

## 马达控制三相变频器中相电流 Shunt 检测电路设计

杨砚

信号链 FAE

### 摘要

随着诸如能源之星等节能标准在家电，医疗，电动车等市场的接收和推广，以磁场定向控制（FOC）算法为基础的高能效三相变频器广泛用于各类交流电机驱动应用中。FOC 算法需要精确检测三相电流，Shunt 电流检测电路因其成本低精度较高取得了广泛应用。本文将探讨 shunt 电流检测电路设计及不同 Shunt 电流检测电路对运算放大器的要求。

**关键词**      三相变频器      Shunt 电流检测      运放压摆率

### Document History

Version	Date	Author	Notes
1.0	July 2013	Van Yang	First release

### 目录

#### 概述

#### 1 shunt 电流检测电路设计

#### 2 1-shunt 电流检测

#### 3 2-shunt 电流检测

#### 4 3-shunt 电流检测

#### 结论

## 概述

磁场定向控制算法（FOC, Field Oriented Control）通过一系列的前向Clarke运算和Park运算将检测到交流电机的三相相电流处理，间接得到转矩分量和磁通分量，经过经典的PI算法对其进行精确控制，从而保证电机能以最佳的扭矩高效运行，实现精确的速度变化控制，算法框图如图1。由此可知，相电流检测的精度是决定整个电机控制性能的一个重要因素。一般来说，相电流检测共有闭环霍尔，Shunt电阻，开环霍尔三种方式。Shunt电阻因其精度较高（全温范围校正后精度2%至5%），成本低而得到广泛应用。

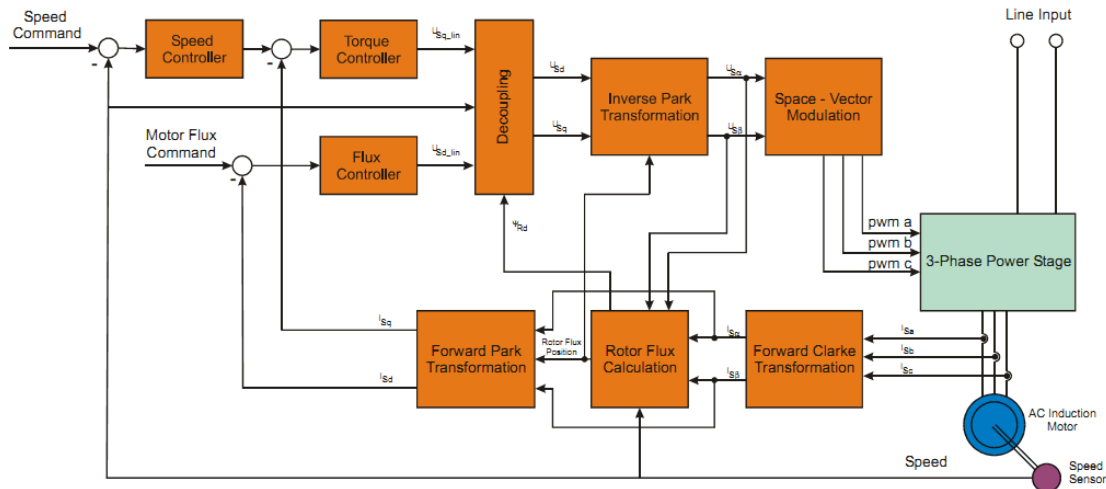


图1 磁场定向控制算法框图

## 1 Shunt 电流检测电路设计

常用的Shunt电流检测电路如图2所示。Shunt电阻将电机的相电流转化为相电压，经过RC低通滤波，偏置电压预置之后经过运放放大，输出给MCU（如TI的C28xx系列）内部12bit ADC。

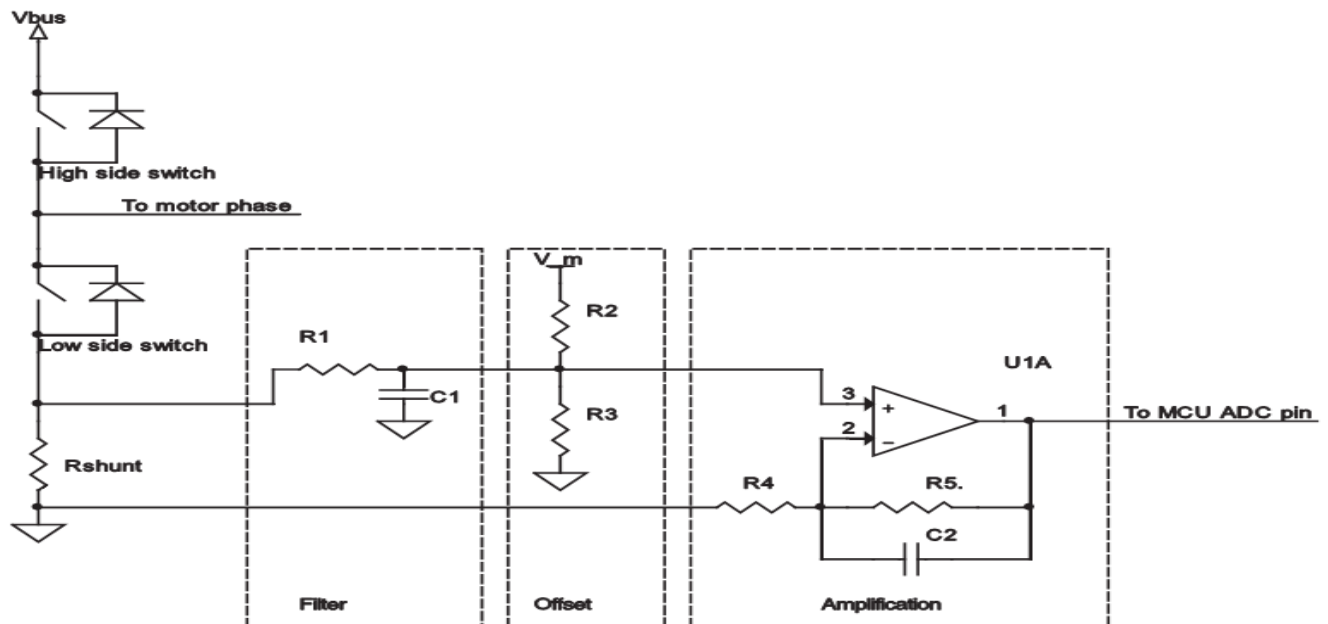


图2 常用Shunt电阻电流检测电路原理图

对于RC低通滤波部分，该滤波器可显著减小功率部分的开关噪声，提高相电流检测精度。但是该滤波器并不能采用高阶滤波器，一是成本考虑，二是高阶滤波器虽然衰减效果更好，但是滤波器群延时也相应显著增加，限制了可检测相电流的最小PWM占空比，降低FOC系统控制精度，一般来说，滤波电路不宜高于2阶，RC常数取在100ns到200ns之间。

因为相电流方向可正可负，所以Shunt电压也带有极性，而一般MCU内部ADC并非双极性ADC，所以在滤波电路之后有一个电阻分压偏置电路将电压转化为单极性。经过一级放大器之后得到动态范围扩展至电源轨的信号，以提高信噪比。

影响Shunt电流检测精度的因素主要来自于Shunt电阻精度及其温漂，运算放大器偏置电压及其温漂，运算放大器非线性误差及其温漂。可见，要想提高Shunt电流检测精度，一颗性能较好的运算放大器必不可少。同时Shunt电阻检测方式可根据Shunt电阻个数分为三类，1-Shunt，2-Shunt和3-Shunt。不同的检测方式对运放的压摆率(Slew Rate)有不同的要求。压摆率是衡量运算放大器输出电压变化速率的重要参数，单位是V/us，其定义如公式1所示，

$$SlewRate = \left| \frac{dV}{dt} \right|_{\max} \quad \text{公式1}$$

例如一个运放的输出信号是频率为 $f$ 幅值为 $V_p$ 的正弦信号，则该运放的压摆率 $SlewRate = 2\pi fV_p$ ，如果输出信号是一个频率为 $f$ 幅值为 $V_p$ 的三角波信号，则该运放的压摆率 $SlewRate = 2fV_p$ 。

在Shunt电阻电流检测电路的PCB设计上，有几点需要注意：

1 RC低通滤波电路应尽可能靠近运放侧。

2 Shunt电阻的功率侧接地走线应该尽可能粗短而且不要有过孔。因为IGBT的开关会引起较大的阶跃电流 $di/dt$ ，而阶跃电流 $di/dt$ 会通过走线或过孔产生的感生电感产生感生电压，造成较大的过冲，影响电流检测精度。如果有过孔，采用多过孔设计，一方面感生电感的并联会减小总体感生电感，另一方面通过多个过孔增强可通过电流。

## 2 1-Shunt 电流检测

1-Shunt电流检测采用一个放置在母线上Shunt电阻来分时检测ABC三相相电流。因其低成本广泛用于如空调压缩机控制等家电领域中，如图3所示

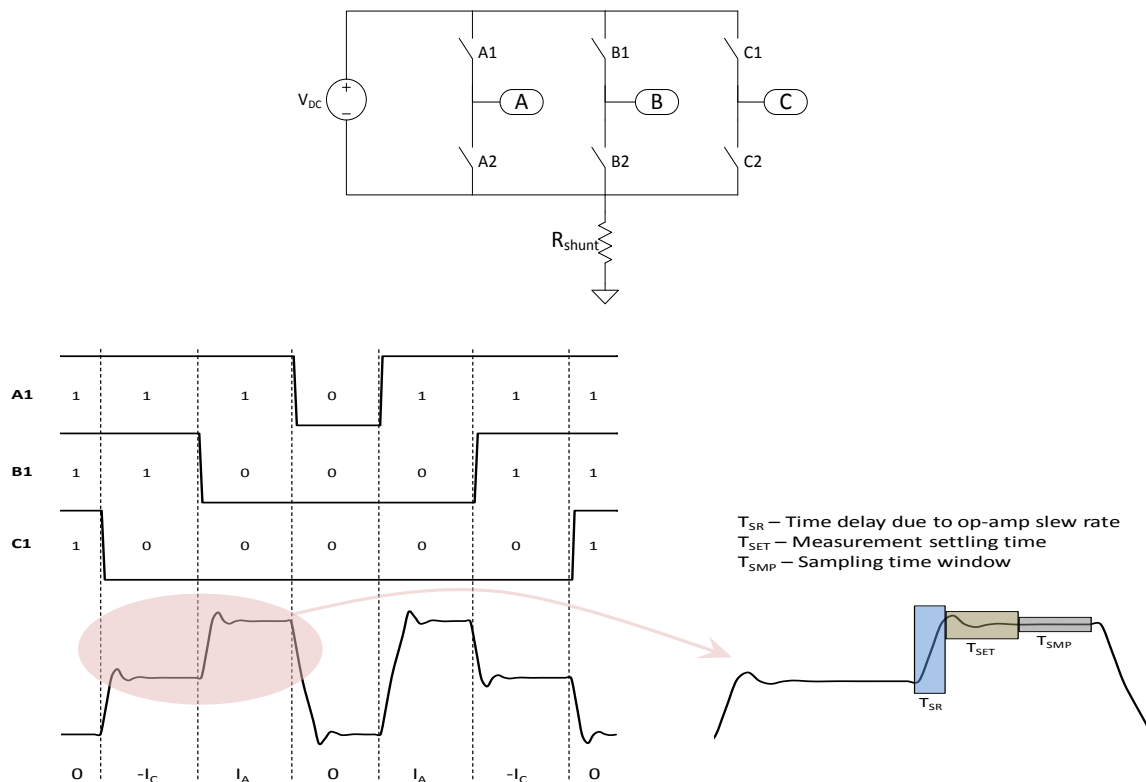


图3 1-Shunt电流检测原理

常用电机控制中，PWM频率一般是10KHz到20KHz，以20KHz为例，一个PWM周期为50us。在50us里需要检测三相电流，所以每相相电流检测窗口时间是50/3us乘以PWM占空比。一般电机控制系统中最小PWM占空比常常定义为5%，所以每相相电流检测窗口时间最小为 $50/3\text{us} \times 5\% = 0.83\text{us}$ 。而在程序控制中ADC采样时刻常控制在这个相电流检测窗口正中间，所以对于Shunt电流检测电路来说，必须在ADC采样时刻之前稳定，完成电压信号的建立稳定。具体来说如图3所示，此时间主要包含两个时间，上升沿时间（ $T_{sr}$ ，由运放的压摆率决定）和稳定时间（ $T_{set}$ ）。假设上升沿时间占相电流检测窗口的20%，即 $20\% \times 0.83\text{us} = 0.167\text{us}$ ，那么对于一个3.3V的MCU，运放最小压摆率 $SR = 3.3\text{V} / 0.167\text{us} = 19.76\text{V/us}$ 。同时运放的带宽应远大于PWM频率，至少10倍以上。

### 3 2-Shunt电流检测

对于2-Shunt电流检测来说，2个Shunt电阻分别置于2相，如A，B，那么C相电流就可以通过2相电流计算出来，如图4所示。

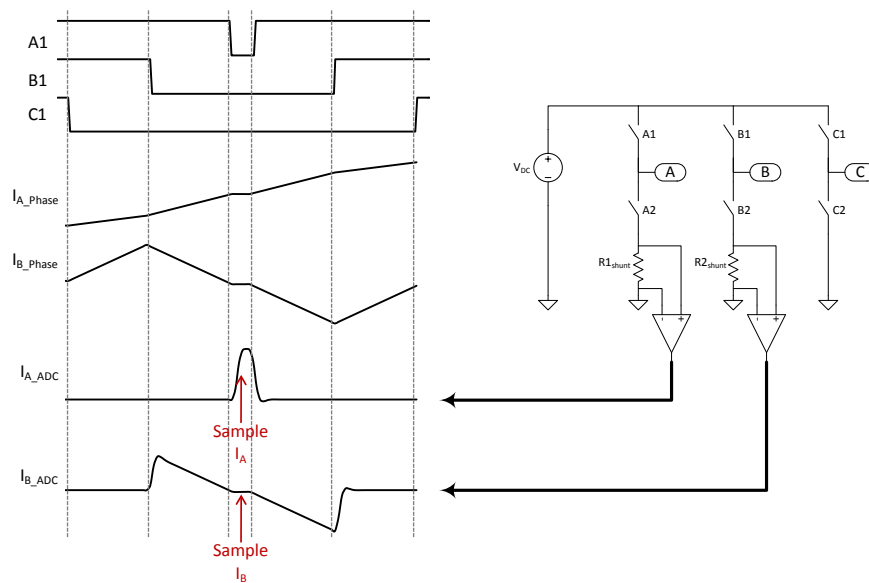


图4 2-Shunt电流检测原理

所以与1-Shunt电流检测相比，2-Shunt电流检测不需要利用分时检测。所以其每相相电流检测窗口时间最小值是1-Shunt的3倍，即压摆率应为1-Shunt方式的1/3。所以对于一个PWM频率10KHz，5%最小占空比，3.3V的MCU系统来说，运放的压摆率 $SR = 3.3\text{V} / 0.48\text{us} = 6.9\text{V/us}$ 。

### 4 3-Shunt电流检测

3-Shunt电流检测即利用3个Shunt电阻检测ABC三相相电流。因为任意两相电流都可以计算出第三相电流，而且在一个PWM周期里，最小PWM占空比只能出现在某一相，所以在一个PWM周期里，出现最小PWM占空比的相电流可以不检测而通过其他两相计算得到。这就意味着每相相电流检测窗口时间没有了最小PWM占空比的限制。另外，当电机控制系统零电位参考取负母线电压时有

$$V_{dc}Duty_A + V_{dc}Duty_B + V_{dc}Duty_C = \frac{3}{2}V_{dc} \quad \text{公式2}$$

其中V<sub>dc</sub>为母线电压。所以三相占空比之和应为1.5。若C相出现最小占空比5%，那么A相占空比与B相占空比之和为1.45。因为各相占空比最大为1，所以假设A相占空比达到最大值，则B相占空比达到最小值，即45%，此时B相相电流检测窗口时间达到最小值。对于一个PWM频率20KHz的马达系统，此时B相相电流检测窗口时间为50us×45%=22.5us。那么对于一个3.3V的MCU系统来说，还是假定上升沿时间占相电流检测窗口的20%，则运放的压摆率SR=3.3V/（22.5us×20%）=0.73V/us。

## 结论

Shunt电流检测广泛应用于各类交流电机控制器中。不同的Shunt电流检测方式对电路中运放的压摆率参数要求不一样，该参数跟控制系统中的PWM频率，最小占空比有关。由本文可知，在其他参数相同情况下，

$$SR_{1-Shunt} > SR_{2-Shunt} > SR_{3-Shunt} \quad \text{公式3}$$

例如当PWM频率为20KHz，最小占空比为5%和上升沿时间占相电流检测窗口的20%情况下，三种Shunt电流检测电路中运放的压摆率最小值如表1所示。

Shunt电流检测方式	运放压摆率（V/us）	推荐TI运放
1-Shunt	20.6	OPA141，压摆率20V/us，建立时间880ns（12bit ADC）
2-Shunt	6.9	TLV2772，双运放，压摆率10.5V/us
3-Shunt	0.73	TLC2274，四运放，压摆率3.6V/us

表1

## 参考文献

1. Field Oriented Control by Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Field-oriented\\_control](http://en.wikipedia.org/wiki/Field-oriented_control)
2. OPA141 器件手册, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa141.pdf>
3. TLV2772 器件手册, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv2772.pdf>
4. TLC2274 器件手册, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc2274.pdf>
5. Predicting Op Amp Slew Rate Limited Response, <http://www.ti.com/lit/an/snoa852/snoa852.pdf>

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

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 © 2014, 德州仪器半导体技术(上海)有限公司