

# 嵌入式工业控制计算机设计

中嵌科技有限公司 李驹光 吴金华

## 一、前言

工业控制计算机（简称工控机）是工业控制系统的核心，在很大程度上决定了工业控制系统的整体水平。目前，在工业控制系统中广泛使用的工控机大致可以分为两类：一类是通过将通用 PC 进行工业化设计、可满足大多数工业现场应用的工业控制计算机（或称为工业 PC）；该类型工业控制计算机脱胎于 PC，与 PC 架构兼容，因而具有 PC 功能强大、可扩展性好、软件开发与维护成本低等优点，但由于受到成本、功耗、体积和可靠性等因素的约束，其应用场合受到极大限制，特别是在工业控制系统前端，几乎完全无法使用；

另一类型的工业控制计算机，通常针对特定的应用设计，满足特定应用需求，几乎完全无法兼容 PC 架构，这类工业控制计算机通常也称为嵌入式工控机；嵌入式工控机具有良好的成本、功耗、体积和可靠性指标，虽然系统的软硬件开发难度要明显高于工业 PC，但市场需求旺盛，具有非常广阔的应用前景。

由于嵌入式工业控制计算机针对特定应用设计的特点，决定了其形态和功能的多样性，从而带来了巨大的设计工作量，同时由于其应用的分散性，无法形成较大的批量生产规模，嵌入式工控机的产销很难形成由一家或几家大公司独揽的局面，有很多较小规模的公司甚至个人会参与其设计。因此，掌握一些嵌入式工业控制计算机的基本设计方法和原则，对提高我国嵌入式工业控制应用技术的整体水平，具有重大的意义。

## 二、嵌入式工控机硬件系统

嵌入式工业控制计算机硬件平台选择和硬件系统的设计，本质上是由不同的应用需求所决定的。目前，工业控制现场所使用的从简单到复杂、形态和功能各异的工业控制计算机，亦是为实现不同的应用需求。

在过去的相当长一段时间内，工业控制计算机应用两极分化现象比较显著，即以 8 位单片机系统为代表的低端系统和以工业 PC 为代表的高端系统占据了工业控制应用系统的绝大多数。其中，以 8 位单片机系统为代表的低端系统具有低成本、低功耗、高稳定性的优势，但由于受到运算能力和存储容量的限制，系统性能较低，仅能实现较简单的运算与控制功能，使用在系统需求较低的场合。以工业 PC 为代表的高端系统具有强大的运算能力、存储能力、且软件开发方便等优点，但成本、功耗、体积和可靠性等指标无法完全满足某些工业现场的应用需求。因此，一种既有工业 PC 性能，又具有成本、功耗、体积、较高的可靠性和使用灵活性等优势的工业控制计算机，是工业控制系统发展的必然需求。近年来，工业控制计算机的硬件系统（特别是微处理器部分）的发展方向，即针对这种趋势出现了一些有趣的变化。

- X86 架构处理器不断进行“嵌入式”改造

较高的性能一直是 X86 架构处理器的固有优点，但成本、功耗、体积等则不尽如人意，在过去几十年里，X86 架构处理器主要用于 PC 及服务领域，这个矛盾并不突出，同时，也由于这些领域的应用驱动，X86 架构处理器在其发展过程中不断追求高性能，不太重视功耗、体积等指标。随着“后 PC”时代到来而引发的嵌入式应用的急剧增长，X86 架构处理器在巩固传统应用领域的同时，也试图在嵌入式应用领域占有较大的市场份额。为满足嵌入式应用市场的需求，X86 架构处理器不断进行“嵌入式”改造，在保持较

高性能的同时，降低成本、功耗和体积，其中，Intel 的 Atom 系列处理器及所采取的 SoC 策略，取得了不错的市场效果；VIA 则通过推出专用嵌入式节能处理器平台及专用芯片组，降低整体系统功耗及成本，以应用于对成本、功耗比较敏感的领域。可以预见，X86 架构处理器在今后的发展过程中，还会采用新技术和新工艺，在保持较高性能的同时，降低成本、功耗和体积，以便更好的满足不断增长的嵌入式应用需求。

- RISC 架构处理器异军突起

以ARM为代表的RISC架构嵌入式微处理器，在过去的十多年里取得了长足的发展，在满足较高性能要求的同时，其成本、功耗、体积等指标表现良好，凭借其综合优势，几乎占据了移动计算和嵌入式计算的全部市场份额。在巩固了这些领域后，RISC 架构处理器亦进军工业控制领域，并有占领从高端到低端全系列应用市场的趋势。ARM 最新推出的 Cortex-A8, Cortex-A9 及 Cortex-A15 架构，在保持低功耗、低成本同时，大幅度提高了处理器性能，特别是其峰值性能的提升，可适应各种要求最为严苛的应用，具有替换工业PC级工控机的能力；而 Cortex-M系列处理器则是ARM专门针对需要低功耗、低成本且有一定性能要求的嵌入式控制市场而设计的，与传统的 8051 内核相比，Cortex-M可以减少 10 倍以上的时钟周期和减少 2 倍的Flash空间完成相同的任务，功耗降低近 80%，且极具价格优势，因而对传统 8 位机市场构成巨大压力。

## 二、嵌入式工控机软件系统

软件系统是嵌入式工业控制计算机的灵魂，其中，操作系统是其的核心与基础。在传统的 8 位工控机系统中，由于受到运算能力和存储容量的限制，几乎不能使用真正意义上的操作系统，因此，其软件系统通常称为监控系统（或称为前后台系统），程序结构如图 1 - 1 所示。

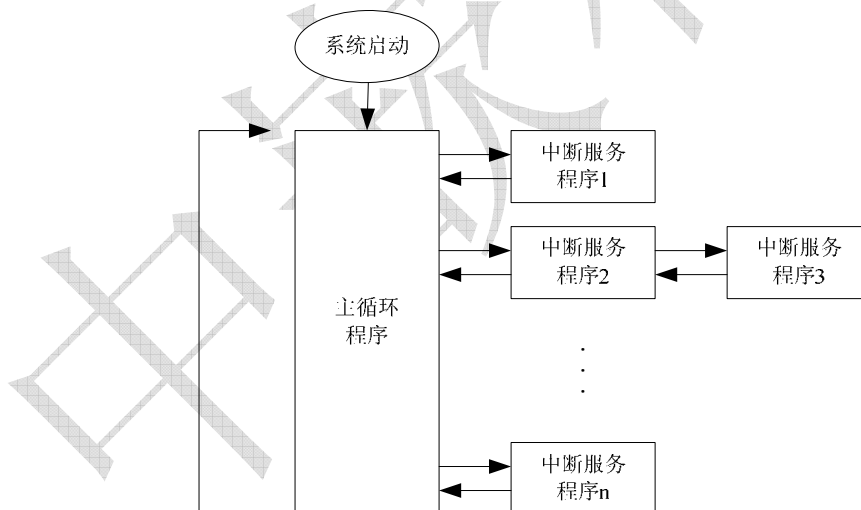


图 1 - 1 监控系统的程序结构

监控系统的整体结构通常由一个主循环程序和若干个中断服务程序构成，当系统启动后，首先完成最基本的初始化工作，然后进入主循环程序，主循环程序是一个无限循环，实现对诸如键盘、显示、输入输出端口等实时性要求不高的外设的扫描与处理，同时等待外部随机事件发生，触发中断，当中断产生后，系统立即从主循环程序进入中断服务程序执行，处理相应的中断事件，处理完毕后返回主循环程序继续执行并等待下一次中断产生。

由于中断服务程序可以打断当前正在运行的主循环程序，可以认为，中断服务程序较主程序更“优先”，因此，中断服务程序通常用于处理比较紧急或实时性要求较高的事件，即这些事件一旦发生，就可以立即得到系统的响应并及时处理。同时，即使系统当前正在执行某个中断服务程序（中断服务程序 2），依然可以被比它更“优先”的中断服务程序（中断服务程序 3）所打断，去执行这个中断服务程序，执行完毕后返回原来的中断服务程序继续执行，最后再返回主循环程序。

事实上，嵌入式操作系统内核就是由中断驱动的，很好的理解监控系统的程序执行流程对嵌入式操作系统工作原理的理解非常有帮助。

相对于嵌入式操作系统来说，监控系统结构简单、清晰，易于理解和实现，目前，在低端的嵌入式系统中，这种方式仍然广泛使用。但监控系统有它固有的弱点，如与硬件系统联系太紧密，无法在不同硬件平台上进行移植，代码的可重用性和可维护性较差等。

但随着嵌入式微处理器的功能不断增强，嵌入式软件越来越复杂，代码的可重用性和可维护性要求也越来越高，因此，迫切需要对软件结构进行优化，将一些公共操作抽象出来，剥离与硬件无关的部分，使这部分代码不依赖于特定的硬件环境实现，嵌入式操作系统正是在这种情况下产生和发展起来的，可以认为，嵌入式操作系统是通用操作系统向嵌入式应用领域的自然延伸。操作系统与计算机系统中其它部件的关系如图 1 - 2 所示。

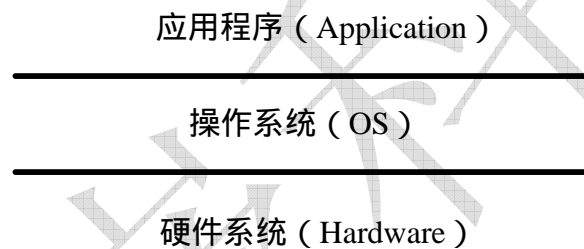


图 1 - 2 操作系统与其它部件的关系

嵌入式操作系统的引入，大大拓展了嵌入式系统的应用领域，它为嵌入式系统应用软件的开发提供了一个高效的平台，对嵌入式系统的推广使用具有重大意义。但是，必须清楚的看到，嵌入式操作系统也会带来一些不利的影晌，认为引入嵌入式操作系统就可以解决一切问题的想法是完全错误的。首先，嵌入式操作系统是一段非常复杂的代码，硬件系统需要较强的运算能力和较大的储存空间才足以支持其运行，功能越强大的嵌入式操作系统所需要的硬件资源就越多，而嵌入式系统的资源恰恰是非常有限的；其次，嵌入式操作系统的引入可以降低应用软件开发的复杂度，但却是以增加系统软件开发复杂度为代价的，如嵌入式操作系统在不用硬件平台上的移植、设备驱动程序的开发等。因此，在嵌入式系统的设计中，是否需要使用嵌入式操作系统，以及使用何种操作系统，是一个需要设计者仔细考虑的问题。

### 三、嵌入式工控机设计

近年来，随着嵌入式工业控制计算机的逐渐推广应用，其综合性能优势越来越得到业界的认同，根据特定应用需求，自行设计专用嵌入式工控机，逐渐成为工业控制计算机应用的新趋势。

由于嵌入式系统的差异性需求，形成了目前嵌入式微处理器及嵌入式操作系统种类繁多，百花齐放的局面，作为工业控制计算机系统的设计者，在进行特定应用系统设计时，面对浩若烟海的工控产品和嵌入式微处理器平台，如何选择最优的实现方案，显然需要考虑多方面的因素，但总体上可以归结为以下两个问题：

- 有什么——全面掌握产品情况

近几年来，嵌入式微处理器技术及嵌入式操作系统技术的发展异常迅速，各个半导体公司不断推陈出新，可供设计者选择的方案越来越多，但同时也带来产品生命周期越来越短、设计者决策越来越困难等问题。因此，一个优秀的设计者，需要随时掌握当前主流嵌入式微处理器及嵌入式操作系统的应用特点，跟踪技术发展的最新动态，了解主流软、硬件供应商的基本情况、嵌入式微处理器诸如速度、成本、功耗、体积、工作温度、供货情况、生命周期以及相关技术成熟度等问题，选择合适的软硬件产品。

- 要什么——深入了解应用需求

设计一个特定的嵌入式系统，需要深入了解和分析其应用需求，哪些是主要矛盾、哪些是次要矛盾，哪些指标是刚性的、哪些指标是柔性的，这对嵌入式系统软硬件平台的选择至关重要。例如，消费类电子产品通常要求较低成本和较短的开发周期，如开发成功会有较大的量产，同时，如果是便携式产品则有严格的体积和功耗限制，因此，嵌入式微处理器的选择必须充分考虑这些因素；而对于工业控制类设备，则对嵌入式微处理器的工作温度、稳定性和抗干扰能力、生命周期等指标要求较高，因此，软硬件平台选型的着眼点也会有较大的差异。

通常，左右嵌入式工业控制计算机系统性能的指标包含如下几个方面，可作为设计参考：

- 处理能力

处理能力是指嵌入式微处理器的运算能力，通常用 MIPS（每秒百万条指令）表征。例如，两个处理器的处理能力分别是 50MIPS 和 10MIPS，表示前者每秒可以执行 5 千万条指令，而后者每秒可执行 1 千万条指令，显然前者具有更强的处理能力。除此之外，处理器寄存器的位数（或数据总线宽度）也是一个重要因素，例如，32 位机的运算能力要强于 8 位机。

不同的工业应用场合，对嵌入式微处理器的处理能力有不同要求，选择合适的处理能力，构建综合性能最优的工业控制计算机系统，是对系统设计者的基本要求。

- 存储器

嵌入式系统存储可执行代码和待处理的数据，都需要一定数量的 RAM 和 ROM 存储器，同时，存储器的数据宽度也需要与微处理器可以访问的数据宽度对应，因此，设计者需要根据系统需求，决定储存容量及数据宽度，并可以根据实际情况，灵活增减。一般认为，微处理器的处理能力越强，需要配置的存储器容量就越大，同时，存储器的数据宽度也尽量与微处理器可以访问的最大数据宽度一致，以提高系统的整体运行效率。

- 系统功耗

根据应用场合的不同，嵌入式工业控制计算机有不同的功耗要求，但通常需要能尽可能降低系统功耗。在嵌入式工业控制计算机系统中，嵌入式微处理器的功耗对系统整体功耗的影响最大，运算能力越强的处理器，功耗越大，因此，嵌入式系统的处理能力和功耗是需要妥善平衡的两个重要指标。嵌入式微处理器的功耗通常用 mW/MIPS（毫瓦每百万条指令）表征，这个值越大，表示在处理能力相同的情况下耗电量就越大。显然，更低的功耗可以给系统带来诸如更少的发热、更小的体积和更高的可靠性等优点。

- 系统成本

评估嵌入式工业控制计算机系统成本，需要考虑开发成本和量产成本，两者之间的平衡关系受产品批量影响。通常，开发成本为固定的一次性投入，对于批量较大的产品，生产成本相对较低，开发成本可以高一些，而批量较小的产品，由于生产成本较高，对开发成本的要求更严格，因为为生产数量很少的产品做一个开发是很不划算的。同时，系统的开发成本还受到技术成熟度的影响，使用越主流、越成熟的技术，开发成本就越低。

- 开发周期

系统的开发周期通常也叫做面市时间（Time to Market），较短的开发周期可以使产品及早面市，获得更高的效益，相反，较长的开发周期会使产品的开发价值大打折扣，甚至失去开发价值，这一点在消费类电子产品领域尤为显著。

- 生命周期

简单的讲，生命周期是指系统自投入使用之日起，需要保证（平均）运行多长时间。产品生命周期的要求会影响从硬件到软件的各项设计的决定。作为工业控制系统核心部件的工业控制计算机，其生命周期要明显长于消费类电子产品，因此在系统设计时就需要考虑较长时间工作的稳定性问题，降低后期的系统维护成本。

- 系统可靠性

嵌入式系统通常都要求较高的可靠性，但工业控制计算机与儿童玩具的可靠性要求显然是不可同日而语的，同时，不同应用场合的工业控制计算机，可靠性要求亦有差异。因此，对可靠性要求越高的系统，需要更严谨的开发过程和更严格的测试过程。

因此，嵌入式工业控制计算机的设计，需要考虑诸多制约因素，一方面是千差万别的嵌入式应用需求，另一方面是令人眼花缭乱的可选方案，一个优秀的设计者，需要能从这些诸多的约束条件中，合理决策，构建满足特定应用需求的最优系统。

（全文完）