

Application Note

确定适用于直流电机驱动应用的大容量电容器的大小



Clark Kinnaird

摘要

合适的局部大容量电容是电机驱动系统设计中的一项重要因素。使用更多的大容量电容通常是有益的，但缺点在于这会增加成本和物理尺寸。本应用手册讨论了用于选择电机驱动系统所需电容大小的通用指导原则。

内容

1 引言.....	2
2 背景和理论知识.....	3
2.1 影响确定大容量电容器大小的因素.....	3
2.2 脉宽调制.....	4
2.3 估算电机电流变化.....	4
2.4 使用理想电容器的通用指导值计算.....	5
3 实际结果.....	7
3.1 示例测量.....	7
3.2 经修订的实用通用指导原则.....	9
3.3 其他注意事项.....	10
4 总结.....	11
5 参考资料.....	11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

直流 (DC) 电机广泛应用于汽车、工业和消费类产品中。当电机开启或关闭时，包括在脉宽调制 (PWM) 操作期间，电机电流可能会发生显著变化。这些电流变化可能会给附近的电子器件带来电源电压变化和电磁干扰等问题。

电机驱动器设计中通常包含大容量电容器。这些大容量电容器充当本地电荷库，用于消除电机电流变化。图 1-1 显示了一个典型的评估板，其右侧的两个大型电解电容器用作直流电机驱动器的大容量电容器。

设计人员需要有关确定合适的大容量电容值的指导。在下面的讨论中，我们可以根据对电机和驱动器参数的了解，寻找选择适当电容值的方法。本文虽然基于有刷直流电机，但相同的原理也适用于其他类型的电机，包括无刷直流 (BLDC) 电机和步进电机。

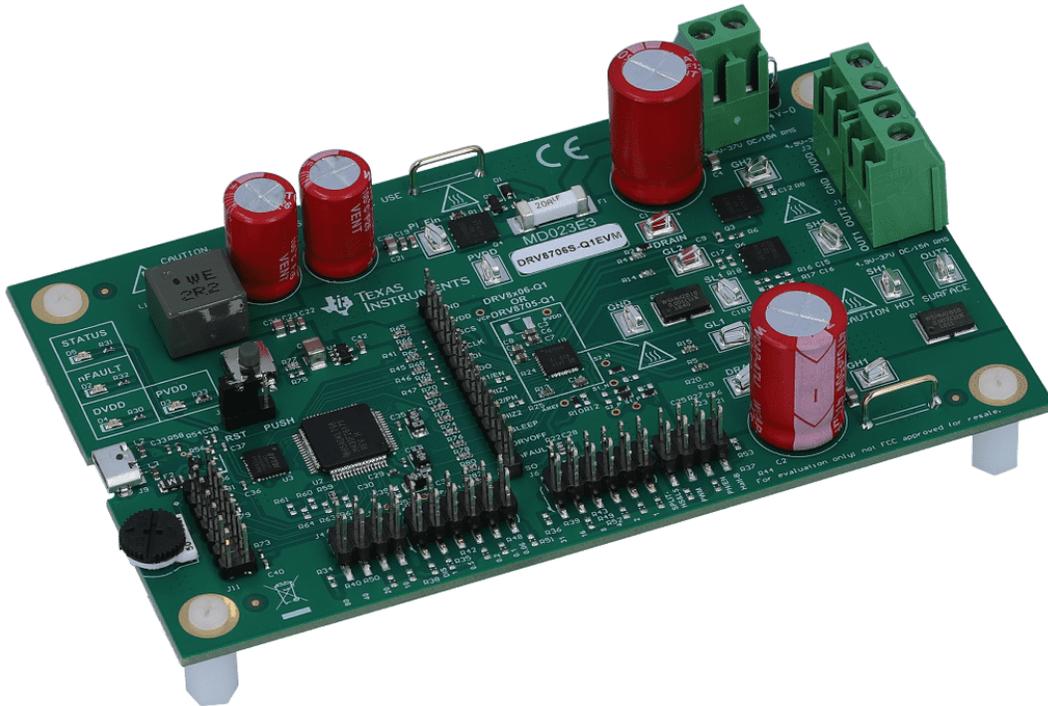


图 1-1. 具有大容量电容器的典型电机驱动器电路板

2 背景和理论知识

经验丰富的工程师通常使用有关大容量电容的通用指导原则来选择电容值。一个指导原则是每瓦电机功率应使用至少 $1\ \mu\text{F}$ 到 $4\ \mu\text{F}$ 的电容。例如，按照这个指导原则，从 12V 电源消耗 10A 电流的电机具有 120W 的功率，因此应使用 $120\ \mu\text{F}$ 到 $480\ \mu\text{F}$ 的大容量电容。我们将深入探究，看看有哪些进一步的讨论支持这些估算值。

为改善大容量电容的电机驱动设计，我们首先回顾一下相关电流和电压关系背后的基本原理。在继续讨论具体的实际案例之前，我们看一下描述简化设计情况下的数学方法。

2.1 影响确定大容量电容器大小的因素

所需的大容量电容大小取决于多种因素，包括：

- 电机系统所需的最高电流
- 电源的类型、电容和拉电流的能力
- 电源和电机系统之间的电感量
- 操作方法，无论是连续调制还是使用脉宽调制
- 可接受的电源电压纹波
- 电机类型（有刷直流电机、无刷直流电机、步进电机）和电机特征
- 电机启动和制动方法

在理想的直流电机系统中，电机驱动电路和电源之间没有阻抗，可以将其建模为理想的恒压源。在这种理想的情况下，电机电源电压没有任何变化。然而，在实际系统中，电源和电机驱动系统之间的电感会限制来自电源的电流的变化速率。驱动器电路板或配网络上还可能存在滤波电感。电源（在汽车系统中通常是 12V 电池）与电机驱动电压 V_M 之间的电感建模为在正极端和接地端连接上标记为寄生电线电感的集总电感，如图 2-1 所示。

如果局部大容量电容太小，系统将以电机电源电压变化的方式对电机中的电流不足或过剩电流作出响应。当使用足够大的大容量电容时，可以快速容纳电流变化，让电机电源电压保持稳定。

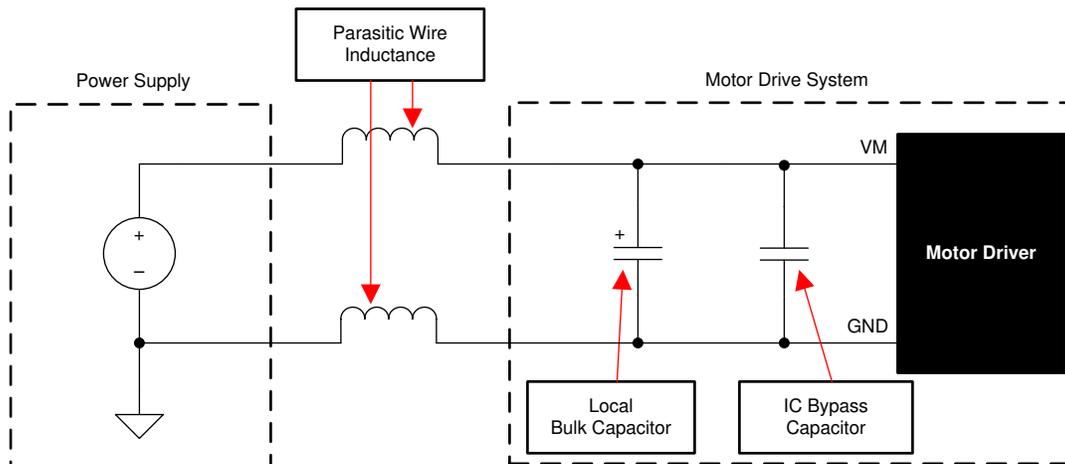


图 2-1. 来自 DRV8718-Q1 数据表的电机驱动模型

电机驱动器数据表通常会给出建议的**最小值**，但需要进行系统级测试来确定大小适中的大容量电容器。表 2-1 显示了 TI 电机驱动器数据表中建议的示例。在这里， C_{PVDD1} 和 C_{PVDD2} 都以并联方式从电机电源电压 (VM 或 PVDD) 连接到接地端 (GND)。

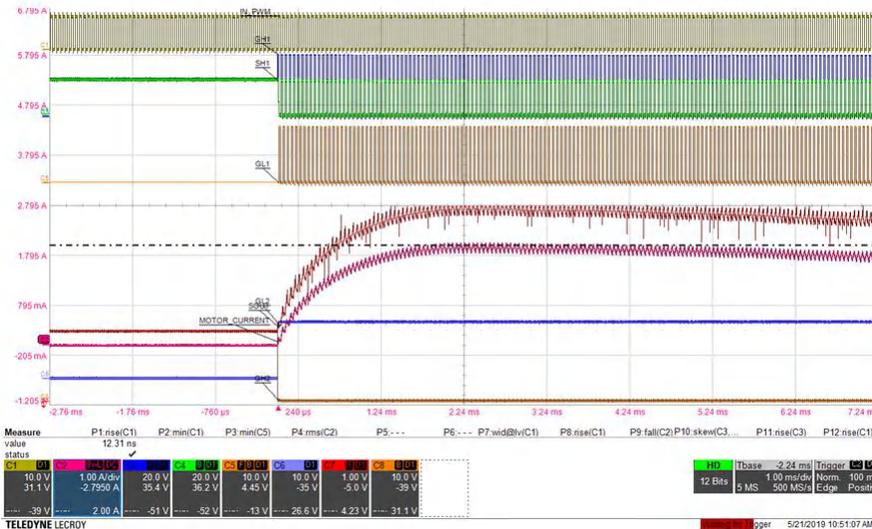
表 2-1. 推荐的外部元件

元件	引脚 1	引脚 2	推荐
C_{PVDD1}	PVDD	GND	0.1 μ F、低 ESR 陶瓷电容器、额定电压为 PVDD。
C_{PVDD2}	PVDD	GND	大于或等于 10 μ F、额定电压为 PVDD 的局部大容量电容器。
$C_{DVDD}^{(1)}$	DVDD	GND	1.0 μ F、6.3V、低 ESR 陶瓷电容器
$C_{AREF}^{(1)}$	AREF ⁽³⁾	GND	0.1 μ F、6.3V、低 ESR 陶瓷电容器
C_{VCP}	VCP	PVDD	1 μ F、16V、低 ESR 陶瓷电容器
C_{FLY1}	CP1H	CP1L	0.1 μ F、低 ESR、额定电压为 PVDD 的陶瓷电容器
C_{FLY2}	CP2H	CP2L	0.1 μ F、PVDD + 16V、低 ESR 陶瓷电容器
R_{nFLT}	VCC ⁽²⁾	nFLT	上拉电阻器， $I_{OD} \leq 5$ mA

- (1) 建议使用局部旁路电容器来降低外部低压电源的噪声。如果另一个旁路电容器靠近用于外部低压电源的器件，并且电源上的噪声很小，则可以选择移除该元件。
- (2) VCC 不是器件上的引脚，而是外部低压电源上的引脚。
- (3) 在 DRV8714-Q1 RHA 封装上，AREF 引脚不存在，AREF 电源来自 DVDD 引脚。

2.2 脉宽调制

如果使用脉宽调制 (PWM) 来控制有效电机电压，则电机电源上的大容量电容就变得更加重要。否则，PWM 运行期间的电流变化会导致电压纹波在整个系统中传播，从而对其他元件造成电磁干扰。图 2-2 显示了 PWM 为 20kHz 时电机驱动系统中的典型波形。标有**电机电流**的红色迹线显示了激活电机时上升电流的影响，纹波电流对应于 PWM 频率。


图 2-2. 来自 DRV8718-Q1 数据表的 PWM 电机驱动器典型波形

在本例中，电流线迹的刻度为每个主要分段 1A，因此 PWM 开关引起的电机电流的变化大约为 200mA。这大约是 2 安培峰值电机电流的 10%。

2.3 估算电机电流变化

在 PWM 运行期间，电机电流围绕一个平均值变化，电流在 PWM 周期的**导通**部分增加，在**关断**部分减少。将电机绕组建模为电感 L_m 与电阻 R_m 串联，增加的电流为：

$$i_{inc}(t) = i_{min} + [i_f - i_{min}] \times (1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

其中 i_f 是 100% 占空比时的最终稳态电流，通常为 $PVDD/R_m$ ，而 i_{min} 是 PWM 导通部分开始时的电流， τ 是电机电气时间常数 L_m/R_m 。

同样，对于减小的电流：

$$i_{dec}(t) = i_{max} + [0 - i_{max}] \times (1 - e^{-t/\tau}) = i_{max} \times e^{-t/\tau} \quad (2)$$

其中 i_{max} 是 PWM 关断部分开始时的电流。

方程式 3 中的电机电流变化是每个 PWM 周期内的电机电流变化。图 2-3 中说明了这一点。

$$\Delta I_{motor} = i_{max} - i_{min} \quad (3)$$

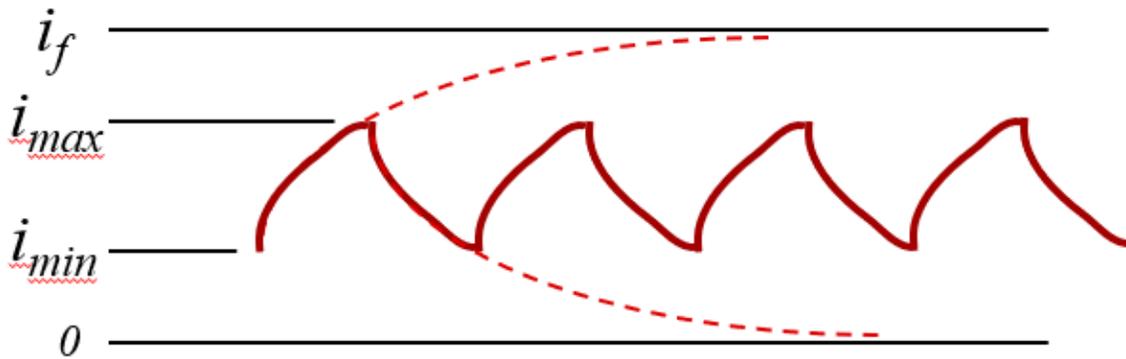


图 2-3. PWM 运行期间的电机电流变化，理想电容器

2.4 使用理想电容器的通用指导值计算

如前文所述，为在电流转换期间（例如电机启动、负载扭矩变化或 PWM 运行）提供恒定的电机电源电压，需要较大的大容量电容。但我们希望能够对所需电容进行实际的估算，这样就不会对大容量电容进行过度设计，从而避免造成高系统成本和过大的电路板尺寸。我们可以按照通用指导原则，根据预期的负载电流变化和允许的电机电源电压变化确定合适的电容器大小。

基于理想电容器的适当大容量电容的初始估算值为：

$$C_{BULK} > \Delta I_{MOTOR} \times T_{PWM} / \Delta V_{SUPPLY} \quad (4)$$

其中 C_{BULK} 是大容量电容， ΔI_{MOTOR} 是电机电流的预期变化， T_{PWM} 是脉宽调制周期，而 ΔV_{SUPPLY} 是允许的电机电源电压变化。

这个不等式基于以下假设：

- 具有零等效串联电阻 (ESR) 的理想电容器
- 电机时间常数 L_m/R_m 明显长于 PWM 周期
- 通过寄生电线电感的电源电流变化可忽略不计
- 当 PWM 占空比为 50% 时，由 PWM 期间变化的电机电流引起的电源电压变化预计最大。

例如，假设在 PWM 期间电机电流的变化约为 $\Delta I_{MOTOR} = 200\text{mA}$ ；这与图 2-2 中显示的值大致相同；图 2-4 中显示了一个简化的草图。对于 20kHz 的典型 PWM 频率， T_{PWM} 为 50 微秒。

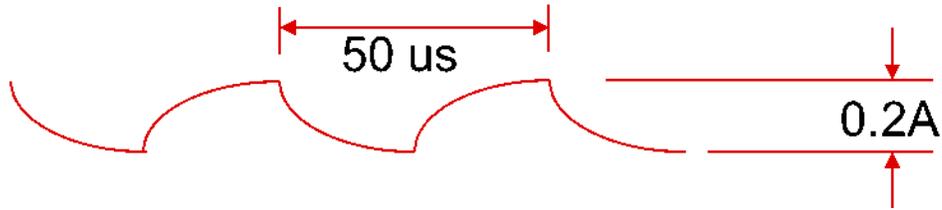


图 2-4. PWM 期间的电机电流波形简化示例

如果我们要使电机电源电压变化不超过 $\Delta V_{\text{SUPPLY}} = 100\text{mV}$ ，可以估算所需的最小大容量电容为：

$$C_{\text{BULK}} \geq 200\text{mA} \times 50\mu\text{s} / 0.1\text{V} = 10\mu\text{A} \cdot \text{s} / 0.1\text{V} = 100\mu\text{F} \quad (5)$$

这是一个估算值，而不是一个详细的分析。我们忽略了多个因素，例如大容量电容的有效串联电阻 (ESR)、电池电感的非无限阻抗、非线性电流变化形状等。然而，它提供了一个合理的大容量电容值作为更严格系统分析的起始点。

在图 2-5 中，将理想仿真的结果与理想电容器公式预测的结果进行了比较。仿真电压纹波略小于理想估算值预测的值，但总体而言，预测和仿真大致保持一致，尤其是对于较高的大容量电容值。

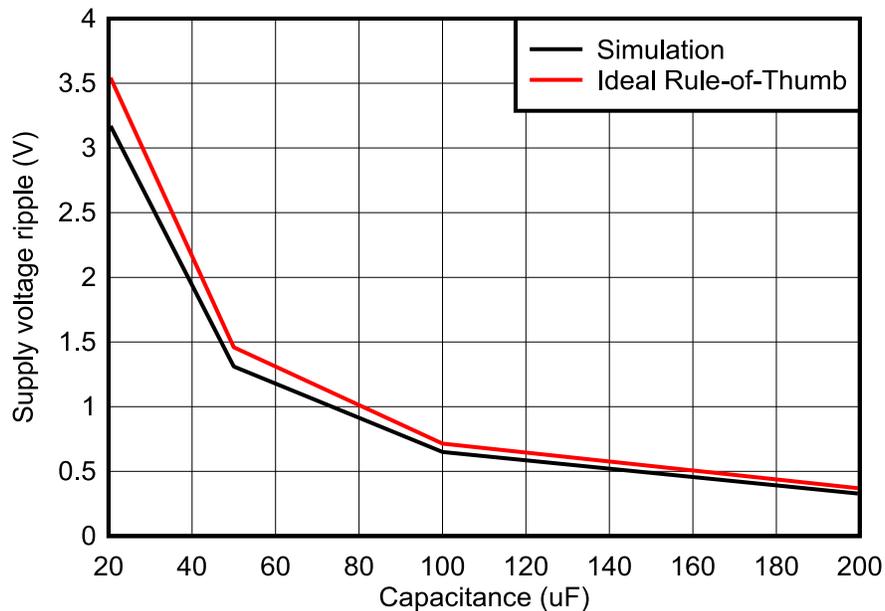


图 2-5. 理想电容器 (ESR=0) 通用指导值与仿真结果比较

但是，我们在后续讨论中将会看到，实际测量表明理想结果相差高达 3 倍，这意味着不理想的电容 ESR 不可忽略。

3 实际结果

实验室测量结果表明，由于典型大容量电容器的非理想特性，前面讨论的计算和通用指导原则与实际结果并不准确匹配。

3.1 示例测量

使用 DRV8718-Q1 EVM，我们可以测量大容量电容的效果示例。我们使用了占空比为 50% 的 PWM 信号以及 12V 电源、3Ω 负载与 470 μH 电感器串联，来仿真典型的直流电机电路。L/R 时间常数为 157 微秒，大约是 PWM 周期的三倍。

图 3-1 显示了大容量电容为 270 μF 的情况。使用理想电容器的估算，我们可以预计由于 PWM 期间电容器的充电和放电，PVDD 会发生大约 80mV 的变化。在每次转换期间忽略快速漂移，电压斜坡确实具有大约 80mV 的振幅，如虚线光标所示。

不过，图 3-1 中 PVDD 的总变化约为 160mV，显著高于按照理想电容估算预测的值。由于大容量电容器的非理想特性，每次转换开始时电压都会急剧漂移。电解电容器的等效串联电阻 (ESR) 可以解决这种快速电压漂移。

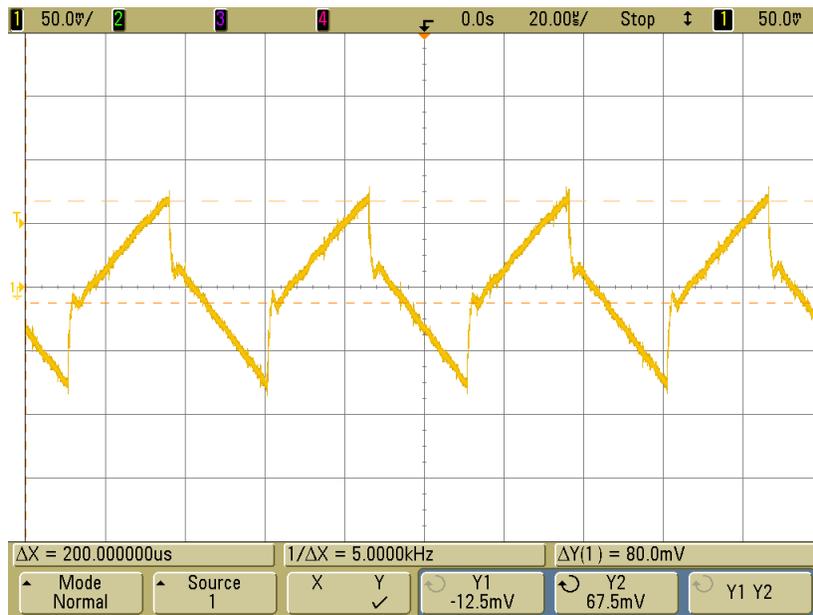


图 3-1. 在 270 μF 大容量电容下的 PVDD 变化，PWM 期间的测量结果

PVDD 的变化主要由两个部分组成：大容量电容充放电引起的电压以及电容器的非理想等效串联电阻 (ESR) 两端的电压。

实际电容器的等效串联电阻 (ESR) 是衡量其特性不理想情况的一个指标。ESR 低的电容器通常较昂贵，但可以提供减少电压纹波的优势。这是电源设计中的一个常见主题，例如，请参阅[降压开关稳压器的输出纹波电压](#)应用手册。

通过仿真，我们可以看到 ESR 为零的理想电容器的纹波是什么样的，还可以通过添加串联电阻表示 ESR 来对实际电容器进行建模。

首先，让我们看看电流在电容器中的流动方式，从而看看电压在我们作为电容器一部分建模的 ESR 上是如何变化的。在 PWM 周期的“导通”部分期间，电容器充当电机电流源，因此 ESR 上的压降从存储在电容器中的内部理想电压中减去。因此，电容器上的电压（包括 ESR）低于内部存储的电压。在 PWM 周期的“关断”部分期间，电容器充当电流阱，为内部电压充电。在充电过程中，电容器两端的电压（包括 ESR）高于内部存储的电压。电机和电容器电流如图 3-2 所示。

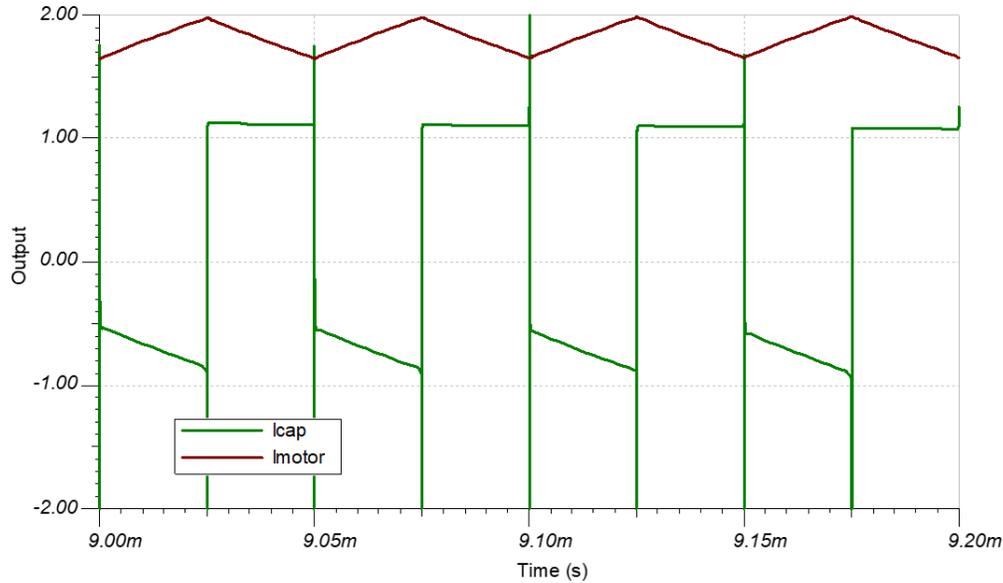


图 3-2. PWM 期间的电机电流 (红色) 和电容器电流 (绿色)

在图 3-3 中，TINA 仿真显示了 MOSFET T1 的 PWM 引起的电压变化，大容量电容为 $270\ \mu\text{F}$ ，零 ESR，对理想电容器建模。PVDD 上的电压变化约为 100mV 。图 3-3 仿真在很大程度上符合理想的电容公式。

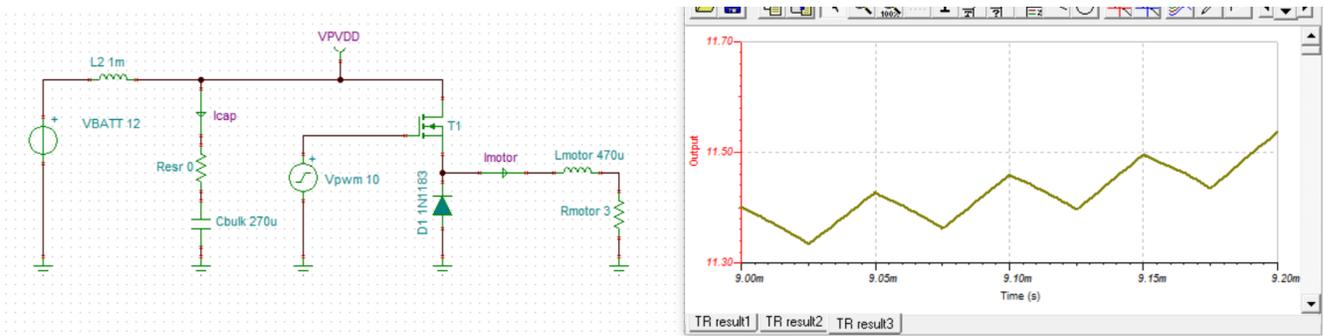


图 3-3. 使用零 ESR 的 TINA 仿真

当在图 3-4 中为 $50\text{m}\Omega$ 的 ESR 建模时，电压变化增加至大约 200mV ，电压纹波的形状看起来更像真实的测量情况。

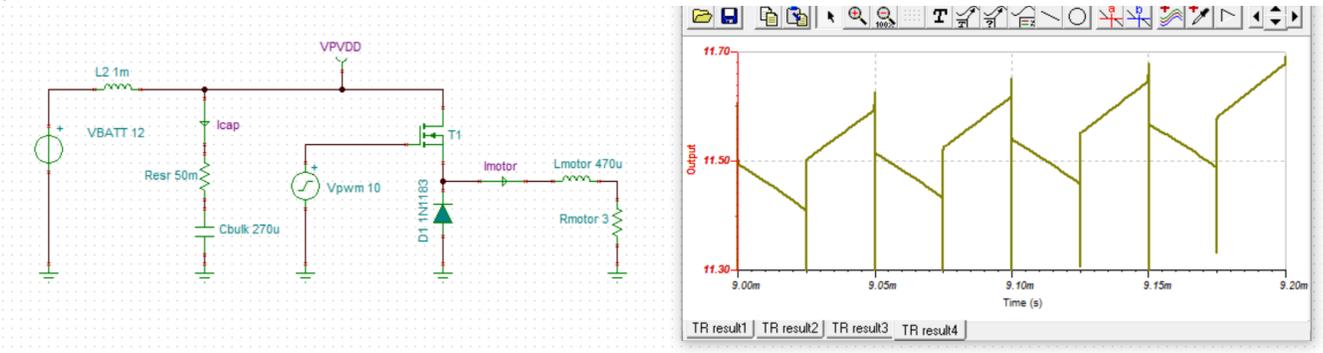


图 3-4. 使用 $50\text{m}\Omega$ ESR 的 TINA 仿真

注意添加 ESR 如何使波形看起来更像实际结果。

图 3-5 中显示了另一个实际情况，其中通过添加一个 330 μF 电容器与前一个情况中的 270 μF 电容器并联，大容量电容增加到了 600 μF 。前面给出的理想电容估算可以预测大约 36mV 的电压变化。测量值大约为 57mV；因此，虽然通过增加更多大容量电容来降低电压变化，但它并没有像理想估算那样降低。

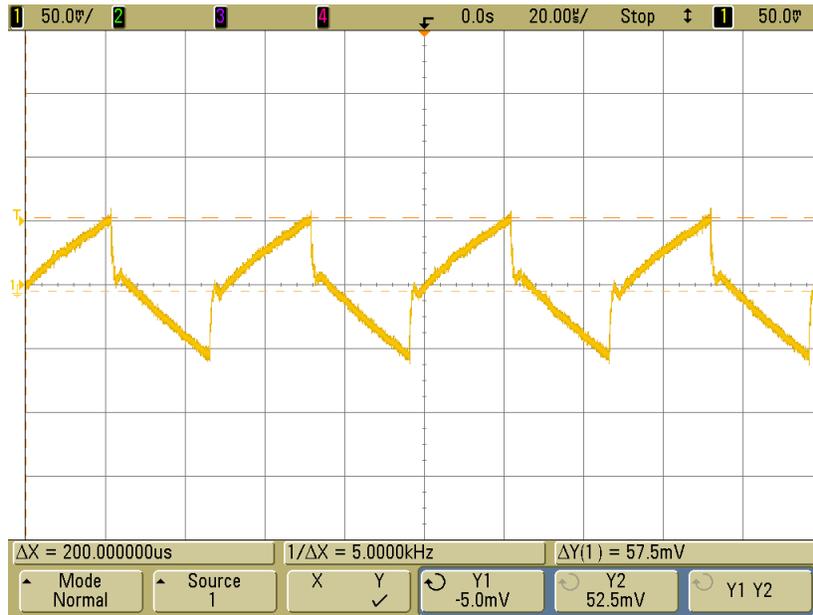


图 3-5. 600 μF 大容量电容时的 PVDD 变化

图 3-6 显示了另一个示例，大容量电容降至 120 μF 。现在电压纹波增加至接近 500mV，并且形状主要由电容的充电和放电决定，而 ESR 的影响则不那么明显。

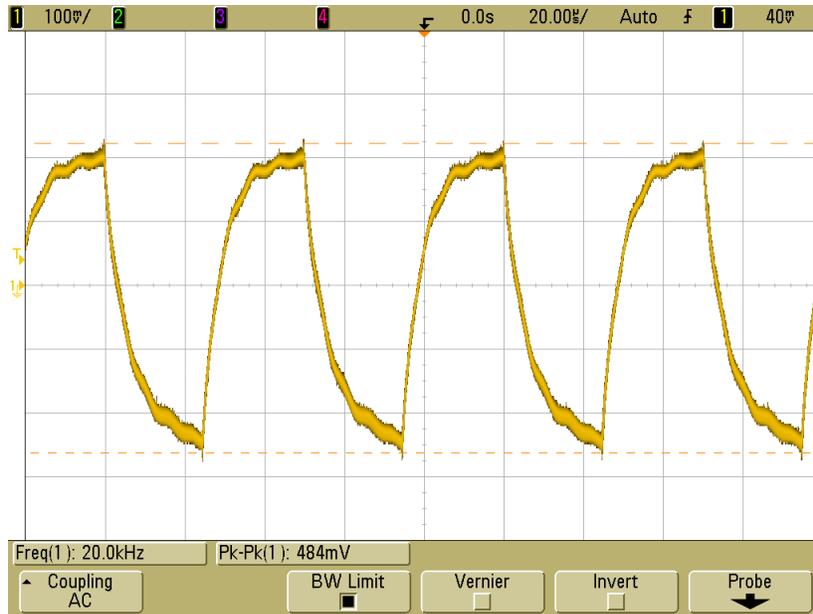


图 3-6. 120 μF 大容量电容时的 PVDD 变化

3.2 经修订的实用通用指导原则

根据这些实际观察结果，我们修改了之前提供的理想通用指导原则，以考虑电容器的非理想特性：

$$C_{BULK} > k \times \Delta I_{MOTOR} \times T_{PWM} / \Delta V_{SUPPLY} \quad (6)$$

其中：

C_{BULK} 是负载电容

k 是此类应用中典型电容器 ESR 的比例因子；根据上面使用 DRV8718 EVM 获得的实验室测量结果， k 约为 3 时，在这些情况下是实际可行的。

ΔI_{MOTOR} 是电机电流的预期变化，即 $i_{\text{max}} - i_{\text{min}}$

T_{PWM} 是 PWM 周期，它是 PWM 频率的倒数

ΔV_{SUPPLY} 是允许的电机电源电压变化

图 3-7 绘制了多个数据点并应用了此通用指导原则，表明一致性相对良好。

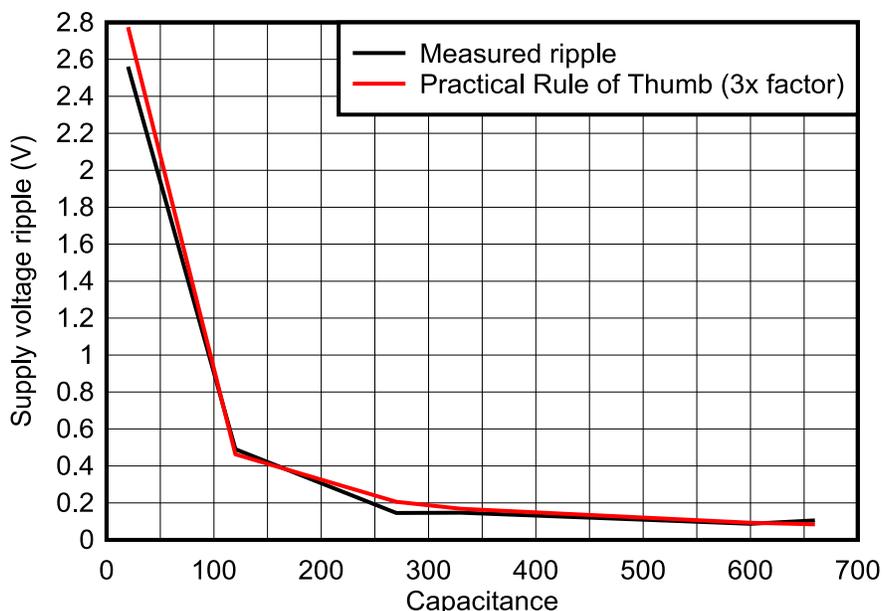


图 3-7. 测量结果和 3 倍通用指导值（考虑了电解电容器的实际非零 ESR 值）

3.3 其他注意事项

讨论已经过简化，以便快速估算大容量电容。几个其他因素也会影响系统性能，在为电机驱动设计选择大容量电容器时需要考虑进去。其中包括：

频率响应 — 电容器的频率响应在不同类型的电容器之间和具有不同值的电容器之间有所不同。通常，建议在电机电源上提供一个以上的电容器值。电容值较大的电容器通常提供出色的低频响应，而电容值较小的电容器提供更佳的高频响应。

电容器类型 — 电容器类型差异很大；一般情况下，对于我们在这里讨论的较大值，通常首选电解电容器。但即使在电解电容器中，也存在一些化学增强功能，可提高元件的耐用性和其他特性，包括 ESR 变化。如果值较小，则首选陶瓷电容器。电容器供应商会提供有关供应商产品的选择标准的信息。

PWM 占空比 — 如果电机在无脉宽调制的情况下连续运行，那么与电源变化有关的许多问题就无关紧要了。相反，如果占空比约为 50%，则假定这是最坏情况。在其他情况下，非常低的占空比（例如 10% 导通时间）或非常高的占空比（例如 90% 导通时间）不需要与我们讨论的大容量电容水平相同。

4 总结

在实际的直流电机驱动系统中，大容量电容器必不可少。尽管最终系统性能需要进行详细分析和实际测试，但我们可以使用经验法则和简单的仿真来估算大容量电容器的大小，并将此估算值作为起点。

5 参考资料

- 德州仪器 (TI), [输入和输出电容器选择](#), 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [降压开关稳压器的输出纹波电压](#), 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [电压裕量和大电容](#), 培训视频。
- Electronics Stack Exchange, [Real World Brushed DC Motor Bulk Capacitance Calculations](#).

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