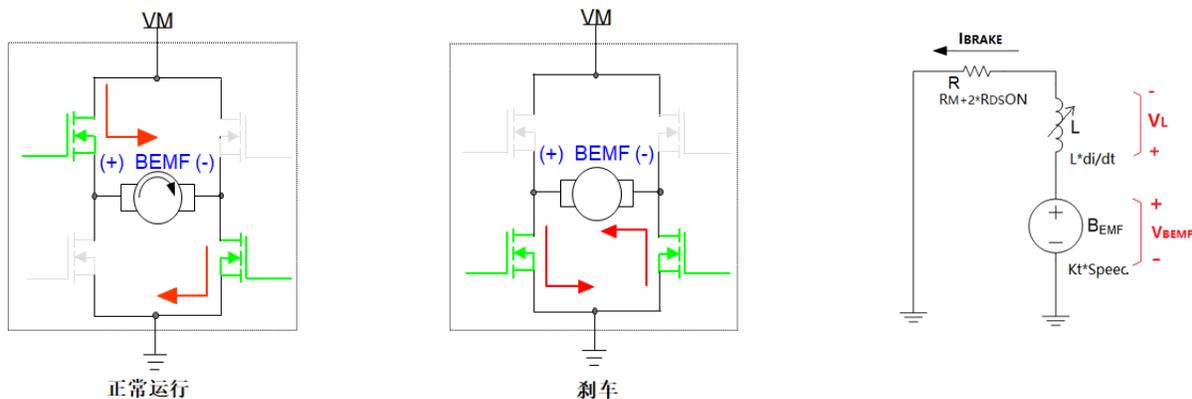
续流是 PWM 的 OFF 时间段，时间非常短，比如 50us（在 20KHz PWM），而电机刹车的时间相对会长很多，从几秒甚至几十秒。两者时间级上完全不一样。在续流阶段时间内，转速变化非常小，基本可以忽略 V_{BEMF} 的变化。

还是以直流有刷电机为例。如下图九，当电机从正常运行状态（Driving 驱动阶段）到把全桥驱动管全部关掉 OFF，此时若考虑 FET 体二极管则继续异步衰减，续流结束后电机就是完全开路状态，反电动势能量无处释放，只有电机本身的摩擦阻力让电机缓慢停下来。



图九 惯性运转 Coasting

而对于刹车，如下图十，电机从正常运行状态切换到只打开下桥臂驱动管并保持住，在刹车切换前（驱动阶段结束）时刻， $V_M = I^*R + L^*di/dt + V_{BEMF}$ ，此时转速最大 V_{BEMF} 最大，电感电压很小忽略，电机相电流近似于 $I_{DRIVE} = (V_M - V_{BEMF})/R$ 。切换后，也就是和慢衰减一样的电路，电机相电流先慢续流直到 0（可能持续多个 OFF 时间），续流结束。然后电机自身的反电动势通过低边驱动管形成回路，相当于发电机，电流反向，如图十中间的红色刹车电流。



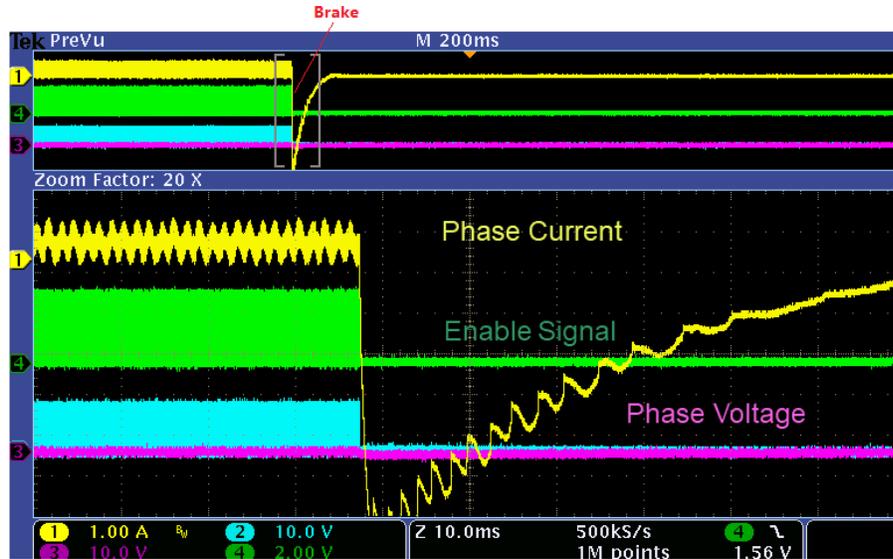
图十 刹车 Braking

这时如图十右， $V_{BEMF} = V_L + I^*R$ ，电流 I_{BRAKE} 从 0 开始迅速增大到最大， V_L 迅速从此刻 ($V_L = V_{BEMF}$) 降低到 0，但是在这个短时间段内（如毫秒），电机转速略微降低（或忽略），所以反电动势略微降低（或不变），

V_{BEMF} 仍然是最大。此时刻（ V_L 降到 0 时）刹车电流最大 $I_{BRAKE} = V_{BEMF}/R$ 。相比较于刹车前时刻的相电流 $I_{DRIVE} = (V_M - V_{BEMF})/R$ ， I_{BRAKE} 后可能是几倍于 I_{DRIVE} 。

下图十一波形是实际的有刷电机的刹车时刻的波形。黄色波形是电机相电流，可以看到刹车时， I_{DRIVE} 从不到 1A 先续流到 0，接着相电流反向直到最大 I_{BRAKE} 刹车电流，大约 6A。

在刹车阶段，“负载”即内阻 R 较小， $I^2 \cdot R$ 损耗较大，反电动势能量快速耗尽，刹车电流继续（相对于惯性运转）快速地降到 0。这里要考虑到电感 L ，所以刹车电流是类似震荡阻尼下行的到 0 的。类似于下图中黄色的相电流波形。这个过程就是刹车。



图十一 刹车阶段波形

同理，通过打开上桥臂的两个驱动管可以达到完全一样效果的刹车（等效电路完全一致）。刹车相对于惯性运转时间较短，还具有一定的刹车保持力矩，取决于 R 大小（以及反电动势）， R 越小就需要越大力矩去转动电机。

6. 小结

本文重点阐述了电机驱动里的关键控制——续流及其各衰减模式的区别，并从等效电路角度分析原理和对比。同时进一步分析了刹车以及与衰减的区别理解。帮助读者掌握并能灵活应用于实际的电机驱动复杂控制中。

7. 参考文献

- 1) DRV88xx Datasheet
- 2) DRV88xx EVM GUI
- 3) Getting smart about tuning your stepper motor

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries (TI) reserve the right to make corrections, modifications, enhancements, improvements, and other changes to its products and services at any time and to discontinue any product or service without notice. Customers should obtain the latest relevant information before placing orders and should verify that such information is current and complete. All products are sold subject to TI's terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgment.

TI warrants performance of its hardware products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are used to the extent TI deems necessary to support this warranty. Except where mandated by government requirements, testing of all parameters of each product is not necessarily performed.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. Customers are responsible for their products and applications using TI components. To minimize the risks associated with customer products and applications, customers should provide adequate design and operating safeguards.

TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any TI patent right, copyright, mask work right, or other TI intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI products or services are used. Information published by TI regarding third-party products or services does not constitute a license from TI to use such products or services or a warranty or endorsement thereof. Use of such information may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

Reproduction of TI information in TI data books or data sheets is permissible only if reproduction is without alteration and is accompanied by all associated warranties, conditions, limitations, and notices. Reproduction of this information with alteration is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for such altered documentation. Information of third parties may be subject to additional restrictions.

Resale of TI products or services with statements different from or beyond the parameters stated by TI for that product or service voids all express and any implied warranties for the associated TI product or service and is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for any such statements.

TI products are not authorized for use in safety-critical applications (such as life support) where a failure of the TI product would reasonably be expected to cause severe personal injury or death, unless officers of the parties have executed an agreement specifically governing such use. Buyers represent that they have all necessary expertise in the safety and regulatory ramifications of their applications, and acknowledge and agree that they are solely responsible for all legal, regulatory and safety-related requirements concerning their products and any use of TI products in such safety-critical applications, notwithstanding any applications-related information or support that may be provided by TI. Further, Buyers must fully indemnify TI and its representatives against any damages arising out of the use of TI products in such safety-critical applications.

TI products are neither designed nor intended for use in military/aerospace applications or environments unless the TI products are specifically designated by TI as military-grade or "enhanced plastic." Only products designated by TI as military-grade meet military specifications. Buyers acknowledge and agree that any such use of TI products which TI has not designated as military-grade is solely at the Buyer's risk, and that they are solely responsible for compliance with all legal and regulatory requirements in connection with such use. TI products are neither designed nor intended for use in automotive applications or environments unless the specific TI products are designated by TI as compliant with ISO/TS 16949 requirements. Buyers acknowledge and agree that, if they use any non-designated products in automotive applications, TI will not be responsible for any failure to meet such requirements.

Following are URLs where you can obtain information on other Texas Instruments products and application solutions:

Products

Motor www.ti.com/motor
Audio www.ti.com/audio
Amplifiers amplifier.ti.com
Data Converters dataconverter.ti.com
DLP® Products www.dlp.com
DSP dsp.ti.com
Clocks and Timers www.ti.com/clocks
Interface interface.ti.com
Logic logic.ti.com
Power Mgmt power.ti.com
Microcontrollers microcontroller.ti.com
RFID www.ti-rfid.com
OMAP Mobile Processors www.ti.com/omap
Wireless Connectivity www.ti.com/wirelessconnectivity

Applications

Motor Drive & Control www.ti.com/motor
Automotive and Transportation www.ti.com/automotive
Communications and Telecom www.ti.com/communications
Computers and Peripherals www.ti.com/computers
Consumer Electronics www.ti.com/consumer-apps
Energy and Lighting www.ti.com/energy
Industrial www.ti.com/industrial
Medical www.ti.com/medical
Security www.ti.com/security
Space, Avionics and Defense www.ti.com/space-avionics-defense
Video and Imaging www.ti.com/video

TI E2E Community Home Page
德州仪器在线技术支持社

e2e.ti.com
www.deyeesupport.com

Mailing Address: 上海市浦东新区世纪大道1568号, 中建大厦32楼 邮政编码: 200122
Copyright © 2012, Texas Instruments Incorporated

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性及其可靠性数据（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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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安全、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及ti.com.cn上或随附TI产品提供的其他可适用条款的约束。TI提供所述资源并不扩展或以其他方式更改TI 针对TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司