

# 智能机器控制设计指南

智能机器控制设计指南介绍了当今机器制造商所面临的挑战，并展示了一些经验证的方法和解决方案来帮助创新的机器制造商在竞争中脱颖而出。通过本指南，您将了解图形化系统设计和可自定义的现成硬件对设计流程和商业成功的影响。

- ▶ I 智能机器工业
- ▶ II 关键技术
- ▶ III 应用实例

## I 智能机器工业

最近智能机器的普及引发了很多激烈的讨论。这些系统不仅以不断飙升的速度和高精度执行重复性任务，还需要适应不断变化的环境，其自动化程序也是前所未有的。与前几代的技术一样，智能机器将会影响我们日常生活的方方面面。它们将改变着人们生产商品、医生进行手术、物流企业管理存货，甚至我们教育后代的方式。

讨论的主题范围从对未来低技术含量工作消失的担心涵盖到推动制造业在高薪国家的复苏。虽然研究机构、经济学家和媒体都在辩论信息技术集成到机器中的影响，但是工程师和科学家的任务是提供更加灵活和多功能的制造系统。这些系统必须帮助制造业满足人们对产品种类的需求以及应对消费产品生命周期不断缩短的状况。

### 智能机器的特性

两大因素推动着制造设备的创新：一个是生产产品的个性化和复杂化，另一个是日益增长的生产力和质量需求。机器和设备制造商已经不再设计单一用途的机器。他们不断开发灵活、多用途的机器来满足当今的各种制造需求，如小批量生产、根据客户需求定制产品以及将多种功能集于一台设备的高度集成化产品趋势。

由于现代机器可以比以往更加自主地运行，这样就可以防止和修正由于原材料、热工作点漂移或机械部件磨损和破裂等条件变化而引起的加工误差。借助广泛的传感器网络，智能机器可以获取有关过程、机器状态及其所处环境的信息。这有助于增加机器的正常运行时间，并提高质量水平。此外，这些系统可以通过挖掘数据、利用仿真模型或学习针对特定应用的算法从而不断改善它们的性能。

最后，机器能够与其他自动化系统交换信息，并将状态更新发送至更高层次的控制系统。这实现了理想的智能工厂和自动化生产线：可适应不断变化的条件、可平衡机器之间的工作负载以及在机器出现故障前通知维修人员。

### 设计方法与挑战

现代机器控制系统通过获取环境、进程和机器参数等相关数据和信息来适应不断变化的条件、执行不完全重复的任务或者提高效率和性能。传感器与测量技术扮演着越来越重要的角色，因为他们使得设备制造商能够开发出可感知环境以及实时监测执行过程的系统，从而确保重要机械部件的良好状态，并利用这些信息进行自适应控制。这要求控制系统能够集成传感器数据、实时采集信息，并在高速运行控制循环的同时并行处理来自多个传感器的信息。具有工业级耐用性的高性能嵌入式系统通过模块化 I/O 设备提供直接的传感器连接。当今领先的设备制造商采用实时处理器和可编程硬件相结合的异构计算架构来满足最苛刻的应用需求。

为了解决当今的制造需求，机器制造商必须设计高度模块化的系统来满足客户的具体要求或者针对不同制造工艺和不同产品现场调整系统，而且有时甚至不需要操作员的交互。模块化方法不仅帮助 OEM 厂商开发出可以在多个机器上重复利用的组件，简化了现成子组件的集成，而且也显著改变了他们设计系统的方式。机械系统的模块化特性需要反映在控制系统架构上。与传统单机系统不同的是，现代机器是

基于一个控制系统网络。这需要一个无缝通信基础设施来处理时间要求严格的数据、优先级较低的数据和状态信息，并与监控系统进行通信。为了应对日益增加的分布式嵌入式系统复杂性，机器制造商可以采用以软件为中心的系统设计方法。

过去，设计团队是由机械、电气和控制工程师组成，各自负责自己的设计任务。然而，当今的现代化机器需要不同的设计团队更紧密地合作。

面向机电一体化设计工具可仿真整个设计过程中机械和电气子系统之间的交互，从而优化了机器开发。以前，来自各个学科领域的工程师团队都各自独立地工作或按顺序进行开发。设计决策都是独立做出的，导致开发时间和成本增加。如今，为了通过机电一体化方法来简化开发，团队就需要同时并行工作，在设计、原型和部署上相互合作。机电一体化方法的一个重要方面是构建虚拟原型的能力，因为它有助工程师和科学家在机器尚未实际成型之前就可以先对机器进行研究。

领先的机器制造商通过功能来实现智能机器的差异化，这些功能需要采用一些重要技术，比如：

- 多个控制系统和异构计算架构的组合
- 软硬件集成平台，可提供
  - 信号分析工具、高速控制回路和算法
  - 仿真和建模工具
  - 联网和通信功能
- 以软件为中心的设计方法，可以帮助应对日益增加的系统复杂性

访问 [ni.com/machinedesign](https://ni.com/machinedesign)，了解更多关于机械控制应用的 NI 工具和技术。

## II 关键技术

### 分散协同控制

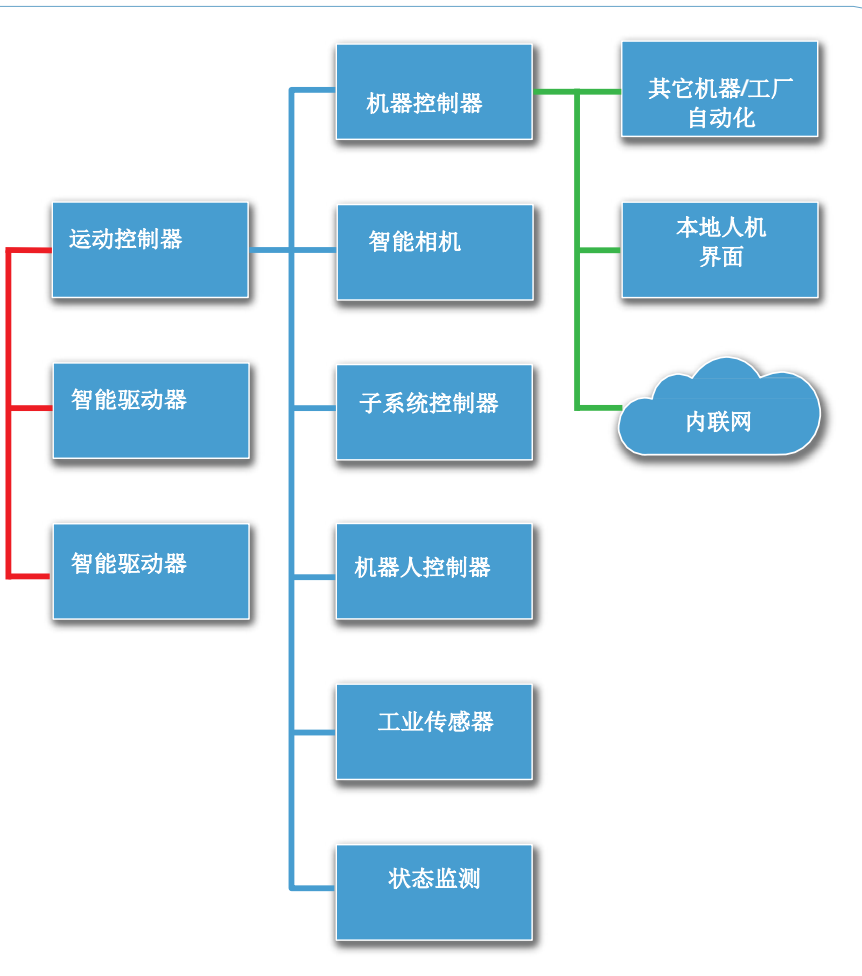
现代机器采用的是模块化方法。它们包含了一个智能子系统网络，这些子系统共同执行机器内的所有自动化任务，并与更高层次的控制系统进行机器设备层面的通信，从而使智能工厂成为可能。如果要创建自适应且可扩展的系统，控制系统结构必须能够反映这种模块化特性。互连多个子系统并保持定时和同步需要使用工业通信协议。以软件为中心的设计方法和能够让单个设计工具实现多个不同自动化任务的编程工具可以帮助用户在控制软件中反映机械系统的模块化特性。

虽然简单的系统可能没有采用将一个中央控制器连接至分散 I/O 的典型概念，但现代机器采用了一个基于分层结构的控制架构，

其中较高层次的控制系统连接到从控制器，从控制器负责执行定义清晰且受控制的自动化操作。

传统的可编程逻辑控制器(PLC)在此装置中发挥着重要作用，特别是对逻辑或安全功能的实现，但现代机器控制系统采用嵌入式控制和监测系统，以实现先进的控制、机器视觉和运动控制功能或机器状态监测。除了连接到主控制器，智能子系统通常还可以与同一层的系统进行交互，以实现触发和同步任务，进而实现高性能视觉引导运动或基于位置的触发和数据采集等应用。

当今机器制造商面临的一个最大挑战是采用嵌入式技术。在紧迫的上市时间需求和激烈的竞争面前，他们没有足够的时间和资源来验证自定义嵌入式硬件开发的价值。通常情况下，他们没有自己的嵌入式工程师，只能选择将这些工作外包。



分散协同机控制系统系统

为机器控制系统选择硬件是一项艰巨的任务。系统工程部门经常需要使用高性价比的自定义嵌入式系统来替代易用、低风险的黑箱解决方案，因为自定义嵌入式系统能帮助他们开发差异化的功能，而这是决定机器在市场上成功还是失败的关键。自定义解决方案通常会让这些设计团队走出自己的熟知的领域，因此他们常常更倾向于他们熟悉的传统解决方案，但这可能会限制他们将差异化智能功能添加到机器中的能力。

为了应对这些挑战，NI 提供了一个基于平台的方法，可帮助各领域专家配置模块化的嵌入式系统，并使用同一个图形化设计工具编程实现不同的自动化任务。这种方法称为图形化系统设计，它结合了 NI LabVIEW 图形化编程和 LabVIEW 可重配置 I/O(RIO)架构，现已经被领先的机器制造商广泛采用。LabVIEW 图形化编程可帮助领先的机器制造商应对日益增加的系统复杂性。机器制造商可以使用 LabVIEW 来增强其工具链的开发，并可借助用于运动控制、机器视觉和控制设计与仿真的附加模块；机器故障预测与状态监测功能以及广泛的 I/O 硬件和通信协议支持来进一步简化设计过程。

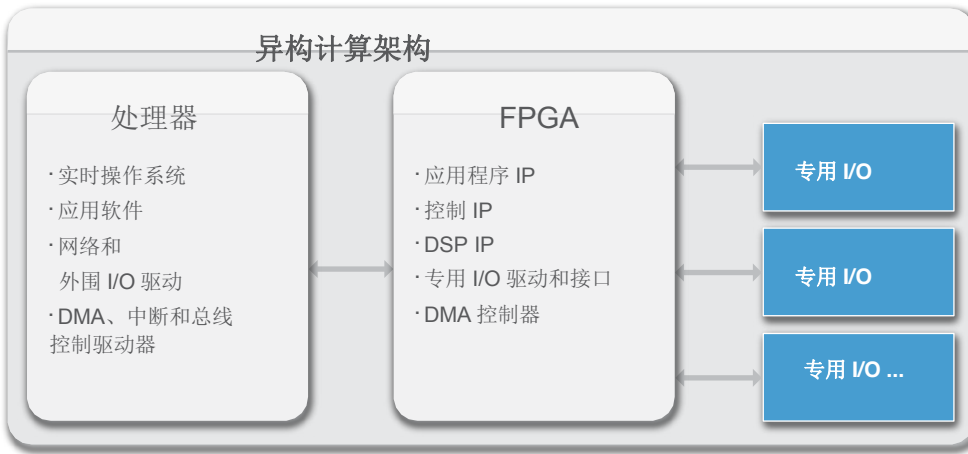
LabVIEW RIO 架构提供了一种混合的方法：一个完全自定义的现成平台，搭载可编程 FPGA 模块，并且能够访问 NI 和第三方供应商提供的各种 I/O 模块。

通过使用 LabVIEW FPGA 模块所提供的功能和 IP，机器制造商可以专注于自定义算法的设计和优化，而不是花费数周甚至数月的时间在硬件设计上或者让第三方公司设计又一个针对特定应用的黑匣子嵌入式解决方案。基于相同架构的自定义 I/O 前端和仅板卡模块提供了更高的灵活性。

### 异构计算架构

随着机器控制应用越来越复杂，硬件架构和嵌入式系统设计工具也必须满足日益苛刻的需求同时还要缩短设计时间。过去，许多嵌入式系统仅采用单个 CPU，因此系统设计师都依赖于 CPU 时钟速度的提升、多核计算技术以及其他创新方法来满足复杂应用所需的处理能力。然而，越来越多的系统设计工程师开始转向具有多个不同处理元件的计算架构上，这种架构保证了吞吐量、延迟、灵活性、成本等因素之间的最佳平衡。异构计算架构便可提供所有这些优势，使先进机器应用所需的高性能嵌入式系统得以实现。

为了说明异构计算架构带来的好处，我们来设想一个由 CPU、FPGA 和 I/O 组成的架构。FPGA 非常适用于处理并行计算，比如并行控制循环、在大量数据通道上运行信号处理，以及在一个系统中执行多个独立的自动化任务。另外，由于 FPGA 可直接在硬件中执行计算，因而为自定义触发和高速闭环控制等任务提供了低延迟处理方法。将 FPGA 集成到计算架构也可提高嵌入式系统的灵活性，使它们相比具有固定逻辑的系统更容易升级，也更能适应不断变化的 I/O 要求。将 CPU 和 FPGA 集成到



嵌入式系统设计工程师将微处理器和 FPGA 集成到同一个异构计算架构，以充分利用每个处理元件的优势和更优化地满足复杂的应用需求。

同一个异构架构意味着系统设计人员不需要在 FPGA 和 CPU 之间做出抉择。此外，相比尝试使用单元解决方案来解决该元件并不擅长解决的问题，选择异构架构要明智得多。例如，单个 FPGA 就可以处理通常使用大量 CPU 来执行的低延迟并行任务。

虽然包含多个处理单元的嵌入式系统设计有很多优点，但当涉及到软件开发时同样也存在诸多挑战。嵌入式系统的专业架构包含了许多独立的处理单元和各种不同的工具，需要专业知识来对其进行编程，这意味着需要大型的设计团队。例如，FPGA 编程通常需要具备 VHDL 编程知识，这个技能可能需要大量的培训投资、更多的员工或昂贵的外包。此外，开发软件栈来支持异构架构



NI CompactRIO 在一个紧凑、坚固的外形结构中结合了异构计算架构和广泛的 I/O 模块。

的工作量非常大，涉及驱动集成、板卡支持、开发中间件来实现元件间通信、I/O 接口逻辑等。系统设计工程师可以使用由标准异构架构、可互换 I/O 和高层系统设计软件组成的集成软硬件平台来解决这些挑战。高层设计工具基于底层硬件知识，可在开发过程中抽象系统架构和 I/O，提高生产力以及减少系统设计人员管理底层实现细节的需求。开发基于异构架构的嵌入式系统时，系统设计人员可以使用高层系统设计工具来抽象单个处理元件（如 FPGA）的架构，并提供一个统一的编程模型来帮助设计人员利用不同元件的性能优势。此外，高层设计软件的抽象可进一步简化功能行为的描述，即使硬件或通信接口发生变化也可重复利用代码。

目前市场上已经提供了基于异构架构的现成嵌入式系统平台，避免了设计自定义硬件的需要。NI 提供了一个基于 LabVIEW RIO 架构的现成平台，包含从板卡级 NI Single-Board RIO 到工业封装的 NI CompactRIO 和 PXI 等各种外形结构和性能级别。广泛的 I/O 模块生态系统包含了各种模拟和数字测量模块以及工业总线连接模块，可帮助工程师在智能机器应用中充分利用这些平台。

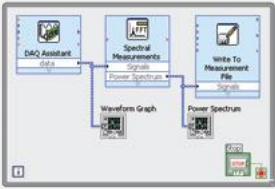
LabVIEW 使得工程师能够使用一致的图形化编程方法在异构硬件上编程 CPU 和 FPGA。此外，LabVIEW 基于底层架构原理抽象了系统定时、I/O 访问以及元件间通信，提供了一个丰富的 IP 核库来实现运动控制、机器视觉、状态监测、预测与诊断等任务的自动化执行。

访问 [ni.com/embeddedsystems](http://ni.com/embeddedsystems)，了解更多关于 LabVIEW RIO 架构和 NI 的异构计算平台产品。



借助 NI Single-Board RIO，用户可以将自定义 I/O 板卡与包含实时处理器和 FPGA 的现成嵌入式板卡相结合。

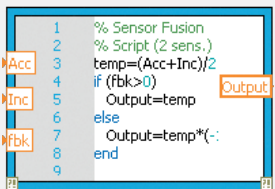
## 数据流



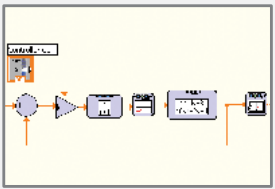
## C|HDL



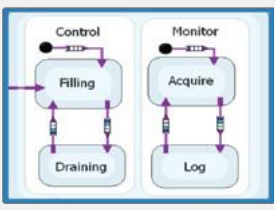
## 文本数学



## 仿真



## 状态图



## 机电一体化设计方法

在现代机器设计中，每个决定都会产生连锁反应。如果机械团队决定更改材料，就会改变机械部件的重量，进而影响电机规格，有时甚至会影响高效运行机器所需的电机类型。从步进电机更换为伺服电动机会显著增加控制算法的复杂性以及对嵌入式系统算法处理性能的要求。提高机械、电气和控制工程师之间的团队沟通和合作至关重要。此外，如果工具在整个开发周期的各个阶段能够无缝集成以及帮助工程师共享数据和信息，就会大大提高合作效率。

机电一体化是整个业界优化现代机器设计过程的一个努力方向。它集成了最优的开发实践和技术来简化设计、原型和部署。

软件工具在采用机电一体化设计方法上起到了关键作用。LabVIEW 提供了多种不同的计算模型，可让工程师选择最适合其任务的方法，从而帮助工程团队降低机器设计的成本和风险。LabVIEW 将多个计算模型与显式定时和并发结构相结合，对于开发和实现协同控制系统非常有用。最重要的是该环境能够让系统设计人员顺利地桌面仿真过渡到实时原型开发、硬件在环仿真再到最终的部署。而 LabVIEW 支持微处理器、FPGA 以及图形处理器等不同异构终端的能力可确保不同的应用能够采用最合适的处理元件。

有用的机器控制计算模型包括数据流、状态图、ANSI C 和 VHDL 代码、文本数学、多速率、仿真和反馈控制。数据流编程可以轻松地创建并行任务，如通信、监测和控制。其他编程计算模型包括用于微处理器的 ANSI C 和用于 FPGA 的 VHDL。面向数学的文本编程可以支持由研究人员和工程师为物理系统的各种组件开发的自定义.m 文件。多速率计算可以实现数字信号处理。动态系统仿真和反馈控制也由一个包含信号流表示方法的独立计算模型来表示。状态图是另一种常用来表示离散逻辑的计算模型。虽然这些计算模型在早期可能需要在台式计算机上运行，但是 LabVIEW 系统开发环境可简化这些模型部署到嵌入式控制和监测平台的过程。

信息物理系统所需的多种计算模型



另一个关键因素是与其它设计工具的互用性。LabVIEW 通过通用的文件格式或者联合仿真的方式为从用于机械设计和仿真的 CAD 软件工具、电子元器件仿真和布线工具到多物理仿真软件包等常见工程工具提供了接口。

与不同厂商提供的软件和硬件组件之间的互操作性有助于实现系统的可扩展性和可重配置性。机械设计师应该摒弃以前那种基于封闭架构的黑箱方法。

访问 [ni.com/mechatronics](http://ni.com/mechatronics)，了解 NI 工具如何支持机电一体化设计方法。

### 可重配置运动控制

无论是单个电机或一组电机在一个多维空间中进行协调运动，运动是通常机械功能的一个重要组成部分。

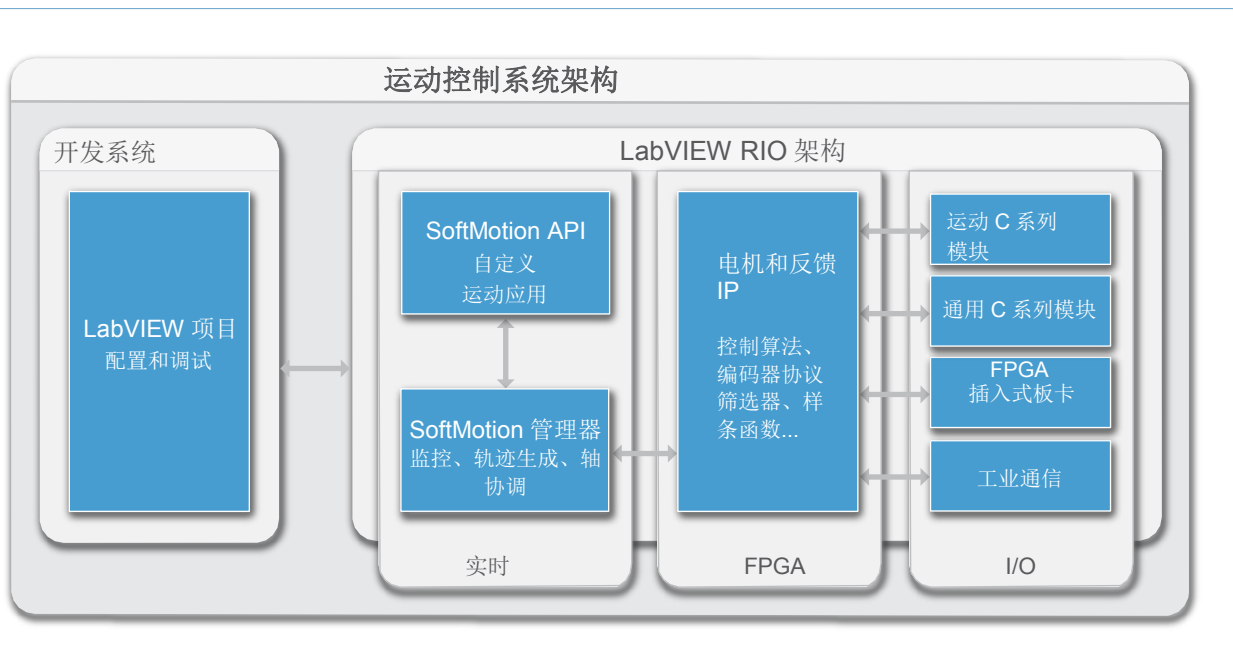
NI 将运动控制作为 LabVIEW 和 LabVIEW RIO 架构的一部分。机械制造商可以利用图形化编程的优势来设计和验证高级运动轨迹，并迅速将其部署到嵌入式控制器和监测硬件上。通过使用标准接口来驱动器和电机，比如步进电机和方向电机、p-command、模拟或工业协议，工程师即可创建强大的多轴运动控制系统。此外，嵌入式 NI C 系列驱动产品系列和 LabVIEW NI SoftMotion 模块提供的运动 IP 可实现高度集成的嵌入式运动控制系统和无与伦比的灵活性和自定义性。



LabVIEW NI SoftMotion 和 AKD EtherCAT 驱动器为多轴运动控制提供了基于 CompactRIO 或 PXI 的理想解决方案。

## 运动控制系统架构：对比可重配置架构与传统架构

固定功能控制器和驱动器随附的固件无法提供用户可修改的行为。这些控制器和驱动器可以针对特定目的进行优化，比如驱动数控铣刀主轴，也可以设计为尽可能地通用，以适用于业内或多个行业的各种应用。只要是在设计用例范围内的操作，这些固定功能的控制器和驱动器通常是开发应用的有效选择。客户可以利用所有的设计工作和特性定义，如高级筛选、自动调谐、测试面板、诊断工具以及固件和产品具有的其他一系列功能。



LabVIEW NI SoftMotion 模块提供了固定功能的运动控制器的功能集和性能，而且还可根据需要进行自定义。

对于固定功能的控制器，当运动控制器和驱动器固件的功能无法满足机器制造商的需要时，问题就出现了。随着机器变得更加专业化和日益复杂化，这种情况也越来越普遍。制造应用一个常见的需求是 I/O 和运动数据（通常是位置，有时是速度或加速度）的同步。所涉及的 I/O 类型根据应用、精准度和测量速率不同会有很大差别。在内置 I/O 通道数量满足应用需求的情况下，许多固定功能设备可提供数字触发等简单的测量。而复杂的测量设备需要增加一个专用数据采集系统来处理不同的速率和 I/O 类型。数据速率越高，采集与运动数据完全同步的难度就越高。当速率超过 2-3 kHz，EtherCAT 等确定性总线需要一个强大的主控制器，或采用专用的采集和数据抽取，但也会出现问题。当速率超过 10 kHz，使用数字总线已经不切实际了。专用的触发线仍可用于系统之间，但可能难以配置。由于高工作量或实现的复杂度增加，

在线处理、自定义触发数据存储以及机器所需的其他功能变成了开发的瓶颈。

设备制造商经常采用的另一种解决方案是自定义设计。通过定制的运动控制器或驱动器，机器制造商可以准确地定义所需的系统行为。然而，自定义设计通常成本昂贵，非常耗时，而且有其局限性。或者，设计和制造可以外包给第三方公司，但这种方法也非常昂贵，并且可能会导致机器的核心 IP 泄露给竞争对手。



*C 系列驱动器结合 CompactRIO 或 NI Single-Board RIO 可实现完全可定制的嵌入式运动控制系统。*

如果要结合固定功能设备的所有功能和性能并且必要时可以进行自定义，机器制造商需要一个能够长期使用的框架来支持固定功能设备的产品线，并能够显著增强测试和迭代功能。该框架应当是模块化的，使用户能够完全定义系统的组件来满足各种严苛的应用需求。

LabVIEW RIO 架构和 LabVIEW NI SoftMotion 模块为机器制造商提供了两全其美的解决方案，使他们能够通过一个高层运动 API 来编程运动曲线，并可连接到固定功能的智能驱动器。通过将关键的电机控制 IP 移动到 FPGA，并使用专用的驱动器、驱动器接口或通用 I/O 模块，机器制造商可以保留他们的高层次运动代码并自定义底层 IP。

重新配置标准框架 - 必要时进行自定义但其余部分仍可继续使用 - 是一个很强大的概念。在这个软件架构中，运动任务被分解，工程师可以选择在哪里运行某个特定任务来满足应用需求。此外，每个任务或程序块都是开放的；因此工程师可以修改非常底层的功能。最后，机器控制软件包也应该是模块化的，这样可以在不影响系统中其它程序块的情况下修改和自定义特定任务。这种模块化方法在很大程度上与硬件无关。这意味着工程师可以混合搭配各种组件来创建一个满足其轴数、处理能力、与其他 I/O 子系统集成以及自定义需求的硬件系统。

这种方法提供的灵活性是非常强大的。工程师可以使用该方法来轻松地在两个不同厂商提供的 FPGA 控制的驱动器以及外部智能驱动器之间实现协调运动。工程师还可以协调许多不同类型的电机，并可针对每种电机使用不同类型的反馈，而且不需要改变现有的轨迹生成或移动曲线软件。从本质上说，使用模块化 I/O 和 FPGA 提供的任何功能可以集成到运动轴上，而该运动轴可以与完全不同配置的其他轴相集成。

访问 [ni.com/motion](https://ni.com/motion)，了解更多关于 NI 运动控制产品。

### 机器视觉

几十年来，机器视觉技术在机器行业的应用日益普及。通过采用图像采集和处理，质量检测、机器人引导、拾放操作或零件分类等应用在性能上有了很大的提升。通过工业协议连接至主控制器和运动控制系统可以让工程师将机器视觉集成到现有流程，并基于图像分析结果做出决策。使用最新处理器和 FPGA 技术的强大嵌入式系统可实现更紧密的集成以及在一个硬件平台上执行不同的自动化任务，进而实现视觉伺服和动态操控等应用。

类似于运动功能通过附加模块的形式添加到 LabVIEW 环境中，NI 视觉开发模块是一个包含了数百个科学成像和机器视觉功能的丰富函数库，机器制造商可以使用 LabVIEW 软件对其进行编程，并将代码部署到适当的嵌入式控制器或者监测硬件中。

访问 [NI ni.com/vision](https://ni.com/vision)，了解更多关于 NI 机器视觉产品。



NI 视觉硬件和软件工具可让机器制造商实现视觉检测和科学成像任务。

### 不断变化的机器设计需求

缩短设计周期和设计具有更多功能的复杂机器需求已经显著地改变了设计方法。设计工具现在可以提供前所未有的灵活性和速度。几年前仅用于高端研究的算法和工具现在已经应用到工业开发中，而且功能不断增加，以使用于软硬件之间的设计。

NI 提供的软件工具可无缝地与其它设计工具交互，且可部署到不同的硬件平台，以快速生成原型以及评估和修改不同的控制器配置。NI 还提供了必要的路径来将所有在原型阶段编写的代码迁移到更灵活的自定义平台，从而避免了需要重新编写代码的麻烦和成本。

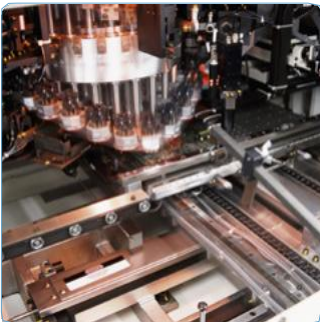
如果您正在开发比先前的设计更好、更快、更智能的高性能机器，那么您可能会碰到一些情况，需要使用先进的 I/O、自定义运动控制、机器视觉、精确的定时和同步以及专用控制算法。您需要跳出传统设备的局限性，应用可重配置的架构可为实现这些系统提供最高效方法。

### III 应用实例



#### 晶圆加工

在半导体制造中，人们对更高效的生产更多的半导体材料的需求永无止境。随着系统的集成化芯片的小型化以及全球价格竞争的加剧，晶圆加工不断挑战着设备的物理极限和运行极限。其结果是人们对用于掩模和蚀刻等精密工艺的晶片的物理和电气参数精准度要求日益严苛。Automation Works 公司使用 NI 的运动和视觉工具来开发其最前沿的半导体制造设备。



#### 电子器件制造

虽然许多光纤零件仍然是手工组装，但是莱特巴斯(LightPath)光学仪器阿尔伯克基(Albuquerque)分公司设计了集成的自动化方法来生产准直器，准直器是融合到光纤电缆中用于将光纤内的传输光转变成准直光的自聚焦透镜。这些复杂零件的性能和可靠性是电信系统整体性能不可或缺的一部分。



#### 自动焊接

Serimax 公司需要开发一个难用的、前沿的自动化管道焊接系统，该公司决定使用 CompactRIO。在 NI 联盟合作伙伴的帮助下，他们开发了一个强大的系统，能够适应不同客户的需求、提供最大正常运行时间、满足最高可靠性和质量标准、提供全球支持以及具有灵活的硬件和软件来解决未来现有机器的控制和监测需求。



### 金属成形机

锥齿轮和圆柱齿轮随处可见 - 汽车、飞机、卡车、拖拉机、为数千家庭供电的风力涡轮机、家里使用的剪草机以及其他电动工具。齿轮齿面和间距是提高运行特性的关键参数。Viewpoint Systems 和 Gleason 公司使用 LabVIEW RIO 架构为其齿轮精加工机床增加了新功能，使其效率提高 30% 的同时生产出更高质量的齿轮。



### 医疗设备

蛋白质结晶是药物研发过程的重要部分。通过将蛋白质与各种试剂混合的方式，找到一个蛋白质晶体适合的条件配方，然后用 X 射线衍射来研究蛋白质晶体。混合物的排列组合数量可以达到上百万种，这使得找到最佳的配方成为非常漫长繁琐的过程。

Coleman Technologies 公司使用 NI 嵌入式控制和监测工具开发了一个可完全自动化识别蛋白质晶体过程的医疗设备。

访问 [ni.com/solutions](http://ni.com/solutions)，了解这些应用的详细信息以及查找特定行业的案例。