

第3章 嵌入式系统设计流程

从软件工程角度讲,项目流程分为需求分析、概要设计、详细设计、编码实现和测试 5 个阶段,嵌入式系统设计也符合这个规律。开始进行一个嵌入式项目之前,应先初步规划好系统完成之后是什么样子,具有什么功能和性能指标,用户如何操作等,即首先要明确系统的需求。进行需求分析不仅有助于设计人员理解用户的实际需要,而且可以帮助设计人员对系统可行性进行评估。明确需求之后,要对系统进行设计,包括系统层级结构设计、软硬件分界线设计、硬件模块设计、软件模块设计、抗干扰设计等方面。一般来说,设计分为概要设计和详细设计两个阶段,但二者之间并没有明确的界限,就如同“概要”和“详细”没有明确的界限一样。

3.1 需求分析的主要问题

嵌入式系统开发中,嵌入式处理器与外围数字电路、存储器、通信接口、键盘显示单元的选择与设计通常比较容易解决,系统研发人员通常视其为“工作”与“劳动”。但系统要实现的核心功能,包括测量、计算、分析、控制,以及系统的成本控制、系统的可靠性设计、系统的高性价比设计、“手持式”嵌入式系统的低功耗设计等,通常是系统设计的难点与重点。下面从几个不同的视角探讨嵌入式系统在需求分析阶段所要做的工作,以及这些工作的重要性。

1. 测量问题

测控领域的嵌入式系统通过测量特定信号来实现对物理量的检测、分析、控制任务,是系统开发的核心工作。不同的检测方法对应不同的测量电路及后续分析计算,不同的使用环境对应不同的输入/输出电路和接口方式。不论是何种测量方法,最终都归结为检测相关的电信号,再对此信号进行分析和计算。系统设计初期的分析通常需要明确以下几个方面的问题:

- (1) 测量方法对硬件电路的约束;
- (2) 测量精度对硬件电路的约束;
- (3) 测控装置的实时性要求对系统硬件资源的约束。

2. 分析计算

许多嵌入式系统实现功能时需要进行复杂的数学分析计算。在系统的需求分析及总体设计阶段,应对实现该分析计算所需的硬件资源和软件开销进行评估和统筹。例如,在设计高性能电力品质分析仪时,对信号要进行高速“交流采样”(每周波 1024 点数据),采样数据的 FFT 处理采用“蝶形算法”时,设计者要评估实现该算法所需要的计算量,包括乘法、除法、加法等,通常可先通过 MATLAB 仿真,进而确定分析计算工作对 MPU 的指令系统计算能力的要求、对 DSP 指令系统计算能力的要求,以及对嵌入式计算机外围资源要求——RAM 容量、系统时钟、终端管理等。

3. 系统控制

具有控制功能的嵌入式系统开发,在系统的设计初期,通常要考虑以下几个因素对控制品质的影响:

- (1) 被控参数的测量;
- (2) 控制算法的明确;
- (3) 控制信号的输出及输出方式;
- (4) 控制系统的实时性保障。

4. 可靠性

工业嵌入式系统的可靠性指标是最重要的指标之一,在嵌入式系统设计的需求分析阶段,嵌入式系统的可靠性设计贯穿于硬件设计、软件设计、电源设计、工艺设计等各个方面。

(1) 硬件设计方面。正确、合理的硬件设计是保障系统可靠的基础,在测量方面,要保证信号的稳定;在驱动方面,保证器件的驱动能力满足负荷;在抗干扰方面,要增加器件间的去耦措施以及干扰吸收措施;在整体可靠性方面,要采用 WATCHDOG 电路并与软件配合以避免系统死机。

(2) 软件设计方面。在测量方面,要根据信号的特点采取相应的软件数字滤波措施;在控制输出方面,要采取高速刷新的方法,避免接口电路干扰产生的误动作;在程序设计方面,要充分利用软件陷阱、软件冗余等抗干扰措施,并根据系统开发的具体情况,有针对性地展开软件容错设计。

(3) 电源设计方面。电源的稳定性与可靠性对嵌入式系统的可靠性是至关重要的。嵌入式系统硬件和软件的局部性损坏和错误对系统的影响是局部性的,而电源的损坏对系统是全局的、致命的。在保障电源可靠运行方面,通常需要考虑系统对电网浪涌冲击的吸收、对电网谐波干扰的消除、电源各回路容量的冗余设计、负载瞬间过载和短路的保护,以及电源防潮防尘设计。

(4) 工艺与结构方面。PCB 设计工艺对电路的电磁兼容性能影响较大,PCB 设计必须严格遵守电磁兼容的相关理论方法进行。另外,嵌入式系统在壳体安装方式对电磁兼容和散热都有较大影响,要综合考虑嵌入式系统结构的设计。

5. 成本控制与性价比

满足嵌入式系统的性能指标是嵌入式系统设计的首要任务,而最大限度地利用现有硬件资源来实现系统功能,降低硬件成本,提高嵌入式系统的性价比是嵌入式系统设计的高端工作。成本控制成功与否关系着该款嵌入式系统的市场生命力。成本控制包含两个方面的内容:构成嵌入式系统的硬件器件成本,以及生产嵌入式系统耗费的人力和物力成本,即生产成本。

在硬件成本降低方面,设计者通常采用的方法是:尽可能用软件去取代硬件;尽可能采用当前国际最流行的、市场用量最大的器件,这类器件往往性价比最高;在可能的条件下,尽可能地简化电路,减少器件使用数量。

在生产成本降低方面,设计者通常采用的方法是:在设计上减少生产加工步骤,简化加工工艺,简化安装工艺;通过优化、合理的软件设计减少嵌入式系统的调试、校验工作量等。

6. 嵌入式系统的低功耗设计

对于无市电供电环境中使用的手持式嵌入式系统,电池供电可能是唯一的选择。这类

嵌入式系统需要进行低功耗设计,这是嵌入式系统整体设计的重点,也是难点。嵌入式系统低功耗设计通常在以下几个方面采取措施:

- (1) 选择低功耗或有休眠模式的元器件;
- (2) 尽量简化电路设计,将各硬件功能分区,根据使用状态单独供电;
- (3) 根据嵌入式系统的设计需求和供电条件,以节电为目标设计多种不同的供电模式;
- (4) 根据系统功能,设计不同节电运行模式,使系统在满足需求的前提下,总是处于相对最低功耗状态。

3.2 嵌入式处理器选型

在嵌入式系统的设计阶段,处理器的选型是重点工作之一。对于所要开发的嵌入式系统,处理器的选择是多项设计约束条件平衡的结果,需要考虑以下因素。

1. 外围接口对嵌入式处理器选择的约束

嵌入式系统的输入/输出接口(包括模拟量输入/输出、开关量输入/输出、脉冲量输入/输出)、外围总线接口、控制接口、键盘接口、显示器接口等的设计对处理器的 I/O 引脚数量、引脚支持的输入/输出方式(高速输入/高速输出、上下沿跳变中断等)提出了要求,对处理器支持的 A/D 通道数量、A/D 分辨率、采样速率、使用方式、功能提出了要求,对 PWM、SPWM 的输出功能提出了要求。根据需求分析,需要将接口设计的约束罗列出来,以便之后统筹考虑。

2. 网络通信对嵌入式处理器选择的约束

网络通信功能对嵌入式处理器的通信接口数量、种类提出了要求。根据需求分析,需要将设计需求所需要的异步通信接口(UART)数量、CAN 总线接口数量、网络通信接口(LAN)数量统计并罗列出来,以便之后统筹考虑。

3. 测量计算对嵌入式处理器选择的约束

测量计算速度、计算工作量的统计评估,通常以采样周期为间隔,估算在此期间的数据采集、测量计算、显示、报警、通信、数据管理等的工作量,作为选择嵌入式处理器计算能力的依据。对于需要进行 FFT 计算和自适应滤波等数字信号处理工作的设计需求,处理器的 DSP 处理计算能力是必须具备的,甚至必须选择高性能的专用 DSP 处理器。

4. 控制功能对嵌入式处理器选择的约束

对于计算机控制类嵌入式系统的开发,控制算法的计算机实现是必须考虑的事情,计算机控制系统是采样控制,特别是代表“模拟化设计”方法的数字 PID 算法,采样周期越小,调节效果越理想。复杂的计算机控制算法对嵌入式处理器的 A/D 采样速率、工程量转换计算速度以及控制算法的计算工作量在采样周期时间内的实现都提出了较高要求。在嵌入式处理器选择阶段,要根据控制功能对计算工作量、计算速度的要求,提出基于计算量(加、减、乘、除计算量的统计)对嵌入式处理器选择的宏观约束。

5. 数据管理对嵌入式处理器选择的约束

嵌入式系统的功能通常涉及对仪表常数的设定、系统校验数据的存储、历史数据/报警事件数据的存储与查询,在许多报警记录中,要求有日历时间的记录,这就要求该嵌入式系

统必须设置硬件日历时钟。对于不同容量的历史数据存储以及保存方式,可通过在嵌入式处理器器件外部扩展 EEPROM、外部 Flash 存储器、SD 卡等外部存储单元来满足需求。在选择嵌入式处理器时,一方面要考虑嵌入式处理器有无 IIC、SPI、USB 等接口,另一方面,要考虑嵌入式处理器自身是否具有硬件日历时钟或 EEPROM 存储单元,是否支持应用程序对 Flash 存储器未使用存储区的在线编程等。

6. 供电模式对嵌入式处理器选择的约束

对手持式嵌入式系统,当电池供电成为唯一选择时,要求选择的嵌入式处理器为低功耗、低电压器件,具有待机、休眠等多种工作方式且能被及时唤醒,主频可调以及具有在低主频工作的低功耗模式等。

3.3 系统软硬件功能分配

对于嵌入式系统来说,软硬件界面划分是一个重要问题,即某功能可用软件实现,也可用硬件来实现时,那么到底采用何种方式来实现该功能呢?在系统设计方面,为降低成本,通常在保证系统性能指标的前提下,尽量用软件替代硬件实现某些功能。硬件与软件的协同设计体现在许多方面,做好这些协同与统筹,不但可以降低嵌入式系统的成本,还可以减少嵌入式系统开发的工作量。

例如,嵌入式处理器接口引脚数量较少时,嵌入式系统键盘、显示器的设计就需要仔细考虑,常规的行列式按键设计和并行式液晶电路接口需占用嵌入式处理器大量的接口引脚,这时可采用模拟量测量式键盘接口,只需占用一条模拟量输入接口即可实现多按键键盘功能,而且增加的编程工作量不大;采用 SPI 串行接口的液晶显示器接口,一方面简化了编程,另一方面也减少了嵌入式处理器引脚的使用数量。

嵌入式系统设计的软硬件协同还体现在软件与硬件的时序配合上,如果配合达不到要求,该嵌入式系统的测量和控制指标也无法达到。这一点在系统设计阶段,尤其是方案比较选择阶段须特别注意。

经过以上步骤,设计团队就明确了设计目标,之后可将设计目标形成设计任务书。通常设计任务书明确描述了拟开发嵌入式系统的功能、指标、组成、结构、外观、连接关系和使用应用对象、应用环境等,明确了设计任务,包括硬件的设计任务、软件的设计任务,制定了嵌入式系统开发的进度管理等细则。

3.4 系统结构设计

在已明确嵌入式系统的安装使用方式(导轨安装、盘式安装、壁挂式安装、手持式)的前提下,才能展开嵌入式系统的结构设计。新嵌入式系统的设计在结构设计上通常要考虑以下几个因素:

- 电气安装对嵌入式系统结构设计的约束;
- 行业内主流嵌入式系统结构外观对新嵌入式系统设计的影响;

- 输入/输出接口的数量对设计的影响；
- 输入/输出接口的类型对设计的影响；
- 嵌入式系统硬件电路设计对嵌入式系统结构设计的影响；
- 生产工艺因素对嵌入式系统结构的影响；
- 电磁兼容对嵌入式系统结构的约束；
- 显示方式对结构的影响。

1. 电气安装因素

电气安装环境对嵌入式系统外观和结构设计的影响,一方面体现在安装方式上,另一方面体现在接线方式和嵌入式系统的外观结构上。对嵌入式系统外观和结构的约束进而体现在嵌入式系统的结构设计上,即嵌入式系统的 PCB 组成、位置和连接关系。

2. 主流嵌入式系统的外观影响因素

新嵌入式系统的开发通常都受到市场中同类型主流嵌入式系统的影响,因为主流嵌入式系统代表着被用户和市场接受和认可的诸多因素,另外,新嵌入式系统进入市场后,用户必然要对其与现有嵌入式系统进行比较。在嵌入式系统设计上,通常要继承已被市场和用户所接受的诸多因素,这些因素许多体现在安装、外观和接口上,进而影响到嵌入式系统的结构设计。

3. 电磁兼容因素

嵌入式系统在 PCB 电路板功能划分上通常考虑的因素是电路功能、电路连接关系、数字电路与模拟电路、强电电路与弱电电路、与外部接口端子的连接关系等。在 PCB 板的安装布局及位置关系上,一定要考虑电源强电部分可能产生的空间电磁辐射因素对嵌入式系统、嵌入式处理器稳定运行的影响,消除由于 PCB 布线和位置因素所产生的寄生互感所造成的影响。

4. 接口数量因素

嵌入式系统的接口数量影响到嵌入式系统的外接端子的类型选择,进而影响到 PCB 设计与嵌入式系统结构设计。

5. 接口类型因素

接口的类型通常有以下几种:供电电源、强电信号接口、弱点信号接口、强电控制输出接口、弱电控制输出接口、网络通信接口和现场总线通信接口。不同类型的接口要求不同形式的接口端子,不同类型的信号从接线和抗干扰等角度出发,对信号的排列、在嵌入式系统壳体中的引出位置都有所不同,接口端子的排列位置和引出位置都会对 PCB 的设计、嵌入式系统的结构设计产生至关重要的影响。

6. 硬件电路设计因素

硬件电路的设计决定了电路元器件的数量以及 PCB 板的大小和规模,在壳体大小和接线端子数量、类型、位置、电磁兼容的共同约束下,嵌入式系统的结构设计要统筹考虑并进行相关的优化设计。

7. 生产工艺因素

嵌入式系统的结构设计要考虑到对嵌入式系统生产加工和安装工艺的影响,所遵循的原则是以减少生产加工和安装的工作量为主导。

8. 显示方式因素

显示方式(LED数码管、LCD液晶显示器)和嵌入式系统的面板空间、壳体选择设计形成了相互制约,在嵌入式系统的总体设计阶段,需要兼顾电路设计、电磁兼容和PCB互连关系,统筹考虑嵌入式系统的结构设计。

3.5 嵌入式系统工艺设计

从嵌入式系统生产加工的角度考虑,嵌入式系统的设计通常涉及的因素包括PCB板的安装结构、连接关系,PCB生产的焊接工艺,PCB板的防潮、防尘、绝缘工艺处理,嵌入式系统的壳体设计,嵌入式系统的面板及外观设计。

3.6 抗干扰设计

抗干扰设计是嵌入式系统设计必须进行的一项工作,应用于各领域的嵌入式系统,在进入市场前必须通过该行业国标的相关电磁兼容测试。嵌入式系统的电磁兼容及抗干扰设计在嵌入式系统的硬件原理设计、PCB设计和软件设计上都须采取相应的措施。

从“抗干扰的三要素”角度出发,嵌入式系统最终受扰程度取决于三方面因素:干扰源强度、干扰源与嵌入式系统电路的耦合程度和嵌入式系统自身抗干扰的能力。嵌入式系统的防电磁干扰设计通常采取的措施是:消除或降低系统中可控的干扰源,对不可控的干扰源找出系统与之耦合的通道,采取切断耦合或降低耦合的措施,在硬件设计和软件设计上采取各种措施提高系统的抗干扰能力。

在硬件电路设计时通常在以下几个方面采取措施。

1. 硬件电路原理设计

硬件原理设计的先天缺陷后天很难弥补,首先,需要考虑的是微机系统在涉及驱动能力的各单元(包括总线、显示、通信)的容量上要留有冗余;其次,为了避免数据流、信号量大的数字电路对周围器件的影响,要设立位置合适、电容值恰当的去耦电容。对电路中强电器件产生的开关噪声须采取相关措施吸收,要通过隔离、屏蔽、消除公共阻抗和独立供电等手段避免模拟系统、弱电系统受到数字系统、强电系统的干扰。在原理设计上要保证微机系统具有可靠的“死机”复位手段。

2. 过程通道接口设计

在过程通道接口设计上,根据现场使用的需要,采取信号隔离(通常为光电隔离)、硬件滤波、信号限幅、信号钳位等必要措施保障系统硬件的可靠性。

3. 网络通信接口设计

采取信号隔离的方式,防止通信线路感应的电信号对嵌入式系统的冲击,在通信线路上增加浪涌吸收器件等保护网络通信的接口驱动器件。

4. 电源设计

(1) 对来自电网干扰的处理

来自电网的浪涌冲击会对嵌入式系统的电源及后续电路造成损坏,来自电网的谐波分量会对嵌入式系统的稳定运行产生干扰。在电源设计上,通常采用压敏电阻和大功率 TVS 器件吸收来自电网的浪涌冲击,有时为应对“感应雷”的冲击,也可以在电源输入点增加泄放雷电能量的放电管器件。对降低电网谐波的处理通常采用两种手段:一是在电源输入回路上增加电源滤波器,用于滤除电网的高次谐波;二是在后续电源变压器原副边绕制(铺设)隔离屏蔽铜箔并将之接入大地,避免电网的高频谐波通过变压器的原副边“层间电容”,由原边直接耦合到副边。

(2) 对来自电网的“闪变”及瞬时电网掉电的抗干扰处理

解决的办法是增大电源各回路储能电容的容量,采用输入与输出压差数值小的稳压器件。

(3) 对嵌入式各电源回路瞬间过负荷或短路的处理

对于有可能产生瞬间过负荷或短路的嵌入式电源供电辅助回路,增加自恢复保险丝器件。

5. PCB 设计

硬件抗干扰的许多措施和手段都是在 PCB 电路设计上采用的,要严格按照 PCB 电路设计的抗干扰和电磁兼容设计原则和条例实施 PCB 设计。

3.7 嵌入式系统工业设计

一款好的嵌入式系统不但要有良好的性能指标、操作使用功能和可靠性,还要有亮丽的外观与形状,嵌入式系统的工业设计遵循将亮丽外观与嵌入式系统实用性、成本统筹考虑的方式与理念。

