3 相感应电机的标量 (V/f) 控制

Bilal Akin and Nishant Garg

摘要

这份应用报告提出了一个用 TMS320F2803x 微控制器来控制交流 (AC) 感应电机的解决方案。TMS320F2803x 器件是 C2000™ 微控制器的系列部件，此微控制器能够通过减少系统组件实现用于 3 相电机的智能控制器的成本有效设计，并且提高了效率。 在这个系统中，使用并研究速度控制来试验电感电机的标量控制 (V/f)。 通过使用这个方法，用户可以快速地评估 V/Hz 系统的性能。

这份应用说明涵盖了以下内容：

- 与标量电机控制原则相关的理论背景。
- 基于模块软件块的递增构建级。
- 试验结果

内容

图片列表

图表列表

1 简介

电机控制行业是一个强大的、有进取性的行业。 为了保持竞争力，新的产品必须解决几个设计限制，其中包括成本减少、功耗降低、功率因子纠正和减少的电磁干扰 (EMI) 辐射。 为了应对这些挑战，先进的控制算法是必须的。 嵌入式控制技术可实现高水平性能和系统成本减少。 根据市场分析，大多数工业电机应用使用 AC 感应电机。 原因在于，与其它类型电机相比，AC 感应电机具有更高的稳健耐用性、更高的可靠性、更低的价格和更高的效率（高达 80%）。 然而，由于其复杂的数学模型，饱和器件的非线性运行方式，以及取决于温度物理影响的电气参数振荡，感应电机的使用对用户具有挑战性。 这些因素使得感应电机的控制变得复杂，并且要求使用诸如“矢量控制”的高性能控制算法，以及一个执行这个算法的强大的微控制器。

标量控制是一个用来描述一个更简答电机控制形式的术语，这个电机控制形式使用非矢量受控驱动机制。 一个 ACI 电机可由简单电压馈入、受控电流或速度受控机制来引导至稳定状态。 可在通过直接测量或计算获得标量变量的值之后对其进行操纵，并且标量变量可以以开环和闭环反馈格式使用。 虽然它的瞬态运行方式不是很理想，但是一个标量系统可导致一个令人满意的稳定状态响应。

2 感应电机

感应电机的名字得自转子磁场产生的方式。 旋转定子磁场在短路转子中感应产生电流。 这些电流产生转子磁场，此磁场与定子磁场相互作用，并产生转矩，这是机器的有用机械输出。

2.1 三相鼠笼式 AC 感应电机是最被广泛使用的电机。 沿着转子轴组成导体的导条底端由一个厚金属环连接，从而导致一个图 1中显示的短路。 馈入定子线圈的正弦定子相位电流产生了一个旋转速度为定子频率 (ω_s) 的磁场。 这个不断变化的磁场会在笼式导体中感应产生一个电流，这样可在转子导线的周围生成第二个磁场。 作为这两个磁场的相互作用产生的力结果，此转子受一个转矩的作用，并且以定子磁场的方向开始旋转。

由于转子开始加速并且接近定子磁场的同步速度，转子和定子磁通间的相对速度减少，从而减少了定子中的感应电压，并减少了被转换为转矩的电能。 这导致转矩产量下降，而电机将达到一个稳定状态，在这个点上，负载转矩与电机转矩相匹配。 这个点是由电机即时负载决定的的平衡点。 简单来说：

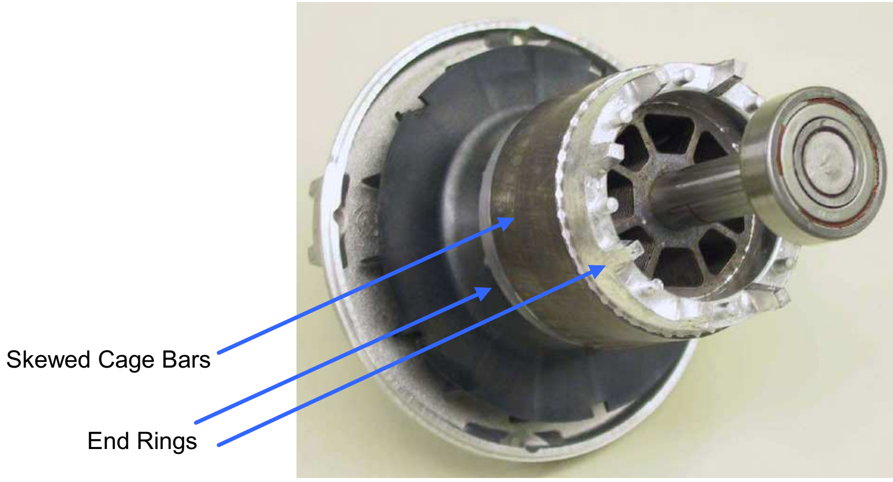

图 **1.** 感应电机转子

- 由于感应机制需要电机速度和转子磁通速度之间的相对的差异这样一个事实，电感电机以附近的频率旋转,但是低于同步速度频率。
- 这个转差率必须存在，即使当运行在一个磁场定向的控制方式也是如此。
- 感应电机内的转子并不由外部激发。 这意味着无需滑环和电刷。 这使得感应电机稳定耐用、廉价并需要更少的养护工作。
- 转矩产量由转子和定子磁通之间形成的角度管理。

在图 2中，转子速度由 Ω 表示。定子和转子频率由一个被称为转差率的参数连接在一起，每单位表示为 $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$。

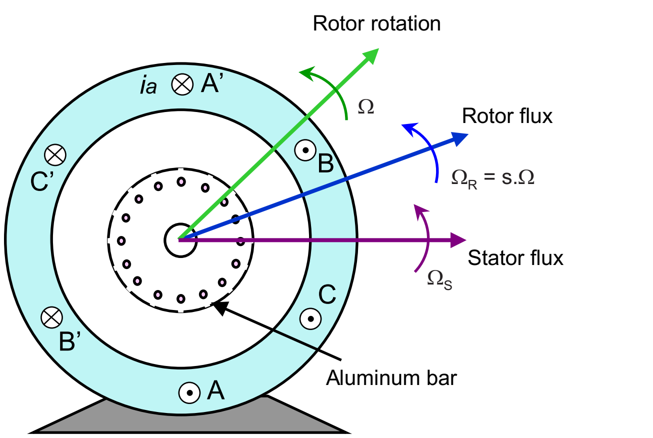

图 **2.** 鼠笼式转子 **AC** 感应电机剖视图

$$- \text{stator rotating field speed } (rad/s): \Omega_S = \frac{\omega_S}{p} \cdot \begin{cases} \omega_S : \text{AC supply freq } (rad/s) \\ p : \text{stator poles pairs numbers} \end{cases}$$

$$- \text{rotor rotating speed } (rad/s): \Omega = (1-s)\Omega_S = (1-s)\frac{\omega_S}{p}$$

在这里，s 被称为“转差率”：它代表同步频率和实际电机旋转速度间的差异。

3 标量控制

3.1 技术背景

在 V/Hz 控制中，通过可调电压和频率的振幅来控制感应电机的速度，使用这种方法，气隙磁通被始终保持在温度状态的所需值。 有时这个系统配置被称为标量控制，这是因为它只关注于稳定状态动态。 通过查看图 3中显示的稳定状态等效电路的简化版本，可以解释这个技术的工作方式。 根据这个图，定子电阻 (Rs) 被假定为 0，而定子泄露电感 (Lls) 被嵌入到（参考定子）转子泄露电感 (Llr) 和磁化电感，它代表气隙磁通的数量，并被移动至总泄露电感 (Ll = Lls + Llr) 的前部。 因此，生成气隙磁通的磁化电流可以大约为定子电压与频率的比率。 它的相量等式（针对稳定状态分析）可被视为：

$$\tilde{I}_m \cong \frac{\tilde{V}_s}{j\omega L_m} \tag{1}$$

如果感应电机运行在线性磁域内，Lm 是恒定的。 然后，公式 1可用振幅显示为：

$$I_m = \frac{\Lambda_m}{L_m} \cong \frac{V_s}{(2\pi f)L_m} \tag{2}$$

在这里，V和 Λ 是它们的定子电压和定子磁通的振幅，而$\tilde{V}$是相量表示法。

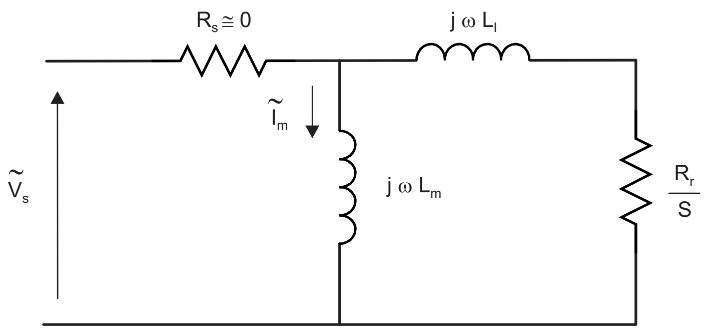

图 **3.** 感应电机的简化稳定状态等效电路

从最后一个等式中，它遵循的是，如果比率V/f针对f的任何变化保持恒定，然后磁通保持恒定，此转矩变为独立于电源频率。 为了保持 Λ_M恒定，V_s/f将在不同速度上恒定。 随着速度增加，因此为了保持 V/f 的恒定比率，定子电压必须成比例增加。 然而，此频率（或者同步速度）并不是真正的速度，这是因为转差率是电机负载的函数。 在无负载转矩上，转差率很小，而此速度接近于同步速度。 因此，简单开环 V/f（或 V/Hz）系统不能够在负载转矩出现时准确地控制此速度。 使用速度测量可将转差率补偿简单地添加到系统中： 图 4中显示了具有速度传感器的闭环 V/Hz 系统。

实际操作中，定子电压与频率的比率通常基于这些变量的额定值。 典型 V/Hz 系统配置可显示在图 5中。 基本上，下面显示了 V/Hz 系统配置中的 3 个速度范围：

- 在 0-fc Hz 时，需要一个电压，所以定子电阻上的压降不能被忽略，并且必须通过增加 Vs 来补偿。 所以，V/Hz 系统配置是非线性的。 截止频率 (fc) 和适合的定子电压在 Rs ≠ 0 时由稳定状态等效电路分析计算。
- 在额定 fc Hz 上，它遵循恒定 V/Hz 关系。 此斜面实际上代表公式 2中的气隙磁通数量。
- 在更高的 $f_{额定值}$Hz 时，无法满足恒定 Vs/f 比率，因为定子电压将被限制在额定值上，这是为了避免定子绕组上的绝缘击穿。 因此，产生的气隙磁通将被减少，并且这将无法避免地导致相应的转矩的减少。 通常，这个区域是所谓的“磁场减弱区域”。 为了避免这个情况，恒定 V/Hz 原则也在这样的频率上被违反。

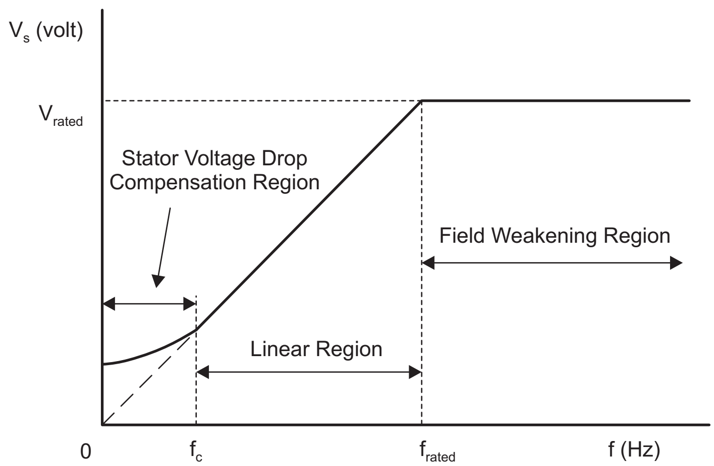

图 **4. V/Hz** 控制下，定子电压与频率系统配置间的关系

由于定子磁通保持恒定（无电源频率的变化无关），形成的转矩只取决于转差速度。 图 5中显示了这一过程。 通过调节转差速度，AC 感应电机的转矩和速度可由恒定 V/Hz 原则控制。

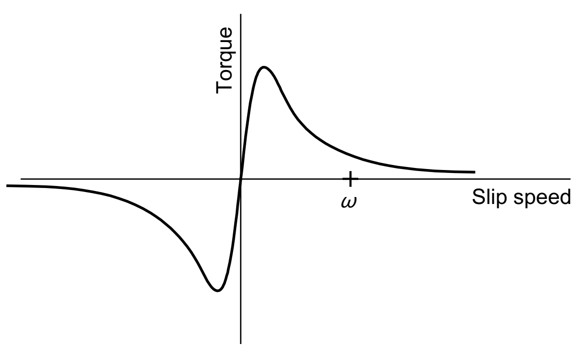

图 **5.** 一个具有恒定定子磁通的感应电机的转矩与转差速度间的关系

一个 AC 感应电机速度开环和闭环控制可根据恒定 V/Hz 原则执行。 当速度响应中的准确度无关紧要时，诸如在 HVAC（加热、通风和空调）、风扇或吹风机应用中，使用开环速度控制。 在这情况下，根据所需的速度来确定电源频率，并假定电机基本上遵循其同步速度。 转差所导致的速度误差被认为是可接受的。

在这个执行中，通过在频率上加上一个较低的限值，来修改图 4中的系统配置，图 6中显示了这一操作。 这个方法可被诸如风扇和吹风机驱动等低端上的速度响应不是十分关键的应用所接受。 由于额定电压，也是最大电压，以额定频率被施加到电机上，所以只需要额定最小和最大频率信息来执行此系统配置。

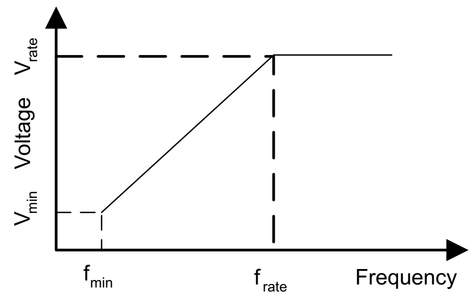

图 **6.** 经修改的 **V/Hz** 系统配置

4 32 位 C2000 控制器针对数字电机控制 (DMC) 的优势

C2000 系列器件具有执行复杂控制算法所需的计算能力，以及与 DMC 硬件的不同组件对接的正确混合外设，DMC 硬件包括模数转换器 (ADC)，增强型脉宽调制器 (ePWM)，正交编码器脉冲 (QEP)，增强型捕捉 (eCAP) 等器件。 这些外设具有符合安全标准的用于执行系统所必须的全部钩子程序，像针对 PWM 和比较器的触发区。 与这些外设一起，C2000 软件（库和应用软件）和硬件（应用套件）系统有助于减少开发数字电机控制解决方案所需的时间和精力。 DMC 库提供可被重新使用来执行全新的控制策略的可配置块。 IQMath 库可实现浮点算法到定点的轻松迁移，因此，从而加速了开发周期。

借助于 C2000 系列器件，可以轻松且快速的执行针对电机控制的复杂控制算法（被传感和无传感器）。 C2000 器件和高级控制系统配置的使用提供了以下系统改进：

- 通过全部速度范围内的有效控制支持系统成本减少，前提是电源器件电路的尺寸正确
- 通过使用先进的控制算法，有可能减少转矩纹波，从而导致更低的振动和电机更长的使用寿命。
- 先进的控制算法减少由反相器生成的谐波，因此减少了滤波器成本。
- 无传感器算法的使用免除了对于速度或位置传感器的需要。
- 减少查询表的数量，这减少了所需存储器的数量。
- 平滑接近最优基准系统配置和移动轨迹的实时生成导致更佳的性能
- 使用 ePWM 外设来控制电源开关反相器有可能生成高分辨率 PWM
- 提供单芯片控制系统

对于高级控制，C2000 控制器也可执行：

- 使用诸如神经网络和模糊逻辑的现代智能方法来实现多变量和复杂系统的控制
- 执行自适应控制。 C2000 控制器具有速度功能来同时监视系统并对其进行控制。 一个动态控制算法在实时中自适应至系统运行方式的变化。
- 针对无传感器控制算法、自我启动、在线参数估算更新执行参数识别
- 执行高级转矩纹波和可闻噪声减少
- 提供具有频谱分析的诊断监控。 通过观察机械抖动的频率频谱，可在早期阶段预测故障模式。
- 产生锐截止陷波滤波来消除窄带机械谐振。 陷波滤波移除了电能，否则，这些电能将激发谐振模式并有可能使得系统不稳定。

5 TI 文献和数字电机控制 (DMC) 库

数字电机控制 (DMC) 库由表示为块的函数组成。 这些块被分类为变换和估算器（滑动模式观察器，相位电压计算和解算器，磁通和速度计算器以及估算器），控制（信号生成，PID，BEMF 换向，空间矢量生成）和外设驱动程序（针对多个拓扑结构和技术的 PWM 提取，ADC 驱动程序和电机传感器接口）。 每个块具有模块化软件宏，具有源代码、使用和技术原理的单个文档。 检查下面的文件夹中的源代码和宏区块的解释说明。

此项目保存在www.ti.com/controlsuite：中。

- \libs\app_libs\motor_control\math_blocks\v4.0
- \libs\app_libs\motor_control\drivers\f2803x_v2.0

这些模块使用户能够快速构建，或者定制他们自己的系统。 此库支持三个电机类型：ACL，BLDC，PMSM。 它还包括外设相关（软件驱动程序）和目标相关模块。

DMC 库组件已经由 TI 用来提供系统示例。 初始化时，所有 DMC 库变量被定义和互连。 运行时，宏函数被按顺序调用。 每个系统使用一个递增构建方法建立，这个方法可一次建立编码的某些部分，这样开发人员可以一次一步验证他们应用的每个部分。 这在实时控制应用中十分重要，在这里，很多不同的变量可影响到系统，而且需要微调很多不同的电机参数。

注： 为了实现优化用途，TI DMC 模块被以宏的形式写入（例如，*《优化数字电机控制 (DMC) 库》*(SPRAAK2)。 宏在头文件内定义。 用户可以打开各自的头文件，并在需要时改变宏定义。 在宏定义中，如下所示，在每一行的末尾应该有一个反斜杠“\”，这意味着编码在下一行继续。 反斜杠后包括诸如“space”或“tab”等不可见字符在内的任一字符将导致编译错误。 因此，请确保反斜杠是行的最后一个字符。 在代码开发方面，宏几乎与 C 函数完全一样，而用户应该可以很轻松地将宏定义转换为一个 C 函数。

Example 1. *一个典型的 DMC 宏定义*

```
#define PARK_MACRO(v)                                              \
                                                                   \
   v.Ds = _IQmpy(v.Alpha,v.Cosine) + _IQmpy(v.Beta,v.Sine);        \
   v.Qs = _IQmpy(v.Beta,v.Cosine) - _IQmpy(v.Alpha,v.Sine);
```

6 系统概览

这个部分描述了“C”实时控制框架，此框架用来演示感应电机的标量控制。 “C”框架被设计用来在基于 TMS320F2803x 的控制器上用 Code Composer Studio™运行。 此框架使用以下模块（请参考电机控制文件夹内的 pdf 文档，此文档解释了每个宏的细节和理论背景）。

表 1. C”实时控制框架模块

宏名称	说明
PI	PI 稳压器
RC	斜坡控制器（转换率限制器）
VHZ_PROFILE	电压和频率文件
QEP / CAP	QEP 和 CAP 驱动
SPEED_PR	速度测量（基于传感器信号周期）
SPEED_FR	速度测量（基于传感器信号频率）
SVGEN_MF	空间矢量 PWM（基于振幅和频率）
PWM / PWMDAC	PWM 和 PWMDAC 驱动

在这个系统中，感应电机的标量控制 (V/Hz) 探究了速度控制的性能。 用户可以快速地开始评估 V/Hz 系统的性能。

HVACI_Scalar 项目具有以下属性：

C 语言框架		
系统名称	程序存储器用量 **2803x**	数据存储器用量 **2803x**[(1)(2)]
HVACI_Scalar	3602	1192

(1) 不包括堆栈尺寸
(2) 不包括“IQmath”查询表

CPU 利用率	
总的周期数量	**459** [1]
CPU 初始化 @ 60Mhz	7.7%
CPU 初始化 @ 40Mhz	11.4%

[1] 在 10kHz ISR 频率下。 不包括可选宏（PWMDAC，目录）

表 2. 系统特性

系统特性	
开发/仿真	具有实时调试的 Code Composer Studio V4.0（或更高版本）
目标控制器	TMS320F2803x
PWM 频率	10kHz PWM（缺省值），60kHz PWMDAC
PWM 模式	与一个可编程死区对称
中断	EPWM1 时基 CNT_Zero - 执行 10kHz ISR 执行速率
使用的外设	PWM 1 / 2 / 3 用于电机控制 PWM 6A，6B，7A 和 7B 用于 DAC 输出 QEP1 A，B，I 或 CAP1

整个系统执行一个 3ph 感应电机 V/Hz 器件实施，图示于图 7中。 感应电机由传统的电压源反相器驱动。通过使用空间矢量 PWM 技术，TMS320F2803x 被用来为反相器内的 6 个电源开关器件生成 6 个脉宽调制 (PWM) 信号。

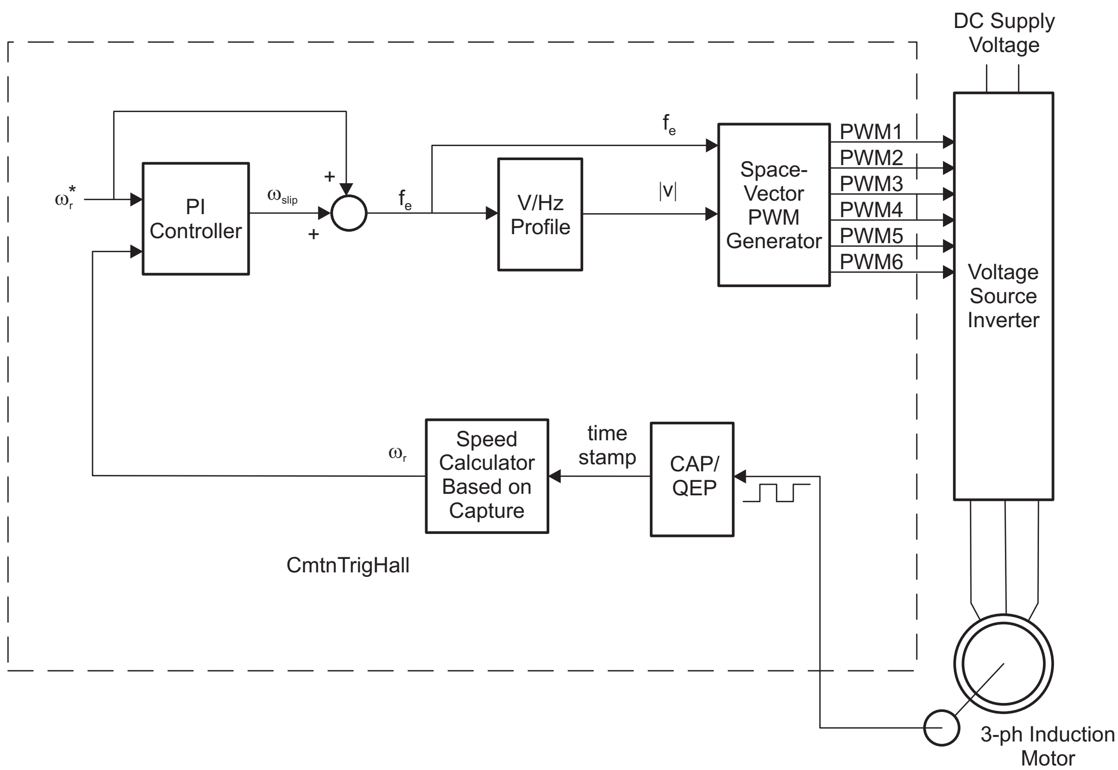

图 7. 一个 3 相感应电机 V/Hz 驱动执行

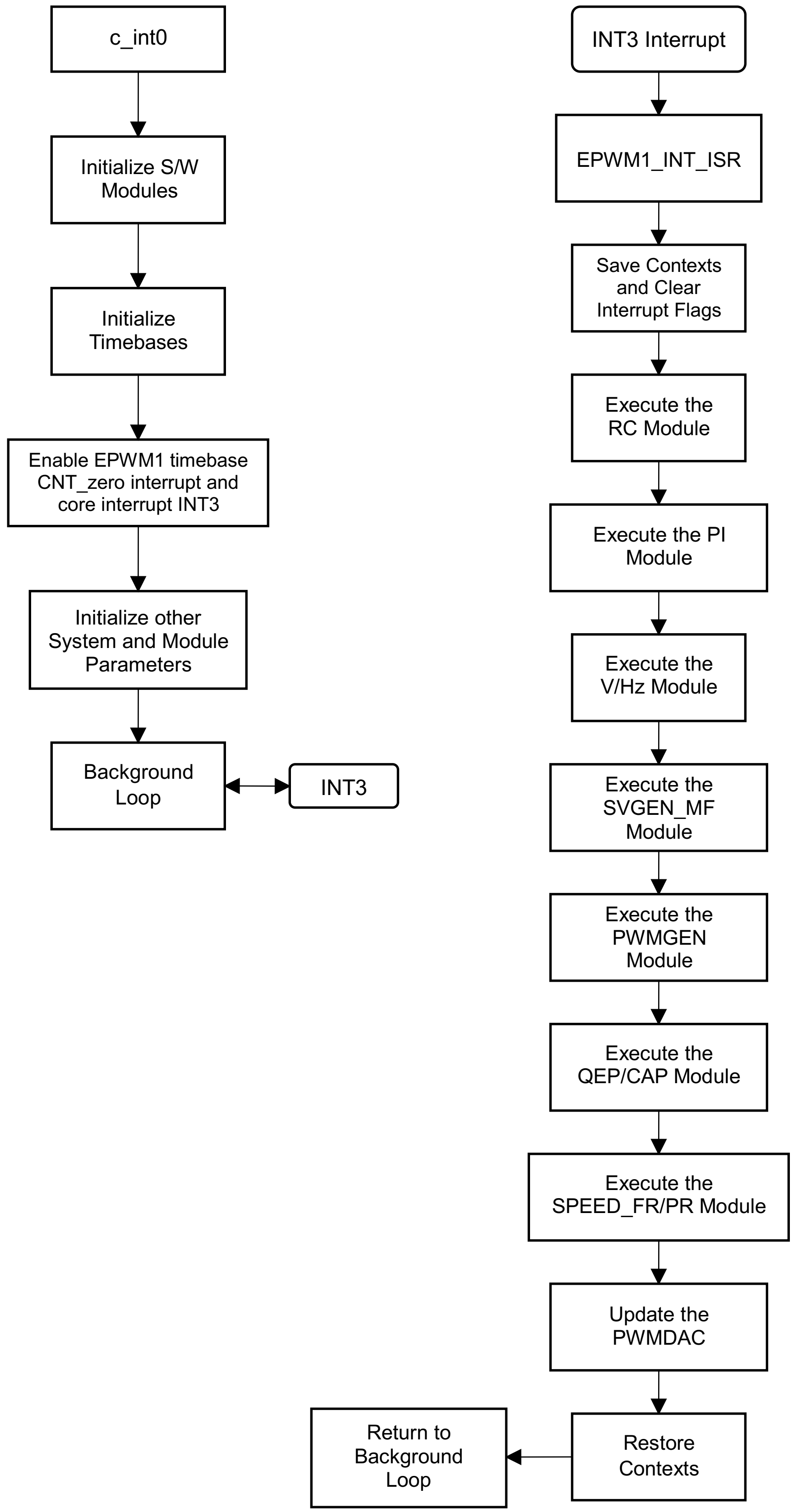
c_int0
Initialize S/W Modules
Initialize Timebases
Enable EPWM1 timebase CNT_zero interrupt and core interrupt INT3
Initialize other System and Module Parameters
Background Loop
INT3
INT3 Interrupt
EPWM1_INT_ISR
Save Contexts and Clear Interrupt Flags
Execute the RC Module
Execute the PI Module
Execute the V/Hz Module
Execute the SVGEN_MF Module
Execute the PWMGEN Module
Execute the QEP/CAP Module
Execute the SPEED_FR/PR Module
Update the PWMDAC
Restore Contexts
Return to Background Loop

图 **8.** 系统软件流程图

7 硬件配置（**HVDCMC R1.1** 套件）

要获得套件硬件的概述和设置这个套件的步骤，请参见《*HVMotorCtrl+PFC 如何运行指南*》位于：www.ti.com/controlsuite并选择 HVMMotorKit 安装。

7.1 硬件设置操作指南

下面列出了某些硬件设置操作指南以便快速参考。

1. 打开 HV 套件的盖子。
2. 安装跳线 [Main]-J3，J4 和 J5，J9 至 3.3V，5V 和 15V 电源轨以及 JTAG 复位线路。
3. 打开包装取出 DIMM 类型 controlCARD，并将其放置在 [Main]-J1 的连机器插槽内。 使用均匀的压力将卡的两端垂直向下按压，直到卡子发生吧嗒一声并锁住。 要移除卡，用拇指打开周围的固定卡子即可。
4. 将一条 USB 线缆连接至接头 [M3]-JP1。 这禁用了到 C2000 器件的隔离式 JTAG 仿真。 [M3]-LD1 应该打开。 请确保 [M3]-J5 未被组装。 如果所包含的 Code Composer Studio 被安装，针对板载 JTAG 仿真的驱动程序将被自动安装。 如果出现了一个 windows 安装窗口，请试着从那些已经安装在您的计算机内的驱动程序中来安装驱动程序。 仿真驱动程序可在以下链接内找到http://www.ftdichip.com/Drivers/D2XX.htm。 列出的驱动程序是支持 FT2232 的正确驱动程序。
5. 如果使用了一个第三方 JTAG 仿真器，将 JTAG 插头连接至 [M3]-J2，并且需要额外组装的 [M3]-J5 以将板载 JTAG 置于复位状态。
6. 请确保 [M6]-SW1 处于“Off”位置。 将 15V DC 电源连接到 [M6]-JP1。
7. 打开 [M6]-SW1。 现在，[M6]-LD1 应该接通。 请注意，控制卡 LED 也点亮，这表示控制卡正在由电路板供电。
8. 请注意，在您完成首个递增构建步骤后，电机应该被接至 [M5]-TB3 端子。
9. 请注意，递增构建级期间，应该只施加 DC 总线电源 下面讨论了获得 DC 总线电源的两个选项：
   - 要使用 DC 电源，将电源输出设定为零，并将 [Main]-BS5 和 BS6 分别连接至 DC 电源和接地。
   - 要使用 AC Mains 电源，使用香蕉插头连接线将 [Main]-BS1 和 BS5 互连。 现在，将 AC 电源线的一端接至 [Main]-P1。 需要将另外一端接至一个自耦变压器的输出。 请确保自耦变压器的输出被设定为零，并通过一个绝缘体接至墙上的电源。

图 9和图 10显示了这个实验中需要被连接的跳线和接头供您参考。

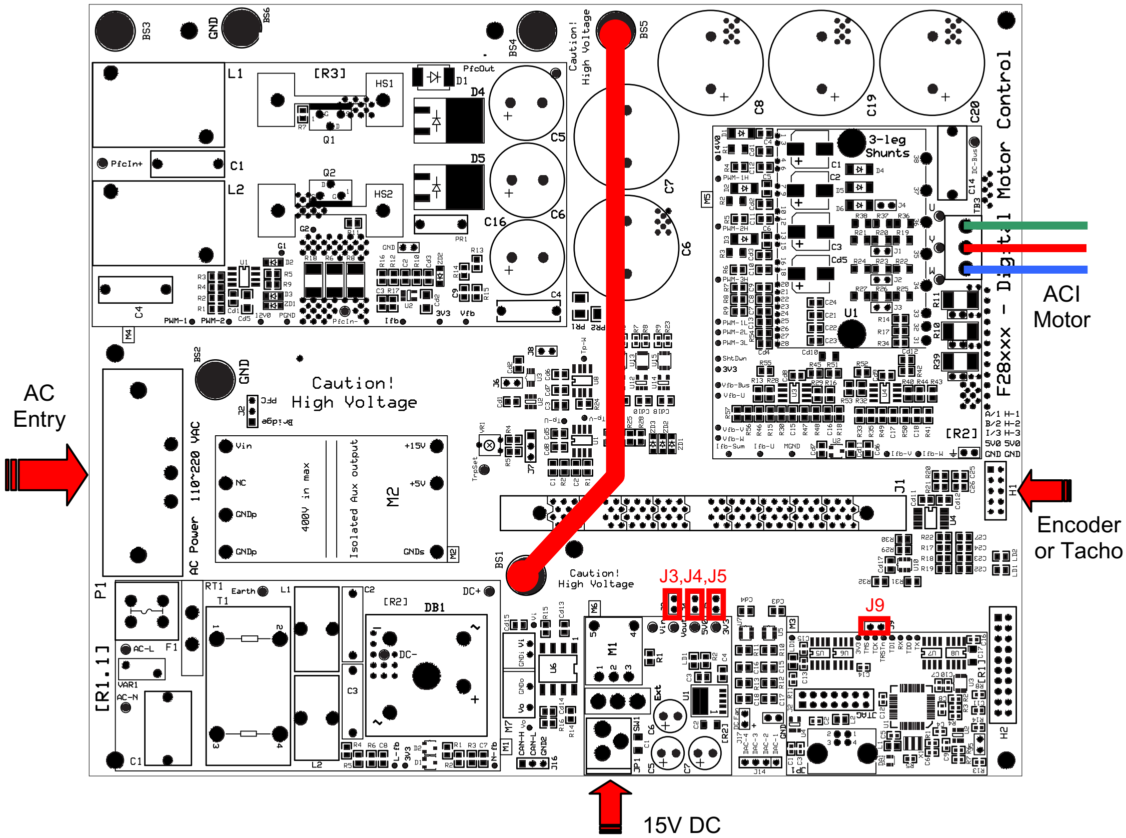

图 9. 使用 **AC** 电源生成 **DC** 总线电源

CAUTION

在高功率线路电源被关闭或断开后，反相器总线电容器仍长时间的保持充电状态。 请小心进行下一步操作！

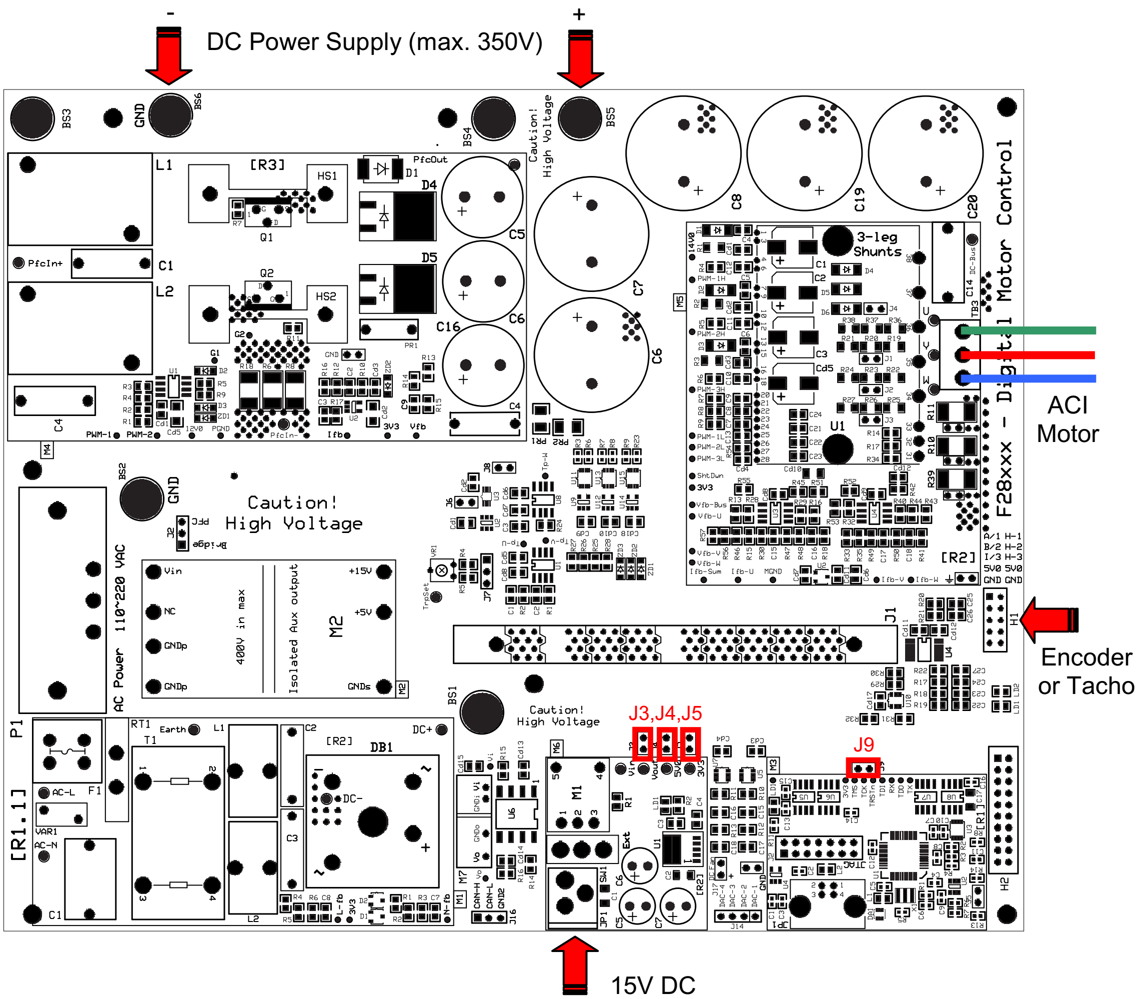

图 **10.** 使用外部 **DC** 电源为反相器生成 **DC** 总线

> **CAUTION**
>
> 在高功率线路电源被关闭或断开后，反相器总线电容器仍长时间的保持充电状态。 请小心进行下一步操作！

7.2 运行 HVACI_Scalar 项目的软件设置指令

更多信息，请参见《*HVMotorCtrl+PFC* 套件运行方法指南》中的《针对 *HVMotorCtrl+PFC* 套件项目的软件设置》部分，此部分可在www.ti.com/controlsuite网页上的 HVMotorKit 安装内找到。

1. 将 HVACI_Scalar 选中为激活项目。
2. 选择被设定为 F2803x_RAM 的激活构建配置。
3. 验证此构建级被设定为 1，然后右键单击项目名称并选择“Rebuild Project”（重建项目）。 一旦构建完成，启动一个调试会话来将编码载入到控制器中。
4. 打开一个观察窗口，按照图 11中显示的那样添加关键变量，并为他们选择合适的 Q 格式。

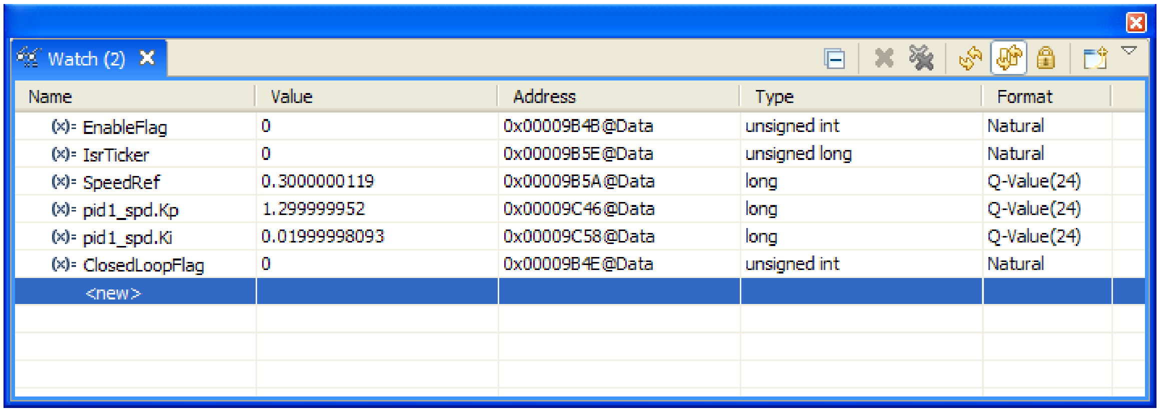

图 **11.** 观察窗口变量

5. 通过从以下位置导入 Graph1.graphProp 和 Graph2.graphProp 来建立时间曲线图窗口：www.ti.com/controlsuite - (developement_kits\HVMotorCtrl+PfcKit_v2.0\HVACI_sensored\).
6. 前往 Tools → Graph → Dual Time（工具 → 曲线图 → 双重时间），并单击窗口底部的 Import（导入）按钮。
7. 单击graph tab（曲线图标签页）左上角上的 Continuous Refresh（持续刷新）按钮来启用微控制器数据的定期捕捉。

8 递增系统构建

此系统被逐步构建，所以最终系统可以安心运转。 递增系统构建的 5 个阶段被设计成验证系统中使用的主要软件模块。表 3总结了每个递增系统构建中的模块测试和使用。

表 **3.** 每个递增系统构建中的测试模块[(1)]

软件模块	阶段 1	阶段 2	阶段 3
VHZ_PROF_MACRO	√√ (1a)	√	√
SVGEN_MF_MACRO	√√ (1a)	√	√
PWMDAC_MACRO	√√ (1a)	√	√
PWM_MACRO	√√ (1a)	√	√
RC_MACRO		√	√
QEP_MACRO		√√ (2a)	√
SPEED_FR_MACRO		√√ (2a)	√
CAP_MACRO		√√ (2a)	√
SPEED_PR_MACRO		√√ (2a)	v
PI_MACRO (SPD)			√√

(1) 符号√表示这个模块正在被使用，而符号√√表示这个模块正在这个阶段中进行测试。

8.1 1 级递增构建

在这个步骤中，将电机断开。 假定《*如何运行 HVMotorCtrl+PFC 套件指南*》中描述的负载和构建步骤已经成功完成，这个部分描述了针对“最小”系统检查退出步骤，在这些步骤中，要确认系统中断、外设和目标独立 VHZ_PROF_MACRO（V/Hz 线性）和 SVGENMF_MACRO（空间矢量发生器）模块的运行。

1. 打开 HVACI_Scalar-Settings.h 并通过将 BUILDLEVEL 设定为 LEVEL 1（# define BUILDLEVEL LEVEL 1（定义构建级 1 级））来选择 1 级递增构建选项。
2. 右键单击项目名称并单击 Rebuild Project。

3. 一旦构建完成，单击 debug（调试）按钮，复位 CPU，重新启动，启用实时模式并运行。
4. 在观察窗口中将“EnableFlag”设定为 1。 名为“IsrTicker”的变量将持续增加。 通过观察观察窗口中的变量来确认这一点。 这确认系统中断运转正常。

在软件中，被调整的关键变量为：

SpeedRef (Q24)：用于改变每个部件中的转子速度。

8.2 1A 级（V/Hz 和 SVGEN_MF 宏测试）

在这个阶段的测试前，必须牢记 V/Hz 系统配置的内容。 为了使电机的运行速度高于额定速度（在磁场减弱时），基频可被指定为额定频率 (60Hz) 的两倍。图 12显示了一个系统中使用的 V/Hz 系统配置示例。

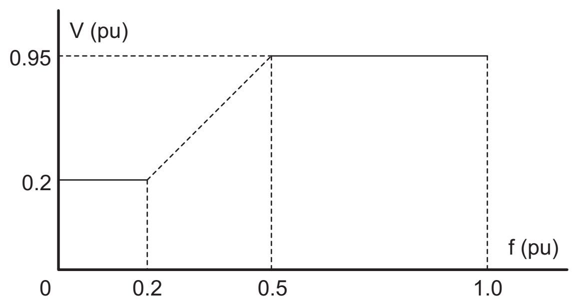

图 12. 系统中使用的 V/Hz 系统配置

这个 SpeedRef 值被指定给 VHZ_PROF_MACRO 模块。 VHZ_PROF_MACRO 模块生成至 SVGENMF_MACRO 模块的输出。 SVGENMF_MACRO 模块的 3 个输出由图 13中显示的曲线图窗口进行监控，在这里，Ta，Tb 和 Tc 波形之间的相位差 120°。 具体来讲，Tb 落后 Ta 120°，而 Tc 在 Ta 前方 120°。 这个构建的运行期间，Code Composer Studio 曲线图内的波形应该如图 13中显示的那样。

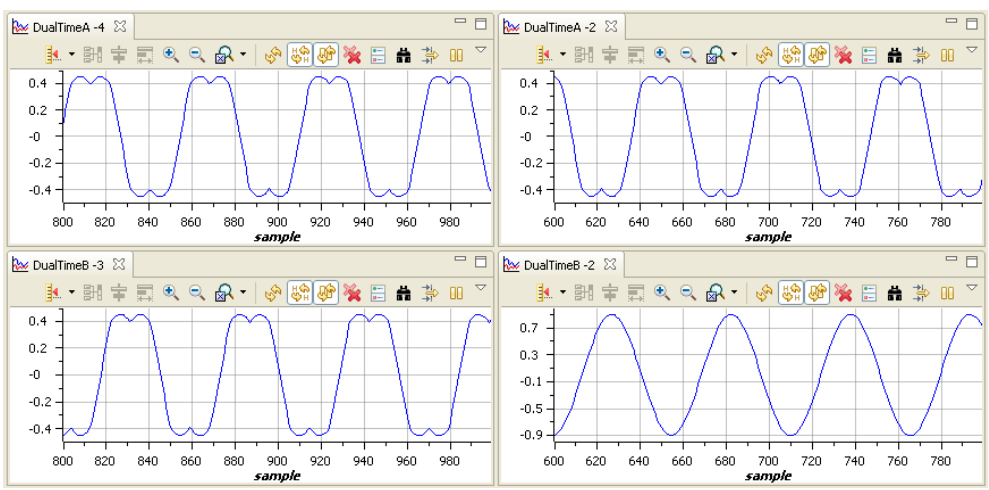

图 13. SVGEN 占空比输出 Ta，Tb，Tc 和 Ta-Tb

8.3 1B 级（PWMDAC 宏测试）

对于监控实时 PWM 中的内部信号值，DAC 是非常有用的工具。 出现在 HV DMC 电路板上的是 PWM DAC，它使用一个外部低通滤波器来生成波形（[Main]-J14，DAC-1 至 4）。 一个简单一阶低通滤波器电阻电容 (RC) 电路被用来过滤高频分量。 根据截止频率 (f_c) 来选择 R 和 C 值的选择（时间常数，τ 的选择），对于这种类型的滤波器，关系如下：

$$\tau = RC \frac{1}{2\pi f_c}$$

例如，R = 1.8kΩ 并且 C = 100 nF，此时 f_c= 884.2Hz。 这个截止频率必须低于 PWM 频率。 通过使用上面的公式，用户可以针对被监控的信号来定制低通滤波器。

DAC 电路低通滤波器（[Main]-R10 至 13 和 [Main]-C15 至 C18）与电路板上的 2.2kΩ 电阻和 220nF 电容一同提供。 更多细节，请参见*《在 TMS320F280x 数字信号控制器上将 PWM 输出用作一个数模转换器》*(SPAA88)。

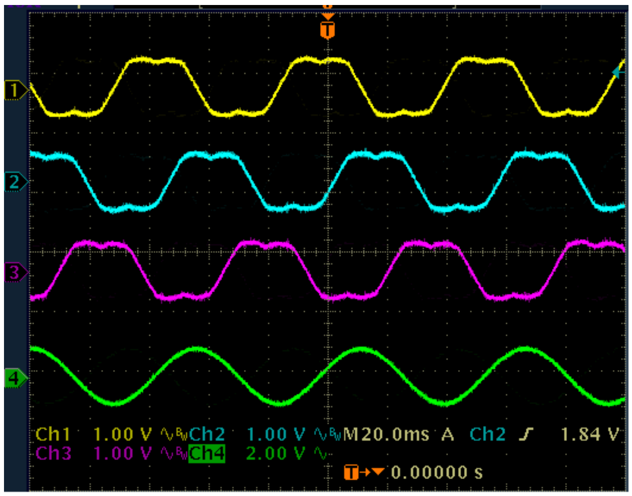

图 **14. DAC-14** 输出显示 **Ta**，**Tb**，**Tc** 和 **Ta-Tb** 波形

*8.4 1C 级（**PWM_MACRO** 和反相器测试）*

在验证了 1A 级内的 SVGENMF_MACRO 模块后，PWM_MACRO 软件模块和 3 相反相器硬件通过查看低通滤波器的输出进行测试。 针对这一用途，如果使用外部 DC 电源的话，逐步增加 DC 总线电压并使用一个示波器来检查 Vfb-U，V 和 W 测试点，或者如果使用 AC 电源供电的话，缓慢改变自耦变压器来生成 DC 总线电压。 一旦 DC 总线电压大于 15V 至 20V，您将开始观察反相器相位电压分压器，而波形监控滤波器 (Vfb-U，Vfb-V，Vfb-W) 启用波形生成，这样就确保了反相器正常运转。 请注意，缺省 RC 值针对 AC 电机状态观察人员采用的相位电压进行了优化。

一旦成功完成了 1A 至 1C 级中给出的指令，并且系统如下面建议的那样被关断，即可连接电机。 现在系统已经为运行开环路做好准备。

CAUTION

验证了所有这些后，减少 DC 总线电压，使控制器脱离实时模式（禁用），并且将处理器复位（详细情况，请参见*《HVMotorCtrl+PFC 运行指南》*）。 请注意，每次测试后，出于安全考虑，需要重复此步骤。 还请注意的是，不适当的关断有可能将 PWM 暂停在某些特定状态，在这些状态下，可汲取高电流，因此，在进行这些试验时要小心。

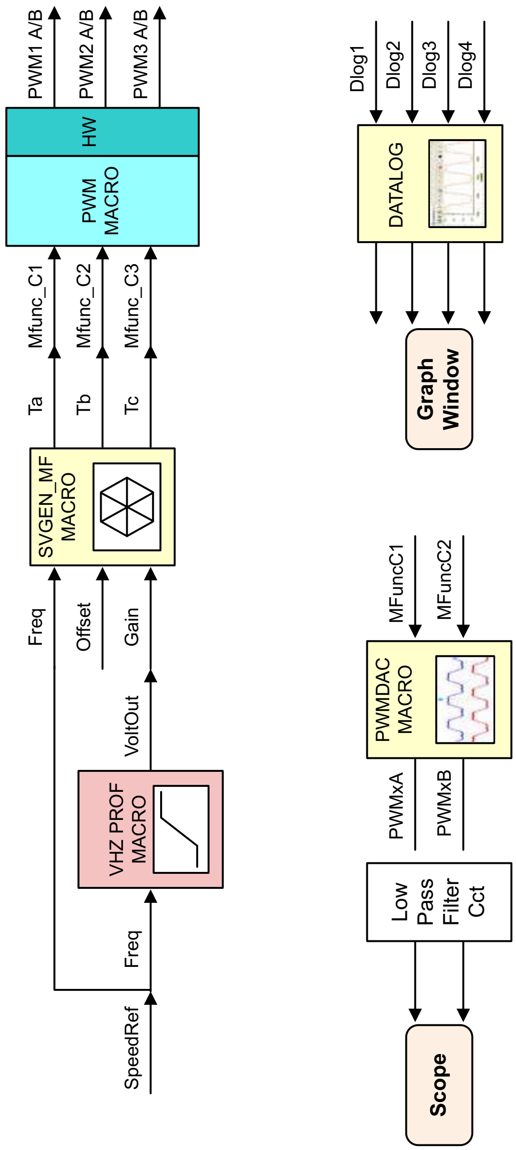

图 **15. 1** 级 **-** 递增系统构建方框图

1 级验证目标独立模块 V/Hz 和 SVGENMF。

8.5 2 级 - 递增构建

假定构建 1 部分已经成功完成，这个部分验证模数转换器，Clarke 和 Park 变换以及相位电压计算。 现在，此电机可被连接至 HVDMC 电路板，这是因为 PWM 信号已成功通过 1 级递增构建验证。

1. 打开 HVACI_Scalar-Setting.h 并通过将 BUILDLEVEL 设定为 LEVEL2（#define BUILDLEVEL LEVEL2（定义构建级 2 级））来选择 2 级递增构建选项，并保存此文件。
2. 右键单击项目名称，单击 Rebuild Project。
3. 一旦此构建完成，单击 debug 按钮，复位 CPU，重新启动，启用实时模式并运行。
4. 在观察窗口中将“EnableFlag”设定为 1。 名为“IsrTicker”的变量在观察窗口中增加，以确认中断正常运转。

在软件中，将被调整的关键变量为：

SpeedRef(Q24)：用来改变每个部件中的转子速度。

8.6 2A 级 - 测试 QEP 和 SPEED_FR（用于递增编码器）

这个部分验证 QEP1 驱动程序和它的速度计算。 QEP 驱动宏确定转子的位置并从电机轴位置编码器脉冲中生成一个方向（转动的方向）信号。 确保递增编码器的输出被接至 [Main]-H1，而且 QEP 和 SPEED_FR 宏在 HVACI_Scalar.c 文件中根据速度传感器的特性被适当地初始化。 与电机控制文件夹中相关宏有关的 pdf 文件位于：www.ti.com/controlsuite - (\libs\app_libs\motor_control)。 这些验证与速度测量相关的两个软件模块的步骤可描述如下：

- 将 SpeedRef 设定为 0.4 pu（如果基速不同的话，设定为其他合适的值）。
- 实时编译/加载/运行程序，然后增加自耦变压器和 dc 电源上的电压以获得适当的 DC 总线电压。 现在，电机的运行速度接近于基准速度。
- 使用持续刷新特性来检查观察窗口中的“speed1.Speed”以确定测得的速度是否由于电机的转差略低于 SpeedRef。
- 要确认这些模块，尝试不同的 SpeedRef 值来测试此速度：
- 使用示波器来观察具有外部低通滤波器的 PWMDAC 输出上的电度角输出，QEP_MACRO 模块的 ElecTheta，仿真转子角，RG_MACRO 的输出。
- 检查 ElecTheta 和输出是锯齿波形并具有同样的周期。 如果测得的角度在相反的方向，那么改变连接至反相器输出（TB3 用于 HVDMC 套件）的电机电缆顺序。
- 检查观察窗口，qep1.IndexSyncFlag 在每次手工复位为 0 时被设定回 0xF0。 将不在观察窗口中的变量添加至观察窗口。

8.7 2B 级 - 测试 CAP 和 SPEED_PR（用于转速计或链轮）

在这种情况下，CAP1 被选择用来检测边缘。 如果可用的话，请确保传感器输出被连接至 [Main]-H1，而 CAP 和 SPEED_PR 宏在 HVACI_Scalar.c 文件中根据速度传感器的特性被适当初始化。 通常情况下，此捕捉被用来测量简单低成本速度感测系统可用时的速度。 此传感器在检测到一个链轮或齿轮的轮齿时生成脉冲，而捕捉驱动提供所选时基（GP 定时器）（在一个事件发生时被捕捉）的即时值。 相关宏的详细信息，请见位于以下位置内的电机控制文件夹中的 PDF 文件：www.ti.com/controlsuite - `(libs\app_libs\motor_control)`。

这些验证与速度测量相关的两个软件模块的步骤可描述如下：

- 将 SpeedRef 设定为 0.3 pu（如果基速不同的话，设定为其他合适的值）。
- 实时编译，加载，运行程序，然后增加自耦变压器和 dc 电源上的电压以获得适当的 DC 总线电压。 现在，电机的运行速度接近于基准速度。
- 使用持续刷新特性来检查观察窗口中的“speed2.Speed”以确定它们是否应该由于电机的转差而略低于 SpeedRef。
- 尝试不同的 SpeedRef 值来测试速度来确认这些模块。
- 将自耦变压器和 dc 电源上的电压减少至零，暂停程序并停止实时模式。 现在电机停止。

可通过使用一个函数发生器来用一个替代的方法在不运行电机的情况下完成这两个软件模块的验证。 关键步骤可解释如下：

- 使用一个函数发生器来生成 3.3V(DC) 方波，此方波的频率与链轮的轮齿和以 RPM 为单位的所需转速相对应。 然后，只将函数发生器的脉冲信号和接地导线接至 HVDMC 电路板。 由函数发生器产生的方波所需频率可用公式表达如下：

$$f_{square\_wave} = \frac{RPM \times TEETH}{60} Hz$$

  在这里，RPM 是以 rpm 为单位的所需转速，而 TEETH 是链轮中的轮齿数量。
- 实时编译，加载，运行程序，然后增加自耦变压器上的电压以获得适当的 DC 总线电压。 现在，电机在运转。 请注意，SpeedRef 可被设定为任一数字。
- 用持续刷新特性来检查观察窗口中的 speed2.Speed 和 speed2.SpeedRpm，以确定它们是否应该与之前选中的所需速度相对应。
- 要确认这些模块，请用相应的所需（已知）速度来更改不同的函数发生器所产生的方波频率以检查 Speed 和 SpeedRpm。

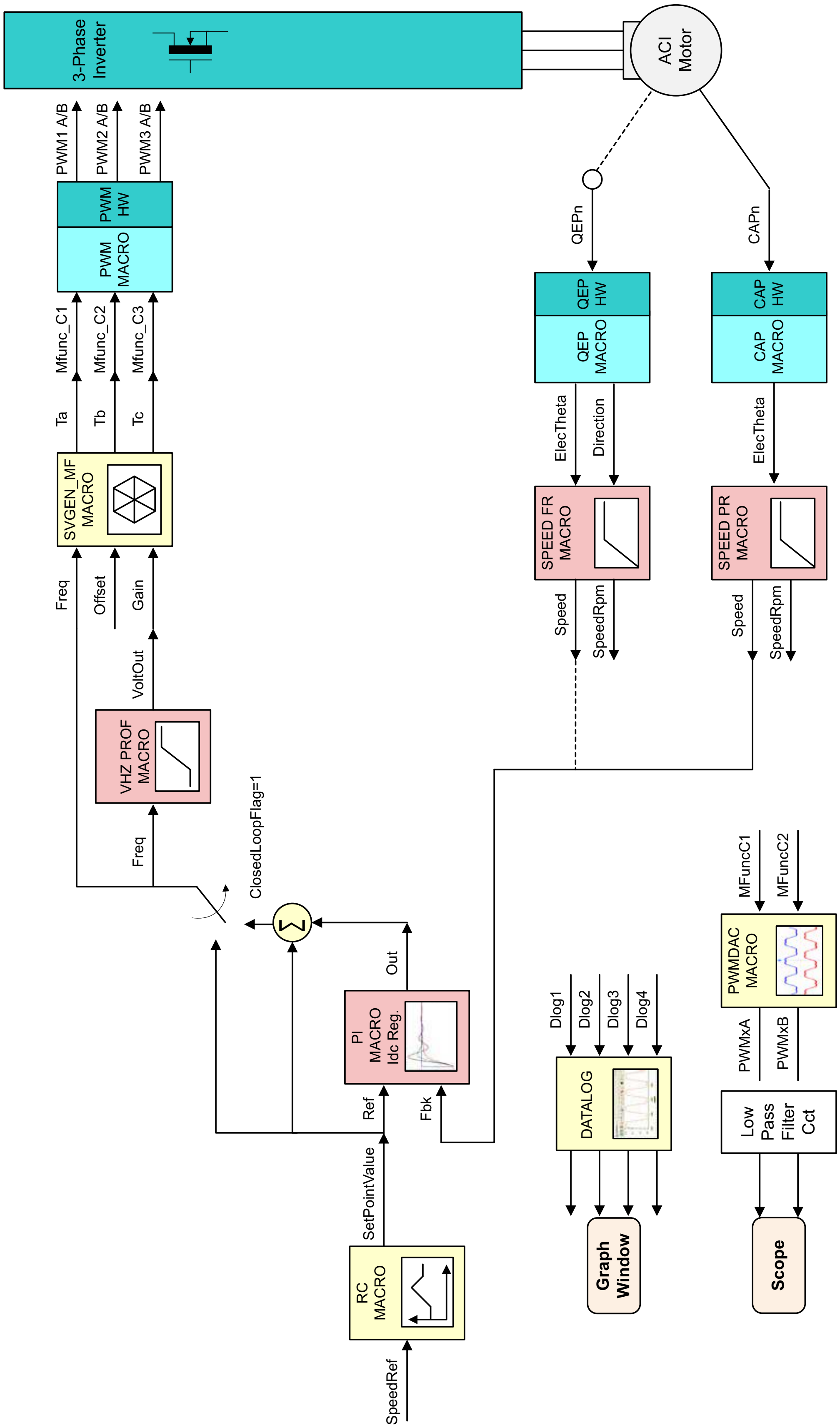

图 **16. 2** 级 **-** 递增系统构建方框图

2 级验证 PWM 生成、模式转换和捕捉部件。

8.8 3 级递增构建

假定之前的部分已成功完成，这个部分验证了 PI 模块和速度测量模块执行的 dq 轴电流调节。 要确认电流调节的运行，有必要调节两个 PI 控制器的增益以实现正确运行。

1. 打开 HVACI_Scalar-Settings.h 并通过将 BUILDLEVEL 设定为 LEVEL3（# define BUILDLEVEL LEVEL 3（定义构建级 3 级））来选择 3 级递增构建选项。
2. 右键单击项目名称并单击 Rebuild Project。
3. 一旦构建完成，单击 debug（调试）按钮，复位 CPU，重新启动，启用实时模式并运行。
4. 在观察窗口中将“EnableFlag”设定为 1。 名为“IsrTicker”的变量在观察窗口中增加，以确认中断正常运转。

在软件中，将被调整的关键变量汇总如下：

- SpeedRef(Q24)：用来改变每个部件中的转子速度。
- 设定 ClosedLoopFlag：用于开关和闭环控制间的切换

在这个构建中，电机由 AC 输入电压供电，而 (AC) 电机电流由 PI 模块通过对电机电流的 park 变换来动态地调节。

关键步骤解释如下：

- 将 SpeedRef 设定为 0.3 pu（如果基速不同的话，设定为其他合适的值）。
- 将 ClosedLoop 标志设定为 0。
- 实时编译、载入和运行此程序并将 EnableFlag 设定为 0。
- 逐渐增加自耦变压器和 dc 电源上的电压来获得适当的 dc 总线电压。 现在电机以这个设定的速度 (0.4 pu) 运行。
- 调节增益 Kp，Ki，这样 PI 输出正确的表示转差。
- 然后，将 ClosedFlag 设定为 1。
- 尝试不同的 SpeedRef 值并检查速度以确认这两个 PI 模块。 如果闭环系统未成功运转，那么立即将 ClosedFlag 置为 0。
- 对于两个 PI 控制器，必须重新调整比例、积分、微分和积分纠正增益以具有满意的相应。
- 将自耦变压器的电压减少至零、暂停程序并停止实时模式。 现在电机正在运行。

当运行这个构建时，Code Composer Studio 曲线图内的电流波形应该如图 17中显示的那样。

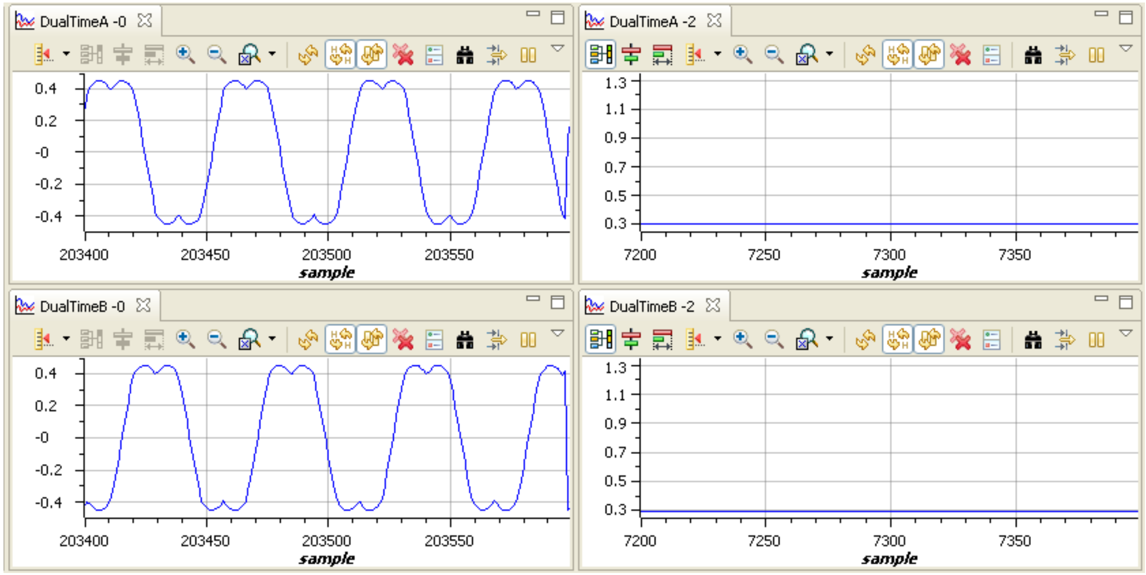

图 **17. Ta**（顶部**-**左侧），**Tb**（底部**-**左侧），速度基准（顶部**-**右侧），速度反馈（底部**-**右侧）

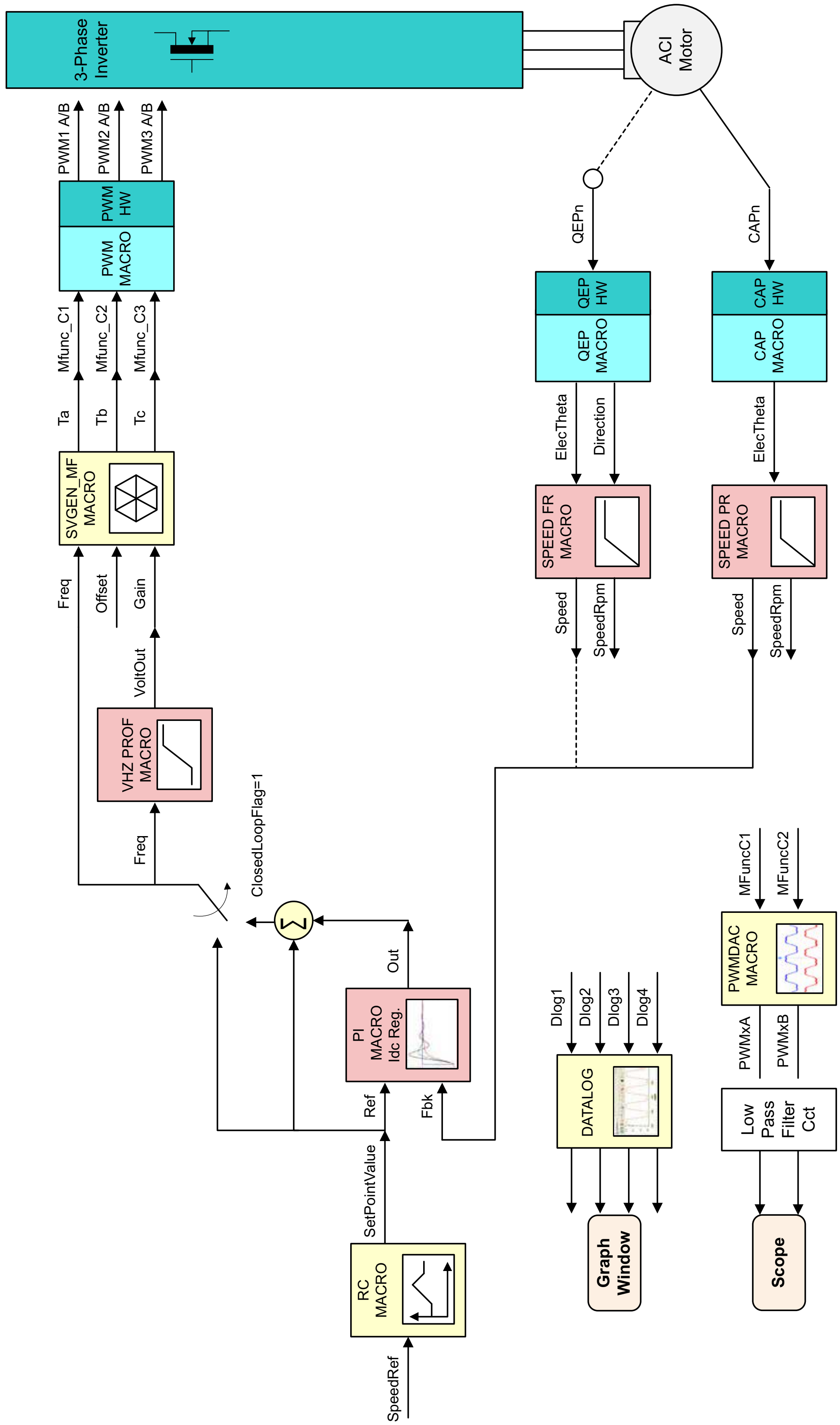

图 **18. 3** 级 **-** 递增系统构建方框图

3 级验证 PI 稳压器和闭环功能性。

9 参考书目

- *《优化数字电机控制 (DMC) 库》*(SPRAAK2)
- *《在 TMS320F280x 数字信号控制器上将 PWM 输出用作一个数模转换器》*(SPAA88)

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改， 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内，且 TI 认为 有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定，否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应 用相关的风险，客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予 的直接或隐含权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息，不能构成从 TI 获得使用这些产品或服 务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可，或是 TI 的专利权或其它 知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分，仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况 下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时，如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分，则会失去相关 TI 组件 或服务的所有明示或暗示授权，且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意，尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供，但他们将独力负责满足与其产品及在其应用中使用 TI 产品 相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意，他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识，可预见 故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因 在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中，为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特 有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此，此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III（或类似的生命攸关医疗设备）的授权许可，除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使 用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或"增强型塑料"的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同 意，对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用，其风险由客户单独承担，并且由客户独 力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品，这些产品主要用于汽车。在任何情况下，因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求，TI不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

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