

Technical White Paper

加速实时控制处理：从 经检验可靠的 MCU 到下一代 MCU



摘要

本文探讨了专用硬件加速器在实时控制系统中的重要性。本文档强调了实时控制环路的处理阶段的作用，并解释了集成到高性能微控制器 (MCU) 中的不同硬件加速器在协助降低系统的整体延迟方面发挥的作用。这里讨论了增强型浮点功能、集成型三角函数和控制律加速器以及各种用于优化通信的技术。

本文最后介绍了两个专为高级实时控制应用而设计的 MCU 产品系列：用于专用控制系统设计的 C2000™ 实时 MCU 产品系列，以及基于 Arm® 的 AM26x MCU 产品系列，后者可在以 Arm 为中心的生态系统中提供各种处理能力。

内容

1 引言.....	2
2 浮点单元.....	2
3 三角函数加速器.....	3
4 控制律加速器.....	3
5 Viterbi、复杂数学运算和 CRC 单元.....	3
6 工业通信子系统.....	3
7 了解满足实时控制需求的出色 MCU.....	4

插图清单

图 1-1. 实时控制环路的主要功能块.....	2
--------------------------	---

1 引言

实时控制系统是众多关键应用的神经中枢。这些系统协调了感应、处理和驱动之间的微妙平衡，其重要性不言而喻。

以电动汽车中的牵引逆变器为例。逆变器的主要功能是将电池的直流电源转换为电机依赖的三相交流电源。在这种情况下，每一毫秒都至关重要。逆变器不断根据路况、负载需求和驾驶员输入等变量进行调节，提供平稳且节能的驾驶体验。同样，对工业机器人进行编程，以确保其在重复的任务中保持高精度。无论是旋转角度还是施加的力，速度和精度都至关重要。即使是细微的偏差也可能导致产品出现缺陷。得益于实时控制系统，机器人和车辆中的电机能够全天候安全无缝地运行。

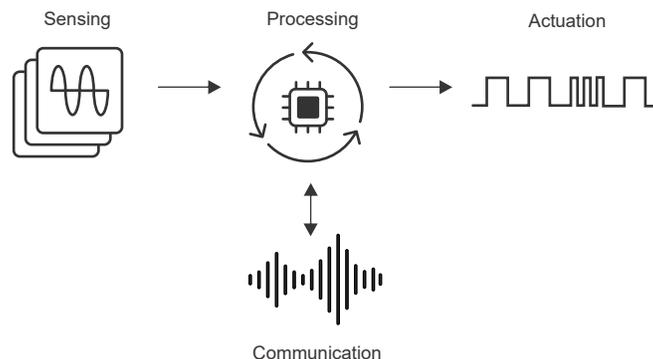


图 1-1. 实时控制环路的主要功能块

每个实时控制系统都包含：

1. **感应**：无论是电动汽车电池中的温度传感器还是机械臂中的位置传感器，这些器件都能持续采集实时数据。
2. **处理**：精密的算法会解读这些原始数据。鉴于实时需求，该阶段的速度和精度至关重要。
3. **驱动**：系统会接收命令，从而根据处理的数据产生实际的操作。

在设计实时控制系统（无论是多轴驱动器、工业机器人、电动汽车还是光伏逆变器）时，主要目标是最大限度地减少延迟，从而优化性能。配备专用硬件加速器的高性能微控制器可实现这一目标。这些加速器专为高效处理复杂的控制算法而设计。以下各节重点介绍实时控制环路的处理阶段，讨论了算法开发以及硬件加速器在尽可能减少系统延迟方面的作用。本文最后回顾了 TI 为这些应用打造的出色 MCU 产品系列。

2 浮点单元

许多实时控制系统设计都始于仿真工具，其中控制算法是使用浮点数学开发的。浮点数学提供了较大的动态范围，因此与使用定点数学相比，代码开发更轻松。例如，调节和饱和不再是问题。使用浮点数学开发的控制算法也更强大，因为这些值不会在上溢或下溢时绕回数字行。

用于实时控制的高性能 MCU 包含一个极其快速的 CPU，其硬件支持 32 位定点和 32 位（或 64 位）浮点数学运算。这样就可轻松地将控制算法移植到器件上，并支持多用途并发处理。

3 三角函数加速器

在控制算法中，某些数学运算显得尤为重要。Park 和反向 Park 变换、空间矢量生成、直接正交零和反向直接正交零变换、FFT 幅度和相位计算等运算都很重要。为什么？因为这些运算在信号调制、数据转换和系统分析中起着关键作用，有助于将原始传感器数据转换为切实可行的见解。此外，其他基本运算（如正弦、余弦、反正切、除法和平方根）也是这些数学运算的基础。然而，这些运算是周期密集型的，当在微控制器的 CPU 上运行时，可能会减慢系统响应的速度。

为了确保这些运算不会成为瓶颈，使用增强型浮点功能至关重要。一个有效的方法是使用扩展指令集来优化这些函数。设计完善的编译器也很重要，能够自动生成三角和算术指令。这样可确保编译器能够依赖这些经过优化的指令，而不是仅仅依靠标准的运行时支持库调用，从而加快计算速度。

4 控制律加速器

许多复杂的实时控制应用都需要集成式控制律加速器提供更高级别的处理性能。例如，典型的功率数字控制器由三个部分组成：一个用于捕获输入数据的模数转换器 (ADC)、一个用于计算控制律算法（例如，PID、两极点或两零点、三极点或三零点补偿器）的数学引擎，以及一个用于输出计算波形的 PWM 通道。高性能 MCU 将这些功能集成在单个器件中，以更大限度地减少延迟（并降低系统复杂性和成本），从而生成绝对最小采样输出延迟。

支持 32 位浮点数学密集型计算是标准功能，因此可以管理底层控制环路，与 CPU 相比性能和效率均有提升。此外，直接访问存储器和控制外设（例如模数转换器和 PWM 模块）有助于更大限度地缩短延迟。这种集成型控制律加速器可以在无需 CPU 干预的情况下响应外设触发器。加速器不使用中断来实现硬件同步，也不必进行任何上下文切换，从而提高了效率。这种方法消除了抖动，并且执行时间变得确定。有关这些加速器的详细基准和见解，请参阅 [增强 C2000™ 微控制器系列的计算性能](#) 应用手册。

5 Viterbi、复杂数学运算和 CRC 单元

随着系统复杂性的增加，在器件和控制单元之间进行可靠且快速的通信显得日益重要。这不仅涉及数据交换，还涉及对不断变化的条件做出及时、准确的响应。无论是电动汽车与充电站同步还是工业机器人中继数据，通信协议的质量都会直接影响系统性能。

高性能 MCU 具有用于 Viterbi 解码、复数 FFT、复数滤波器和循环冗余校验 (CRC) 的紧耦合定点加速器，可极大地提高通信性能。这种加速器也可用于通用信号处理，例如滤波和频谱分析，从而扩展系统的功能并增添其价值。

6 工业通信子系统

另一种方法是使用具有专用工业通信子系统的可编程实时单元。此选项提供了多功能性，便于实时处理和工业协议集成，尤其是在需要确定性通信的系统中。双核架构和专用 RAM 便于进行快速、并行的数据处理，并提供最短的延迟。独立内核可以同时运行，管理不同的任务，从而优化通信流并确保毫无延迟地执行高优先级任务。根据设计，该子系统可以与各种工业通信协议无缝连接，从而提供灵活性和广泛的应用潜力。

7 了解满足实时控制需求的出色 MCU

随着实时控制系统复杂性不断增加且其要求不断扩大，选择合适的微控制器变得至关重要。凭借在开发实时控制技术方面超过 25 年的经验，TI 很自豪能提供两个专为满足这些高级需求而量身定制的出色微控制器产品系列。

对于积极参与严格实时控制应用的用户来说，基于专有架构的 **TI C2000 实时 MCU 产品系列** 提供了我们专用的控制系统设计。这些器件专为电机驱动和可再生能源系统等要求严苛的领域量身定制。这些产品提供先进的片上元件，包括高分辨率 PWM、ADC 和本文讨论的许多不同的硬件加速器。凭借所有这些量身定制的功能，**C2000 MCU** 成为对精度要求很高的高性能控制工程的理想选择。

相反，当工程需要强大的实时控制并需要能够处理各种工作负载时，我们基于 **Arm® 的 AM26x MCU 产品系列** 表现优异。该产品系列基于流行的 **Arm Cortex-R** 架构，不仅在控制（利用集成的 **C2000** 控制功能）方面出色，还擅长管理从数据分析到复杂的通信协议在内的各种任务。我们的 **AM26x MCU** 具有一套全面的特性，包括增强型安全模块和专用通信接口，以及高达 **SIL 3** 或 **ASIL-D** 的功能安全要求，因此非常适合寻求在以 **Arm** 为中心的生态系统中实现各种处理能力和无缝集成的专业人士。

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司