

TMS320F28054M、TMS320F28052M InstaSPIN-MOTION™ 软件

Technical Reference Manual



Literature Number: ZHCU087

June 2014

1	F2805xM InstaSPIN-MOTION™ 支持的 MCU	5
2	InstaSPIN-MOTION 关键功能和优势	7
2.1	FAST 统一观测器	7
2.2	SpinTAC 运动控制套件	8
2.3	额外 InstaSPIN-MOTION 特性	11
3	InstaSPIN-MOTION 方框图.....	12
4	应用示例	19
4.1	跑步机传送带：不同速度和负载下的平滑运动。	19
4.2	视频摄像机：低速时平滑运动和位置准确度	19
4.3	洗衣机：低速时的平滑运动和位置准确度.....	19
4.4	InstaSPIN-MOTION 在整个工作范围内的运行	23
5	评估 InstaSPIN-MOTION 性能.....	24
5.1	速度控制性能：SpinTAC 与 PI 相比较.....	27
5.2	位置控制性能：SpinTAC 与 PI 对比	39
6	微控制器资源	49
6.1	CPU 利用率.....	49
6.2	内存利用率.....	52
6.3	安全区	54
6.4	连接器命令文件设置	54
6.5	连接 FAST ROM 库	54
6.6	引脚利用率.....	55
6.7	模拟前端 (AFE) 模块注意事项.....	55
附录 A	资源	59
附录 B	术语和首字母缩略词定义	60

附图目录

1	InstaSPIN-MOTION = C2000 F2805xM MCU + FAST 软件传感器 (可选) + 自动调整内部转矩控制器 + SpinTAC 运动控制套件	5
2	SpinTAC 运动控制套件组件	7
3	简单调整接口	9
4	SpinTAC™ Move 曲线说明	9
5	针对一台洗衣机的状态转换图	10
6	针对一扇车库门系统的状态转换图	11
7	除了 ROM 中的 FAST 和 SpinTAC, 用户内存中的 InstaSPIN-MOTION	13
8	ROM 中的 InstaSPIN-MOTION	14
9	使用机械传感器进行的 InstaSPIN-MOTION 速度控制	16
10	机械传感器和冗余 FAST 软件传感器进行的 InstaSPIN-MOTION 位置控制	18
11	洗衣机系统配置	20
12	InstaSPIN-MOTION 最大限度地减少误差	21
13	第一个旋转周期 - 500rpm	22
14	第二旋转周期 - 2000rpm	23
15	施加转矩干扰比较	25
16	移除转矩干扰比较	26
17	最大速度误差和稳定时间的抗扰测试	28
18	控制器饱和时的抗扰测试	29
19	基准跟踪测试期间使用的速度系统配置	32
20	基准跟踪期间针对 PI 控制器的较大过冲	33
21	基准跟踪期间针对 PI 控制器的速度跟踪误差	34
22	PI 控制器零速度启动的启动误差	35
23	最大过冲和稳定时间的阶跃响应	37
24	最大位置误差和稳定时间的抗扰测试	40
25	基准跟踪测试期间使用的位置系统配置	43
26	位置跟踪期间的 PI 误差	44
27	最大过冲和稳定时间的阶跃响应	45
28	针对 Teknic M-2013P 的惯性估算结果	47
29	针对 Estun EMJ-04APB22 的惯性估算结果	48
30	软件执行时钟树用实时调度提供灵活性	49
31	为 InstaSPIN-FOC 和 SpinTAC 库分配的 F2805xF 和 F2805xM 内存	53
32	具有 ROM 符号库的 2805x 项目	54
33	电流信号通过单端连接直接传输到 PGA	56
34	使用外部差分放大器反馈相电流	57
35	使用 AFE 的内置基准电压测量双极信号	58

附表目录

1	InstaSPIN-MOTION 应用示例	6
2	PI 与 InstaSPIN-MOTION 间的关系	24
3	SpinTAC 与 PI 抗扰测试结果比较（对于 Teknic 电机）	30
4	SpinTAC 与 PI 抗扰测试结果比较（对于 Estun 电机）	31
5	SpinTAC 与 PI 控制器跟踪测试结果比较	36
6	SpinTAC 与 PI 阶跃响应测试结果比较（对于 Teknic 电机）	38
7	SpinTAC 与 PI 阶跃响应测试结果比较（对于 Estun 电机）	38
8	SpinTAC 与 PI 位置控制抗扰测试结果比较（Teknic 电机）	41
9	SpinTAC 与 PI 位置控制抗扰测试结果比较（Estun 电机）	41
10	SpinTAC 与 PI 位置系统配置跟踪测试结果比较	45
11	SpinTAC 与 PI 位置控制阶跃响应测试结果比较（Teknic 电机）	46
12	SpinTAC 与 PI 位置控制阶跃响应测试结果比较（Estun 电机）	46
13	在闪存中执行库时，SpinTAC CPU 周期利用率	50
14	针对 SpinTAC 组件的代码尺寸和 RAM 用量	52
15	SpinTAC 组成部分 + InstaSPIN-FOC 的堆栈利用率	52
16	为 InstaSPIN-FOC 和 SpinTAC 库分配的 2805x 和 2805xM 内存	53
17	每个电机的引脚利用率	55

TMS320F28054M、TMS320F28052M InstaSPIN-MOTION™ 软件

1 F2805xM InstaSPIN-MOTION™ 支持的 MCU

InstaSPIN-MOTION [TMS320F2805xM (54M 和 52M — 80 引脚封装)] 是德州仪器 (TI) 的特色器件，首次将 TI 32 位 C2000™ Piccolo™ 微控制器与综合电机、运动、速度、和位置控制软件组合在一起。InstaSPIN-MOTION 以最高效率为运行在不同运动状态转换中的电机应用提供稳健耐用的速度和位置控制。InstaSPIN-MOTION 是您自己的单片运动控制专家。

InstaSPIN-MOTION 是一款无传感器或传感磁场定向电机控制 (FOC) 解决方案，此解决方案能够在几分钟的时间内识别、调整并且控制您的电机。InstaSPIN-MOTION 特有 FAST™ 优质软件传感器和 SpinTAC™ 运动控制套件 (图 1)。核心算法被嵌入到 TI 32 位 C2000 Piccolo 微控制器 (MCU) 上的只读存储器 (ROM) 内。

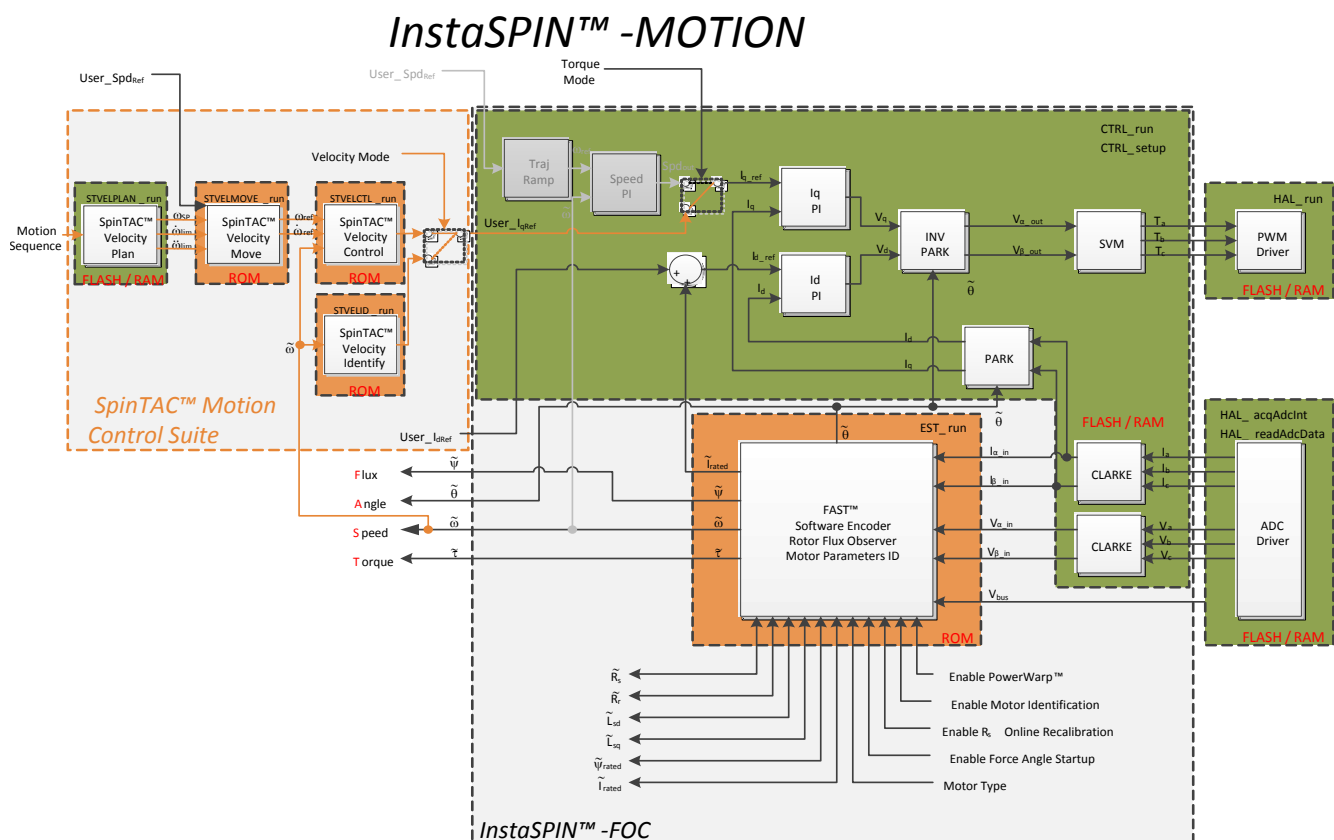


图 1. InstaSPIN-MOTION = C2000 F2805xM MCU + FAST 软件传感器 (可选) + 自动调整内部转矩控制器 + SpinTAC 运动控制套件

InstaSPIN-MOTION, C2000, Piccolo, FAST, PowerWarp, MotorWare, E2E are trademarks of Texas Instruments. SpinTAC is a trademark of LineStream Technologies. All other trademarks are the property of their respective owners.

InstaSPIN-MOTION 十分适合于需要精确速度和位置控制，最小干扰的应用，或者要进行多状态变换或经历动态速度或负载变化的应用。

表 1 提供将大大得益于 InstaSPIN-MOTION 的应用示例。

表 1. InstaSPIN-MOTION 应用示例

应用特性	示例
精确的速度控制	工业用风扇 传送带系统 电梯/扶梯 车体部件（电动车窗、蓬顶等） 光盘驱动器/硬盘 医疗混合
精确的位置控制	监控系统 包装系统 医疗机器人 Gimbal 系统 纺织/缝纫机器
最小干扰	牙科工具 电动工具 安检门和防盗门
进行多状态变换/动态变化	加热，通风和空调环境系统 (HVAC) 泵、风扇和鼓风机 发电机 空调压缩机 洗衣机 健身设备 医疗泵

这份文档专注于 InstaSPIN-MOTION 中提供的附加特性，并且是全部标准 TMS320F2806x 文档的补充，其中包括：

[SPRS797](#) — *TMS320F28055、TMS320F28054、TMS320F28053、TMS320F28052、TMS320F28051、TMS320F28050 Piccolo 微控制器数据手册*。包含 2805x 器件的引脚分配、信号描述以及电子和时序技术规范。

[SPRUHE5](#) — *TMS320x2805x Piccolo 技术参考手册*。详述了针对每一个外设和器件中子系统的集成、环境、功能说明，以及程序设计模型。

[SPRU566](#) — 《*TMS320x28xx, 28xxx DSP 外设参考指南*》。描述了 28x 数字信号处理器 (DSP) 的外设参考指南。

此外，InstaSPIN-MOTION 文档包包括：

[SPRUHJ1](#) — *TMS320F2802xF、TMS320F2805xF、TMS320F2806xF InstaSPIN-FOC、TMS320F2805xM、TMS320F2806xM InstaSPIN-MOTION 用户指南*。涵盖以下内容的范围和功能：

- F2805xM 器件
- F2805xM ROM 内容
- InstaSPIN-MOTION 系统解决方案。

2 InstaSPIN-MOTION 关键功能和优势

InstaSPIN-MOTION 用最大限度提高系统性能且尽可能减少设计工作的解决方案来取代低效率、之前的设计技术。通过嵌入与芯片相关的电机专业技术，InstaSPIN-MOTION 使得用户能够专注于优化他们的应用，而不是纠结于运动控制。

InstaSPIN-MOTION 提供以下核心功能：

- **FAST** 统一观测器，此观测器充分利用那些使用磁通量进行能量转换的所有电机之间的相似性。FAST 估算器测量转子磁通（幅度，角度和速度）以及一个无传感器 FOC 系统中的转轴转矩。
- 电机参数识别，用于调整 FAST 观测器，并且初始化针对 FOC 系统的 I_q 和 I_d 控制的最内部电流（转矩）PI 控制器。
- **SpinTAC**，LineStream Technologies 公司的综合性运动控制套件（请见图 2），简化了调整并且确保动态速度和位置范围内的最优性能。

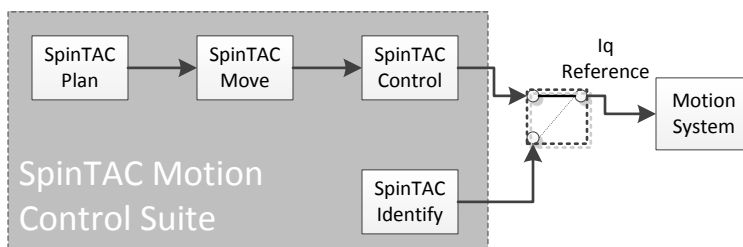


图 2. SpinTAC 运动控制套件组件

2.1 FAST 统一观测器

FAST 统一观测器结构充分利用那些使用磁通量进行能量转换的所有电机之间的相似性：

- 支持同步电机（无刷直流 (BLDC)，同步永磁电机 (SPM)，内部永磁电机 (IPM)）和异步电机 (ACIM) 控制。
- 提供针对内部永磁电机的凸极补偿。观测器在 L_s-d 和 L_s-q 被提供时准确跟踪转子磁通和角度。

FAST 为系统控制提供独特的，高质量电机反馈信号：

- 针对稳定磁通监视和场强减弱的高质量 **磁通** 信号。
- 与独立于 ACIM 全部转子参数的传统观测器技术相比，在更宽的速度范围内具有出色的转子磁通 **角度** 估算精度。
- 实时低噪声电机转轴 **速度** 信号。
- 针对负载监视和失衡检测的准确高带宽 **转矩** 信号。

FAST 替代机械编码器和解算器，并且加快控制系统设计：

- 施加波形第一个周期内的角度估算器收敛，与速度无关。
- 全部功率象限内的稳定运行，其中包括发电机象限。
- 满转矩时，稳定状态速度下（典型值低于 1Hz）的准确角度估算。
- 即使在经历零速度的低速反向期间也可保持角度完整性。
- 停转情况下保持角度完整性，从而实现平稳的停转恢复。
- 电机识别在少于 2 分钟（典型值）的时间内测量所需的空载电机的电机参数。
- “高速数据传输错误纠正 (On-the-fly)”定子电阻再校准（在线 R_s ）实时跟踪定子电阻变化，从而获得温度范围内的稳健耐用运行。这个特性也可被用作电机绕组的温度传感器（需要基点校准）。

- 大大优于传统观测器的转子磁通角度跟踪的瞬态响应。
- PowerWarp™ 自适应减少流耗以最大限度地降低组合（转子和定子）铜损耗到最低，而又无需影响 ACIM 输出功率级。

2.2 SpinTAC 运动控制套件

SpinTAC 最大限度地减少您在定义电机旋转方式时所花费的时间，并且确保您的电机以最佳水平运转，从而实现理想性能。关键优势包括：

- 经简化的调整 - 用一个单一参数在整个位置和速度运行范围内调整您的系统。
- 直观轨迹规划 - 轻松设计和执行复杂运动序列。
- 机械可靠运动 - 根据您系统的机械限制来优化速度转换。
- 理想控制 - 基于 LineStream 公司已获专利的主动抗扰控制，受益于市面上最准确的速度和位置控制。

在 SpinTAC 运动控制套件中包含四个组成部分：**Identify**（识别），**Control**（控制），**Move**（移动）和 **Plan**（规划）。这些组件均可同时用于速度和位置解决方案。

IDENTIFY

SpinTAC Identify 估算惯性（一个物体围绕轴旋转加速的阻力）。系统的惯性越大，电机加速或减速所需的转矩也就越大。SpinTAC 速度控制器使用系统的惯性值来提供最准确的系统控制。SpinTAC Identify 通过使用电机在应用中旋转并且测量反馈来自动测量系统惯性。

CONTROL

SpinTAC Control 是一款高级速度和位置控制器，此控制器特有主动抗扰控制 (ADRC)，此控制主动实时地估算且补偿系统干扰。SpinTAC 自动补偿由以下因素导致的有害系统运行方式：

- 不确定因素（例如，共振模式）
- 非线性摩擦
- 负载变化
- 环境变化。

SpinTAC Control 显示比 PI 控制所能提供的更好干扰抑制和轨迹跟踪信息，并且能够耐受宽范围的惯性变化。这意味着 SpinTAC 提升了精度和系统性能，并且最大限度地减少机械系统强制。

借助于单系数调整，SpinTAC 控制器使得用户能够快速地将他们的速度和位置控制从软响应测试和调整为硬响应。这个单个增益（带宽）通常在应用的整个可变速度、位置和负载范围内起作用，从而减少了基于 PI 的多变量系统中的典型复杂度和系统调整时间。一个单个参数控制位置和速度。这些系统常常需要十二个或更多的已调整系数集合来处理全部可能的动态情况。

InstaSPIN-MOTION (F2805xM) 图形用户界面 (GUI)（请见图 3），连同 InstaSPIN-MOTION 快速入门指南，使得用户能够使用 TI 的评估套件以及 TI 提供的电机，或者他们自己的电机快速评估 InstaSPIN-MOTION（速度控制）。GUI 被设计成在整个 InstaSPIN-MOTION 评估过程中为您提供快速指导。您可以从 www.ti.com/tool/motorkitscncd69miso 中免费获得此 GUI。确定适用于应用的 InstaSPIN-MOTION 后，可立即使用基于 MotorWare™ 的项目连同《InstaSPIN-FOC 和 InstaSPIN-MOTION 用户指南》（文献编号 [SPRUHJ1](#)）来设计项目并进行性能测试。

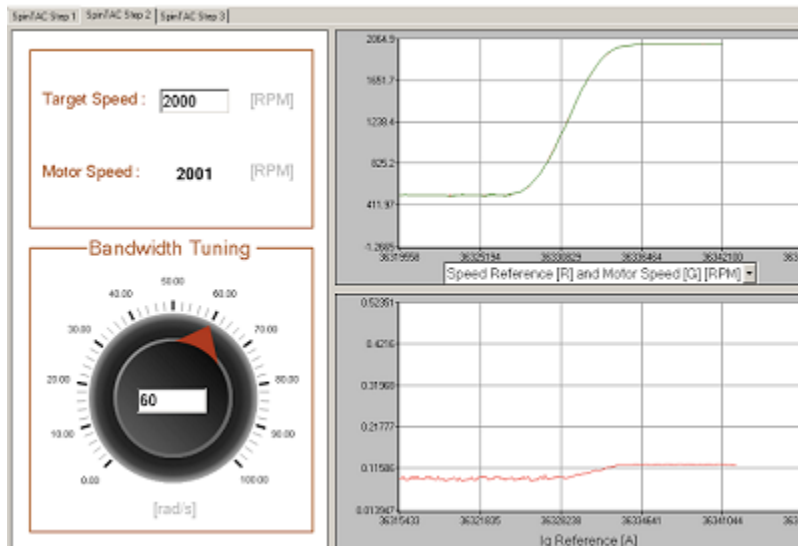


图 3. 简单调整接口

Move

SpinTAC Move 通过计算点 A 和点 B 之间的最快路径来提供一个速度或位置到另外一个速度或位置平稳转换的简单方法。SpinTAC 移动生成一个基于启动速度或位置、所需速度或位置，以及针对加速和急动的已配置系统限制的系统配置。急动代表加速度变化率。更大的加速度变化率将增加更快速率时的加速度。步进，或两个点之间的突然运动会导致系统振荡。步进越大，这个趋势越明显。对于急动的控制可使速度角变得圆滑，从而减少振荡。因此，加速度可被设定的更高一些。控制您系统中的急动将减少您系统组件上的机械应力，并且能够获得更好的稳定性和更少的故障部件。

与预先定义的查询表相反，SpinTAC Move 在处理器上运行，从而比传统解决方案占用更少的存储器。除了行业标准梯形曲线和 s 曲线 SpinTAC 还提供一个专有的 s 曲线，此曲线比 s 曲线更平滑，并且使得用户能够限制突然的机械运动。

图 4 描述了可在 SpinTAC Move 内使用的曲线。LineStream 专有 st 曲线通过使系统配置的加速变得平滑来提供最平稳的机械运动。对于大多数应用，st 曲线代表最佳机械运动系统配置。

Signals	Trapezoidal	s-Curve	st-Curve
Position	Smooth	Smooth	Smooth
Velocity	Continuous	Smooth	Smooth
Acceleration	Bounded	Continuous	Smooth
Jerk	Infinite	Bounded	Continuous

图 4. SpinTAC™ Move 曲线说明

PLAN

SpinTAC Plan 提供复杂机械运动序列的简单设计和执行。轨迹规划特性使得用户能够快速建立不同的运行状态（速度或位置 A 到速度或位置 B），并且将它与基于状态的逻辑电路关联起来。SpinTAC Plan 可被用来执行一个针对几乎全部应用的机械运动序列。图 5 显示一个洗衣机的机械运行序列，而图 6 显示一个车库门的机械运行序列。可使用 SpinTAC Plan 来轻松设计这些机械运动序列。一旦设计完成，轨迹被直接嵌入到微控制器上的 C 语言代码中。

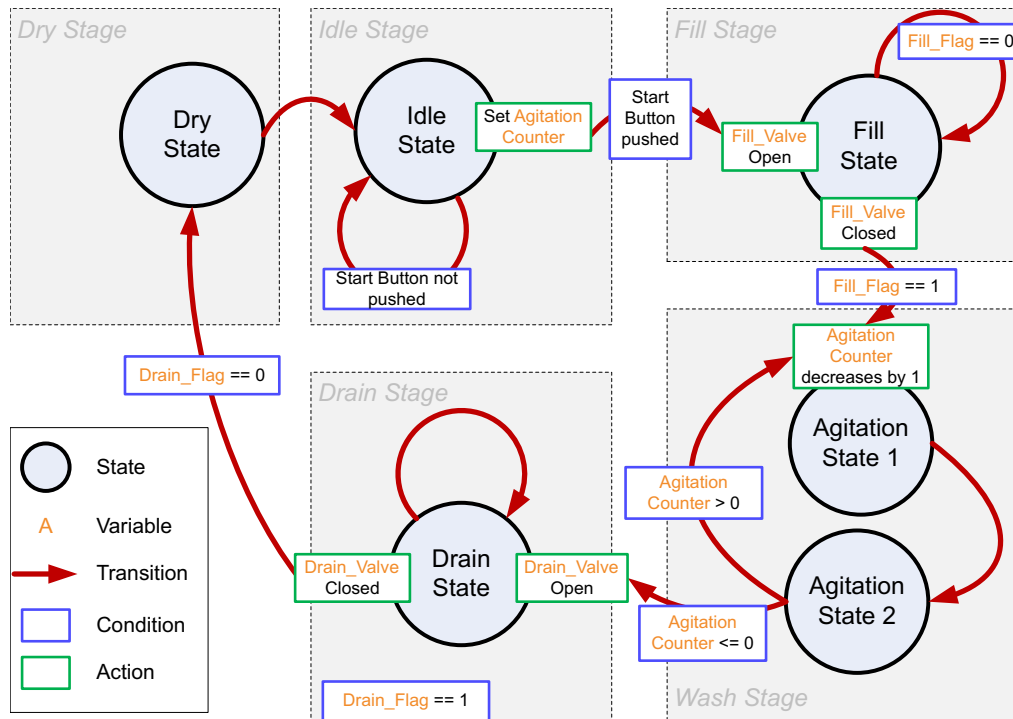


图 5. 针对一台洗衣机的状态转换图

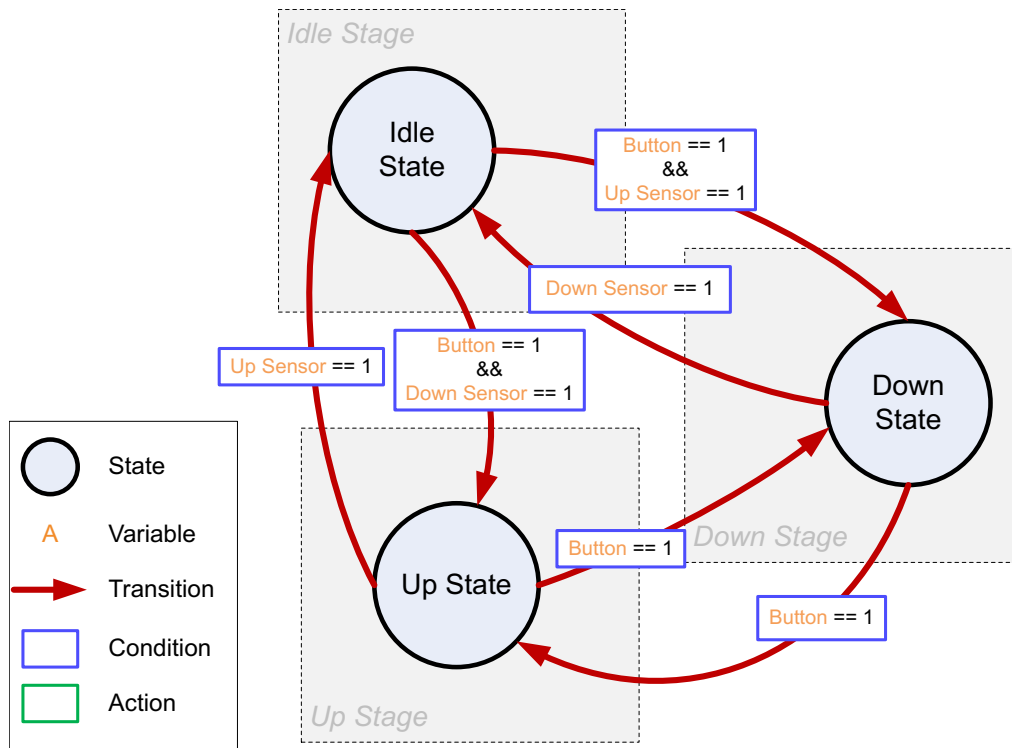


图 6. 针对一扇车库门系统的状态转换图

2.3 额外 InstaSPIN-MOTION 特性

- 支持用户调节选项的自动转矩（电流）环路调整
- 自动或手动场强减弱和场强增强。
- 总线电压补偿。
- 自动偏移补偿确保了反馈信号的高质量采样。

3 InstaSPIN-MOTION 方框图

InstaSPIN-MOTION 采用模块化设计。客户可确定他们系统中所包含的函数。FAST 观测器驻留在 ROM 中。SpinTAC 库的核心控制算法驻留在 ROM 中，而这些函数可由用户代码中的应用程序接口 (API) 访问。

InstaSPIN-MOTION 支持大量的系统设计。InstaSPIN-MOTION 针对无传感器 FOC 系统使用 FAST 软件编码器 [有关其它信息，请参见《TMS320F28052F、TMS320F28054F InstaSPIN-FOC™ 软件技术参考手册》（文献编号 [SPRUHW0](#)）]。InstaSPIN-MOTION 还支持利用机械传感器的解决方案（例如，编码器和解算器）。这些情况说明如下。

图 7，图 8，图 9，和图 10 中的变量定义如下：

- θ_{Cep} : 编码器的位置角信号
- θ_{SP} : SpinTAC 位置移动生成的锯齿位置基准信号
- ω_{lim} : 速度限值（用于位置系统配置生成）
- $\dot{\omega}_{\text{lim}}$: 加速度限制
- $\ddot{\omega}_{\text{lim}}$: 急动限制
- ω_{Ref} : 速度基准
- $\dot{\omega}_{\text{Ref}}$: 加速度基准
- τ_r : 电机时间常量

情况 1: 借助 FAST 软件编码器的 InstaSPIN-MOTION 速度控制

在这个情况下（请见图 7 和图 8），SpinTAC 速度控制接收来自 FAST 估算器的速度估计值，并且生成转矩基准信号。这与用户存储器中（请见图 7）或 ROM（请见图 8）中的 InstaSPIN-FOC 一起工作。SpinTAC 机械运动控制套件提供运动序列状态机，生成基准轨迹并且控制系统速度。

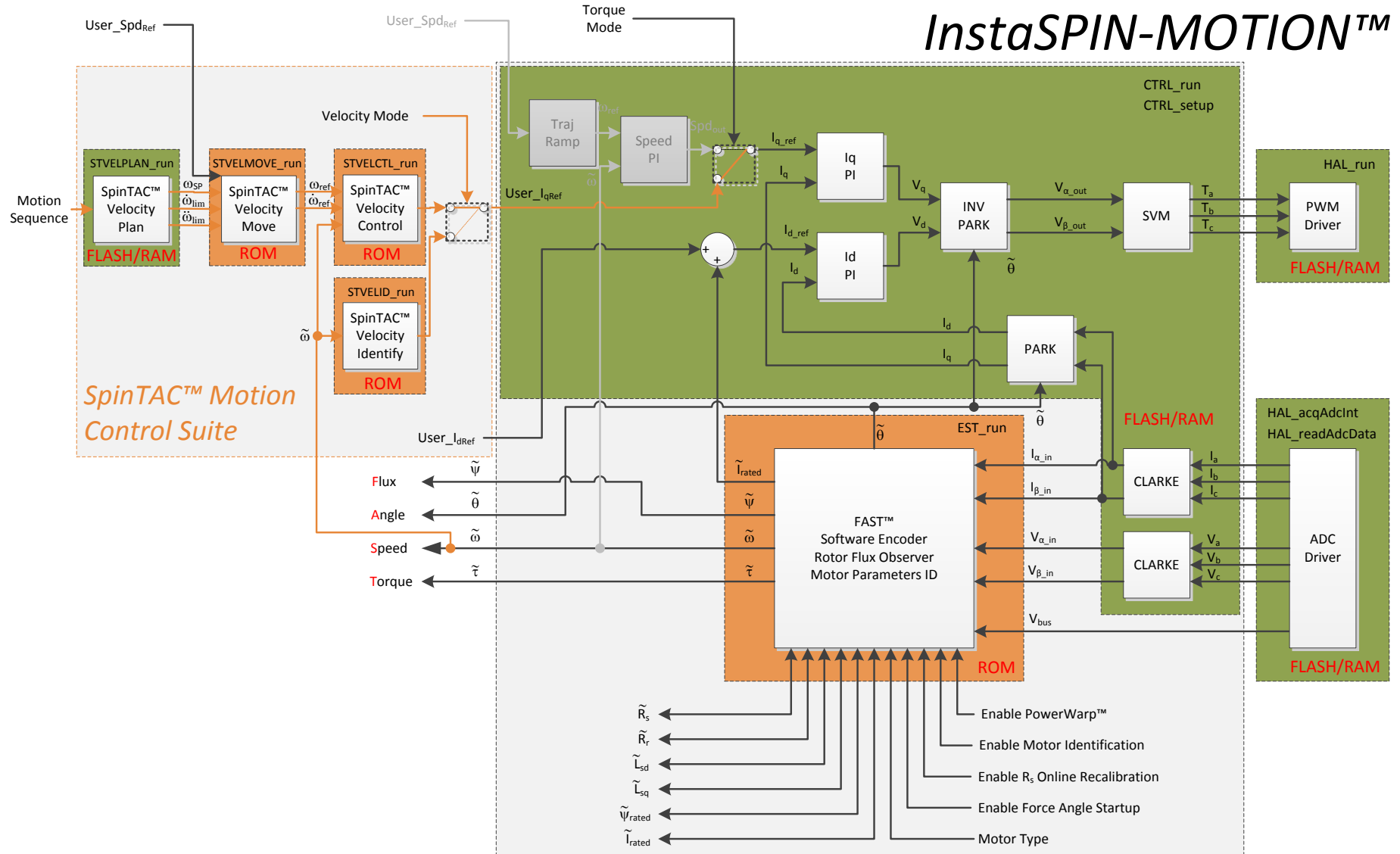


图 7. 除了 ROM 中的 FAST 和 SpinTAC，用户内存中的 InstaSPIN-MOTION

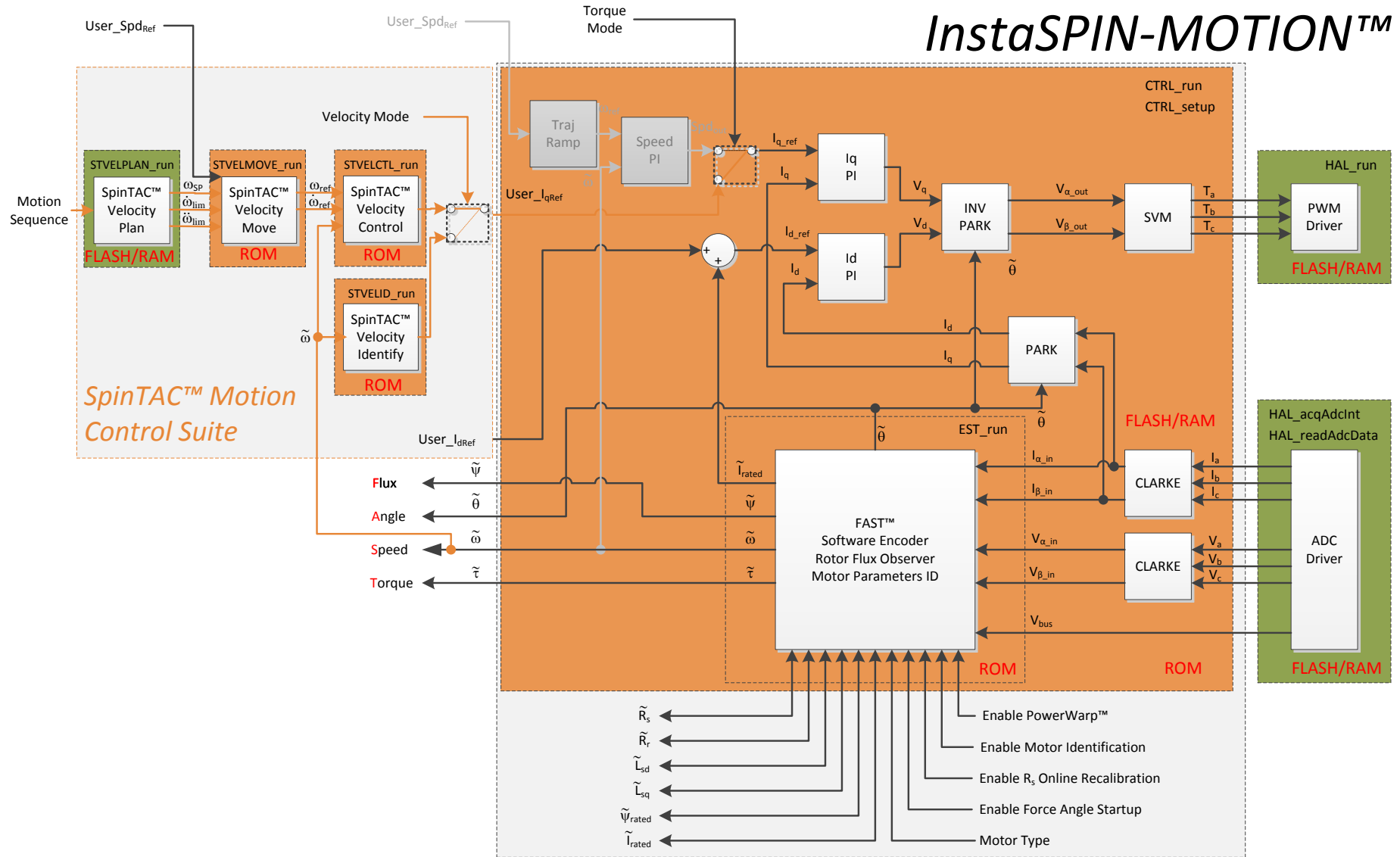


图 8. ROM 中的 InstaSPIN-MOTION

情况 2: 借助机械传感器的 InstaSPIN-MOTION 速度控制

虽然它对于很多应用来说极具吸引力且划算的无传感器解决方案，有很多应用需要严格且高精度的机械传感器。对于这些应用来说（请见 [图 9](#)），正交编码器提供位置信息，此位置信息然后通过 SpinTAC 位置转换被转化为速度反馈。SpinTAC 速度控制接收速度反馈，并且通过 IqRef 生成转矩基准信号。SpinTAC 运动控制套件提供机械运动序列状态机，生成基准轨迹，并且控制系统速度。

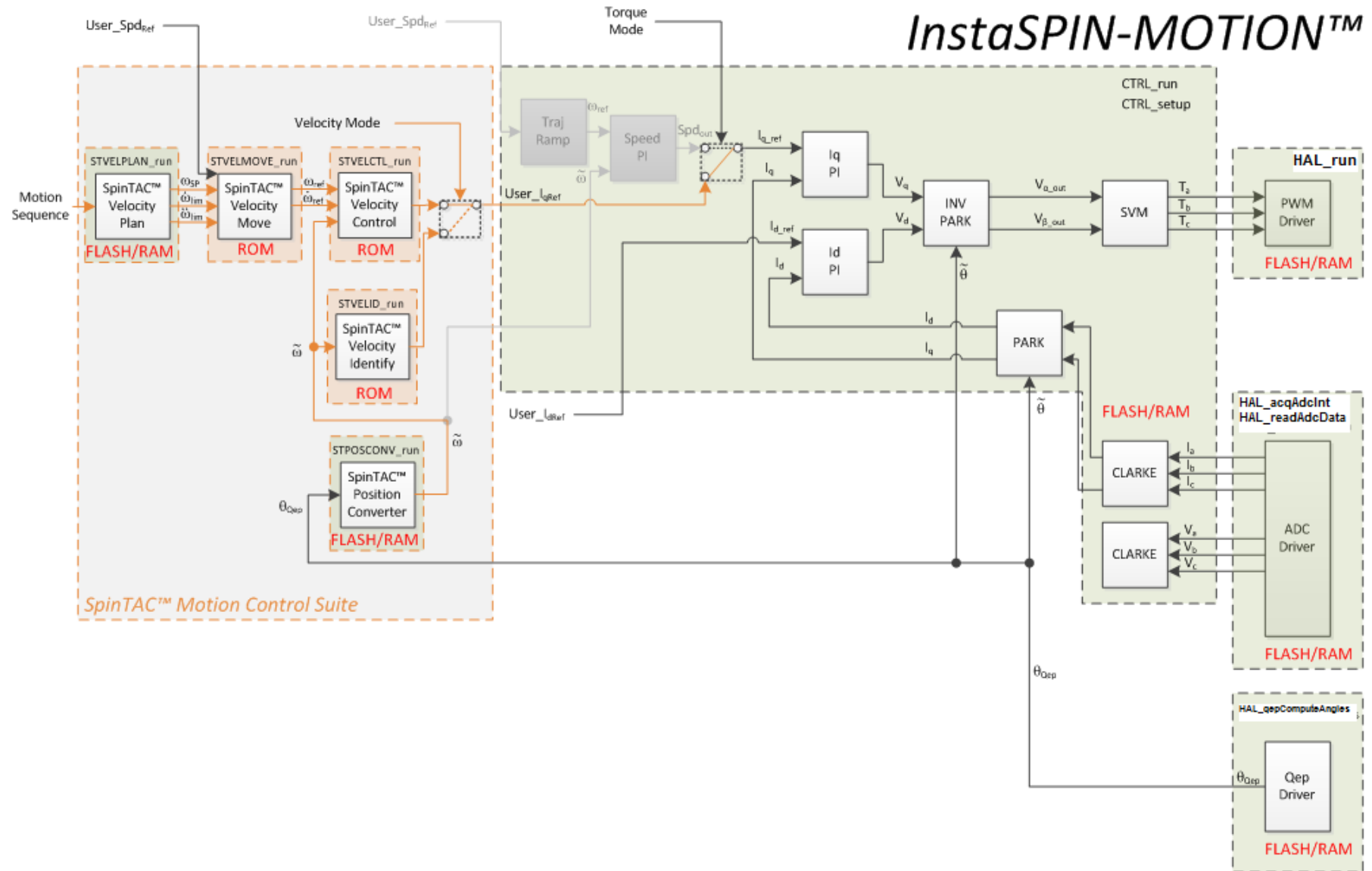


图 9. 使用机械传感器进行的 InstaSPIN-MOTION 速度控制

情况 3：使用机械传感器和冗余 FAST 软件传感器进行的 InstaSPIN-MOTION 位置控制

有很多需要高精度位置控制的应用。对于这些应用，很难去平衡很多所需的调整参数。InstaSPIN-MOTION 特有支持位置和速度单变量组合调节的准确位置、速度和转矩控制（请见 [图 10](#)）。这一特性简化了调整工作，并且使您能够专注于您的应用，而不是将精力放在电机调整方面。位置应用需要一个机械传感器，以便准确识别零速和极低速时的电机角度。FAST 软件编码器可在位置控制应用中提供冗余；这可在机械编码器故障情况下被用作安全特性。

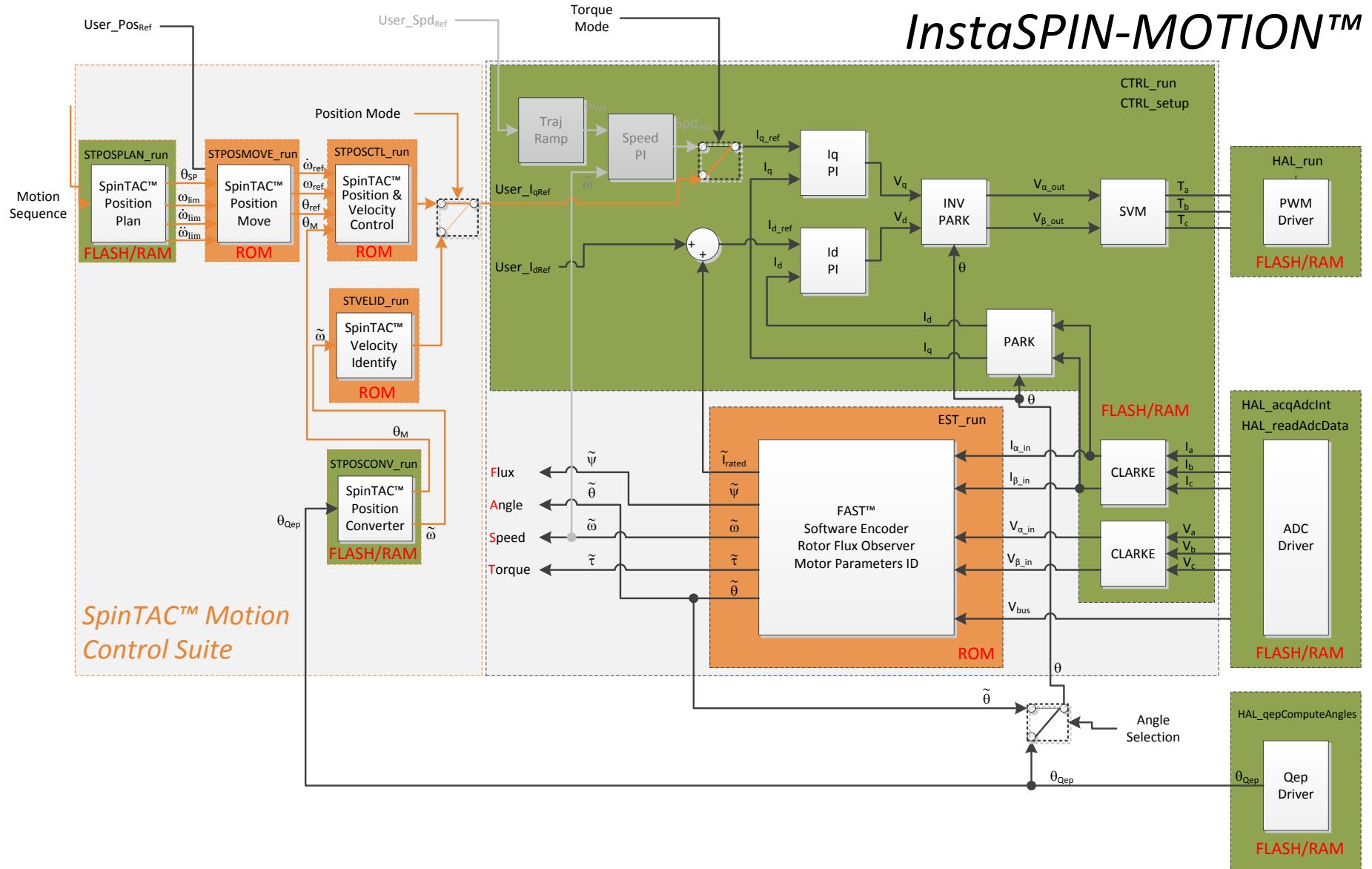


图 10. 机械传感器和冗余 FAST 软件传感器进行的 InstaSPIN-MOTION 位置控制

4 应用示例

InstaSPIN-MOTION 十分适合于需要精确的速度和位置控制以及最小干扰的应用，以及要进行多状态变换或经历动态变化的应用。以下章节中提供的几个示例。

4.1 跑步机传送带：不同速度和负载下的平滑运动。

持续速度控制对于跑步机传送带十分关键。当一个人在跑步机上奔跑时，他们跨步动作干扰了传送带的运动。如果驱动传送带的电机不能快速提供足够的转矩来克服干扰，那么跑步者的跨步动作将被打断。这个问题在用户将变速运动作为他们锻炼方式的一部分时加剧。如果传送带无法平滑加速或减速，那么看起来就好像跑步机无法正常工作。此外，低速时，当用户在传送带上行走时，他们的体重会使得传送带停止。

InstaSPIN-MOTION 被应用于使用 4HP，220V 交流感应电机的商用跑步机，以驱动传送带。此跑步机已在一个变速范围内进行测试：最低 42rpm 到最高速 3300rpm。

客户会发现，InstaSPIN-MOTION 的高级控制器自动对干扰进行补偿，从而在跑动和速度变化情况下保持速度一致。低速时，此控制器防止传送带在负载施加时停止。此外，一个单个增益被用来控制整个工作范围。

4.2 视频摄像机：低速时平滑运动和位置准确度

高端安保和会议室摄像机以极低速运转（例如，0.1rpm），并且需要准确且平滑的位置控制来转动，倾斜和缩放。很难在低速时对驱动这些摄像机的电机进行调节，并且他们通常需要最少四个调整集。此外，启动时会有跳动，这会导致抖动或未聚焦画面。

InstaSPIN-MOTION 被应用于由具有磁编码器的 2 极 BLDC 电机驱动的高精度安保摄像机。InstaSPIN-MOTION 能够使用一个在整个工作范围内都有效的单一调整参数来控制速度和位置。SpinTAC Move 被用来控制电机急动，从而获得平滑启动。

4.3 洗衣机：低速时的平滑运动和位置准确度

周期变换、负载变化和干扰会导致严重的电机磨损。自动、实时的干扰减少能够延长电机的使用寿命和性能。

例如，让我们看一看洗衣机。图 11 显示针对一个标准洗衣机三个阶段的机械运动系统配置。第一阶段代表搅动周期，在 250rpm 到 -250rpm 之间重复旋转。第二和第三阶段代表两个不同的旋转周期。第二阶段的旋转速度为 500rpm，而第三阶段旋转速度为 2000rpm。此系统配置可通过 SpinTAC Plan 轻松创建 [如《InstaSPIN-FOC 和 InstaSPIN-MOTION 用户指南》(SPRUHJ1) 中所述]。

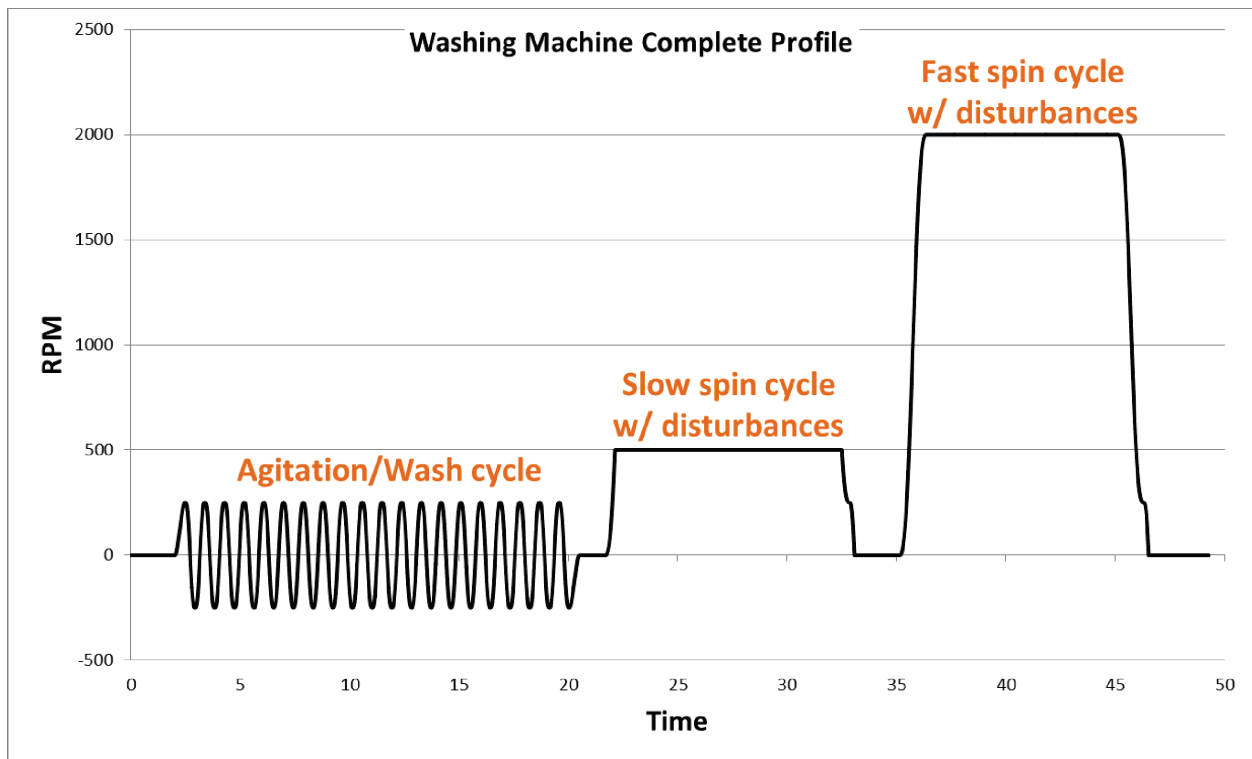


图 11. 洗衣机系统配置

InstaSPIN-MOTION 被施加到一个洗衣机应用中。SpinTAC Plan 轨迹规划特性被用来快速建立不同的运动状态（速度 A 至速度 B），并且将他们与基于状态的逻辑电路关联起来（请见 图 5）。

洗衣机应用运行了两次 - 一次使用一个标准 PI 控制器，一次使用 LineStream 公司的 SpinTAC 控制器。然后，在比较参考曲线上标出数据位置。

搅动周期

搅动期间，电机在 250rpm 和 -250rpm 设定点之间切换 20 次。图 12 中的结果表示 InstaSPIN-MOTION 更加符合基准系统配置。此外，PI 的最大误差为 91rpm (341 - 250 = 91rpm)；反之，SpinTAC 的最大误差为 30rpm (280 - 250 = 30rpm)。

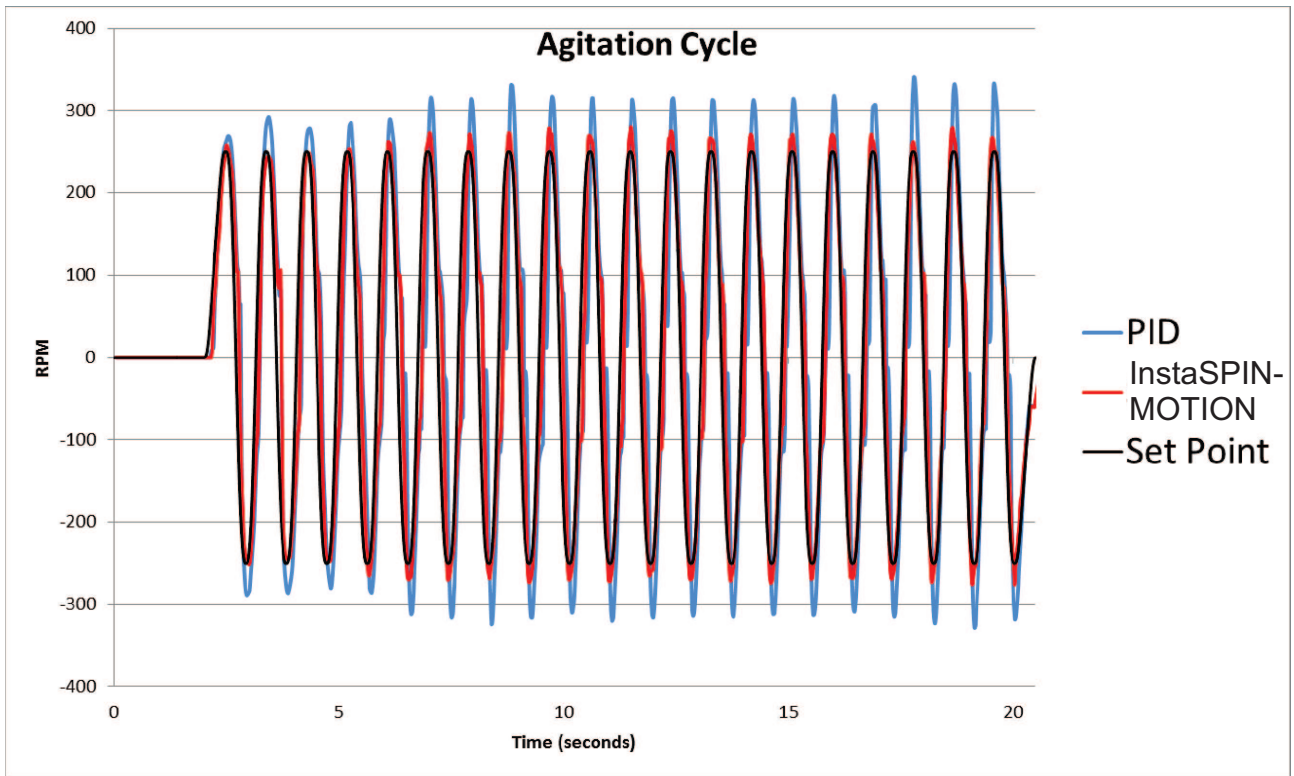


图 12. InstaSPIN-MOTION 最大限度地减少误差

旋转周期

对于第一个旋转周期，目标是保持 500rpm，即使当干扰被引入时也是如此。图 13 表明，相对于 PI 控制器，InstaSPIN-MOTION 从干扰中恢复得更快，并且振荡较少。此外，当它尝试达到初始 500rpm 设定点时，InstaSPIN-MOTION 不会受到 PI 控制器所表现出的过冲和下冲的影响。

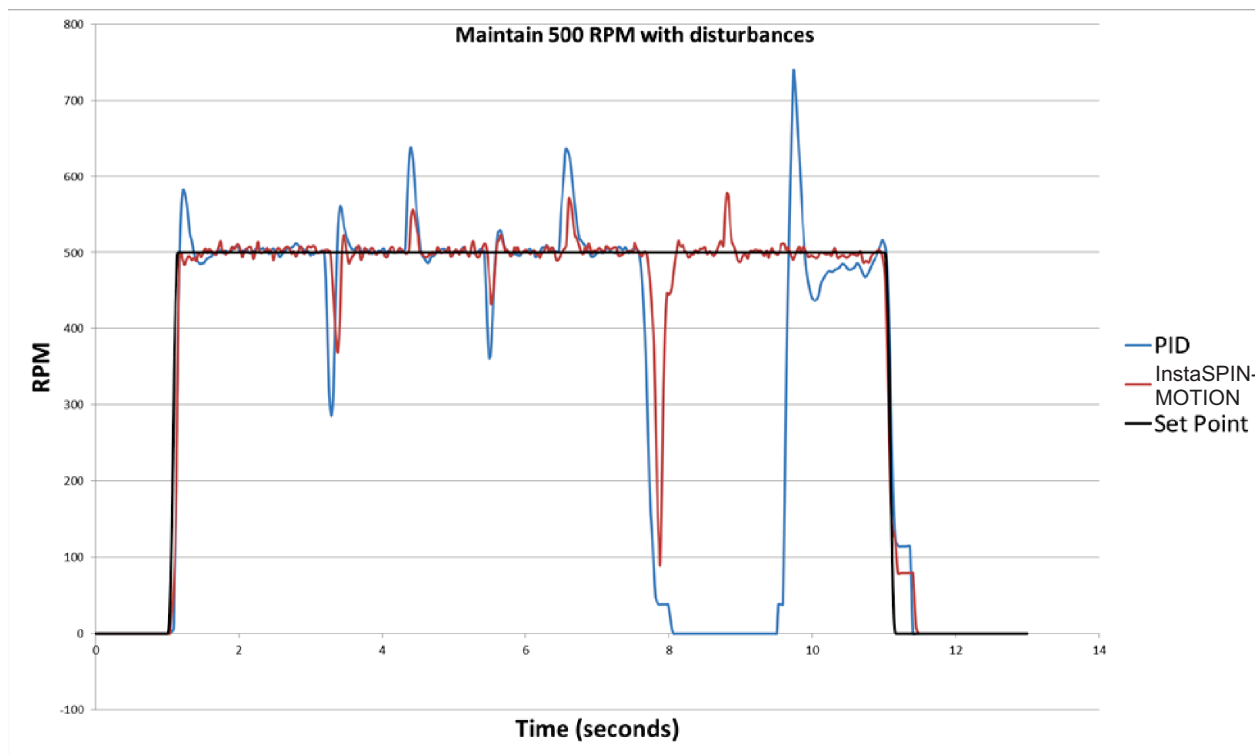


图 13. 第一个旋转周期 - 500rpm

第二个旋转周期期间，如 图 14 中所示，相对于 PI 控制器，SpinTAC 控制器在 2000rpm 时以更快的速度从干扰中恢复，并且振荡更少。请注意，当它尝试达到初始 2000rpm 设定点时，InstaSPIN-MOTION 不会受到 PI 控制器所表现出的过冲和下冲的影响。

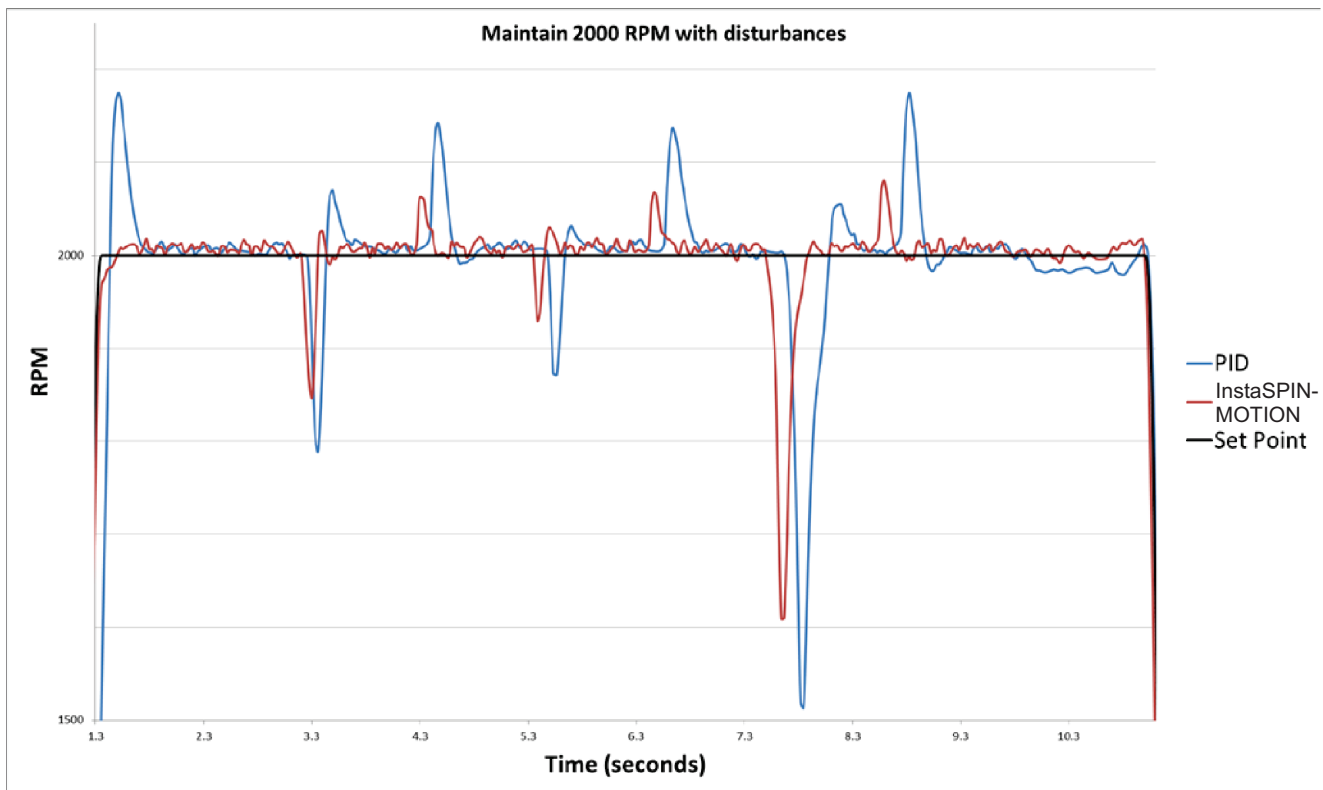


图 14. 第二旋转周期 - 2000rpm

此外，PI 控制器不能从 9.75 秒标记的斜坡干扰中恢复。相反地，它表现出一个大约为 20rpm 的稳定状态误差。

4.4 InstaSPIN-MOTION 在整个工作范围内的运行

在执行洗衣机应用前，InstaSPIN-MOTION 控制器和 PI 控制器被调整一次。从上面所示的示例中可知，InstaSPIN-MOTION 的调整在整个工作范围内起作用。不论电机是在 250rpm 到 -250rpm 间切换，或者是保持在 500rpm 或 2000rpm 旋转周期上，都不需要新的调整集。

5 评估 InstaSPIN-MOTION 性能

大型原始设备制造商 (OEM) 可以与外部设计公司一起工作，以优化他们的调整参数。然而，很多中小型 OEM 在调整他们自己的 PI 控制时也会遇到问题。借助于 InstaSPIN-MOTION，OEM 能够节省几周的调整时间。

虽然 PI 控制是多用途的，并且适用于很多控制系统，然而调整过程会是复杂且耗时的。相似地，PI 环路的性能在宽工作范围和系统随时间发生动态变化时无法预知。虽然高级控制技术的使用，诸如基于模型的补偿，能够解决这些问题，但是他们需要大量的执行和测试时间。他们也增加了系统复杂度，并且会在系统运动发生变化时导致性能下降。

InstaSPIN-MOTION 通过替换传统 PI 控制来解决这些问题。表 2 中突出显示了这些优势。InstaSPIN-MOTION 组合了高级控制特性，诸如前馈，一个观测器，并且可在调整 PI 控制所需时间的一小部分时间内完成调整。除了必须调整多个控制参数，可通过调整一个针对位置和速度的单个参数来调整 SpinTAC 控制器。一旦被调整，它在宽工作范围内运行。

表 2. PI 与 InstaSPIN-MOTION 间的关系

主题	PI 控制器	InstaSPIN-MOTION
性能	无法预测不同速度和负载下的性能。	补偿工作范围内的干扰。
调整参数	不同速度和负载点需要多组参数。	单个设置通常在整个工作范围内均有效。
调整过程	复杂且无法估算。	简单 - 识别过程花费几分钟。
启动	困难 - 要求控制专业知识。	简单 - 内含专业知识。
干扰恢复	干扰被引入且在转换期间的过冲和下冲。	高级抗扰使设定点保持得更加接近。

InstaSPIN-MOTION 被设计成在所有类型的系统中执行。在不受外部影响的系统中，InstaSPIN-MOTION 控制器通过消除转换期间的过冲和下冲来证明其性能优势。

在受到外部干扰影响的系统中，InstaSPIN-MOTION 控制器可提供高级抗扰，从而将可由标准 PI 控制实现的设定点保持得更加接近，如 图 15 和 图 16 中所示。

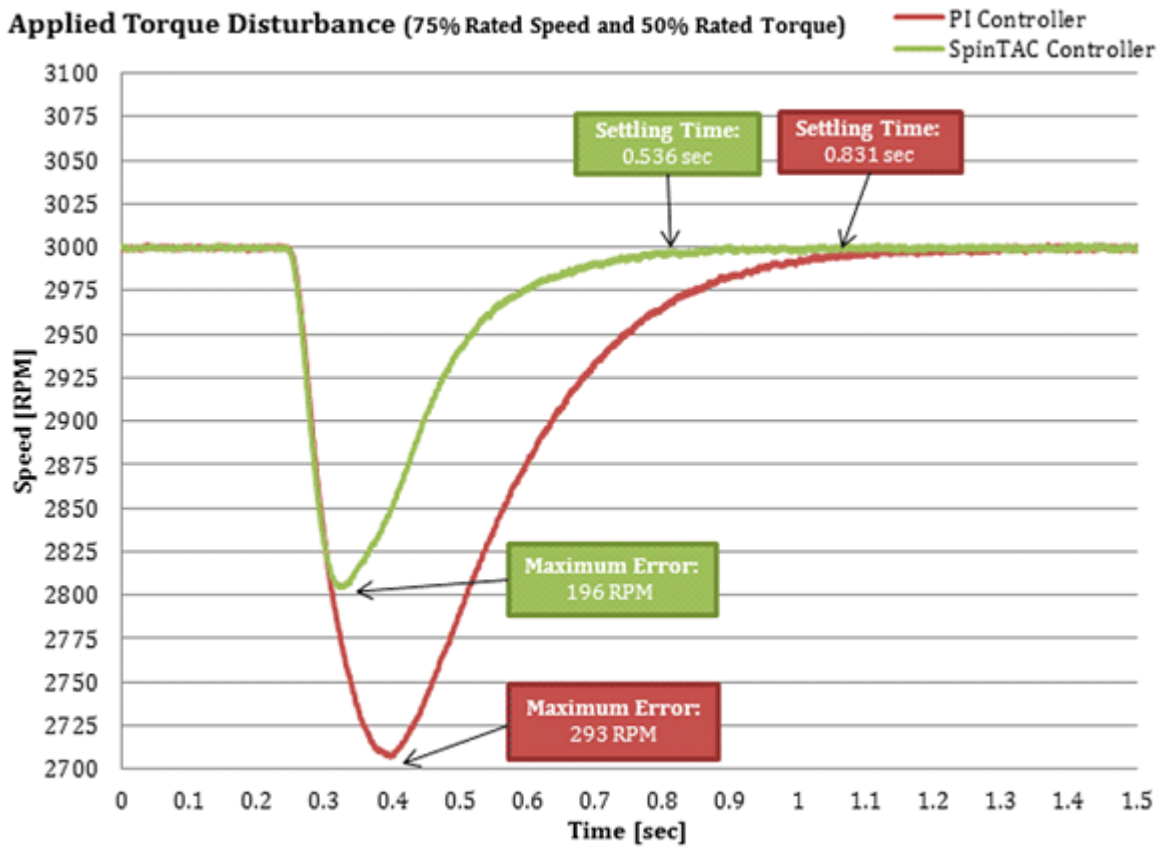


图 15. 施加转矩干扰比较

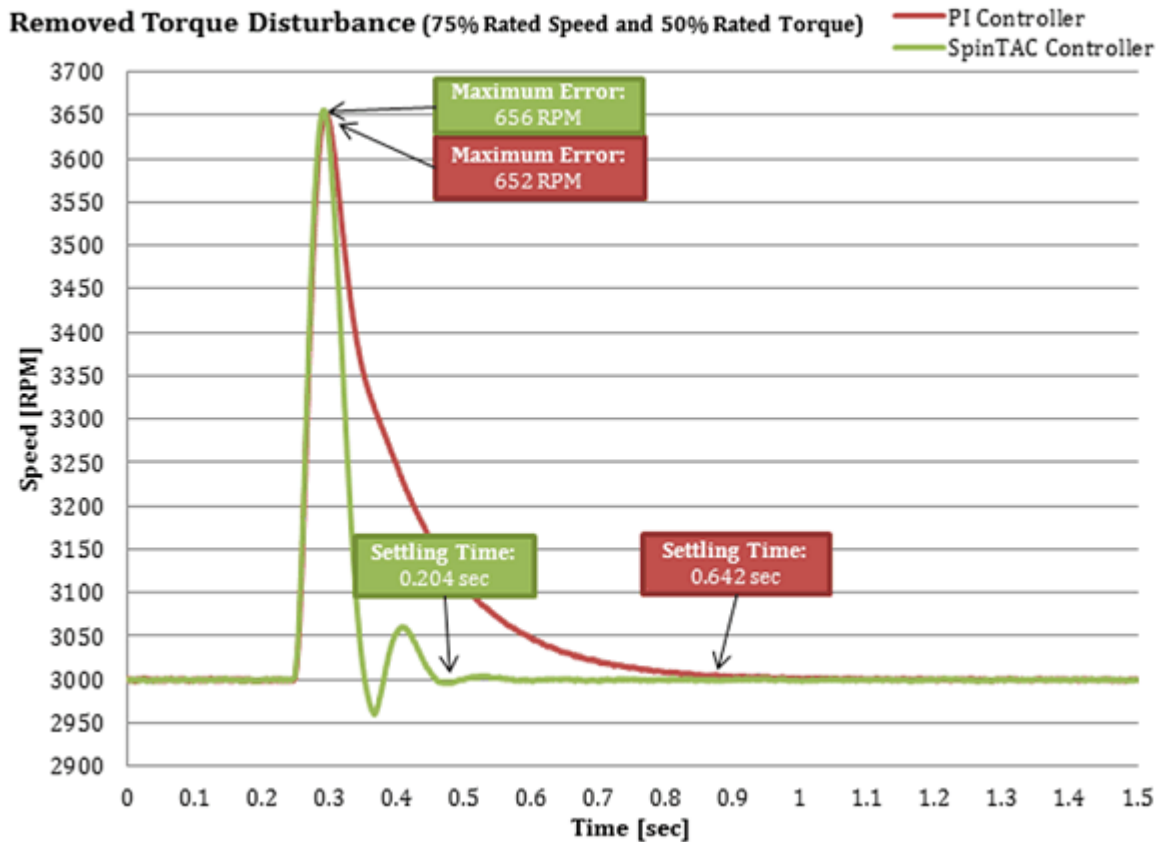


图 16. 移除转矩干扰比较

从您的机械运动系统中获得最佳性能是十分重要的。未经良好调节的稳压器会导致能源浪费、材料浪费，或者使系统不稳定。为了确定控制器在您的应用中工作状态如何，有必要在很多不同的速度和负载工作点上评估速度和位置控制器性能。

可根据很多不同的因素对速度和位置控制器进行比较。然而，两个衡量标准 - 抗扰和系统配置跟踪 - 可被用来测试性能，并且确定您的控制器对于您的应用被调整的如何。

试验台说明

使用以下设备来执行测试：

- TMS320F28054M 控制卡 (InstaSPIN-MOTION 版本1.6)
- 德州仪器 (TI) Code Composer Studio 版本 5.3
- 德州仪器 (TI) 逆变器：
 - DRV8301-69M-KIT
 - TMDSHVMTRPFCKit 版本 1.1
- 电机：
 - Teknic M2310P
 - Estun EMJ-04APB22
- 测力计
 - Magtrol HD-715 测力计

- Magtrol DSP7001 控制器
- Magtrol 6510e 功率分析仪
- 直流电源

5.1 速度控制性能: SpinTAC 与 PI 相比较

对于速度控制, 我们已比较了 SpinTAC 控制器与 PI 控制器的性能。这两种控制器均使用 FAST 软件观测器。

每个控制器可使用同一种方法进行调整。对于 Estun 电机, 通过在电机以 100% 额定速度 (3000rpm) 运转的同时, 注入 25% 额定转矩 (45 oz-in) 干扰来用实验的方法调整这些控制器。这导致以下增益:

- PI 速度控制器
 - $K_p = 20$
 - $K_i = 0.098$
- SpinTAC 速度控制器
 - 带宽 = 35 弧度每秒

用与电机耦合的达因数估算 SpinTAC 速度控制器所使用的惯性。发现这个值为 0.483 A/(krpm/s)。

对于 Teknic 电机, 通过在电机以 50% 额定速度 (2000rpm) 运转的同时, 注入 50% 额定转矩 (19.4 oz-in) 干扰来用实验的方法调整这些控制器。这导致了以下增益:

- PI 速度控制器
 - $K_p = 9$
 - $K_i = 0.03$
- SpinTAC 速度控制器
 - 带宽 = 16 弧度每秒

用与电机耦合的达因数估算 SpinTAC 速度控制器所使用的惯性。发现这个值为 4.23 A/(krpm/s)。

这些增益在所有测试过程中保持恒定。这样做是为了突出显示 SpinTAC 速度控制器的宽工作范围。

5.1.1 抗扰

抗扰测试控制器对影响电机速度的外部干扰的补偿能力。在抗扰测试中, 在系统上施加一个负载转矩, 保持一个较短时间, 然后从系统中移除。图 17 是一个抗扰测试的示例。使用最大速度误差和稳定时间来测量控制器响应。最大速度误差显示从目标速度的偏离, 并且表示出对您的控制器进行调整的积极程度。积极调整产生一个低最大误差。在图 17 中, PI 控制器表现出大于 SpinTAC 控制器的最大速度误差, 这表示 SpinTAC 控制器在对系统误差进行补充时响应更快。

Disturbance Rejection Test (50% Rated Speed and 50% Rated Torque)

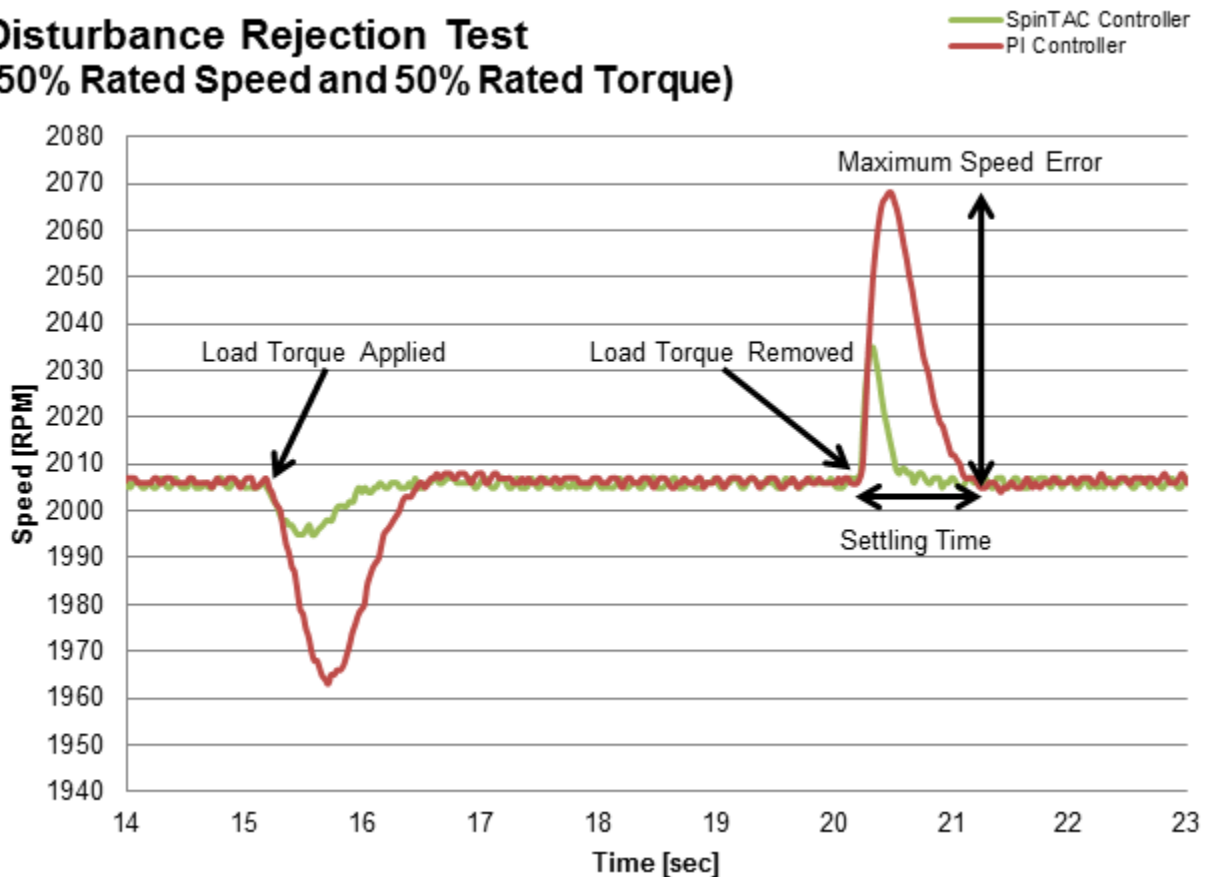


图 17. 最大速度误差和稳定时间的抗扰测试

稳定时间是指从干扰发生的时间点到速度返回至一个目标速度附近的固定范围内所需要的时间。这也表示出您的控制环路调整的积极程度。如果控制器的调整过于积极，控制器的稳定时间将会比较长，这是因为控制器将在稳定前在目标速度附近振荡。在图 17 中，PI 控制器的稳定时间要长于 SpinTAC 控制器的稳定时间。请注意，由于这两个控制器稳定返回至目标速度，所以两个控制器的振荡都很小。

当在系统上施加负载，并且当把负载从系统中移除时，稳定时间会有所不同。当一个负载被施加到电机上时，控制器会达到饱和，在这个饱和点上，控制器的输出受到限制。然而，当负载被移除时，电机从负载状态转换为零负载。稳定时间和过冲完全取决于控制器。图 18 显示这个情况的一个示例，在这个示例中，控制器被置于饱和状态。

Disturbance Rejection Test (100% Rated Speed and 50% Rated Torque)

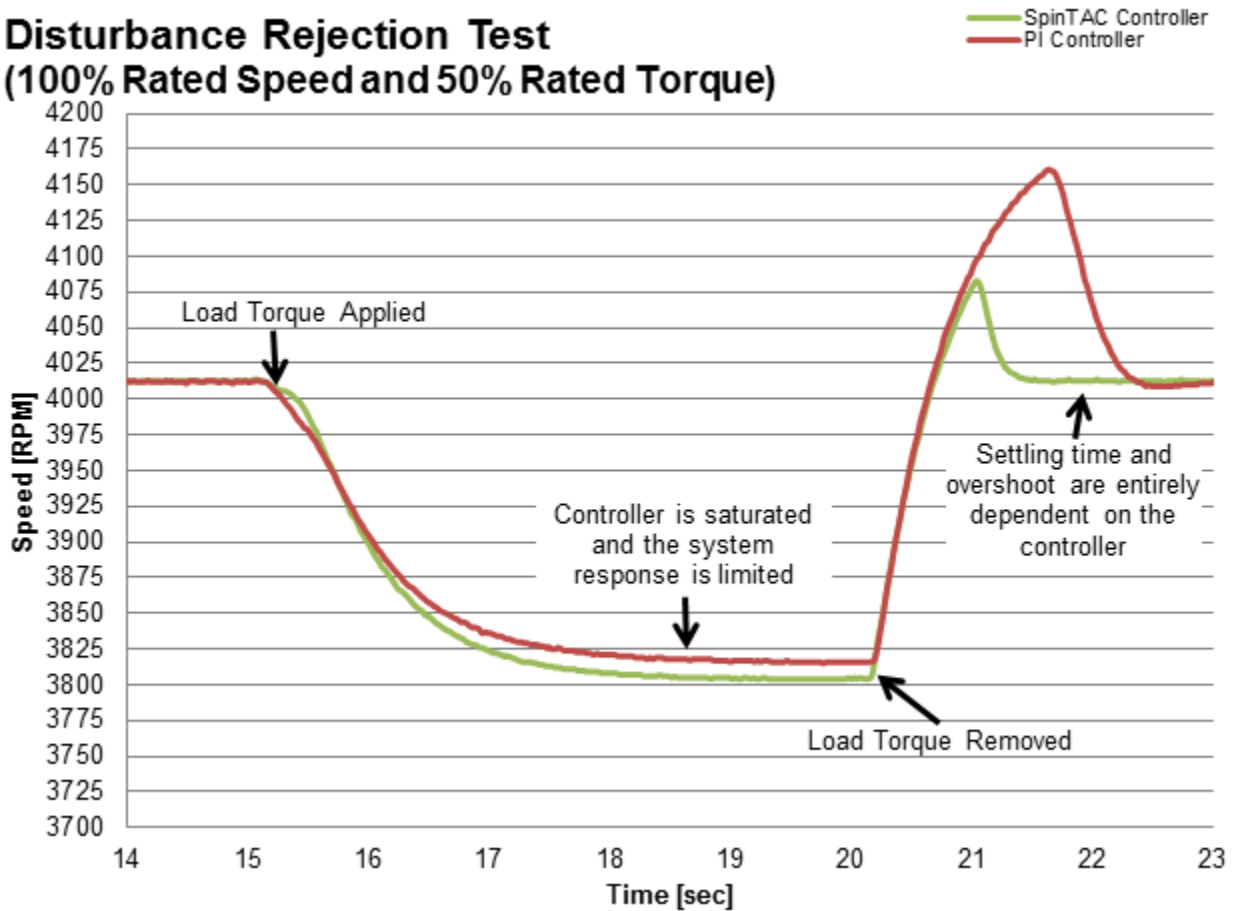


图 18. 控制器饱和时的抗扰测试

当执行抗扰测试时，在多个速度和负载组合下进行测试很重要。当被置于不同条件下时，速度控制器具有不同的性能特点。为了正确评估速度控制器的效率，应该在应用工作范围内执行测试。这些测试结果将表示此控制器是否符合应用技术规格的要求，或者是否需要针对不同的运行点进行多次调整（增益调度）。以下测试结果对应于九种不同的速度和负载组合，表明对具体运行进行了广泛测试。

能够创建可重复的干扰也很重要。这一要求可通过使用一个测力计或扰动电机来实现。在评估多个控制器时，创建可重复干扰是一个重要因素。如果测试条件不能被复制，那么就很难充分地比较多个控制器的响应。

对于表 4 和表 3 中显示的测试结果，创建了干扰负载系统配置，将 25%，50% 和 100% 额定转矩施加到电机上。此测试比较了 SpinTAC 速度控制器与一个标准 PI 控制器的性能，并且针对每个控制器对以下参数进行了测量：

- 平均恢复时间（从干扰点直到目标速度的 2% 以内）：在负载被施加，以及负载从系统中移除时测量平均恢复时间。
- 绝对平均速度误差：系统干扰被引入时，距离目标速度的正偏离或负偏离。
- 最大速度误差：干扰被引入时，距离目标速度的最大偏离。

表 3. SpinTAC 与 PI 抗扰测试结果比较（对于 Teknic 电机）

	1000rpm			2000rpm			4000rpm		
	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)
25% 额定转矩									
平均恢复时间 (单位秒) - 负载被施加	1.34	1.84	27.34	1.20	1.67	28.27	0.85	1.79	52.46
平均恢复时间 (单位秒) - 负载被移除	0.43	0.93	53.29	0.41	0.89	53.55	0.54	1.02	46.82
绝对平均误差 (rpm)	3.06	4.16	26.44	5.98	6.63	9.74	12.23	12.42	1.53
平均最大误差 (rpm)	17	29	41.38	16	27	40.74	18	26	30.77
50% 额定转矩									
平均恢复时间 (s) - 负载被施加	1.01	1.33	23.81	1.01	1.45	30.34	4.98	5.04	1.19
平均恢复时间 (s) - 负载被移除	0.51	1.04	51.30	0.56	1.06	46.52	1.33	2.54	47.20
绝对平均误差 (rpm)	3.7	7.9	53.16	6.21	10.2	39.12	81.92	87.66	6.55
平均最大误差 (rpm)	36	71	49.30	35	69	49.28	197	185	-6.49
100% 额定转矩									
平均恢复时间 (s) - 负载被施加	0.76	1.20	36.67	0.78	1.16	32.73	4.98	5.08	1.95
平均恢复时间 (单位秒) - 负载被移除	0.40	1.00	59.84	0.52	1.02	48.89	1.90	3.12	39.09
绝对平均误差 (rpm)	5.4	15.39	64.91	7.99	17.54	54.45	345.42	360.74	4.25
平均最大误差 (rpm)	87	158	44.94	80	151	47.02	829	837	0.96

表 4. SpinTAC 与 PI 抗扰测试结果比较（对于 Estun 电机）

	750rpm			1500rpm			3000rpm		
	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)
25% 额定转矩									
平均恢复时间 (s) - 负载被施加	0.69	1.52	54.34	0.60	1.36	57.96	0.60	1.35	52.87
平均恢复时间 (s) - 负载被移除	0.42	1.12	61.75	0.40	1.03	61.58	0.41	1.01	59.01
绝对平均误差 (rpm)	1.97	3.81	48.13	3.05	5.25	41.90	6.16	9.08	32.12
平均最大误差 (rpm)	37	47	21.28	36	47	23.40	38	49	22.45
50% 额定转矩									
平均恢复时间 (s) - 负载被施加	0.35	1.31	72.97	0.33	1.33	76.23	0.36	1.13	67.07
平均恢复时间 (s) - 负载被移除	0.44	1.36	67.32	0.40	1.25	68.02	0.364	1.14	67.33
绝对平均误差 (rpm)	2.67	5.91	54.87	3.86	7.13	45.89	6.89	11.14	38.19
平均最大误差 (rpm)	76	96	20.83	74	95	22.11	76	97	21.65
100% 额定转矩									
平均恢复时间 (s) - 负载被施加	0.56	2.26	75.09	0.5	2.14	76.68	4.98	5.06	1.58
平均恢复时间 (s) - 负载被移除	0.38	1.16	66.78	0.4	0.92	55.93	0.44	0.74	40.60
绝对平均误差 (rpm)	8.64	57.98	85.09	9.54	59.95	84.09	94.25	103.74	9.15
平均最大误差 (rpm)	440	697	36.87	440	665	33.83	585	646	9.44

5.1.2 基准跟踪

基准跟踪测试控制器跟随变化的目标速度的程度。这个测试中评估的两个衡量标准是最大误差和绝对平均误差。最大速度误差显示速度变化时，控制器过冲的大小。这个值表示您控制器调整的积极程度。如果控制器的调整不够积极主动，速度将超过目标值，并且需要花费较长的时间恢复。如果控制器的调整过于积极主动，它将过冲，然后在稳定至目标速度时发生振荡。如果控制器被正确调整，它的过冲值最小，然后平稳返回至目标速度。

绝对平均误差是整个系统配置范围内瞬时速度误差绝对平均值。这个测量结果显示整个系统配置上的偏离量。它将电机运行时的全部小值误差考虑在内。如果控制器的调整过于积极，它将导致较大的绝对平均误差，这是由控制器将在整个系统配置内振荡所造成的。如果控制器的调整不够积极，则会导致较大的绝对平均误差，因为电机将持续落后于系统配置。

创建一个跟踪系统配置，以一个重复模式来使用电机。此系统配置被用来比较 SpinTAC 和 PI 控制器的性能。此系统配置已包括快速转换以及逐渐全面转换。图 19 是基准跟踪测试期间所使用的速度系统配置的图表。图表的遮挡区域是详细显示 SpinTAC 和 PI 控制器之间不同的额外图表区域。

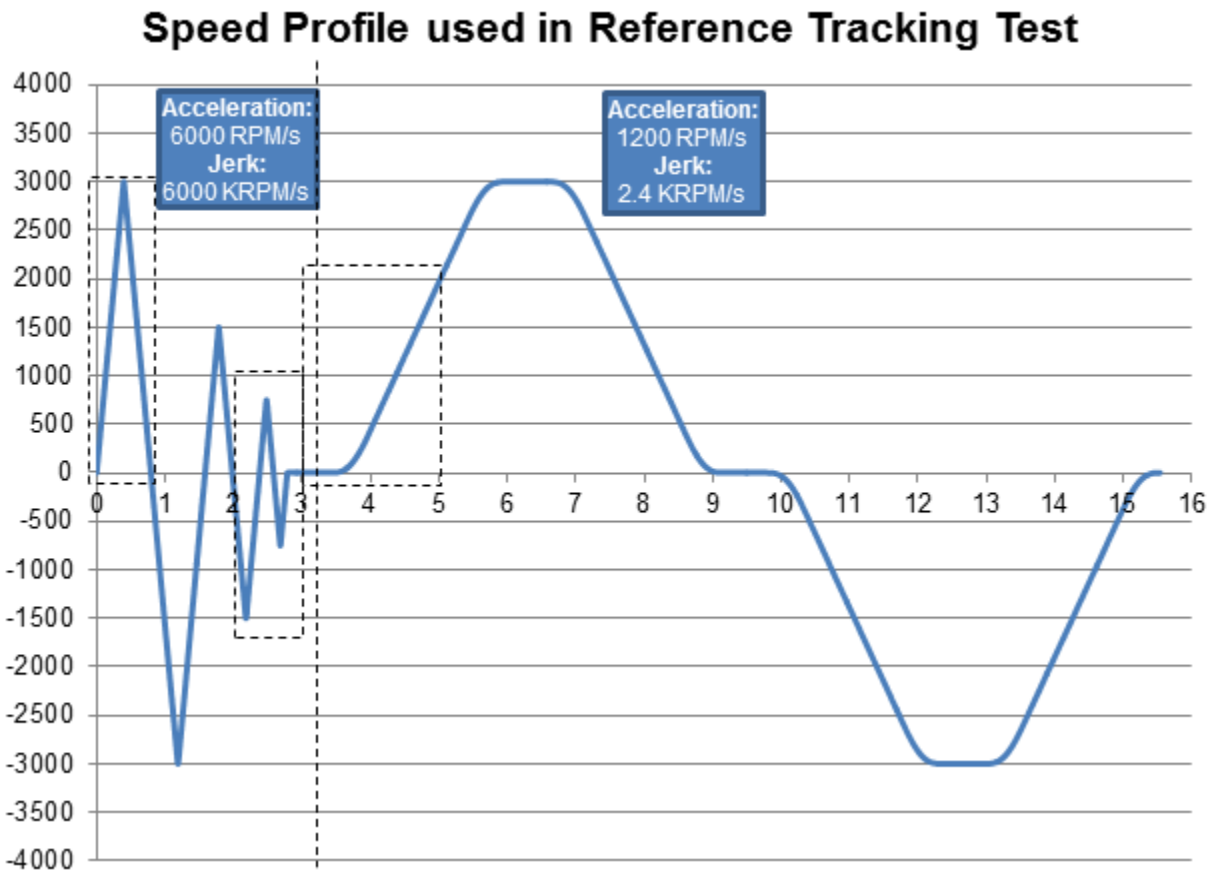


图 19. 基准跟踪测试期间使用的速度系统配置

除了系统配置跟踪的绝对平均误差和最大误差，应该突出显示并且评估 SpinTAC 和 PI 控制器的某些差异。图 20 显示在发生剧烈变化时，PI 控制器超过速度基准的程度。然后，它花费很长的时间从那个初始误差中恢复，而 SpinTAC 控制器在剧烈基准变化时不会出现问题。

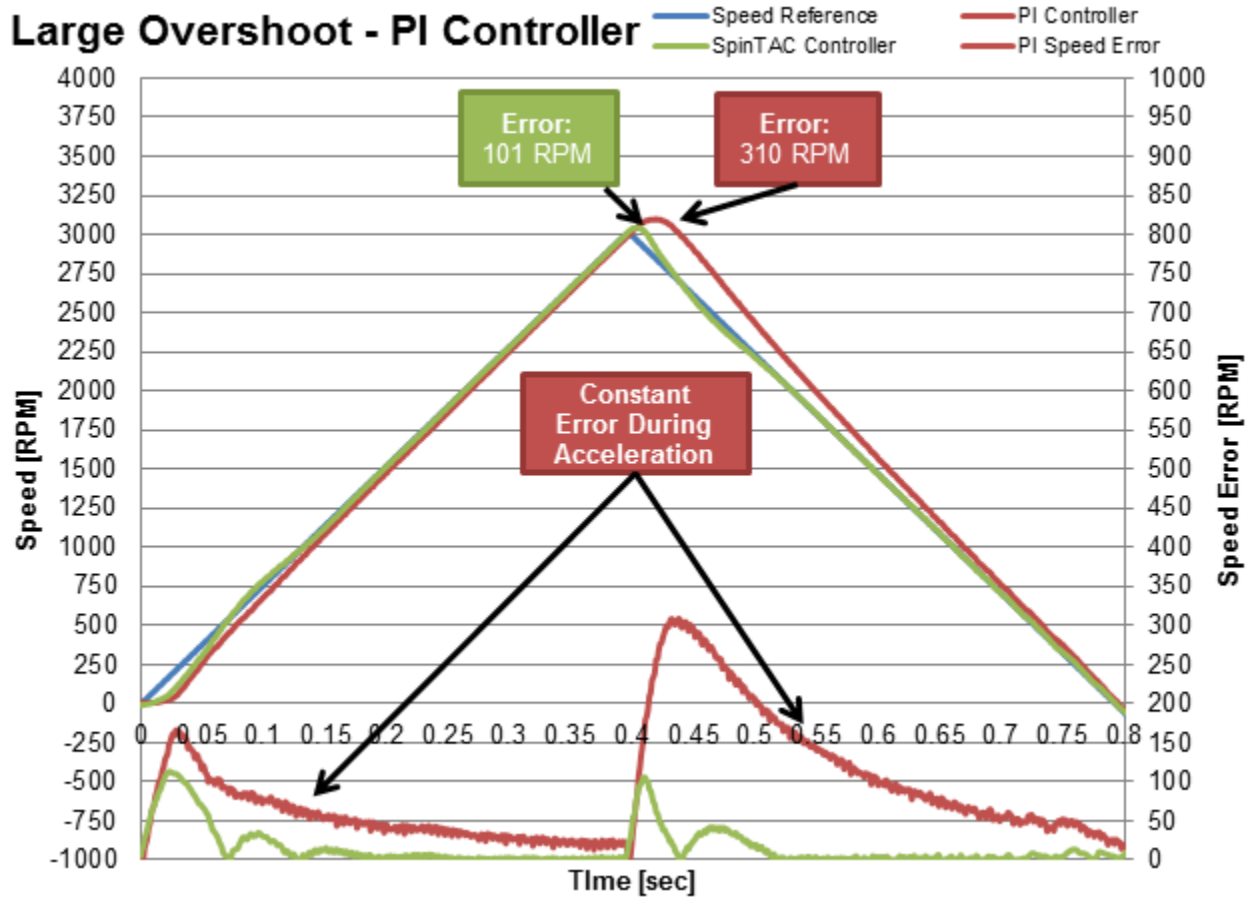


图 20. 基准跟踪期间针对 PI 控制器的较大过冲

图 21 显示在基准继续发生剧烈变化时，PI 控制器的落后于基准的程度。PI 控制器不能跟上速度基准，而 SpinTAC 控制器在准确跟踪速度基准时没有问题。

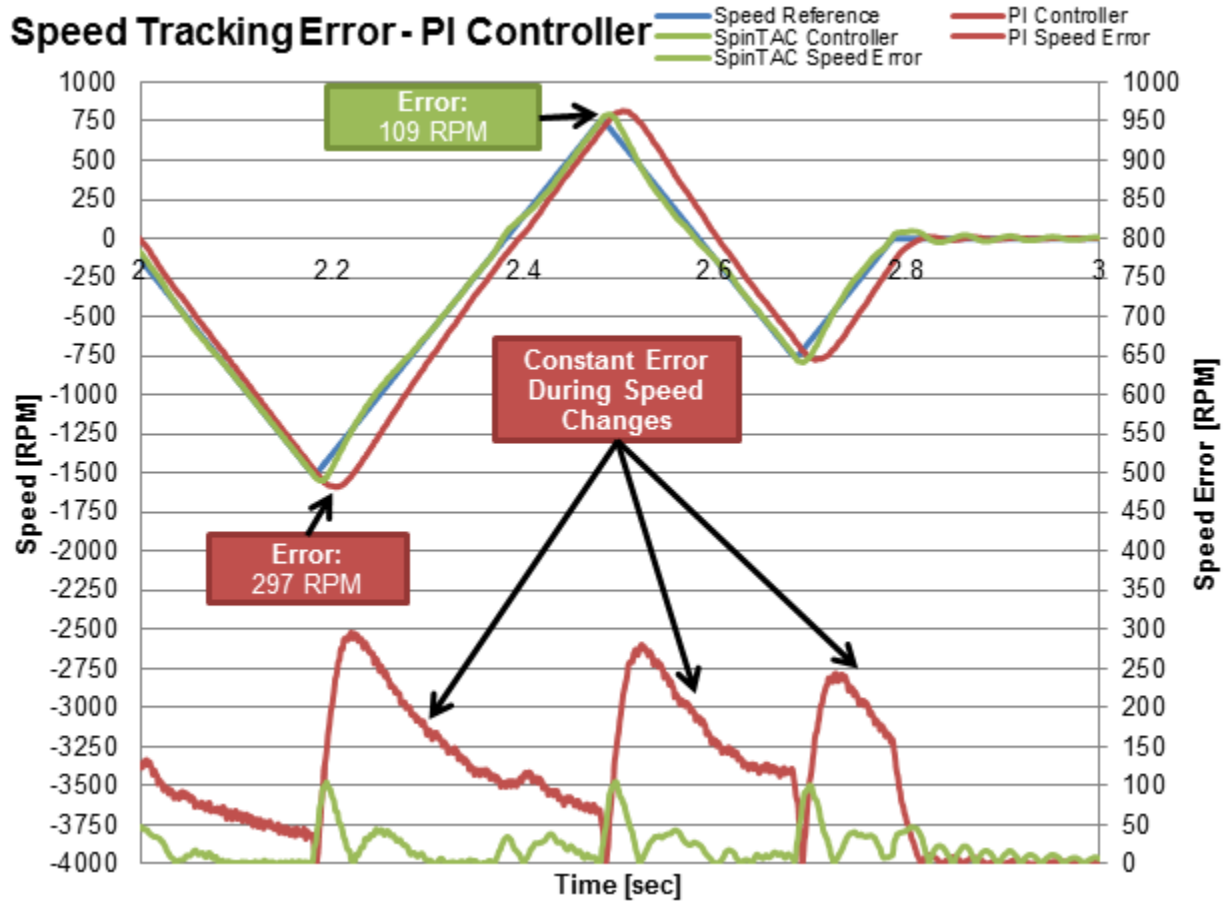


图 21. 基准跟踪期间针对 PI 控制器的速度跟踪误差

当从零速度启动并且轨迹变化较慢时，PI 控制器遇到的困难比 SpinTAC 控制器遇到的困难更多。这是因为 SpinTAC 控制器具有跟踪一个变化的基准信号的出色能力。图 22 显示基准跟踪测试中这一跟踪能力的示例。

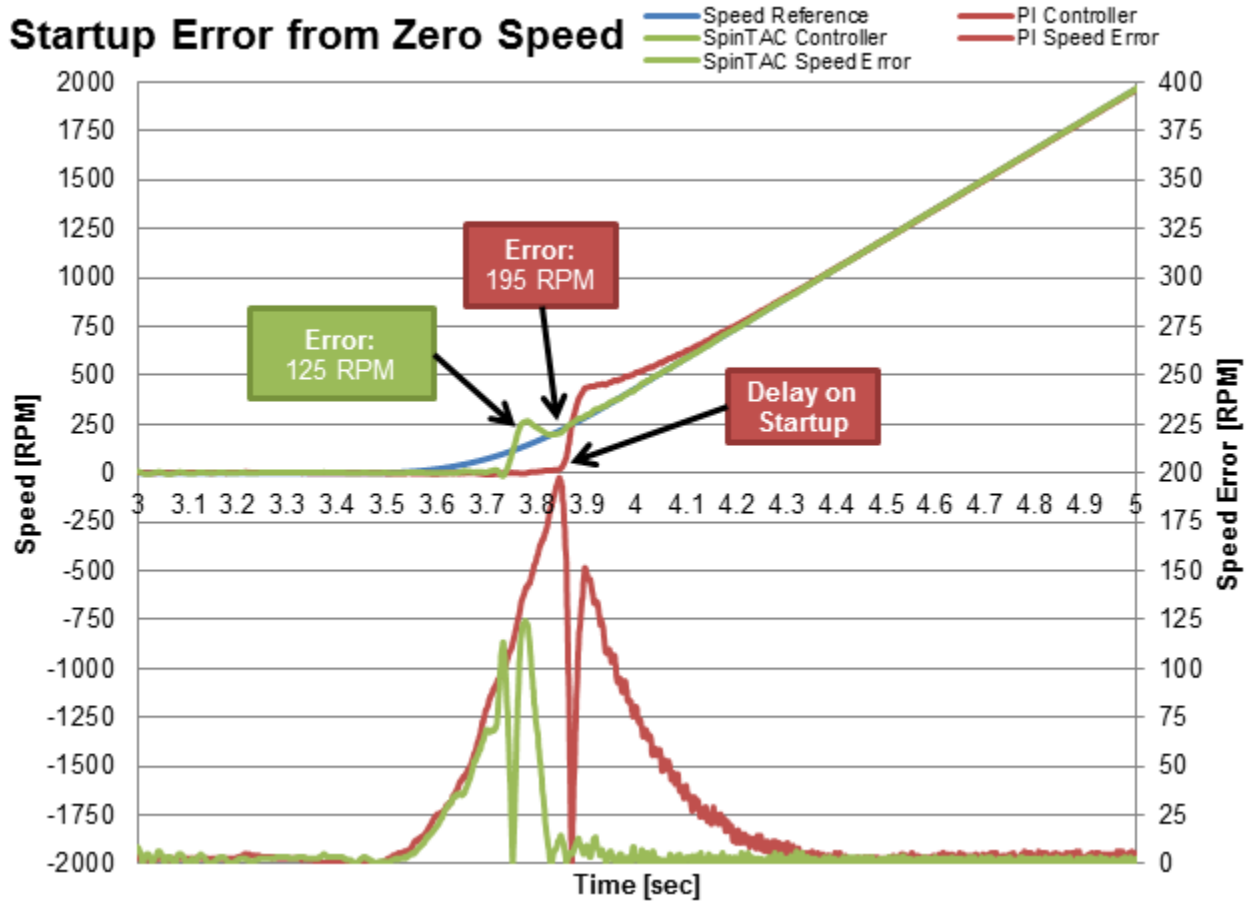


图 22. PI 控制器零速度启动的启动误差

在您的系统配置中测试多个速度和加速度以及多个不同负载同样重要。当被置于不同情况下，速度控制器具有不同的性能特点。为了完全评估您的速度控制器的效率，应该在应用范围内执行测试。这包括您何时为测试设计系统配置。设计时应该注意，以确保在系统配置中建立应用速度和加速度。这些测试结果将告诉您控制器是否满足应用技术规格，或者您的控制器是否需要针对不同的运行点进行多次调整。请注意，图 19 中测试了宽范围的速度和加速度。

创建可重复系统配置也很重要。可通过 pinTAC Move 和 SpinTAC Plan 创建可重复系统配置 [《InstaSPIN-FOC 和 InstaSPIN-MOTION 用户指南》（文献编号 SPRUHW1）提供了关于 SpinTAC Move 和 SpinTAC Plan 的详细信息，MotorWare 库中提供了各实验项目]。需要可重复系统配置，这样，可使用顺序一致同一基准，在相同的时间长度内测试全部控制器。这样确保了测试条件尽可能一样。使用 SpinTAC Move 和 SpinTAC Plan 来生成针对这个测试的系统配置，以确保提供给 SpinTAC 和 PI 控制器的系统配置完全一样。

测量了以下参数：

- 绝对平均速度误差：整个速度系统配置范围内，距离目标速度的正偏离或负偏离。
- 最大速度误差：速度系统配置期间，距离目标速度的最大偏离。

表 5. SpinTAC 与 PI 控制器跟踪测试结果比较

	梯形曲线			st-Curve		
	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)
Teknic 电机						
绝对平均误差 (rpm)	6.01	19.94	69.86	5.98	19.51	69.35
最大误差 (rpm)	266.06	430.00	38.13	263.00	334.71	21.42
Estun 电机						
绝对平均误差 (rpm)	5.39	16.11	66.54	5.73	16.124	64.46
最大误差 (rpm)	248.29	312.74	20.61	181.64	307.61	40.95

5.1.3 阶跃响应

阶跃响应测试一个控制器对意外输入变化的响应速度。这个测试中评估的两个衡量标准为稳定时间和最大过冲。这个测试还测量了您的控制器的稳定性。如果控制器在达到目标速度时发生振荡，那么他非常不稳定。

阶跃系统配置被施加到每个控制器。这个阶跃输入绕过了系统配置发生器。测量了以下参数：

- 稳定时间（从阶跃输入直到目标速度的 **2%** 以内）：稳定时间反映出控制器达到目标速度所需的时间，以及使电机的速度进入目标速度附近的一个窄带范围内所需的时间。
- 最大过冲：阶跃输入后，电机达到的最大速度。

图 23 比较 SpinTAC 和 PI 控制器的阶跃响应。它还给出了这些衡量标准计算的可视化表示。SpinTAC 控制器能够以零过冲和最少的稳定时间达到目标速度。它实现最少稳定时间的原因是由于此控制器不允许电机超过目标速度。

Step Response Test (0 to 100% Rated Speed)

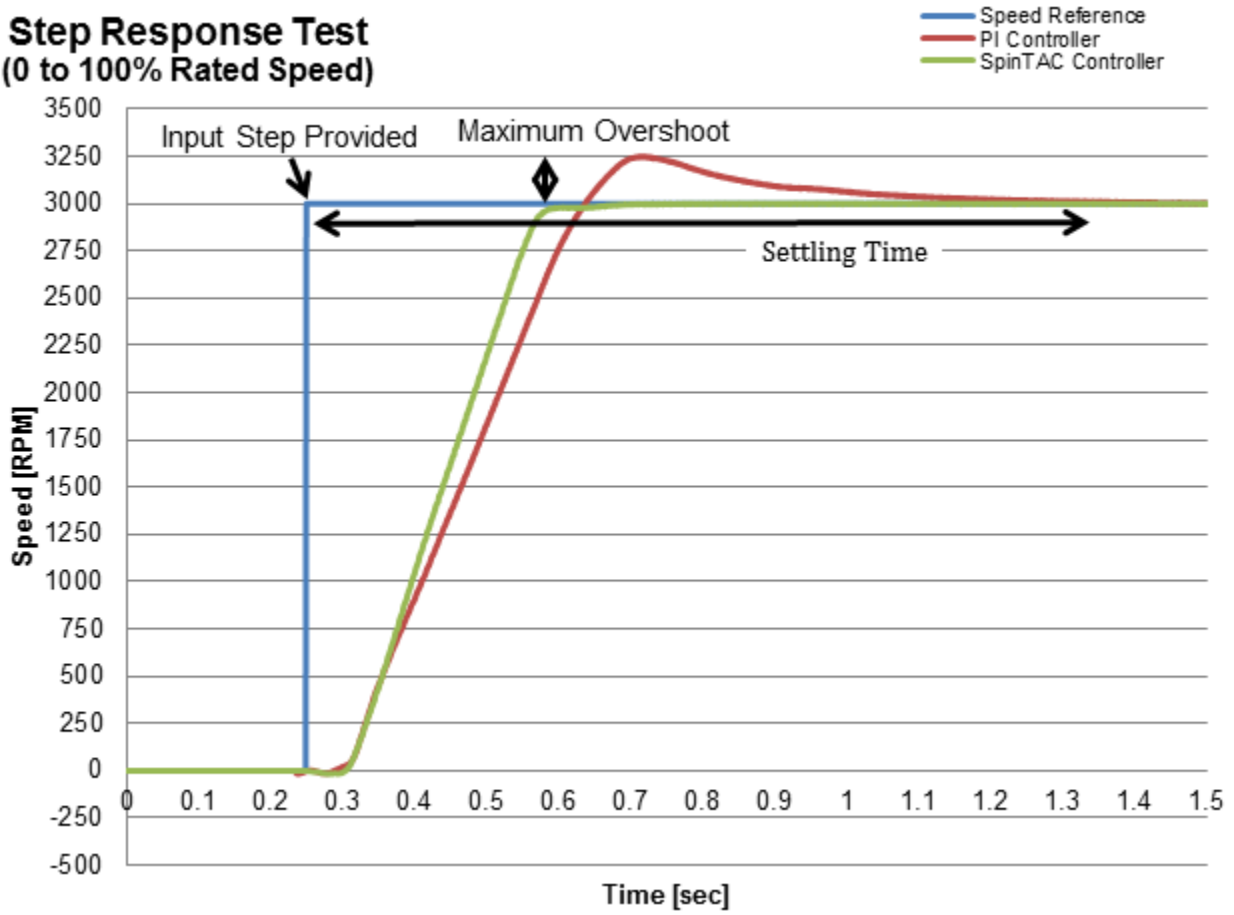


图 23. 最大过冲和稳定时间的阶跃响应

表 6. SpinTAC 与 PI 阶跃响应测试结果比较（对于 Teknic 电机）

稳定时间 (s)			过冲 (rpm)		
SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)
0 - 4000rpm					
2.67	3.45	22.66	73	140.4	48.01
2.48	3.39	26.84	71.5	139.6	48.78
2.52	3.51	28.21	70.1	138.2	49.28
2.54	3.59	29.25	71.5	138.2	48.26
2.64	3.39	22.12	70.1	139.6	49.79
0 - 2000rpm					
0.84	1.51	44.37	317	319.6	0.81
0.9	1.42	36.62	325	320.3	-1.47
0.86	1.42	39.44	332	320.3	-3.65
0.93	1.45	35.86	390	320.3	-21.76
0.92	1.42	35.21	325	319.6	-1.69
0 - 1000rpm					
0.65	1.28	49.38	239	316.2	24.41
0.79	1.1	28.18	269	317.6	15.3
0.57	1.27	55.12	195	319.1	38.89
0.59	1.38	57.25	203	318.4	36.24
0.59	1.18	50	24.16	318.4	38.76

表 7. SpinTAC 与 PI 阶跃响应测试结果比较（对于 Estun 电机）

稳定时间 (s)			过冲 (rpm)		
SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)
0 - 3000rpm					
0.44	1.16	61.81	2.9	250.5	98.84
0.54	1.1	50.91	2.9	251.2	98.85
0.38	1.32	71.21	2.9	252.7	98.85
0.4	1.21	66.94	2.9	252	98.85
0.42	1.41	70.21	2.9	252.7	98.85
0 - 1500rpm					
0.25	1.12	78	3.7	261.5	98.59
0.37	1.3	71.54	19	262.2	92.75
0.47	1.12	58.04	3.7	263.7	98.6
0.42	1.1	61.82	3.7	263.7	98.6
0.44	1.13	61.06	3.7	262.9	98.59
0 - 750rpm					
0.41	0.81	49.63	63.72	286.4	77.75
0.32	0.61	47.54	76.17	179.44	57.55
0.43	0.71	39.44	71.04	279.8	74.61
0.32	0.62	48.39	13.91	292.2	95.24
0.32	0.73	56.16	24.16	177.97	86.42

5.2 位置控制性能: SpinTAC 与 PI 对比

对比 SpinTAC 位置控制与典型 PI-PI 控制系统的性能。每个控制器可使用同一种方法进行调整。

Estun 电机使用 2500 线编码器。这两款控制器均通过在电机以 100% 额定速度 (3000rpm) 运转时注入 25% 额定转矩 (45 oz-in) 干扰来进行调整, 从而获得以下增益:

PI 控制系统

- 位置环路
 - $K_p = 20$
 - $K_i = 0.002$
- 速度环路
 - $K_p = 23$
 - $K_i = 0.5$

SpinTAC 位置控制 (位置与速度采用单个增益)

- 带宽 = 36 弧度每秒

用与电机耦合的达因数来估算 SpinTAC 位置控制所使用的惯性。发现这个值为 0.44 A/(krpm/s)。

Teknic 电机使用 1000 线编码器。这两款控制器均通过在电机以 50% 额定速度 (2000rpm) 运转时注入 50% 额定转矩 (19.4 oz-in) 干扰来进行调整。这产生了以下增益:

PI 控制系统

- 位置环路
 - $K_p = 17$
 - $K_i = 0.01$
- 速度环路
 - $K_p = 1.2$
 - $K_i = 0.1$

SpinTAC 位置控制 (位置与速度采用单个增益)

- 带宽 = 50 弧度每秒

用与电机耦合的达因数来估算 SpinTAC 位置控制所使用的惯性。发现这个值为 0.07A/(krpm/s)。

这些增益在所有测试过程中保持恒定。这些测试是为了突出显示 SpinTAC 位置控制的宽工作范围。

5.2.1 抗扰

抗扰测试体现了控制器对影响电机位置的外部干扰的补偿能力。此测试中，在系统上施加一个负载转矩，保持一段较短时间，然后将其从系统中移除。图 24 是一个抗扰测试的示例。使用最大位置误差和稳定时间来测量控制器响应。最大位置误差显示距基准位置的偏离，指示控制器调整的积极程度。积极调整产生一个低最大误差。在图 24 中，PI 控制器表现出大于 SpinTAC 控制器的最大误差，这表示 SpinTAC 控制器在对系统误差进行补充时响应更快。

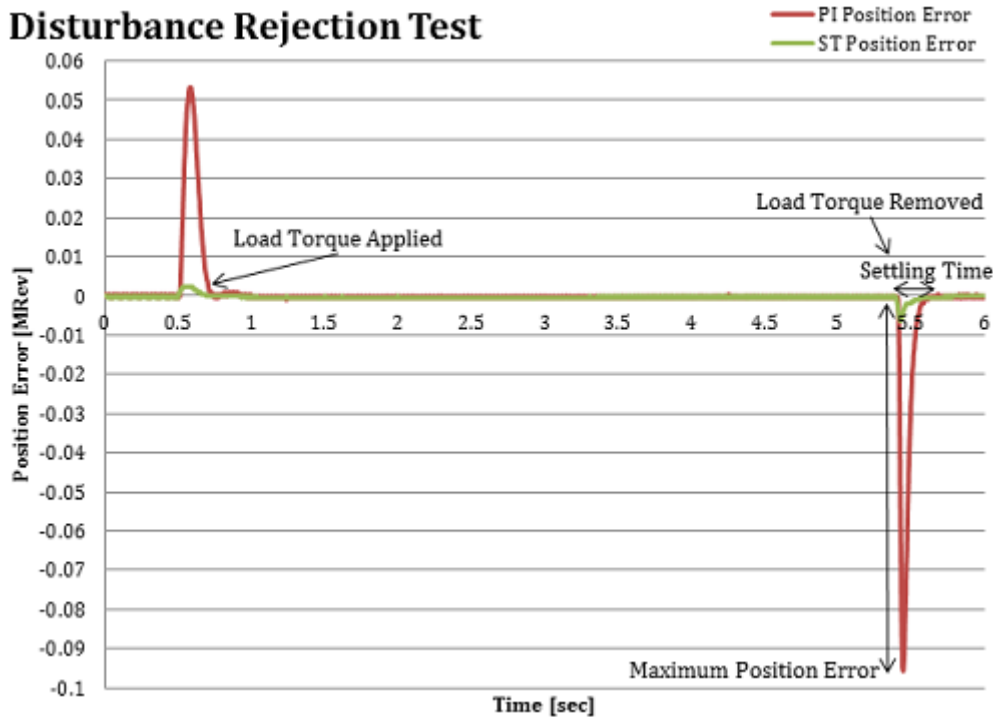


图 24. 最大位置误差和稳定时间的抗扰测试

稳定时间是指从干扰发生的时间点到位置反馈返回至一个目标位置基准附近的固定范围内所需要的时间。这也表示出控制环路调整的积极程度。如果控制器的调整过于积极，控制器的稳定时间将会比较长，这是因为控制器将在稳定前在目标位置附近振荡。图 24 中显示 PI 控制器的稳定时间要长于 SpinTAC 控制器的稳定时间。请注意，由于这两个控制器均会返回至目标位置，因此它们的振荡都很小。

当进行抗扰测试时，在多个速度和负载组合下进行测试很重要。为了正确地评估位置控制器的效率，应该在应用范围内完成测试，因为电机运行速度会影响控制位置的能力。这些测试结果将表示此控制器是否符合应用技术规格的要求，或者是否需要针对不同的运行点进行多次调整。针对九种不同的速度和负载组合（表 8 和表 9）执行抗扰测试，表明对具体运行进行了广泛测试。

能够创建可重复的干扰也很重要。这一要求可通过使用一个测力计或扰动电机来实现。在评估多个控制器时，创建可重复干扰是一个重要因素。如果测试条件不能被复制，那么就很难充分地比较多个控制器的响应。

对于以下测试结果，创建了干扰负载系统配置，将 25%、50% 和 100% 额定转矩施加到电机上。测试结果比较了 SpinTAC 位置控制与标准 PI 位置控制系统的性能。测量了以下参数：

- 平均恢复时间（从干扰点直到目标速度的 2% 以内）- 在负载被施加，以及负载从系统中移除时测量平均恢复时间。
- 绝对平均位置误差 - 当引入系统干扰时，距离基准位置的正偏离或负偏离（以机械角度为单位）。

- 最大位置误差 - 当引入干扰时，距离目标位置的最大偏离（以机械角度为单位）。

**表 8. SpinTAC 与 PI 位置控制抗扰测试结果比较
(Teknic 电机)**

	1000rpm			2000rpm			4000rpm		
	SpinTAC C	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的 改进百分比)	SpinTAC C	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的 改进百分比)	SpinTAC C	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的 改进百分比)
25% 额定转矩									
平均恢复时间 (单位秒) - 负载被施加	0.40	0.55	25.9	0.44	0.52	15.2	0.41	0.53	23.2
平均恢复时间 (s) - 负载被移除	0.2	0.50	59.6	0.25	0.38	33.6	0.20	0.39	49.5
绝对平均误差 (机械角度)	3.22e-1	2.38	86.4	2.70e-1	1.94	86.1	2.63e-1	1.98	86.7
平均最大误差 (机械角度)	17.57	132.0 1	86.7	17.06	130.4 3	86.9	15.80	127.6 2	87.6
50% 额定转矩									
平均恢复时间 (s) - 负载被施加	0.28	0.39	27.9	0.44	0.49	11.0	0.27	0.56	51.4
平均恢复时间 (s) - 负载被移除	0.23	0.51	55.3	0.25	0.39	35.5	0.25	0.45	44.2
绝对平均误差 (机械角度)	6.12e-1	4.86	87.4	5.04e-1	4.21	88.0	5.04e-1	4.18	87.9
平均最大误差 (机械角度)	35.68	270.5 4	86.8	34.63	267.0 1	87.0	33.41	253.8 4	86.8
100% 额定转矩									
平均恢复时间 (s) - 负载被施加	0.24	0.39	37.4	0.38	0.65	41.6	0.32	0.43	26.6
平均恢复时间 (s) - 负载被移除	0.26	0.64	59.7	0.28	0.43	35.3	0.32	0.42	23.8
绝对平均误差 (机械角度)	1.15	11.52	90.0	1.08	13.75	92.1	8.64e-1	8.14	89.4
平均最大误差 (机械角度)	61.16	479.8 8	87.3	59.76	730.5 5	91.8	51.84	3.48e +2	85.1

**表 9. SpinTAC 与 PI 位置控制抗扰测试结果比较
(Estun 电机)**

	750rpm			1500rpm			3000rpm		
	SpinTAC C	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的 改进百分比)	SpinTAC C	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的 改进百分比)	SpinTAC C	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的 改进百分比)
25% 额定转矩									
平均恢复时间 (单位秒) - 负载被施加	0.40	0.62	34.3	0.38	0.54	46.4	0.40	0.51	20.5
平均恢复时间 (s) - 负载被移除	0.22	0.3	24.8	0.18	0.29	34.0	0.20	0.33	39.5
绝对平均误差 (机械角度)	9.21e-2	1.08	91.5	8.16e-2	1.01	90.6	8.36e-2	1.12	91.6
平均最大误差 (机械角度)	2.63	02.85 e+1	90.8	2.45	2.71e +1	90.9	2.27	4.1e+ 1	94.5
50% 额定转矩									
平均恢复时间 (s) - 负载被施加	0.29	0.46	36.2	0.24	0.42	43.0	0.27	0.35	21.7
平均恢复时间 (s) - 负载被移除	0.27	0.35	22.9	0.19	0.32	40.0	0.24	0.42	41.2

表 9. SpinTAC 与 PI 位置控制抗扰测试结果比较 (Estun 电机) (continued)

	750rpm			1500rpm			3000rpm		
	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)
绝对平均误差 (机械角度)	1.53e-1	1.73	91.1	1.58e-1	1.69	90.7	1514e-1	1.41e+1	98.9
平均最大误差 (机械角度)	3.35	5.64e+1	94.1	3.35	5.52e+1	93.9	3.53	5.38e+1	93.4
100% 额定转矩									
平均恢复时间 (s) - 负载被施加	0.58	0.76	23.0	0.54	0.78	30.9	0.46	5.00	90.7
平均恢复时间 (s) - 负载被移除	0.29	0.41	28.9	0.25	0.36	29.0	0.28	5.00	94.1
绝对平均误差 (机械角度)	2.55	2.64e+1	89.9	2.08	2.67e+1	92.2	1.38	1.8e+3	99.9
平均最大误差 (机械角度)	1.35e+2	1.24e+3	89.2	1.15e+2	1.23e+3	90.7	8.37e+1	1.8e+3	95.4

5.2.2 基准跟踪

基准跟踪测试控制器跟随变化的位置目标的程度。这些测试中评估的两个衡量标准是最大误差和绝对平均误差。最大位置误差显示速度变化时，控制器过冲的大小。这个值表示您控制器调整的积极程度。如果控制器的调整不够积极主动，速度将超过目标值，并且将需要花费较长的时间恢复。如果控制器的调整过于积极主动，它将过冲，然后在稳定至位置目标时发生振荡。如果控制器被正确调整，它的过冲值最小，然后平稳返回至位置目标。

绝对平均误差是整个系统配置范围内瞬时位置误差绝对平均值。这个测量结果显示整个系统配置上的偏离量。它将电机运行时的全部小值误差考虑在内。如果控制器的调整过于积极，它将导致较大的绝对平均误差，这是由控制器将在整个系统配置内振荡所造成的。如果控制器的调整不够积极，则会导致较大的绝对平均误差，因为电机将持续落后于指定的系统配置。

创建一个位置跟踪系统配置，以重复模式来使用电机。此系统配置被用于比较 SpinTAC 位置控制和 PI 控制系统的性能。此系统配置已包括快速转换以及逐渐全面转换。图 25 是基准测试中所用的系统配置的图表。

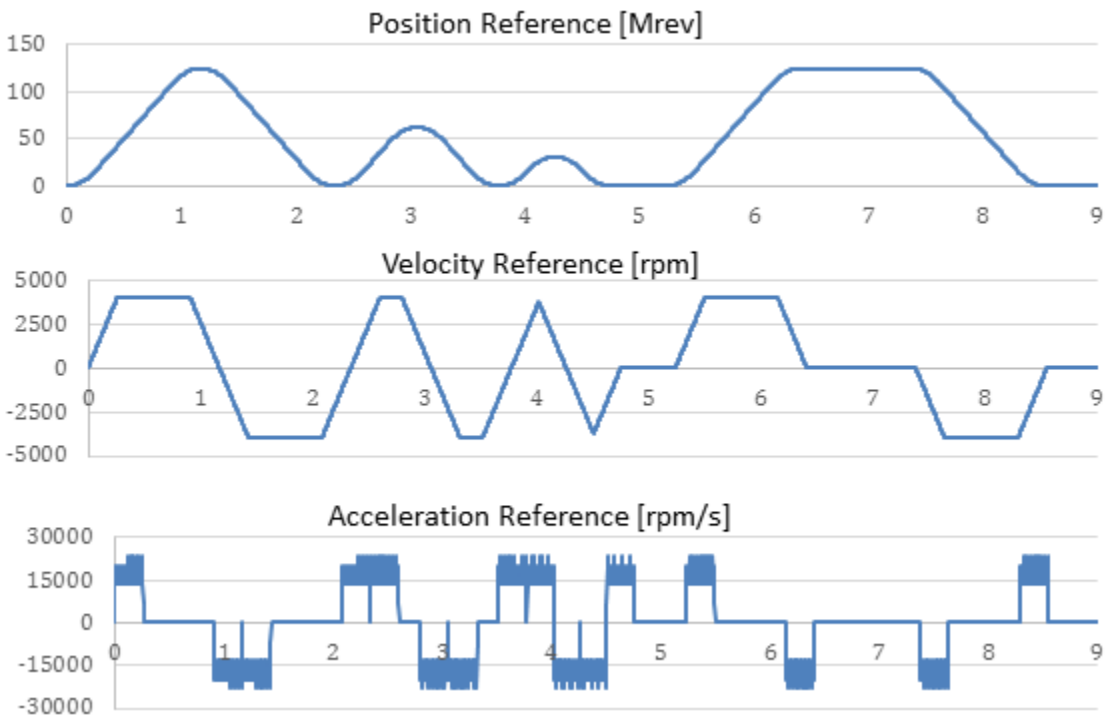


图 25. 基准跟踪测试期间使用的位置系统配置

图中的遮挡区域中的附加图表突出显示了 SpinTAC 与 PI 控制器之间的差异。

图 26 是位置基准跟踪测试的第一部分。图底部的红线指示 PI 位置误差。绿线指示 SpinTAC 位置误差。注意：在进行转换时 PI 位置误差更大，在系统配置的恒定速度部分该位置也会出现偏移。而 SpinTAC 在跟踪系统配置时毫无问题，并且误差也比 PI 控制器小。

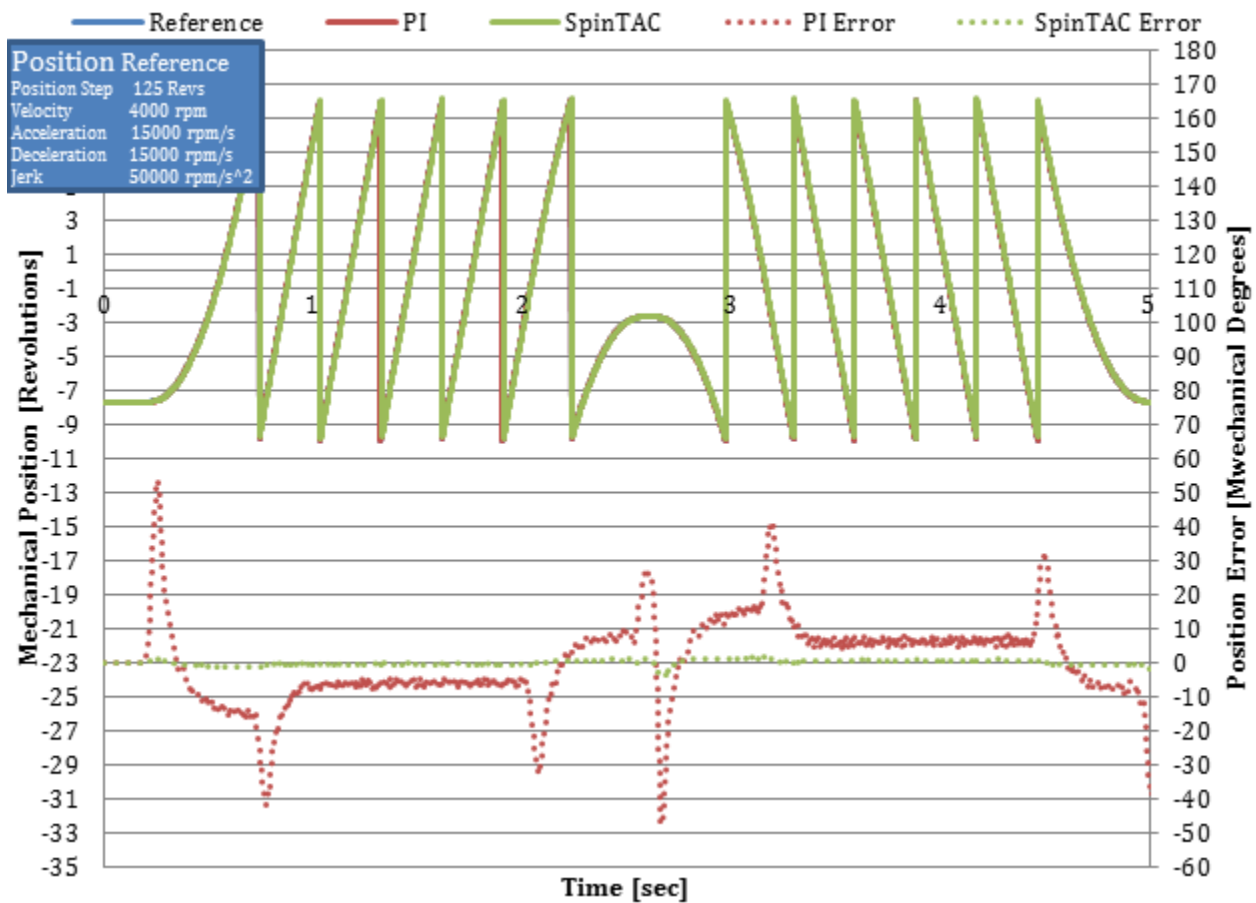


图 26. 位置跟踪期间的 PI 误差

在您的位置系统配置中测试多个速度和加速度以及多个不同负载同样重要。当被置于不同情况下，位置控制器具有不同的性能特点。为了完全评估您的控制器的效率，应该在应用范围内执行测试。这包括您何时为测试设计系统配置。设计时应该注意，以确保在位置系统配置中建立应用速度和加速度。这些测试结果将表示此控制器是否符合应用技术规格的要求，或者是否需要针对不同的运行点进行多次调整。您应该注意到，在图 25 中测试了宽范围的速度和加速度。

创建可重复系统配置也很重要。可通过 pinTAC Move 和 SpinTAC Plan 创建可重复系统配置 [《InstaSPIN-FOC 和 InstaSPIN-MOTION 用户指南》（文献编号 [SPRUHJ1](#)）提供了关于 SpinTAC Move 和 SpinTAC Plan 的详细信息，[MotorWare](#) 库中提供了各实验项目]。如果比较位置控制器，则需要可重复系统配置。一个可重复系统配置确保使用顺序一致的同一基准，在相同的时间长度内测试控制器，并且测试条件尽可能完全一样。使用 SpinTAC Move 和 SpinTAC Plan 来生成针对这个测试的系统配置。

测量了以下参数：

- 绝对平均位置误差 - 在整个位置系统配置内，距离目标位置的偏离（以机械角度为单位）。
- 最大位置误差 - 位置系统配置期间，距离目标位置的最大偏离（以机械角度为单位）。

表 10. SpinTAC 与 PI 位置系统配置跟踪测试结果比较

	梯形曲线			st-Curve		
	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)
Teknic 电机						
绝对平均误差 (机械角度)	3.6e-1	5.98	94.0	3.95e-1	4.54	91.5
最大误差 (机械角度)	3.85	95.8	96.0	4.03	53089	92.5
Estun 电机						
绝对平均误差 (机械角度)	3.32e-1	10.19	96.7	3.48e-1	51.05	99.3
最大误差 (机械角度)	2.12	126.75	98.3	1.76	113.55	98.4

5.2.3 阶跃响应

针对位置控制器的阶跃测试要求为控制器提供一个阶跃输入，以确定一个控制器对突发输入变化的响应速度。这些测试中评估的两个衡量标准为稳定时间和最大过冲。这个测试还测量了您的控制器的稳定性。如果控制器在达到目标速度时发生振荡，那么他非常不稳定。

阶跃系统配置应用于 SpinTAC 位置控制和 PI 控制系统。这个阶跃输入绕过了系统配置发生器。测量了以下参数：

- 稳定时间 (从阶跃输入直到目标位置的 2% 以内) - 稳定时间反映出控制器达到目标位置所花费的时间。
- 最大过冲 - 阶跃输入后，测得的最大机械角度。

图 27 比较 SpinTAC 位置控制和 PI 控制系统的阶跃响应。它还直观地表示了计算这些衡量标准的方式。SpinTAC 位置控制能够以零过冲和短于 PI 控制系统的稳定时间到达目标位置。

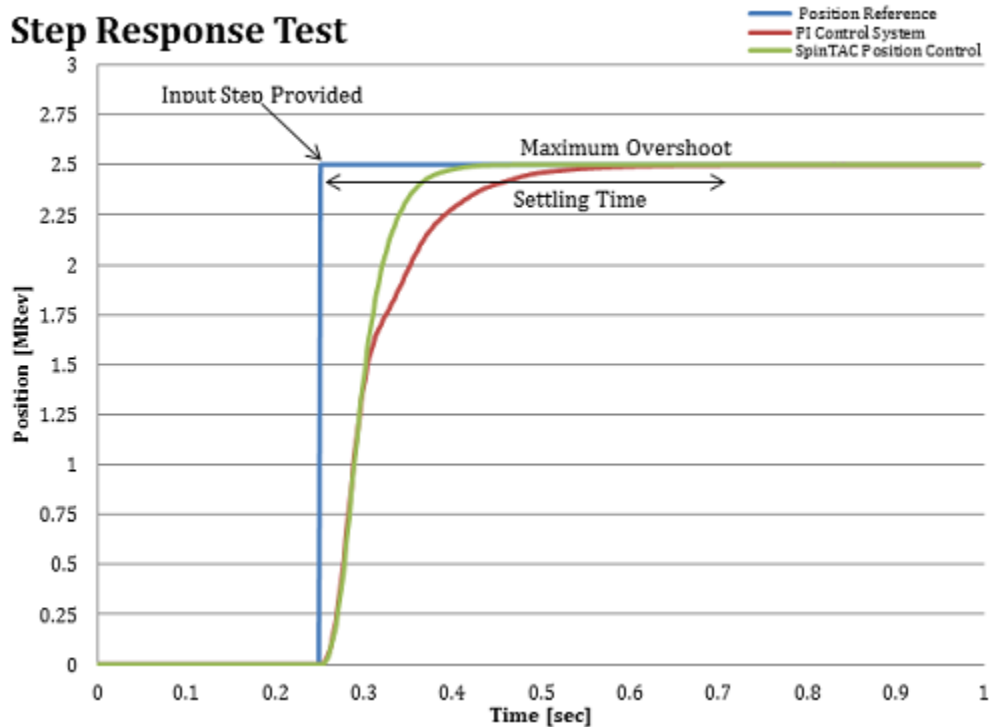


图 27. 最大过冲和稳定时间的阶跃响应

表 11. SpinTAC 与 PI 位置控制阶跃响应测试结果比较 (Teknic 电机)

	稳定时间 (s)			过冲 (机械角度)		
	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)
0 至 4.9 机械角度						
	0.23	0.54	57.4	0.00	0.00	0.0
	0.22	0.45	51.1	0.00	0.00	0.0
	0.25	0.46	45.7	0.00	0.00	0.0
	0.28	0.45	37.8	0.00	0.00	0.0
	0.27	0.43	37.2	0.00	0.00	0.0
0 至 2.5 机械角度						
	0.24	0.36	34.4	0.00	0.00	0.0
	0.23	0.38	39.5	0.00	0.00	0.0
	0.24	0.41	41.5	0.00	0.00	0.0
	0.23	0.40	42.5	0.00	0.00	0.0
	0.21	0.41	48.8	0.00	0.00	0.0
0 至 1.25 机械角度						
	0.21	0.41	48.5	0.00	0.00	0.0
	0.20	0.41	51.2	0.00	0.00	0.0
	0.18	0.46	60.9	0.00	0.00	0.0
	0.18	0.40	55.0	0.00	0.00	0.0
	0.23	0.38	39.5	0.00	0.00	0.0

表 12. SpinTAC 与 PI 位置控制阶跃响应测试结果比较 (Estun 电机)

	稳定时间 (s)			过冲 (机械角度)		
	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)	SpinTAC	PI	SpinTAC 优势 (对 PI 的改进百分比)
0 至 4.9 机械角度						
	0.67	0.59	-13.6	4.54e+2	1.26e+3	63.9
	0.94	0.57	-66.1	4.57e+2	1.26e+3	63.7
	0.86	0.57	-49.6	4.58e+2	1.27e+3	63.8
	0.70	0.60	-15.5	4.58e+2	1.27e+3	63.8
	0.81	0.62	-30.1	4.58e+2	1.24e+3	64.3
0 至 2.5 机械角度						
	0.53	0.50	-5.8	8.14e+1	4.03e+2	79.8
	0.52	0.48	-8.3	8.14e+1	4.18e+2	80.5
	0.62	0.49	-27.2	8.17e+1	4.10e+2	80.1
	0.56	0.47	-18.2	8.17e+1	4.18e+2	80.5
	0.17	0.49	65.2	8.14e+1	3.70e+2	78.0
0 至 1.25 机械角度						
	0.53	0.42	-26.2	0.00	1.69e+1	100
	0.53	0.32	-65.6	0.00	1.44e+1	100
	0.53	0.33	-63.1	0.00	1.69e+1	100
	0.53	0.41	-30.6	0.00	1.63e+1	100
	0.60	0.36	-68.4	0.00	1.63e+1	100

5.2.4 惯性估算可重复性

系统惯性是到 SpinTAC 速度控制和 SpinTAC 位置控制的重要输入。使用 SpinTAC 速度识别来估算惯性值。SpinTAC 速度识别产生一个非常准确的惯性估算。为了测试 SpinTAC 速度识别的可重复性，对于每个电机，惯性识别过程运行了 100 次。在图 28 和图 29 中采集这些结果。

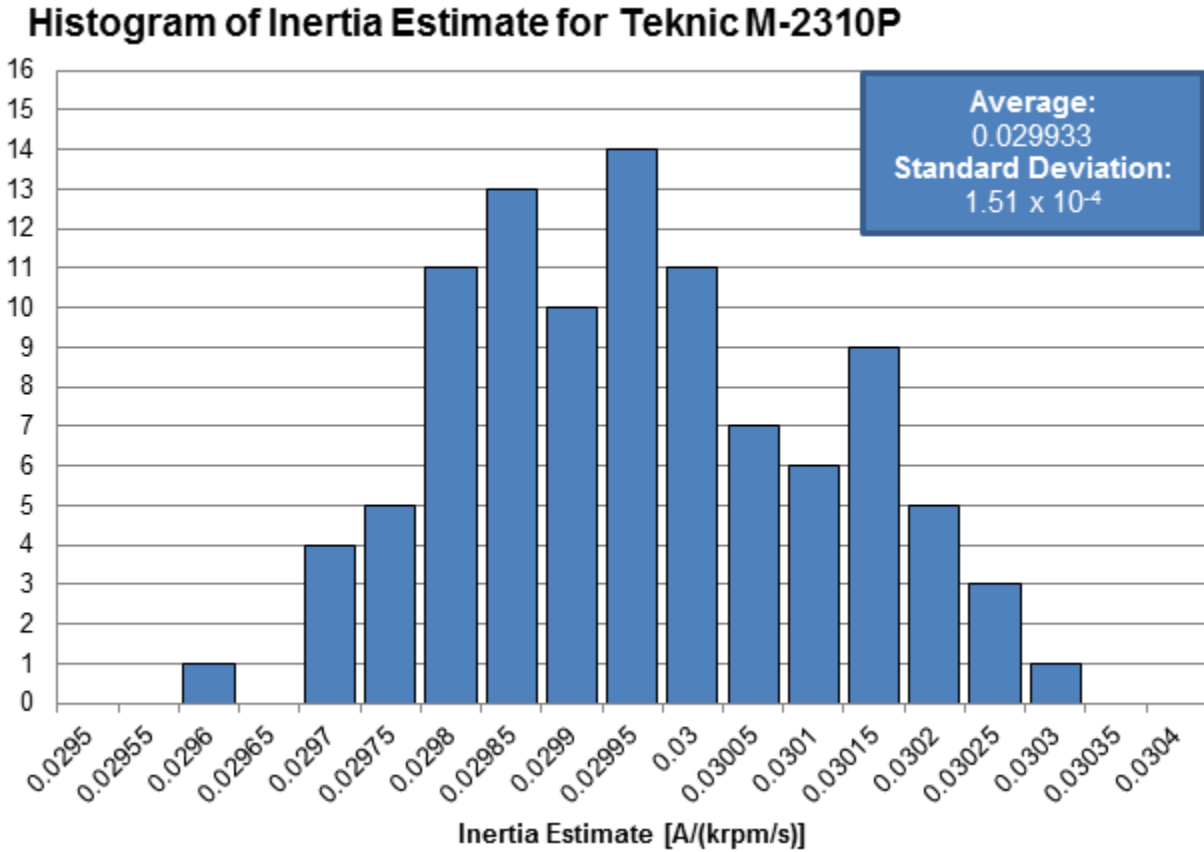


图 28. 针对 Teknic M-2013P 的惯性估算结果

Histogram of Inertia Estimate for Estun EMJ-04APB22

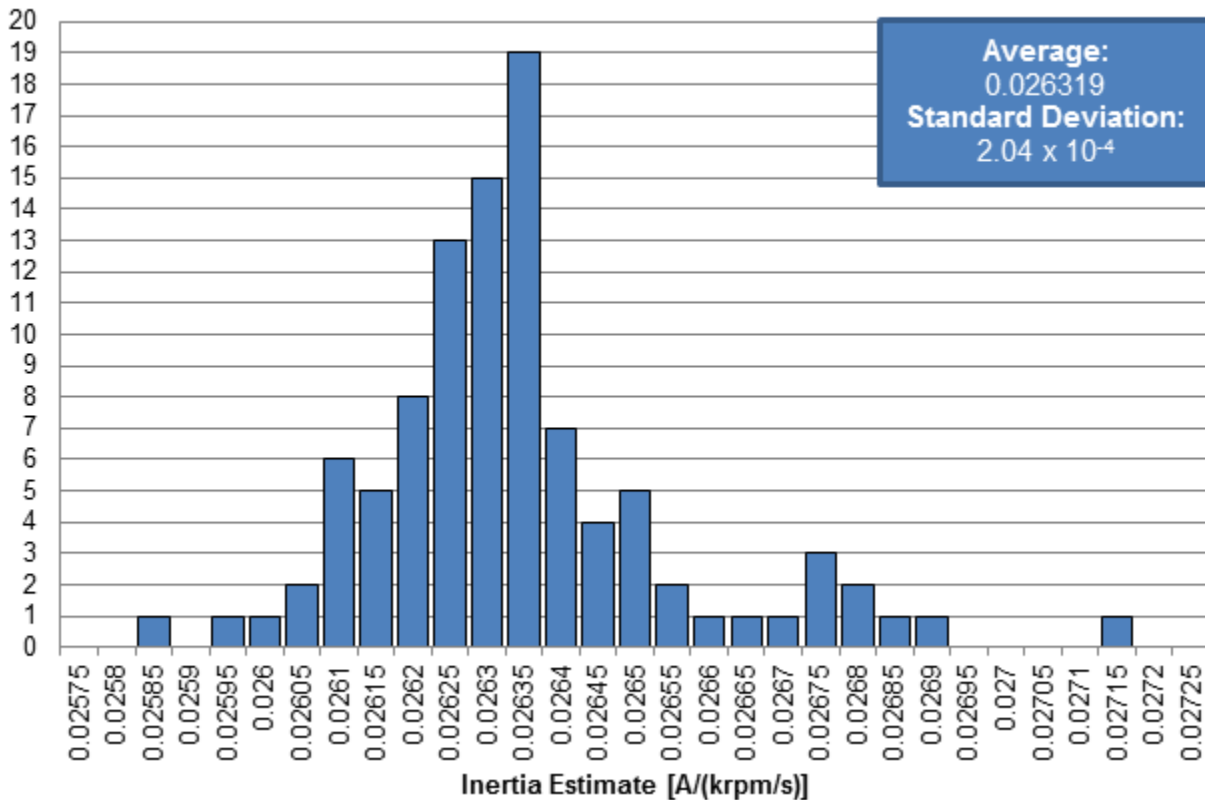


图 29. 针对 Estun EMJ-04APB22 的惯性估算结果

上面的结果明显地显示出 SpinTAC 速度识别具有一个很高程度的可重复性。提供给 SpinTAC 控制器的惯性估算值不需要是理想的惯性值。作为一项稳健耐用特性，一个 SpinTAC 速度控制器可以接受宽范围的惯性变化。然而，如果提供的惯性值是准确的，SpinTAC 速度控制器将始终产生最佳性能。

6 微控制器资源

InstaSPIN 库所需要的 TMS320F2805xM 微控制器资源在《InstaSPIN-FOC 和 InstaSPIN-MOTION 用户指南》（文献编号 [SPRUHJ1](#)）中有详细介绍。

测量了以下资源以确定 InstaSPIN-MOTION 库的使用量：

- CPU 利用率
- 内存分配
- 堆栈利用率
- 数字和模拟引脚利用率

6.1 CPU 利用率

图 30 图示了提供给设计人员用来管理每个主要软件函数的实时调度的选项。

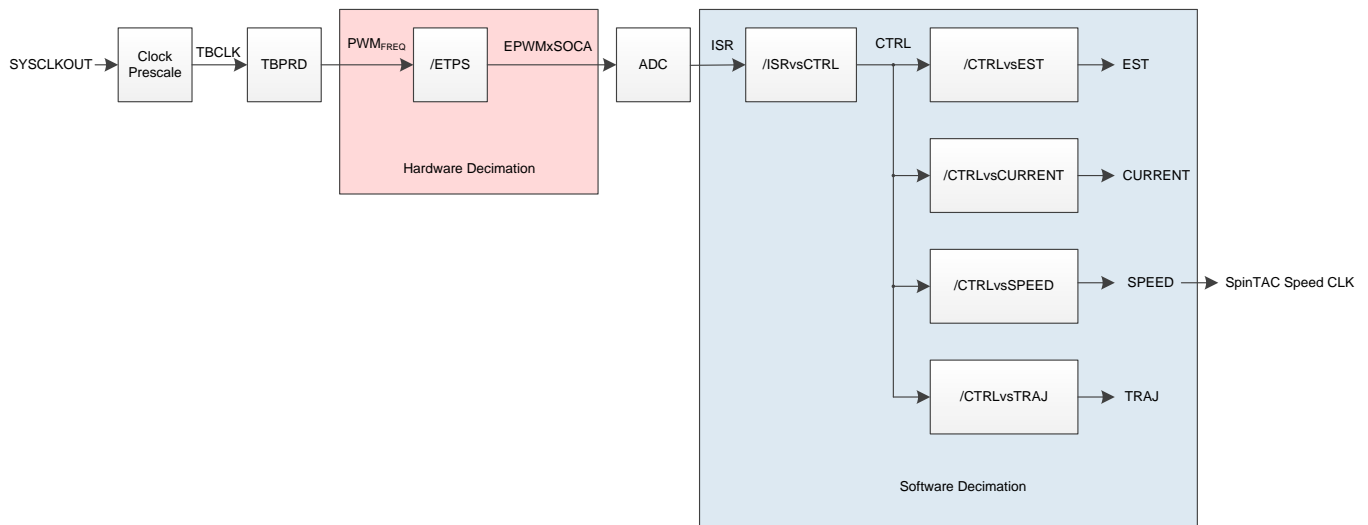


图 30. 软件执行时钟树用实时调度提供灵活性

表示在 28054M 和 28052M 器件的 ROM 之外运行的 SpinTAC 组件的 CPU 周期利用率。请注意，此数据只适用于 SpinTAC，并且包括 InstaSPIN-FOC。有关 InstaSPIN-FOC CPU 利用率和内存占用量，请参见《《TMS320F2805xF InstaSPIN-FOC™ 软件技术参考手册》》（文献编号 [SPRUHW0](#)）。

速度计数被用来计算 SpinTAC 采样时间。SpinTAC 从主中断处理例程 (ISR) 中调用，但是也可使用与速度控制器运行时所使用的抽取率一样的抽取率来抽取。可通过将 `USER_NUM_ISR_TICKS_PER_CTRL_TICK` 乘以 `USER_NUM_CTRL_TICKS_PER_SPEED_TICK` 来计算正确的抽取率。

表 13. 在闪存中执行库时，SpinTAC CPU 周期利用率⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

函数名称	CPU 周期数			执行位置		
	最小值	平均值	最大值	ROM	RAM	闪存
STVELCTL_run (速度控制)						
RES = 1, ENB = 0	189	189	189			
RES = 0, ENB = 1	614	614	614			
ENB = 1 后的首次调用	1077	1077	1077			
改变带宽	842	842	842	✓	×	✓
改变惯性参数	842	842	842			
RES = 1, ENB = 1	347	347	347			
STVELMOVE_run (速度移动)						
RES = 1, ENB = 0	220	220	220			
stcurve RES = 0, ENB = 1	724	759	1468			
scurve RES = 0, ENB = 1	687	724	1435	✓	×	✓
trap RES = 0, ENB = 1	561	636	1167			
RES = 1, ENB = 1	494	494	494			
STVELPLAN_run (速度规划)						
RES = 1, ENB = 0	183	183	183			
RES = 0, ENB = 1	238	238	238			
ENB = 1 后的首次调用	333	333	333			
STAY FSM 状态	238	238	238			
条件 FSM 状态 对于每个状态，必须完成计算	436 (固定) + 320 * 转换数 + 388 * EXIT (退出) 操作数			✓	×	✓
条件 FSM 状态 对于每个状态，必须完成计算	283 (固定) + 438 * ENTER (进入) 操作数					
STVELPLAN_runTick (ISR 函数)	76	100	100			
STVELID_run (速度识别)						
RES = 1, ENB = 0	198	198	198			
RES = 0, ENB = 1	256	278	723	✓	×	✓
ENB = 1 后的首次调用	1196	1196	1196			
RES = 1, ENB = 1	292	292	292			
STPOSCOV_run (位置转换器)						
RES = 1, ENB = 0	127	127	127			
RES = 0, ENB = 1	391	398	400	✓	×	✓
ENB = 1 后的首次调用	1209	1209	1209			
RES = 1, ENB = 1	140	140	140			
STPOSCTL_run (位置控制)						
RES = 0, ENB = 0	201	201	201			
RES = 0, ENB = 1	1207	1212	1225			
ENB = 1 后的首次调用	2043	2043	2043			
改变带宽参数	1729	1729	1729	✓	×	✓
改变惯性参数	1729	1729	1729			
RES = 1, ENB = 1	449	449	449			

表 13. 在闪存中执行库时，SpinTAC CPU 周期利用率⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ (continued)

函数名称	CPU 周期数			执行位置		
	最小值	平均值	最大值	ROM	RAM	闪存
STPOSMOVE_run (位置移动)						
RES = 0, ENB = 0	520	520	520			
stcurve RES = 0, ENB = 1	790	1611	3630			
速度受控系统配置	1467	1588	2778			
scurve RES = 0, ENB = 1	790	1564	3205	✓	×	✓
速度受控系统配置	1415	1551	2734			
trap RES = 0, ENB = 1	790	1501	3130			
速度受控系统配置	1540	1903	2438			
RES = 1, ENB = 1	996	996	996			
STPOSPLAN_run (位置规划)						
RES = 1, ENB = 0	202	202	20			
RES = 0, ENB = 1	255	255	255			
ENB = 1 后的首次调用	373	373	373			
STAY FSM 状态	255	255	255			
条件 FSM 状态 对于每个状态，必须完成计算	501 (固定) + 323 * 转换数 + 382 * EXIT (退出) 操作数			✓	×	✓
转换 FSM 状态 对于每个状态，必须完成计算	301 (固定) + 432 * ENTER (进入) 操作数					
STPOSPLAN_runTick (ISR 函数)	86	115	115			

- (1) 微控制器在脉宽调制 (PWM) 为 15kHz 时，以 60MHz 的频率运行。
- (2) RES = 1 表示此组件复位。
- (3) ENB = 1 表示此组件使能。
- (4) 粗体字 显示典型状态。

6.2 内存利用率

表 14 列出了每个 SpinTAC 组件的内存用量。SpinTAC Plan 中有大量配置函数。

表 14. 针对 SpinTAC 组件的代码尺寸和 RAM 用量

组件	Code (.text) (16 位字)	RAM (.ebss) (16 位字)
速度控制	0x2E6	0x4C
速度移动	0x488	0x5C
速度规划 (最小值)	0x666	0x4E
速度规划 (最大值)	0x14BA	0x4E
速度识别	0x392	0x3C
位置转换器	0x21C	0x4C
位置控制	0x416	0x62
位置移动	0x13A4	0xCC
位置规划 (最小值)	0x7AE	0x60
位置规划 (最大值)	0x16F4	0x60

表 15 在 SpinTAC 组成部分单个运行时，分解了 SpinTAC 组成部分的最大堆栈利用率。包括了 InstaSPIN-FOC 的堆栈使用量。为了计算堆栈用量，放置堆栈的整个内存部分被填充为已知值。然后相应的代码运行几分钟。分配给堆栈的内存区域被分析，并且计算出内存使用量。

表 15. SpinTAC 组成部分 + InstaSPIN-FOC 的堆栈利用率

配置	使用的最大堆栈 (16 位字)
速度控制	0x0120
速度移动	0x0120
速度规划 + 移动 + 控制	0x0120
速度识别	0x0120
位置转换器	0x0120
位置控制	0x0120
位置移动	0x0120
位置规划 + 移动 + 控制	0x0120

表 16 显示为 InstaSPIN-FOC 和 SpinTAC 库分配的内存。

表 16. 为 InstaSPIN-FOC 和 SpinTAC 库分配的 2805x 和 2805xM 内存

特性	2806xF	2806xM	2805xF	2805xM	2802xF
FAST	是	是	是	是	是
SpinTAC	否	是	否	是	否
可被控制的最多电机数量	2	2	2	2	1
可重定位控制器结构	否	否	是	是	是
FAST 版本	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7
需要向项目添加公用库	否	否	否	否	是
ROM 库 [大小、十六进制、字]	4000	4000	3D27	3D27	2000
ROM 库起始位置 [地址、十六进制]	3F 8000	3F 8000	3F 8808	3F 8808	3F C000
库需要的 RAM [大小、十六进制、字]	800	800	800	800	200
库起始 RAM [地址、十六进制]	01 3800	01 3800	00 8000	00 8000	00 0600

对于 F2805xM 器件，FAST v1.7 和 SpinTAC v2.2.7 均存储在只执行内存中。图 31 显示这些器件的内存映射，其中突出显示已分配给 FAST 和 SpinTAC 的位置。

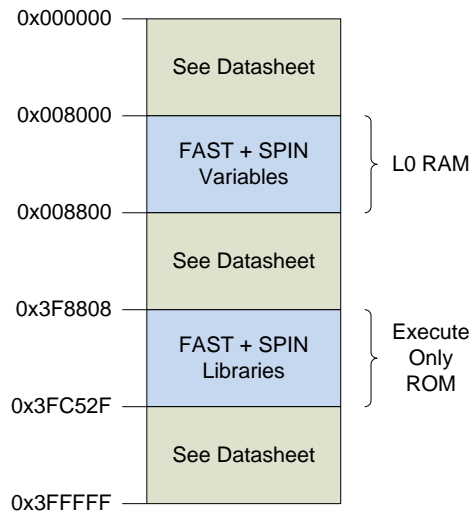


图 31. 为 InstaSPIN-FOC 和 SpinTAC 库分配的 F2805xF 和 F2805xM 内存

该库变型需要向项目中添加控制结构，然后将其加载到用户 RAM 空间中。此控制结构为公用类型，其中不包含关于估算器的具体信息，但它却是库接口正常操作必不可少的。该控制结构可声明为单一条目，也可声明为两个条目构成的数组，供用户单独控制两个电机时使用。

```
// control structure declaration in main.c to control one motor
CTRL_Obj ctrl;

// control structure declaration in main.c to control two motors
CTRL_Obj ctrl[2];
```

每个 ctrl 成员占用 0x100 x 16 位字，或 512 字节内存。ctrl 或 ctrl[2] 结构的具体位置并不重要，因此用户可将它们存储在易失性存储器的任意位置。

6.3 安全区

F2805xM 器件可提供不同的安全区，供用户选用。记住，安全区配置可能会影响库接口的操作。例如，如果控制器对象所在的内存区域安全，则 ROM 中的库将不会写入此内存；因此未能正确更新控制器对象。有关更多详细信息，请参见《TMS320F2805x Piccolo 微控制器》数据手册（文献编号 [SPRS797](#)）中的安全部分。

为估算器预先分配的 ROM 和 RAM 中的库均位于 Z1 部分。确保可通过 Z1 安全区域访问用于放置连接库所使用的变量的 RAM。

6.4 连接器命令文件设置

为便于 2805xM 器件使用 InstaSPIN，必须保留 ROM 中库所用的易失性存储器。RAM 区域的以下代码列表显示了不可使用的 L0 RAM。为避免用户内存和库所用内存之间出现冲突，用户声明的变量不得使用此内存范围。

RAMM0	: origin = 0x000050, length = 0x0003B0
//RAML0	: origin = 0x000000, length = 0x000000
RAML1	: origin = 0x008800, length = 0x000800
RAML2	: origin = 0x009000, length = 0x000800
RAML3	: origin = 0x009800, length = 0x000800

6.5 连接 FAST ROM 库

为了连接 ROM 库，用户需在项目中包括一个库。此库包含 ROM 中软件的符号地址。以下是此特定产品系列对应符号库的相对 MotorWare 路径。

```
sw\modules\fast\lib\32b\f28x\f2805x
```

如 [图 32](#) 项目屏幕截图所示，项目中链接了一个仅符号库。

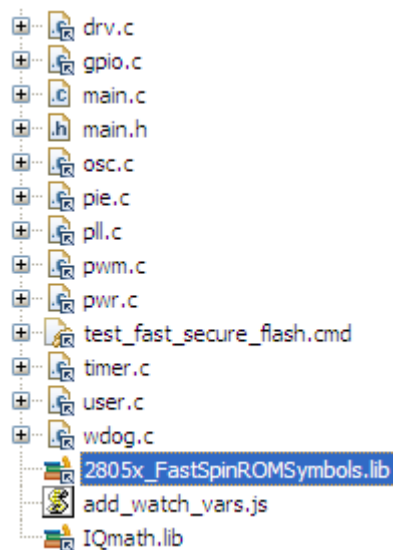


图 32. 具有 ROM 符号库的 2805x 项目

2805x 器件变型（est.h、est_Flux.h、est_Ls.h 和 est_Rs.h）需要图中所示相同的估算器头文件。

此外，如 F2805x 器件变型的相关说明，控制器对象 (CTRL_Obj) 的某些功能也包含在 ROM 中。以下相对路径是 TI 某款电路板器件的控制器头文件示例：

```
sw\solutions\instaspin_foc\boards\hvkkit_rev1p1\f28x\f2805x\src\ctrl.h
```

6.6 引脚利用率

InstaSPIN-FOC 设计中的灵活性可支持多个电机。表 17 列出了每个电机使用的最少和最多引脚数量。谨记，一个 F2805xM 微控制器提供 (14 个) ePWM 输出，所采用的封装为 80 引脚封装。

表 17. 每个电机的引脚利用率

引脚类型	引脚名	每个电机的引脚用量	
		最小值	最大值
数字	PWM1A	3 (需要具有死区时间的外部故障和外部互补模式)	7
	PWM1B (可选)		
	PWM2A		
	PWM2B (可选)		
	PWM3A		
	PWM3B (可选)		
	触发区 (可选)		
模拟	IA	5 (只有两个电流，且无 VBUS 纹波补偿)	7
	IB		
	IC (可选)		
	VA		
	VB		
	VC		
	VBUS (可选)		

6.7 模拟前端 (AFE) 模块注意事项

在 InstaSPIN 应用中，相关算法需要电机线电流和相电压。在模拟电路处理完所有信号之后，处理器才能对这些模拟信号采样。外部模拟电路会增加组件成本并增大电路板尺寸。2805x 系列处理器可通过添加内部模拟调节组件（称为模拟前端 (AFE)）用于电机反馈信号来解决此类问题。

有关 2805x 器件的更多详细信息，请参见《TMS320x2805x Piccolo 技术参考手册》（文献编号 [SPRUHE5](#)）。

6.7.1 电流信号传输

在解决有关实施以及使用可编程增益放大器 (PGA) 和比较器的问题前，建议考虑如何将电流反馈信号从分流器传送到 PGA 的输入端。使用分流电阻器测量线路电流时，电流值必须很小，以降低分流器中的功耗量。由于电流值很小，因此分流器上会出现压降。这样便会有大量电流通过分流电阻器。从电源器件连接分流器到接地端的铜走线成为与分流器并联的电阻器。使用分流电阻器测量电机线路电流时，必须考虑铜走线上形成的寄生电阻。

AFE 最多可具有三个不同接地端。2805x 器件可具有多组放大器模块。每组放大器具有不同的接地端。在本文档中，M1 接地用于三个 PGA 构成的组，它们将分别反馈三相电机电流。对于具有功率因数校正的系统，存在另一个接地端为 PFC 接地的单一 PGA。固定增益放大器块使用 M2 接地端作为参考，在本文档中用于电机三相电压反馈。

此处介绍了两个用于为 AFE 的 M1 PGA 块反馈电机分流信号的选项。第一个选项仅将内部运算放大器用于电流反馈，如 图 33 所示。三个运算放大器针对反向输入共用同一接地端，因此不会产生分流差分信号。对于单端信号，将分流器接地时必须谨慎布线，以减小分流器间不同的走线电阻。建议将分流器接地端尽可能靠近在一起。走线必须从分流器的汇集点连接到集成电路的 M1gnd 引脚。由于放大器中可能加入共模噪声，M1gnd 引脚和 PGA 输入必须尽可能短。三相电流的走线必须与 M1gnd 走线尽可能靠近，以便减小 Faraday 环路的大小。Faraday 环路在相电流走线周围形成，相电流走线从分流器顶部连接到 IC，然后背靠 M1gnd 走线连接到分流器底部，通过分流器后返回到分流器顶部。

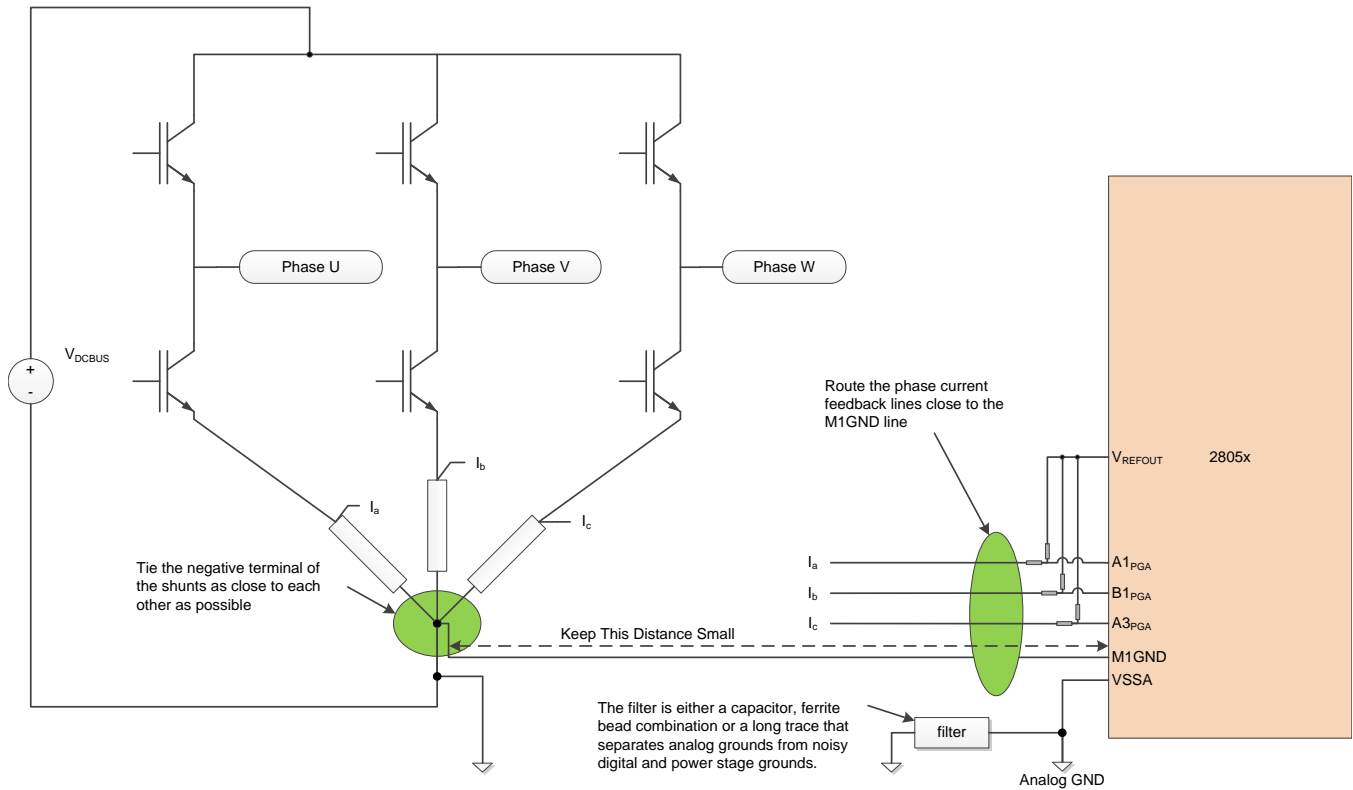


图 33. 电流信号通过单端连接直接传输到 PGA

第二个选项是在差分放大器配置中使用外部运算放大器，这种方法的抗扰能力最强。有效的 Kelvin 连接可直接反馈到差分放大器，然后将差分放大器的输出传送到 PGA 输入端。图 34 显示了使用外部差分运算放大器时的典型布线。由于 Kelvin 连接具有低阻抗特性并可产生真正的差分信号，因此具备极佳的抗扰度。外部运算放大器电路可将差分电路转换为单端输出。单端输出更容易受噪声干扰，因此最好将运算放大器的输出端靠近处理器的 AFE 输入端。

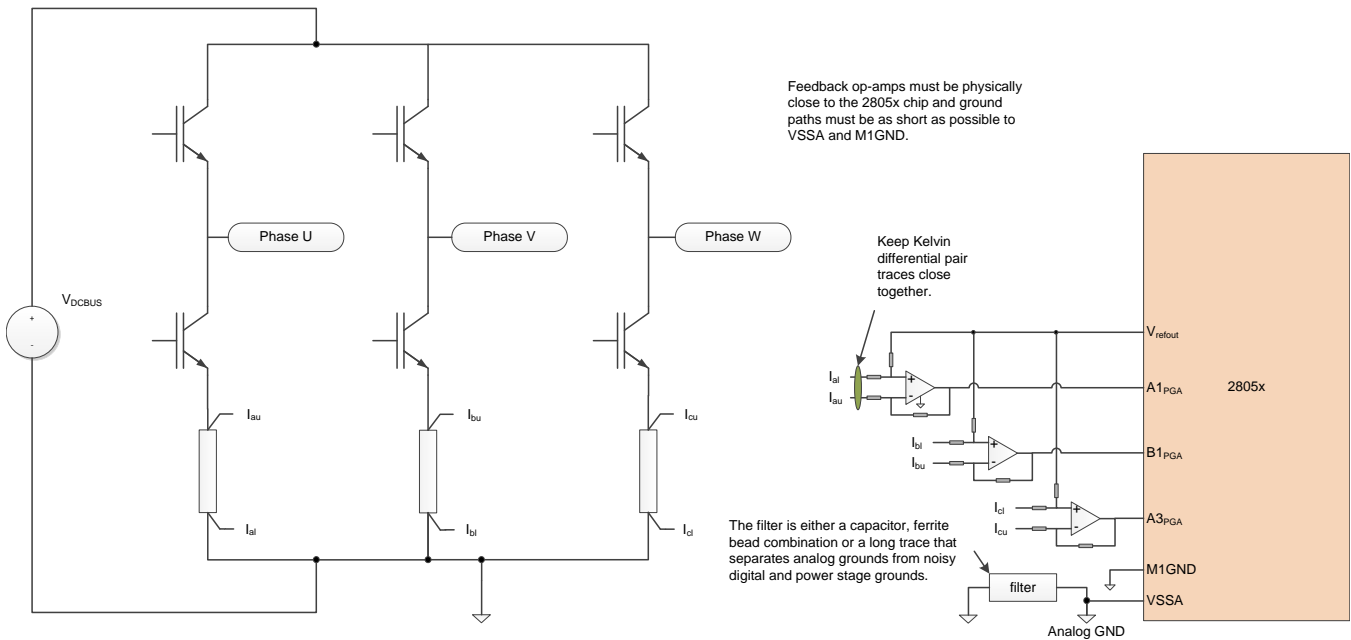


图 34. 使用外部差分放大器反馈相电流

为什么在使用外部放大器的同时使用 PGA？如果多个额定电流不同的电机通过同一个逆变器供电，则符合此情况。可对电流信号放大率进行调整，以便最适合受控电机的规模。PGA 块的输出即为比较器窗口的输入。仍需要连接 PGA 后才能使用故障检测电路。

6.7.2 基准电压连接

电流可以正向或反向流经分流器，相应生成的正向电压和反向电压可反馈回分流放大器电路。最经济高效的电机逆变器不会同时配备可处理这种双极信号的正向和反向电源。双极电流信号引入仅对从零到正电源电压有效的放大器。为了能够利用单极运算放大器电路测量双极信号，需将基准电压加入电流反馈运算放大器的同向侧。为此，2805x 器件的 AFE 包含一个具有电压跟随器的 6 位 DAC，可提供输出基准电压。图 35 中显示的电路配置可使用基准电压测量双极电流信号。

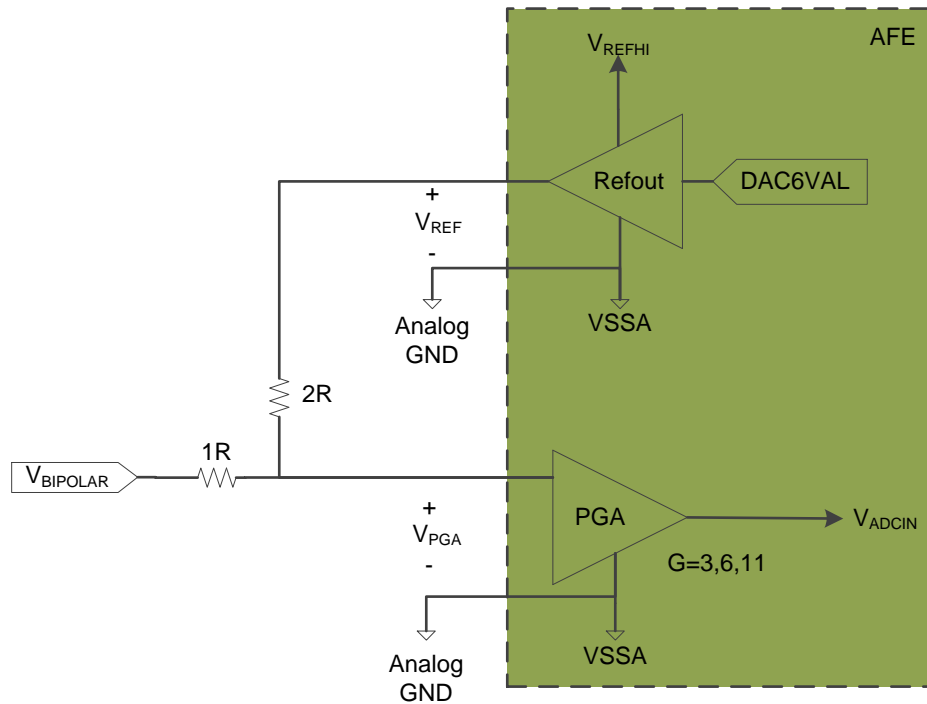


图 35. 使用 AFE 的内置基准电压测量双极信号

公式 1 显示了如何在 V_{PGA} 条件下计算电压。例如，设置 PGA 增益 = 3。 $V_{ADCIN} = 2V_{BIPOLAR} + V_{REF}$ 。假设系统的 $V_{REFHI} = 3.3V$ 。为实现双向最大电压摆幅，将 V_{REF} 设为 1.65V。此时，测得最大峰值 $V_{BIPOLAR}$ 电压为 $\pm 0.825V$ 。

$$V_{PGA} = \frac{2R \cdot (V_{BIPOLAR} - V_{REF})}{(1R + 2R)} + V_{REF} = \frac{2}{3}V_{BIPOLAR} + \frac{1}{3}V_{REF} \quad (1)$$

假设使用相同的硬件并且需要更高的分辨率。PGA 增益 = 6。 $V_{ADCIN} = 4V_{BIPOLAR} + 2V_{REF}$ 。 V_{REF} 必须调整为 0.825V。可测得最大峰值 $V_{BIPOLAR}$ 电压为 $\pm 0.4125V$ 。

基准电压输出由 6 位 DAC 调节。 $V_{REFOUTCTL}$ 电阻按照下面的公式 2 控制 DAC 的电压输出。

$$V_{REF} = \frac{V_{REFHI} \cdot (V_{REFOUTCTL_DACVAL} + 1)}{64} \quad (2)$$

6.7.3 电压信号传输

与电流信号相比，正弦电机控制驱动器中的电压信号会缓慢变化。因此，可将更大的硬件滤波器应用于电压反馈信号，这有助于增强抗噪能力。电压信号为单极信号，因此不需要使用特殊电路和基准电压。电压较低的电机（400 V_{DCBUS} 以下）通常只需要带电容式低通滤波器的电阻分压器。对于无刷直流电机控制，电压需要尽可能少地出现相移，因此，低通滤波性能取决于电机达到的最大速度。电压反馈信号布线的唯一关键在于：低通滤波器必须尽可能靠近 AFE 或 A/D 输入引脚。

要在自己的应用中开始使用 InstaSPIN 软件：

- 请订购符合您的电机要求的[评估套件](#)。
- 下载 [MotorWare](#) 软件（所有实验及实验手册在 MotorWare 库中提供）
- 下载 [Code Composer Studio v5.5](#) 或更高版本。

如有任何问题，请在 [TI E2E™ 在线社区 InstaSpin 电机解决方案论坛](#)上提出。

术语和首字母缩略词定义

ACIM — Alternating current induction motor.

ADRC — Active Disturbance Rejection Control. Estimates and compensates for system disturbance, in real-time.

CCStudio — Code Composer Studio.

FAST — Unified observer structure which exploits the similarities between all motors that use magnetic flux for energy transduction, automatically identifying required motor parameters and providing the following motor feedback signals:

- High-quality **F**lux signal for stable flux monitoring and field weakening.
- Superior rotor flux **A**ngle estimation accuracy over wider speed range compared to traditional observer techniques independent of all rotor parameters for ACIM.
- Real-time low-noise motor shaft **S**peed signal.
- Accurate high bandwidth **T**orque signal for load monitoring and imbalance detection.

FOC — Field-oriented control.

Forced-Angle — Used for 100% torque at start-up until the FAST rotor flux angle tracker converges within first electrical cycle.

InstaSPIN-FOC — Complete sensorless FOC solution provided by TI on-chip in ROM on select devices (FAST observer, FOC, speed and current loops), efficiently controlling your motor without the use of any mechanical rotor sensors.

InstaSPIN-MOTION — A comprehensive motor-, motion- and speed-control software solution that delivers robust system performance at the highest efficiency for motor applications that operate in various motion state transitions. InstaSPIN-MOTION builds on and includes InstaSPIN-FOC, combined with SpinTAC™ Motion Control Suite from LineStream Technologies.

IPM — Interior permanent magnet motor.

LineStream Technologies — Pioneers in the world of embedded controls software. Boasting a team of motor control experts from six different countries cumulatively speaking fifteen languages and possessing over eighty years of industry experience, LineStream is fast becoming the world's preeminent stronghold of embedded motor control knowledge.

Motor Parameters ID or Motor Identification — A feature added to InstaSPIN-FOC, providing a tool to the user so that there is no barrier between running a motor to its highest performance even though the motor parameters are unknown.

PI — Proportional-integral regulator.

PMSM — Permanent magnet synchronous motor.

PowerWarp™ — A mode of operation for AC induction™ motors (ACIM) that minimizes motor losses under lightly loaded conditions.

Rs-Offline Recalibration — InstaSPIN-FOC feature that is used to recalibrate the stator resistance, R_s , when the motor is not running.

Rs-Online Recalibration — InstaSPIN-FOC feature that is used to recalibrate the stator resistance, R_s , while the motor is running in closed loop.

SpinTAC™ Motion Control Suite — Includes an advanced speed controller, a motion engine, and a motion sequence planner. The SpinTAC disturbance-rejecting speed controller proactively estimates and compensates for system disturbances in real-time, improving overall product performance. The SpinTAC motion engine calculates the ideal reference signal (with feed forward) based on user-defined parameters. SpinTAC supports standard industry curves, and LineStream's proprietary "smooth trajectory" curve. The SpinTAC motion sequence planner operates user-defined state transition maps, making it easy to design complex motion sequences.

SVM — Space-vector modulation.

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间接权利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, 但他们将独立负责满足与其产品及其应用中使用 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, 并且由客户独立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.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/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.cn/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
Copyright © 2015, 德州仪器半导体技术(上海)有限公司

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间接版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, 但他们将独立负责满足与其产品及其应用中使用 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, 并且由客户独立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.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/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.cn/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

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2015, Texas Instruments Incorporated