

ATC MCU电机控制算法介绍

OC

2023.05

01

MCU产品介绍

02

电机算法应用场景

03

电机算法简介

04

参考资料

CPU

ARM Cortex™-M3 100MHz CPU
支持32位单周期乘法器

存储器

高达 256 KB 嵌入式Flash
高达 64 KB SRAM

通信接口

2路CAN、6路UART
1路HW LIN, 1路UART LIN
2路SPI、2路I2C、68个GPIO

封装

LQFP 80 (10mmx10mm)
LQFP 64 (7mmx7mm)

模拟

1个12bit 精度ADC, 最多支持16通道
2个模拟比较器, 内置6bit 精度的DAC

车规标准

AEC-Q100 Grade 1
环境温度支持-40~125°C, Tj<150°C

功耗模式

Normal: 20mA(5V供电, 时钟使能)
Stop: 5uA(RAM数据保持)
Standby: 2uA(RTC可唤醒)

操作特性

电压范围: 2.7~5.5V
HBM ESD 8KV(接触放电)

调试接口

联合测试工作组(JTAG)接口
串行调试(SWD)接口

Clock

支持4~30 MHz 外置晶振谐振器
支持内置8MHz RC, 误差全温<1.1%
支持内置32 KHz 低功耗RC

Timer

1组6通道互补PWM、3组双通道PWM
8 个通用 Timer、实时时钟(RTC)
1个脉宽检测定时器(PWDT)

CPU

ARM Cortex™-M0+ 48MHz
(72MHz) CPU
支持32位单周期乘法器

存储器

高达 128KB 嵌入式Flash
高达 20 KB SRAM

通信接口

1路CAN-FD、3路UART、
2路UART-LIN、2路SPI、
2路I2C、42个GPIO

封装

LQFP 48 (7mmx7mm)
QFN 32 (5mmx5mm)
TSSOP 20 (6.5mmx4.4mm)

模拟

1个12bit 精度ADC, 最多支持16通道
1个模拟比较器, 内置6bit 精度的DAC

车规标准

AEC-Q100 Grade 1
环境温度支持-40~125°C, Tj<150°C

功耗模式

Normal: 20mA(5V供电, 时钟使能)
Stop: 6uA(RAM数据保持)
Standby: 2uA(RTC可唤醒)

操作特性

电压范围: 2.7~5.5V
HBM ESD 4KV(接触放电)

调试接口

串行调试(SWD)接口

Clock

支持4~30 MHz 外置晶振谐振器
支持内置8MHz RC, 误差全温<1.1%
支持内置32 kHz 低功耗RC

Timer

2组8通道互补PWM
4个32位通用 Timer、实时时钟(RTC)
2个脉宽检测定时器(PWDT)

协处理器

支持硬件除法器与硬件开方根计算

CPU

ARM Cortex™-M4F 120MHz CPU
支持数字信号处理器DSP
支持浮点单元FPU

存储器

高达 1024KB P-Flash, 带ECC
128KB D-Flash, 带ECC, 可模拟EEPROM
高达 64 KB SRAM_U + 60KB SRAM_L, 带ECC
4kB FlexRAM, 可作SRAM或模拟EEPROM

通信接口

3×SPI、1×I2C、最多128×GPIO
4×UART, 都支持SW LIN
最大4×CAN, 都支持CAN-FD
1×EIO, 支持模拟UART、I2C、SPI、I2S、PWM

封装

LQFP 144 (20mmx20mm)
LQFP 100 (14mmx14mm)
LQFP 64 (10mmx10mm)

模拟

2个12bit 精度ADC, 每个支持24+4通道
1个模拟比较器, 内置8bit 精度DAC

车规标准

AEC-Q100 Grade 1
环境温度支持-40~125°C, Tj<150°C
ISO26262 ASIL-B

功耗模式

5种电源管理模式:
运行模式 RUN
低速运行模式 VLPR
停止模式 STOP1
停止模式 STOP2
低功耗停止模式 VLPS

操作特性

电压范围: 2.7~5.5V
HBM ESD 4KV(接触放电)

调试接口

联合测试工作组(JTAG)接口
串行调试(SWD)接口

Clock

支持4~30 MHz 外置晶谐振器
支持外部输入时钟<=50 MHz
支持内置8 MHz HSI
支持内置48 MHz VHSI
支持内置128 KHz LSI

Timer

6组全功能8通道互补PWM
4个32位通用 Timer、实时时钟(RTC)
1个16位脉冲计数器PCT
2个可编程延时定时器PDT

系统

1×安全管理单元SMU
1×时钟监控单元CMU
1×硬件加密模块CSE

CPU

2× Cortex-X 350MHz + 2× Cortex-X 350MHz 锁步核
支持MPU
支持数字信号处理器DSP
支持浮点单元FPU(单精度和双精度)

存储器

高达 12MB P-Flash, 带ECC
512KB D-Flash, 带ECC, 可模拟EEPROM
2048 KB SRAM, 带ECC, 可模拟EEPROM

通信接口

1×XSPI、4×SPI、4×CSPI、2×I2C
8×UART, 都支持SW LIN
最大12×CAN-FD, 都支持CAN 2.0B
2×MSC, 8×SENT
2×EIO, 支持模拟UART、I2C、SPI、I2S、PWM

封装

BGA 320
LQFP 176

模拟

4个12bit 精度ADC@2Msps, 每个支持24通道。
3个模拟比较器, 内置8bit 精度DAC

车规标准

AEC-Q100 Grade 1
环境温度支持-40~125°C, Tj<150°C
ISO26262 ASIL-B/D

功耗模式

Normal: <1000mA
Stop: 6uA
Standby: <500uA

操作特性

电压范围: 2.7~5.5V
HBM ESD 4KV(接触放电)

调试接口

联合测试工作组(JTAG)接口
串行调试(SWD)接口

Clock

支持4~30 MHz 外置晶谐振器
支持外部输入时钟<=50 MHz
支持内置8 MHz HSI
支持内置48 MHz VHSI
支持内置128 KHz LSI

Timer

4组全功能8通道互补PWM
6个32位通用 4通道定时中断Timer
1个实时时钟(RTC)
1个GTM

安全

支持EVITA HSM全标准, 遵循ISO/SAE21434
支持AES-128/RSA2048 (包括TRNG/PRNG)
支持SM2/SM3/SM4
支持EBC/CBC/CMAC/HASH/SHA

01

MCU产品介绍

02

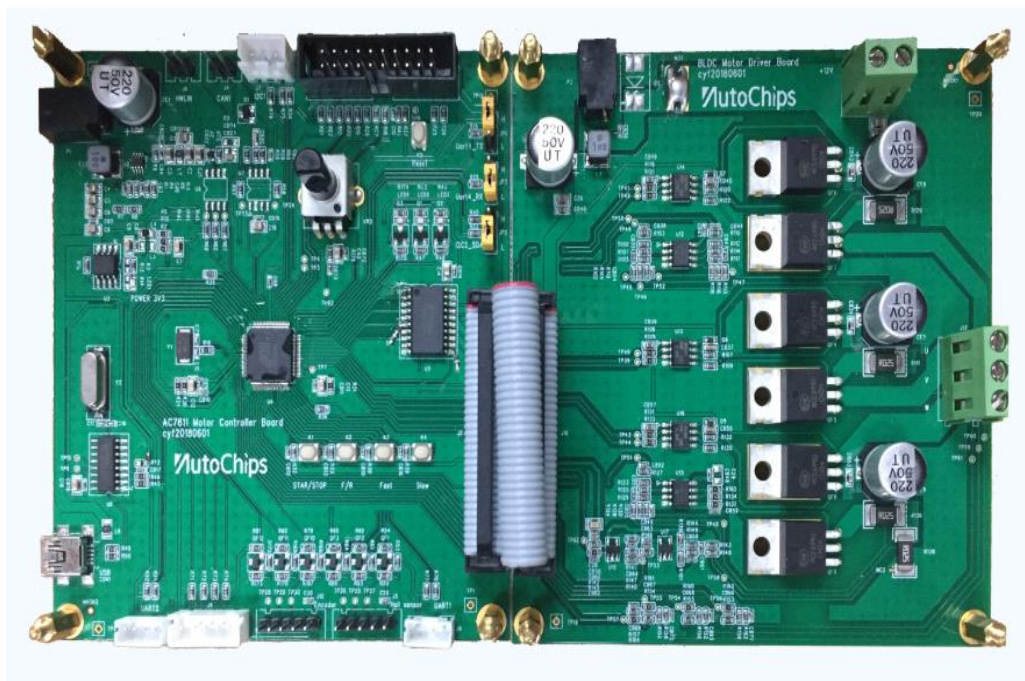
电机算法应用场景

03

电机算法简介

04

参考资料



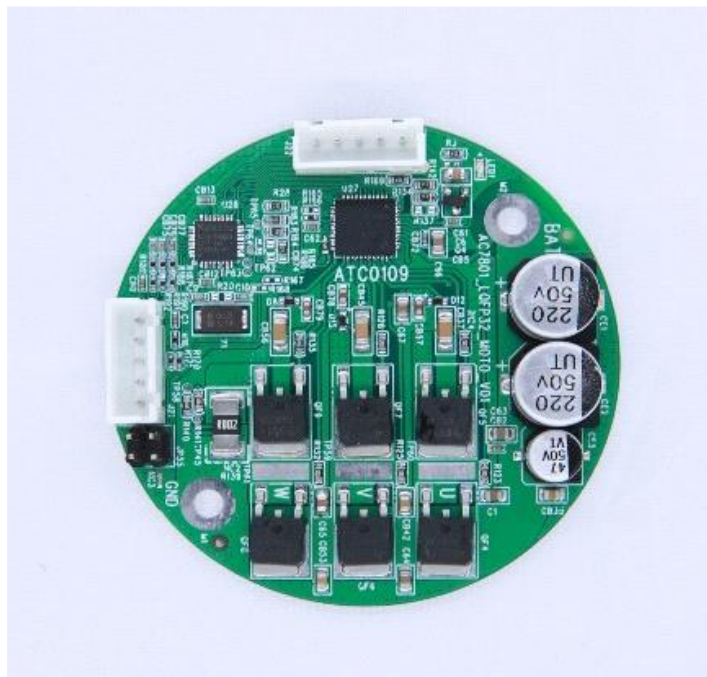
AC7801x/AC781x系列电机控制低压开发板

- 由MCU控制板和功率驱动板组成
- 功率：小于1000W
- 电压：7V-60V
- 控制算法：六步方波/FOC弦波
- 有传感器：支持Hall、正交编码器、Hall+正交编码器
- 无传感器：支持无传感方波/无传感FOC弦波控制
- 温度：-40-125度，AECQ100 Grade1



AC7840x电机控制开发板

- 由MCU小板和底板拼叠组成，支持AC7801x等小板直接替换
- 功率：小于1000W
- 电压：7V-60V
- 控制算法：六步方波/FOC弦波
- 有传感器：支持Hall、正交编码器、Hall+正交编码器
- 无传感器：支持无传感方波/无传感FOC弦波控制
- 温度：-40-125度，AECQ100 Grade1



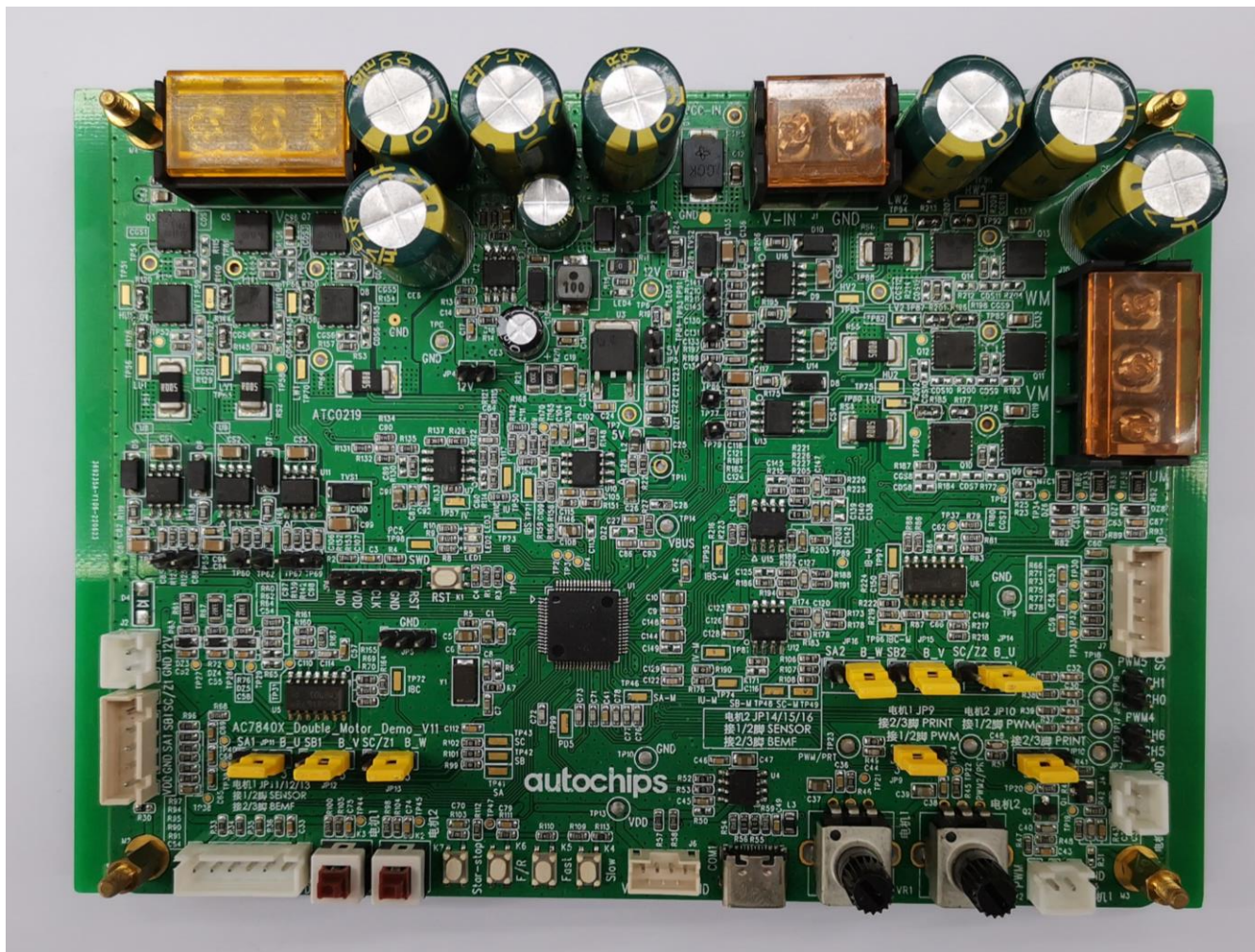
AC7801x电机控制应用类控制板

- Autochips 无刷电机应用类控制板：水泵/油泵，风机
- 功率：小于700W
- 电压：7V-28V
- 控制算法：六步方波/FOC弦波
- 有传感器：支持Hall
- 无传感器：支持无传感FOC弦波控制
- 尺寸：直径60mm
- 温度：-40-125度，AECQ100 Grade1



AC7801x/AC781x电机控制高压开发板

- 由MCU控制板和功率驱动板组成
- 功率：小于3000W
- 电压：220VAC
- 控制算法：六步方波/FOC弦波/Vf控制
- 有传感器：支持Hall、正交编码器、Hall+正交编码器
- 无传感器：支持无传感方波/无传感FOC弦波控制
- 温度：-40-125度，AECQ100 Grade1



AC7840x双电机控制开发板

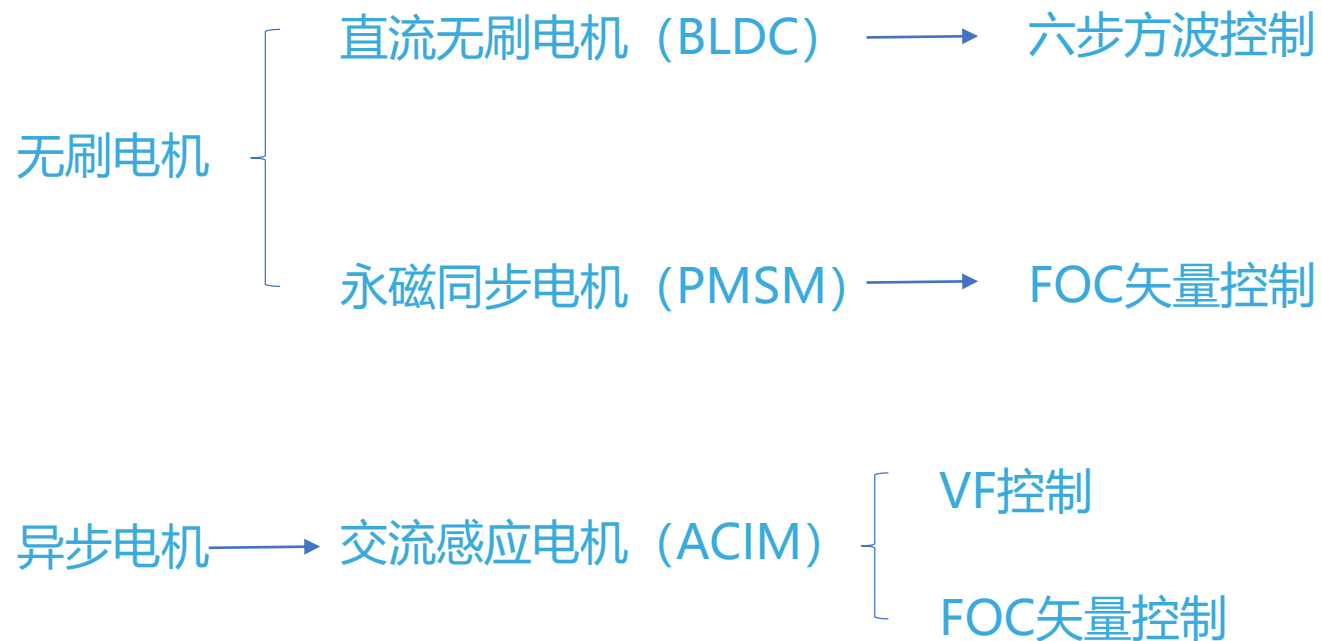
- Autochips 无刷双电机应用类控制板，支持独立启停，调速控制。
- 功率：小于1000W
- 电压：7V-60V
- 控制算法：六步方波/FOC弦波
- 六步方波控制：支持无传感方波和Hall方波组合双电机控制方案、
- FOC弦波控制：支持无传感FOC，正交编码器FOC和Hall FOC任意组合双电机FOC控制方案
- 温度：-40-125度，AECQ100 Grade1

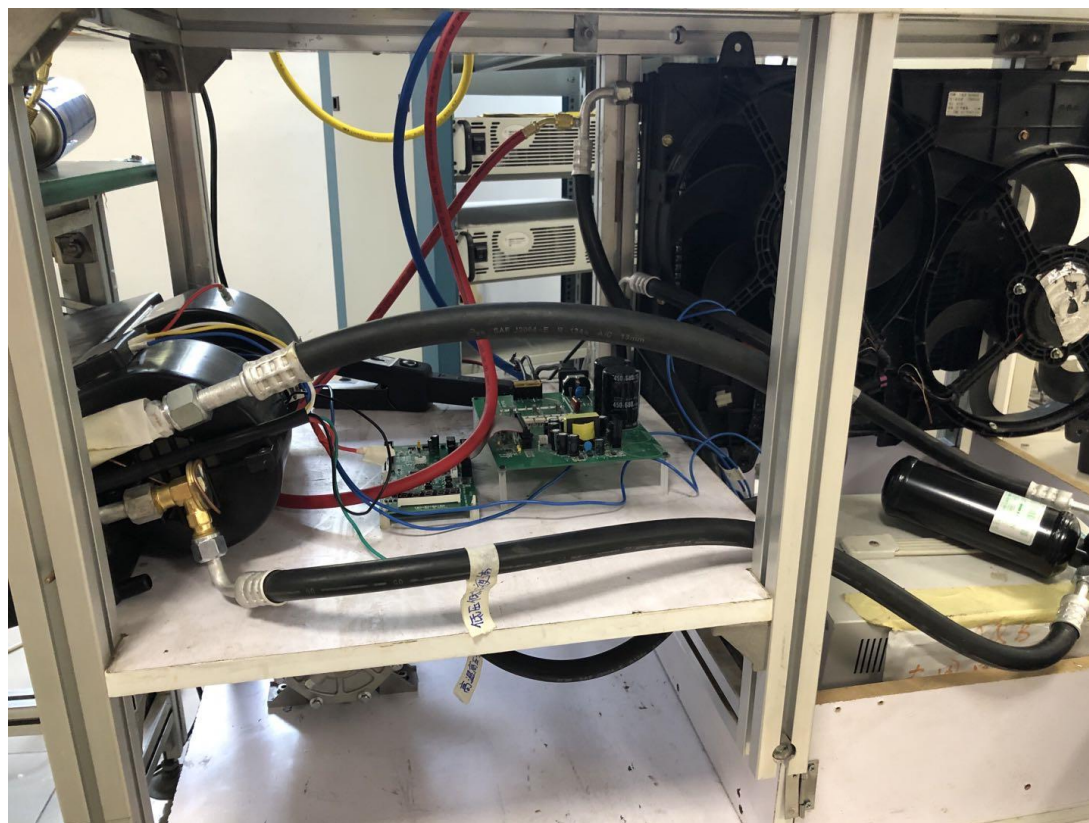
01. 汽车应用

- 冷却风扇
- 汽车水泵/油泵
- 汽车主驱(规划AC787x系列支持)
- 汽车空调
- 汽车座椅风扇
- 汽车除霜器/散热器
- ...

02. 工业/消费应用

- 工业风扇
- 变频器
- 水泵
- 闸机
- 电动自行车
- 电动工具
- 空调压缩机
- 除湿机
- ...





压缩机方案联调实物图

指标	参数
硬件拓扑	MCU+光耦+IGBT
电压	DC320V
功率	5kW
电机类型	PMSM
控制算法	无感FOC (双电阻采样)
加速时间	0-6000rpm: <2s 0-8000rpm: <2.67s
最大负载	2Mpa稳定运行
停机方式	减速停机
保护策略	过压、欠压、失速、过载、过流、缺相、堵转保护等

01

MCU产品介绍

02

电机算法应用场景

03

电机算法简介

04

参考资料

支持的电机位置传感器类型

- 霍尔传感器
- 正交增量编码器
- 霍尔+正交增量编码器
- 无位置传感器
- 旋转变压器(规划AC787x系列支持)
- ...

支持的电流采样方式

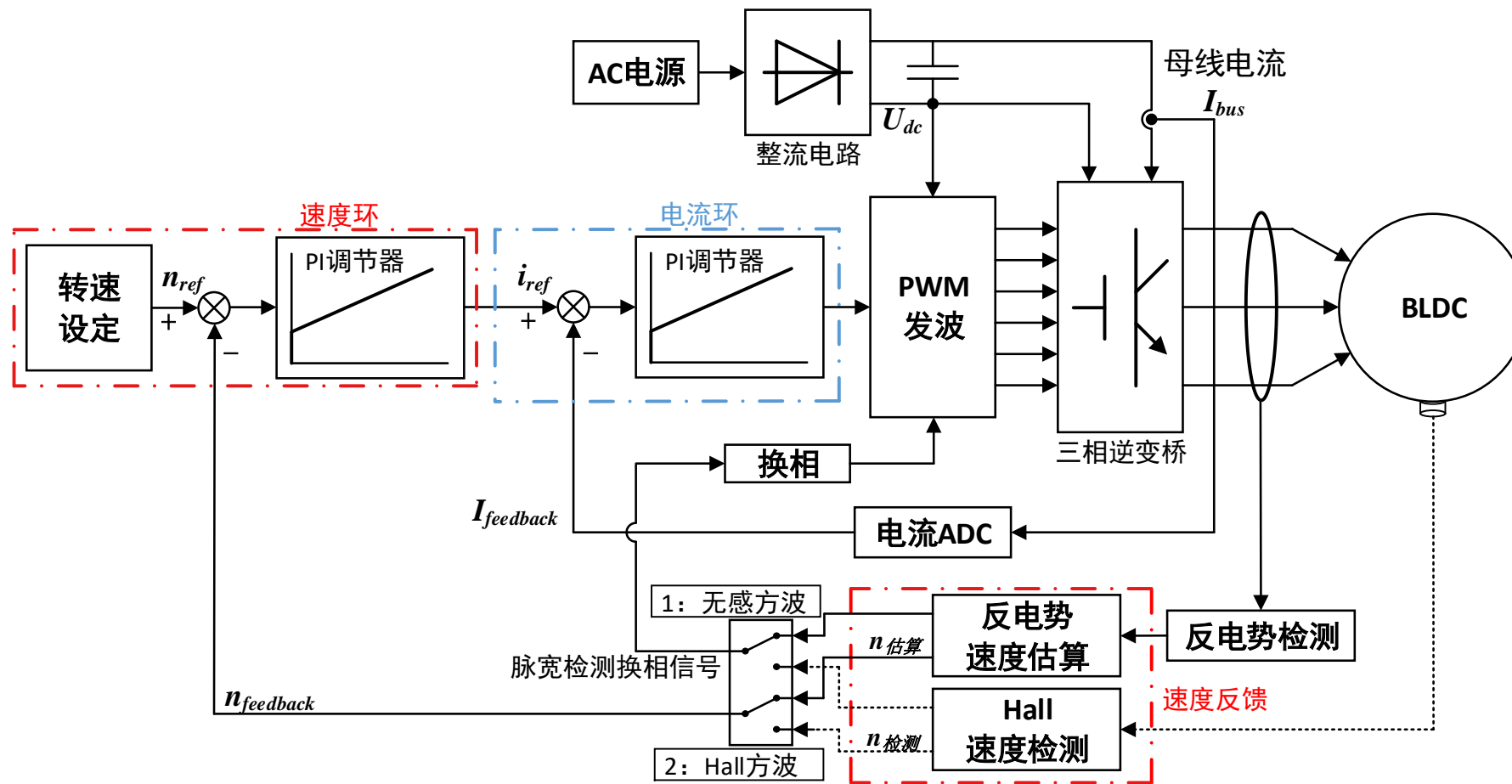
- 单电阻
- 双电阻
- 三电阻
- 电流传感器

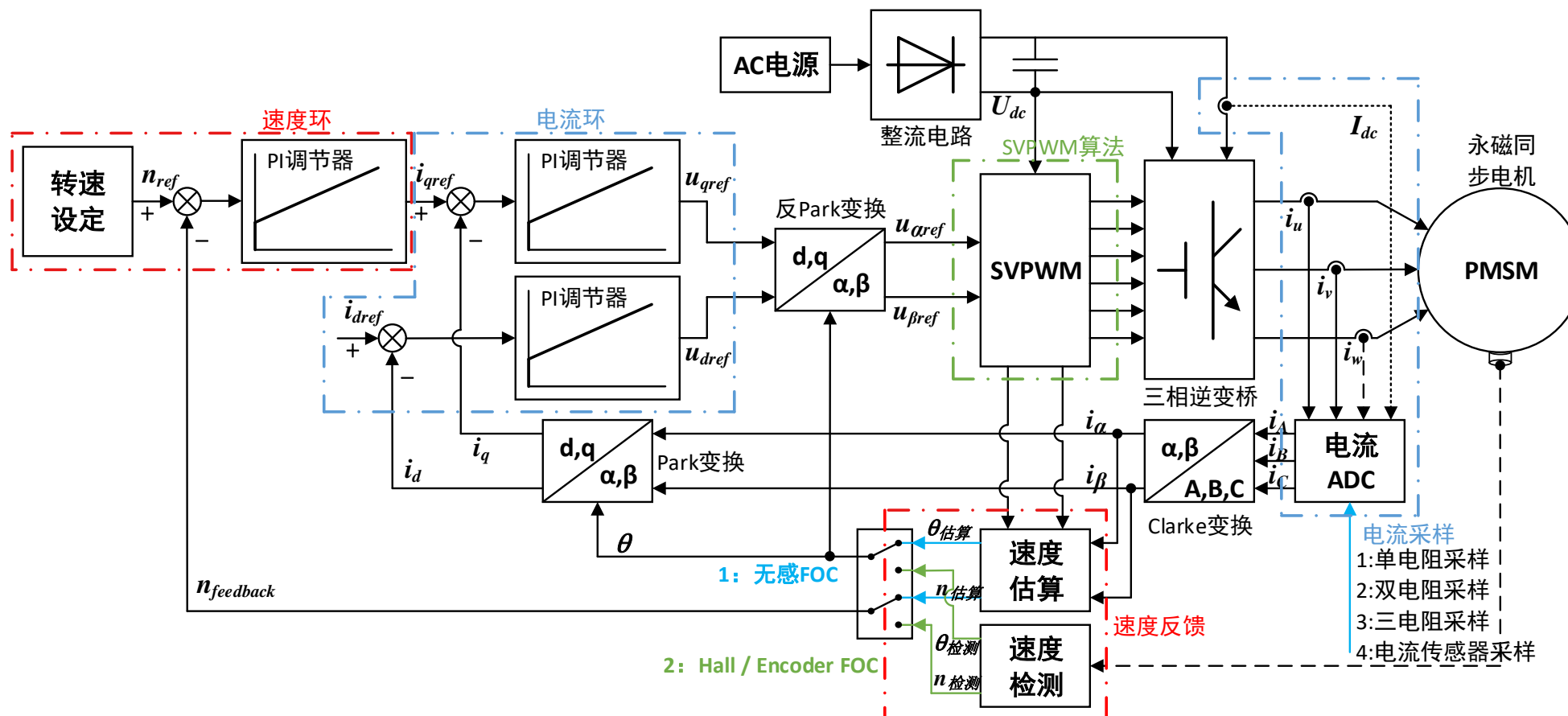
支持的电机个数

- AC7801x/AC781x支持单电机
- AC784x可支持双电机

支持的电机控制核心算法

- 有/无霍尔六步方波控制
- 有/无传感FOC控制
- VF控制
- 霍尔传感器自学习
- 脉冲注入算法 (识别转子初始位置)
- 高频注入算法 (静止/低速下无传感控制)
- 滑模观测器 (无传感观测器算法)
- 磁链观测器 (无传感观测器算法)
- MRAS观测器 (无传感观测器算法)
- 电流前馈控制
- PI调节器
- PI参数自整定
- 五/七段式SVPWM
- 母线电流及功率估测
- MTPA控制 (Maximum Torque Per Ampere)
- 弱磁控制
- 死区补偿
- 过调制算法
- 电磁刹车/制动
- 电机参数识别
- 旋变位置软解码(规划AC787x系列支持)





支持的电流采样方式：

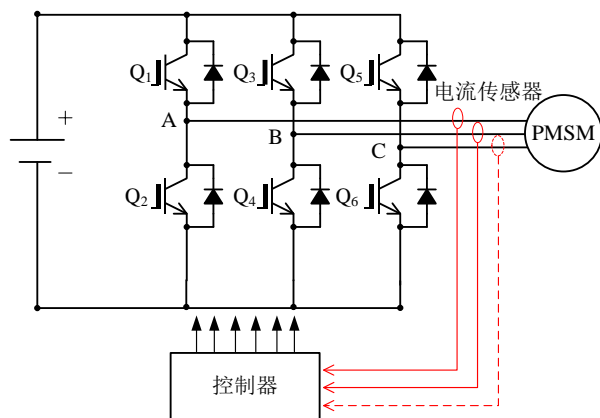
按电流采样性能与成本降序排列：

电流传感器采样：在电机三相上采集相电流，采样效果好，成本高

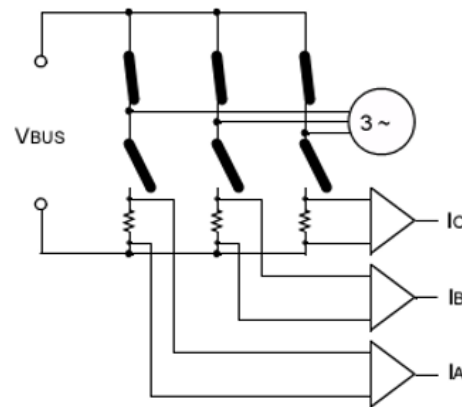
三电阻采样：在三相桥下臂开关管串电阻，通过采样电阻采集三相电流

双电阻采样：与三电阻采样方案一致，减少一相（由两相电流计算得到）

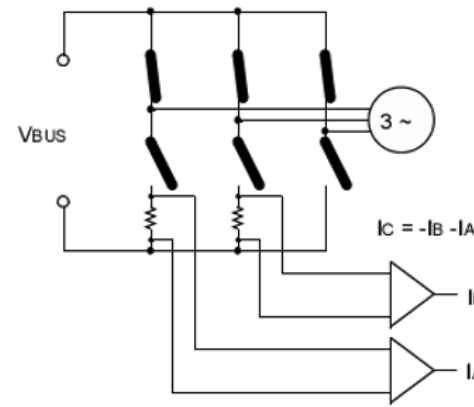
单电阻采样：采集母线电流，并重构得到三相电流，低成本，算法复杂



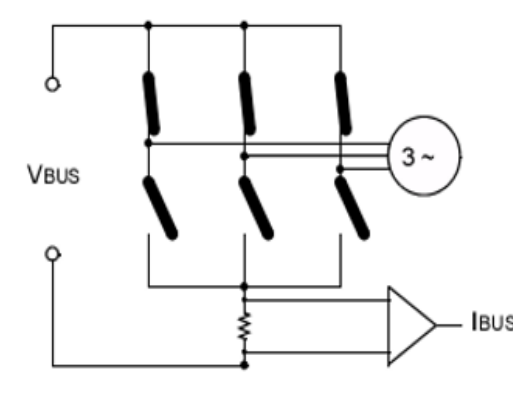
电流传感器



三电阻采样



双电阻采样



单电阻采样

霍尔传感器使用影响因素:

霍尔传感器在安装时, 霍尔相序受霍尔线序及电机线序所影响。

同时制造水平、人工干扰等因素影响, 霍尔传感器存在安装偏差。会导致使用霍尔传感器估算得到的转子位置不准确, 影响磁场定向控制性能, 例如: 电机输出效率低、运行不顺畅、甚至运行失控的问题。

霍尔相序与霍尔安装偏差自学习:

霍尔相序与安装偏差角度自学习算法适用于任何未知霍尔安装的情况, 对各种霍尔线序、电机线序、60度霍尔、120度霍尔进行快速适配, 顺利估算得到转子位置。

无传感FOC观测器:

滑模观测器SMO: 鲁棒性强

磁链观测器Flux observer: 算法调节参数少

自适应观测器MRAS: 低速性能好, 受电机参数影响较大

角度估计方法:

反正切atan计算: 查表法 / atan函数计算得到角度, 响应快速, 对噪声敏感

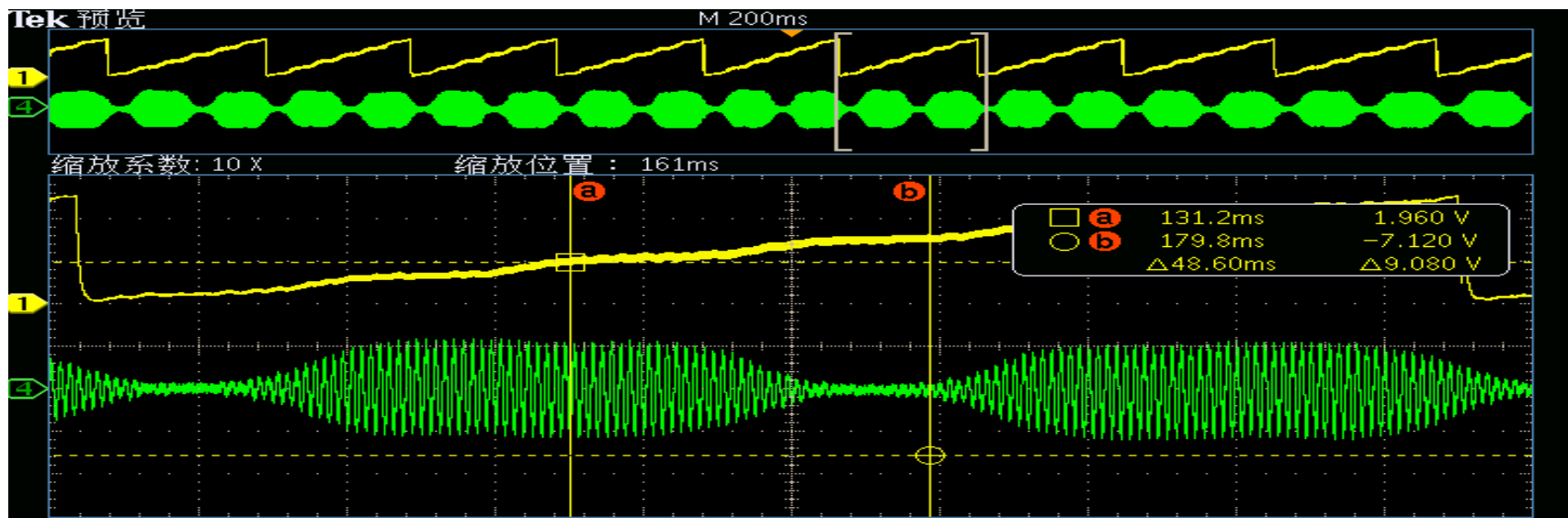
锁相环PLL: 使用PI控制器输出速度与角度, 对噪声不敏感, 系统响应速度减慢

无传感启动:

无感启动方式	预定位法	脉冲注入法	高频注入法
适用的电机	SPM/IPM	SPM/IPM	IPM
启动时电机状态	静止	静止	静止或低速
启动现象	可能有轻微逆转	平稳启动	平稳启动
启动噪音	无噪音	短暂电流噪音	连续电流噪音

高频注入:

通过向定子线圈注入特定的电压载波信号，藉由电机d-q轴电感的差异特性，进而产生与转子角度误差相关的电流信号，再依此电流信号进行估测角度的修正以达到无感启动之目的。

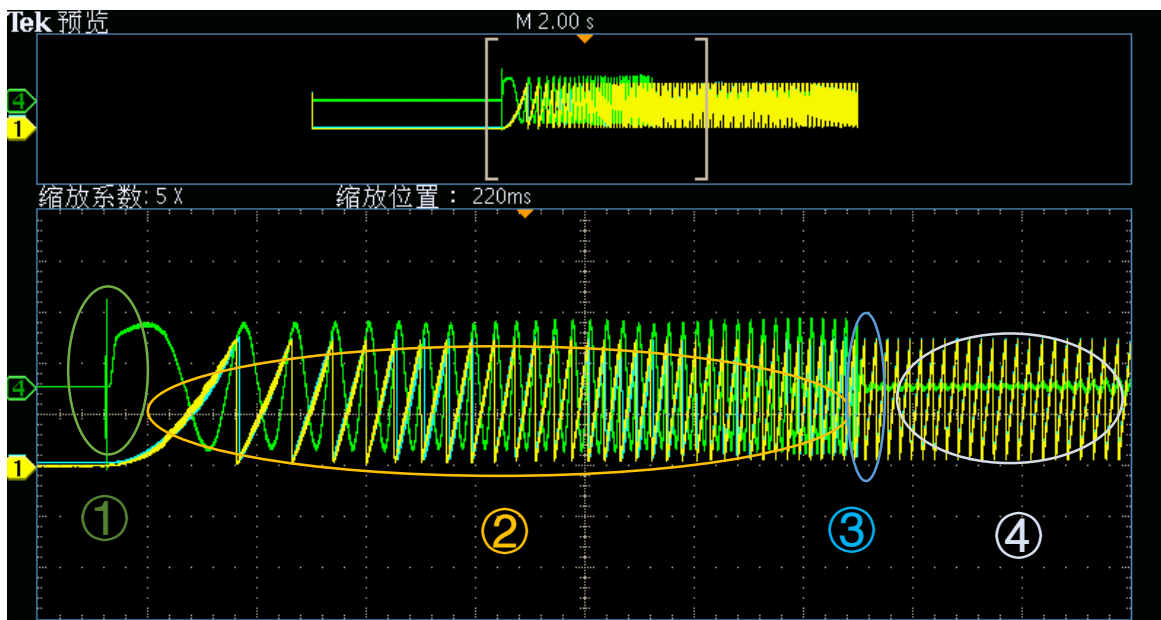


注入频率和注入电压:

- HFI频率: 一般在100~1KHZ范围内, 默认为800HZ;
- HFI电压: 一般设定为电机额定电流的10%。

脉冲注入：

根据定子铁芯非线性饱和效应的特征，当向定子绕组施加一系列等宽的短时检测电压矢量，可通过母线响应电流的大小来辨别转子初始位置区间。



无传感控制过程：

- ①初始位置识别
脉冲注入辨识，无抖动启动。
- ②开环运行
IF或VF开环加速过程。
- ③开环闭环切换
切入观测器估算角度。
- ④转速闭环
进行速度闭环控制

电流环解耦

前馈解耦作用

电机数学模型具有非线性、强耦合特点，采用PI电流调节器常忽略不同分量之间的耦合，影响电机控制的动态性能。使用前馈解耦，可将d/q轴之间控制相互解耦，提升系统动态性能。

前馈解耦原理

PMSM基本电压方程为：

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \Psi_f \end{cases}$$

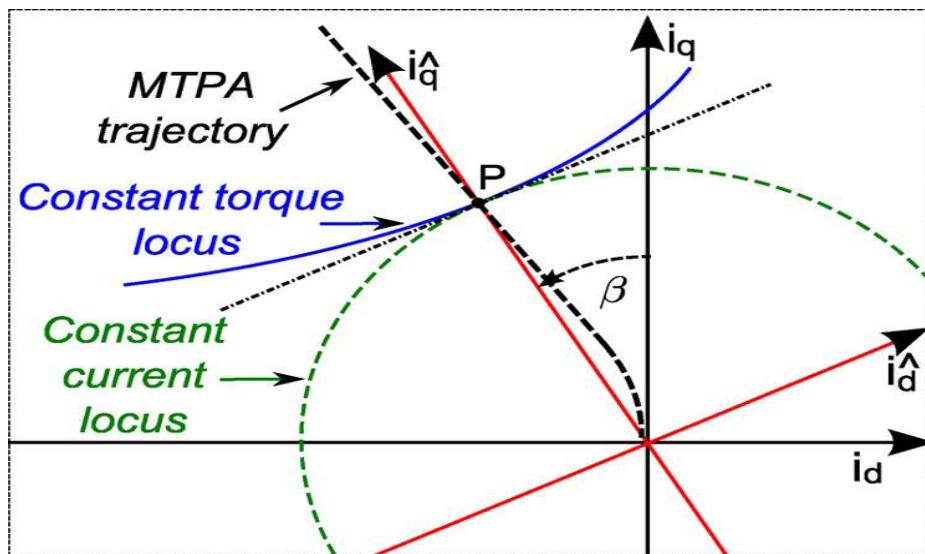
$$\text{令} \begin{cases} u'_d = u_d + \omega_r L_q i_q \\ u'_q = u_q - \omega_r L_d i_d - \omega_r \Psi_f \end{cases} \quad \begin{cases} u'_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u'_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases}$$

实现d/q轴之间的解耦

MTPA

最大转矩电流比控制，又称为定子电流最小控制，即在给定转矩的情况下，最优配置交直流轴电流分量，使定子电流最小，达到单位电流下电机输出转矩最大。最大转矩电流比控制可以减小电机铜耗，提高电机运行效率。

最大转矩电流比控制的核心在于：在定子电流一定的条件下，如何求得最优转矩角 β ，从而实现输出电磁转矩最大。



$$\left\{ \begin{aligned} T_{em} &= \frac{3P}{4} [\lambda_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \\ \beta &= \sin^{-1} \left(\frac{\lambda_{pm} - \sqrt{\lambda_{pm}^2 + 8(L_d - L_q)^2 I_s^2}}{4(L_d - L_q) I_s} \right) \end{aligned} \right.$$

弱磁控制

FOC控制的矢量电流必须位于电流极限圆和电动势极限椭圆内，否则电枢电流不能跟随给定电流，永磁同步电机的调速性能将下降。

在电机低速运行区域，电动势极限椭圆较大，电流控制器输出电流能力主要受电流极限圆的约束，限制了永磁同步电机低速时的输出转矩。

在高速运行区域，电动势极限椭圆不断缩小，电动势极限椭圆变成了逆变器输出约束的主要方面，从而限制了永磁同步电机的调速运行范围。

弱磁控制：通过使定子绕组中有**负向的d轴电流**流过，削弱转子方向上的磁通量，提高电机运行的最高转速

母线电流估算及功率估算作用：通过软件对母线电流及控制器输出功率进行估算，可用估算值进行相关控制及保护功能设置。

母线电流估算原理：将三相相电流采样值的加权平均值作为直流母线电流预估值，相电流的权系数分别为各自的作用时间占比。

$$I_{dc} = t_a i_a + t_b i_b + t_c i_c$$

式中 t_a , t_b , t_c 为三相占空比, i_a , i_b , i_c 为三相电流值。

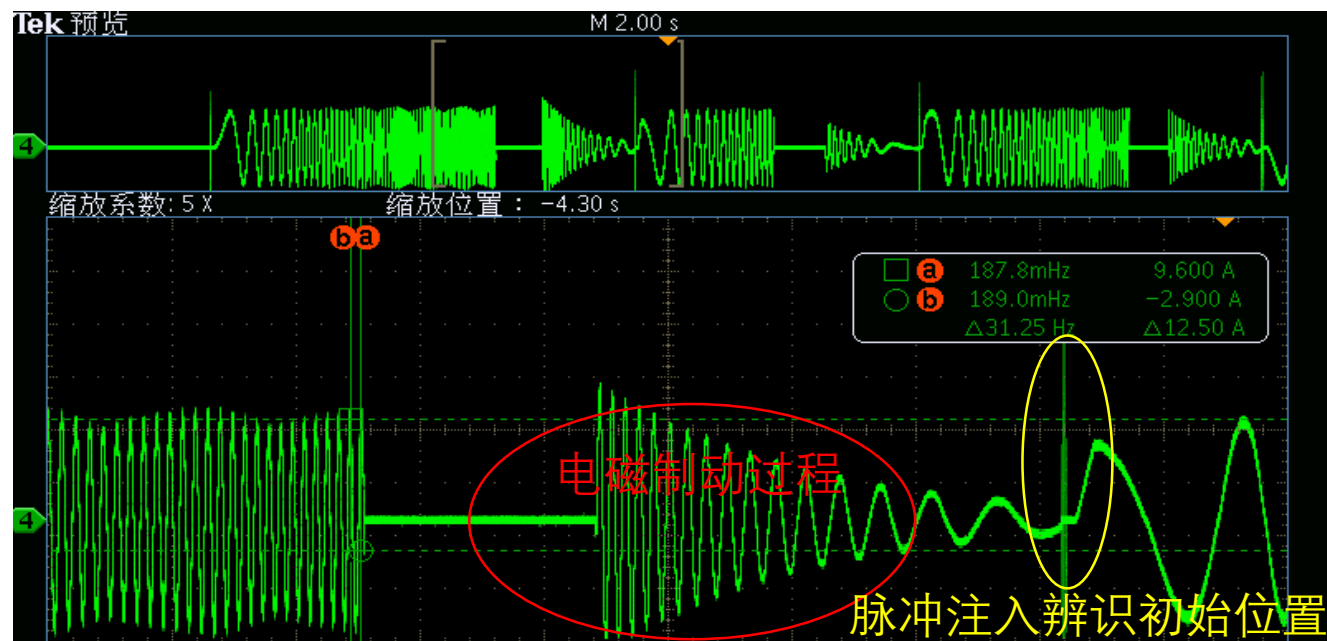
功率估算原理：

$$P = U_d i_d + U_q i_q$$

式中 U_d , U_q 为与dq轴电流同时刻的dq轴电压。

电磁制动

电磁制动算法可快速使自由运行状况下的电机停止，使系统重新进入静止启动过程。其基本原理是利用电机绕组短路，产生制动力矩，快速停机。



完善的保护策略:

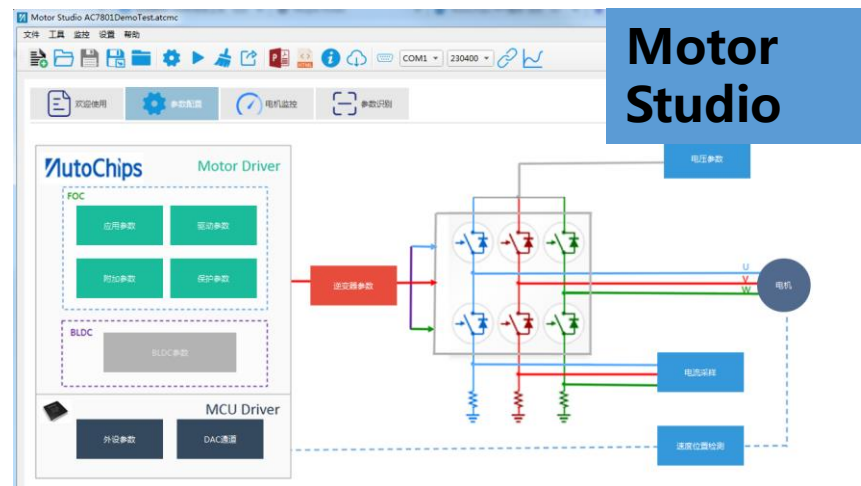
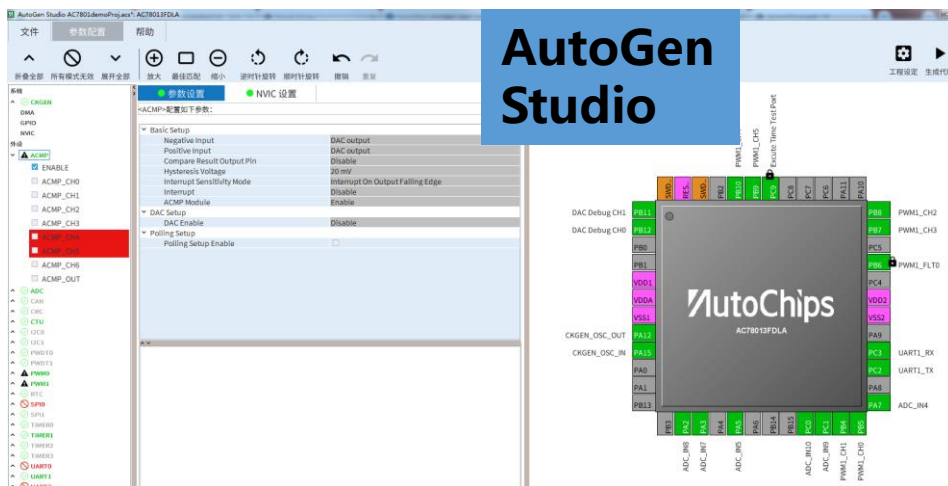
- 1 电流中点偏置保护
- 2 过流保护
- 3 过欠压保护
- 4 堵转保护
- 5 失速保护
- 6 缺相保护
- 7 限功率运行
- 8 限母线电流运行

AutoGen Studio

AutoGen Studio是ATC开发的MCU外设配置工具软件，可快速配置MCU外设驱动，提高软件开发效率，同时提高代码质量。AutoGen Studio支持对MCU硬件资源驱动程序进行配置，包括ACMP、ADC、CAN、CRC、CTU、DMA、GPIO、I2C、LIN、PWDT、PWM、RTC、SPI、TIMER、UART、WDG等硬件外设，并可输出对应的驱动代码，符合Keil或IAR两种工程需求，可在Keil或IAR环境中正确编译。

Motor Studio

Motor Studio是ATC开发的电机控制套件，配合AutoGen Studio可匹配AC78系列MCU快速生成电机控制代码，并支持在线调试，实现电机控制算法的参数配置、代码自动生成与调试过程的可视化。支持Keil或IAR两种代码环境。



01

MCU产品介绍

02

电机算法应用场景

03

电机算法简介

04

参考资料

OC 参考连接

电机方案更多资料，可从AutoChips官网获取：

电机方案软硬件、文档资料链接：

http://www.autochips.com/jk/wjxz/index_250.aspx

电机工具下载链接：

http://www.autochips.com/jk/kfzzy/index_287.aspx

方案的演示和讲解可观看视频资料：

汽车冷却风扇演示：

<https://www.bilibili.com/video/BV14V411r767/>

座椅通风演示：

<https://www.bilibili.com/video/BV1nz411e7F5/>

AC78xx无传感电机应用方案简介：

<http://www.emakerzone.com/live?id=699>

AC78xx有传感电机应用方案简介：

<http://www.emakerzone.com/move?id=712>

AC78xx有传感电机应用方案简介：

<http://www.emakerzone.com/move?id=720>

➤ 如何获取AutoChips电机开发套件？

官方电机开发套件资料可通过AutoChips官网获取。

原厂电机开发板可通过官网进行样片申请，填写相关信息后，商务端会安排进行对接。样品申请链接：

http://www.autochips.com/jk/SampleApply/index_230.aspx

➤ AutoChips 能提供哪些电机开发板？

目前对外提供的开发板有低压电机开发板、高压电机开发板、电机小圆板、继电器开发板（针对直流电机）。

➤ AutoChips 能支持哪些电机控制算法？

1. 方波控制支持有感、无感方波。
2. FOC控制支持HALL、编码器以及无传感FOC
3. 电流采样支持单电阻、双电阻、三电阻、MOS内阻、电流传感器方式。
4. 无感FOC角度估算支持滑模、磁链、MRAS等观测器算法。
5. HALL FOC支持角度自学习，可在位置霍尔线序工况下，快速适配运行。
6. 更多算法支持，如脉冲注入、高频注入、MTPA、弱磁控制等。如需了解更多，可与我们联系。

THANK YOU



官方网址:

<http://www.autochips.com>

21 IC论坛:

<https://bbs.21ic.com/iclist-864-1.html>

合肥杰发科技 | 深圳分公司 | 上海途擎(子公司) | 武汉杰开(子公司)