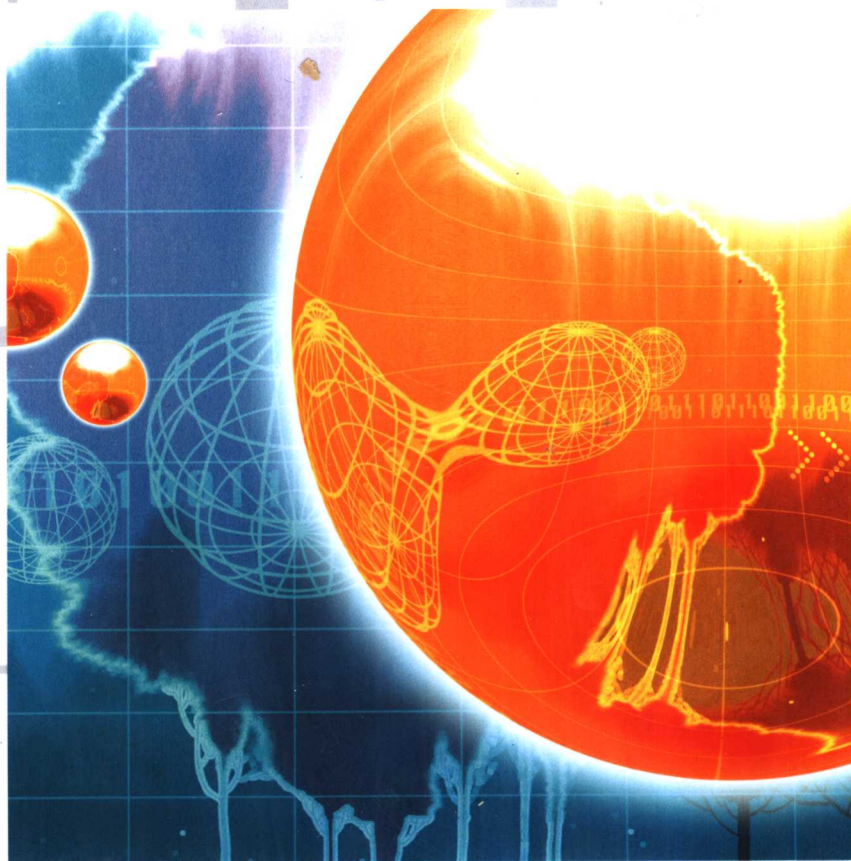


Analog Interfacing to Embedded Microprocessors
Real World Design Second Edition

国外IT精品丛书



嵌入式微处理器模拟接口设计

(第二版)

Stuart R. Ball现就职于美国俄克拉荷马州
医用电子设备制造公司，是一位在嵌入式控制
系统工作了15年的高级电子工程师，曾参与全
球定位系统和安全通信设备的研发工作。

〔美〕 Stuart R. Ball 著

刘 谦 等译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

Analog Interfacing to Embedded Microprocessors
Real World Design Second Edition

嵌入式微处理器 模拟接口设计 (第二版)

〔美〕 Stuart R. Ball 著

刘 谦 等译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要内容是向读者介绍需要实现模拟接口的各种嵌入式系统中所涉及的模拟量的检测与控制方法。作为嵌入式微处理器模拟接口设计技术的专业读物,本书覆盖了从模拟设备基本工作原理到接口设备集成调试等涉及数字设备与模拟设备接口的所有技术领域。此外,本书还结合实例对嵌入式微处理器接口设计中经常遇到的问题进行了分析论述并针对设备接口设计过程中常见的难点问题进行了深入讨论。

本书适用于从事嵌入式微处理器接口设计和应用的工程师以及大专院校应用软件专业师生。



Copyright© 2004, by Newnes. All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

本书英文版由Newnes公司出版,Newnes公司已将中文版独家版权授予电子工业出版社及北京美迪亚电子信息有限公司。未经许可,不得以任何形式和手段复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字:01-2004-3223

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式微处理器模拟接口设计(第二版)/(美)鲍尔(Ball, S. R.)著;刘谦等译.一北京:电子工业出版社,2004.6

书名原文: Analog Interfacing to Embedded Microprocessors Real World Design Second Edition
ISBN 7-120-00009-8

I.嵌… II.①鲍… ②刘… III.微处理器-接口-设计 IV.TP332

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第043577号

责任编辑:徐云鹏 朱 巍

印 刷:北京天竺颖华印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

北京市海淀区翠微东里甲2号 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:20 字数:370千字

印 次:2004年6月第1次印刷

定 价:32.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换,若书店售缺,请与本社发行部联系。

联系电话:010-68279077。质量投诉请发邮件至zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

译 者 的 话

在经历了50个日夜的艰苦奋斗后，我们怀着欣慰的心情完成了《嵌入式微处理器模拟接口设计（第二版）》一书的全部译文。可以毫不夸张地说，该书是同类有关嵌入式微处理器系统专著中很有特色的一本专业级读物。该书不仅深入浅出地介绍了嵌入式微处理器接口技术所涉及的各种基本原理，而且还结合实际案例对嵌入式微处理器接口设计中经常遇到的问题进行了分析论述。该书自第一版发行以来受到了读者的好评，应读者要求我们发行了第二版。经过补充和更新，第二版内容覆盖了从嵌入式微处理器接口技术概念到接口调试所涉及的全部内容。

作为嵌入式微处理器模拟接口设计技术的专业读物，本书内容覆盖了从模拟设备基本工作原理到接口设备集成调试等涉及数字设备与模拟设备接口的所有技术领域。与其他只限于介绍单一类型模拟接口设备的专著不同，本书论述的嵌入式微处理器外部设备接口原理适用于各种微处理器的嵌入应用。除此之外，本书还针对设备接口设计过程中常见的难点问题进行了深入讨论。为了便于读者掌握实际设计技能，本书还集中介绍了多种模拟设备、接口软件、调试方法的原理和技能。

本书作者Stuart R. Ball现就职于美国俄克拉荷马州医用电子设备制造公司，作为一位在嵌入式控制系统有15年工作经验的高级电子工程师，Stuart R. Ball此前还曾在Rockwell国际公司参与了全球定位系统和安全通信设备的研发工作。除了嵌入系统专著外，Stuart R. Ball还是美国“Byte”杂志和现代电子周刊的撰稿人。

本书最大受益者是那些从事嵌入式微处理器接口设计和应用的工程师和在校学生。借助于本书作者根据亲身经历总结的经验教训，这些读者可以在自己从事的项目中少走许多弯路。由于本书还就有关嵌入式微处理器设备接口的具体实施方法和难点以及设计注意事项进行了广泛讨论，因此也适用于需要了解嵌入式微处理器接口技术的初学者以及大专院校应用软件专业师生和有兴趣从事嵌入式应用维护工作的专业技术人员。

本书由刘谦、苏建平负责审校和统稿，参与本书翻译工作的其他人员还有李鹏飞、王军平、刘丽云、李新、张君哲、钱云、刘城。田红等人参与了本书的校对和录入。由于本书内容较新，篇幅较多，再加上译者的时间和水平有限，在翻译过程中难免有疏漏和错误，敬请读者给予批评指正。

前 言

在模拟量与数字量之间似乎一直存在着某种人为的分界线。从事数字电路的设计人员通常不愿对模拟量进行深入研究，同样，从事模拟电路设计的技术人员也不愿与数字量打交道。这种现象最终导致这两类技术人员在专业方面缺乏共同语言。

尽管微处理器在数字处理速度和功能方面有了惊人的发展，但对大多数人来说，他们每天面对的仍然是模拟量。就希望对外部真实世界进行控制和测量的数字电路设计人员来说，他们必须通过某种方式将模拟环境与自己设计的数字设备连接在一起。针对有关模拟电路设计和微控制器应用设计的各自特点，本书将重点介绍这两种独立技术结合在同一系统中使用的方法。

某些读过作者的第一本书《嵌入式微处理器系统设计》的读者曾经建议作者在该书中增加有关模拟电路接口的内容，但本人认为在该书中扩充上述内容将会分散读者的注意力。注意到读者的这种要求，经过反复考虑，作者决定在这一本新的专著中为需要实现微处理器接口的读者提供实现模拟电路与微处理器接口的专门信息。希望读者可以从本书中受益。

目 录

第1章 系统设计	1
动态范围	1
精度校准	2
带宽考虑	4
处理器吞吐量	6
选择合适的运算速度	7
系统设计中的其他注意事项	9
采样速率与失真	12
第2章 模数转换设备	15
模数转换器类型	19
各种模数转换器的比较	28
采样与保持	29
出厂参数和附加功能	32
微处理器接口	33
时钟控制接口	38
串行接口	39
多通道模数转换器	45
微控制器内置模数转换器	46
编解码	47
中断速率	48
微控制器使用的双功能管脚	48
系统设计注意事项	49
第3章 传感器	53
温度传感器	53
光学传感器	65
电荷耦合器件	78
磁性传感器	87

运动传感器与加速度传感器	91
变形测量器	94
第4章 基于时序的测量方法	97
周期检测与频率检测的比较	100
混频	102
电压频率转换器	104
时钟精度与范围	106
提高测量精度的方法	108
第5章 系统输出控制	113
开环控制	113
负反馈控制	113
微处理器控制系统	114
开关控制	115
过调节	117
比例控制法	118
比例积分微分调节	121
电机控制	132
预测控制	138
测量与分析控制回路	139
PID控制软件案例介绍	143
控制系统设计注意事项	148
第6章 电磁线圈、继电器及其他模拟输出器件	151
电磁线圈	151
加热器	156
冷却器	161
发光二极管 (LED)	163
数模转换器 (DAC)	169
数字电位器	170
模拟开关	173

第7章 电机	177
步进电机	177
直流电机	195
电机选择注意事项	211
电机加电	212
电机扭矩	213
步进电机的应用	214
第8章 电磁干扰	219
接地环路	219
静电放电 (ESD)	224
第9章 高精度应用	229
输入偏移电压	231
输入阻抗	232
频率特性	233
电阻的温度效应	234
参考电压	234
温度对应用的影响	236
噪声和接地的方法	237
印刷电路板设计	238
统计容许偏差	241
参考电压	242
本章小结	243
第10章 标准接口	245
IEEE 1451.2接口	245
4~20mA电流环路标准	246
Field总线	247
第11章 常用模拟控制方法	249
微控制器电源和基准电压	249
电阻网络	250

多输入控制	252
交流控制	254
电压监控和监测电路	255
双极晶体管驱动	256
场效应管驱动	259
负值电压的读入	262
控制系统案例	263
 附录A 运算放大器基础	275
运算放大器配置	275
运算放大器通用设计方程	280
非电阻器件	281
输入反相	281
比较器	282
滞后现象	284
测量放大器	286
 附录B 脉宽调制	289
脉宽调制的引入	289
脉宽调制电路中使用的器件	294
晶体管的频率限制	294
精度限制	295
选择电源的考虑	296
PWM与电磁干扰	297
音频应用	297
PWM硬件	298
PWM软件	299
 附录C 常用Web站点介绍	301
 词汇表	309

第1章 系统设计

大多数嵌入式微处理器系统的设计都涉及到对某种输入量进行处理，从而得到需要的输出量，通常在输入量与输出量中至少有一方会是模拟信号。本章将不对一般模拟系统中的数字信号处理部分（如微处理器与存储部件的接口等）进行讨论，重点介绍嵌入系统与外部模拟量进行交互的接口技术。

动态范围

在动手开始系统设计之前，一般都要对系统使用的输入量和输出量的动态范围进行确认，动态范围定义了输入量和输出量的度量精度。动态范围不仅与输入输出有关，而且会影响到系统中其他部分的设计，诸如设计中使用部件的精度和允许的噪声等。

一个简单的基于微处理器的嵌入系统有可能需要读入一个模拟电压输入量并将其转换为一个对应的数字（我们将在第2章中讨论这种读入和转换过程）。动态范围通常用电平分贝来表示，这是由于电平分贝（dB）可以用来表示相对功率或电压的度量单位。然而，对于微处理器系统来说，电平分贝并不能适用于所有信号的测量。简单来说，我们可以把动态范围看成是一个系统必须可以测量的最大值与最小值的比值。在多数情况下，动态范围需要确认的基本数值就是系统需要测量或控制某个量时所需的精度的位数。

举例来说，假设我们需要测量的温度范围是在 0°C 到 100°C 之间。如果我们希望以 1°C 的精度来对温度进行测量，那么就需要使用100个离散数值来实现该精度。由于一个8位模数转换器可以把其接收的输入电压转换为256个不同数值来表示，因此上述系统使用8位精度就可以满足测量要求。然而，如果我们需要用 0.1°C 的精确度对上述温度范围进行测量，这就需要用到100除以0.1，即1000个数值来表示该温度范围，在这种情况下，可以用10位的模数转换器（可以产生1024个数值）来满足设计要求。

电压精度

用来测量所需的位数是由测量目标的变化范围（如本例中的温度、电压、光强或压力等）决定的，而与具体的电压范围无关。该转换范围可以用多种电压范围来表示。对上面的例子来说，我们可以把 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的温度表示为 $0\sim 5\text{V}$ 或 $0\sim 1\text{V}$ 电压。不管用何种电压范围来表示，我们所测量的动态范围都是相同的。然而，在 1°C 精度下， $0\sim 5\text{V}$ 电压范围下 1°C 温度对应的电压表示为 19.5mV （ $5\text{V}/256$ ），如果要求表示精度为 0.1°C 的话，则在同样电压范围下， 1°C 温度对应的电压表示就是 4.8mV （ $5\text{V}/1024$ ）。如果使用 $0\sim 1\text{V}$ 电压表示范围的话，上述两种电压精度对应的电压值则分别为 3.9mV 和 $976\mu\text{V}$ 。由此看出，电压范围对模数转换器和运算放大器等器件的选择是有一定影响的。有关这方面的深入讨论将在本书后续章节中进行介绍。需要强调的是，一个系统的动态范围在很大程度上决定了该系统在测量或控制对象时所需精度的位数，以及如何将该动态范围转化为模拟量并从模拟量转换为数字量的具体过程，这些都会进而对系统的设计产生影响。

精度校准

动态范围的引入带来了所谓校准问题。我们知道，一个特定的动态范围必须借助于若干位的精度来实现。但不幸的是，系统中使用的所有器件都存在着一定的容许偏差。例如，一个容许偏差为1%的 $10\text{k}\Omega$ 电阻的实际阻值可能是在 9900Ω 和 10100Ω 之间。如果该电阻的容许偏差为0.1%的话，则其实际阻值就将在 9990Ω 与 10010Ω 之间。除此之外，电阻的阻值还是可以随温度改变的。同理，系统中使用的包括传感器自身在内的所有其他部件的性能指标也存在着类似问题。我们将在第9章中就误差问题进行深入讨论。从系统角度来看，我们目前要解决的主要问题是如何使用存在误差的部件来实现系统的精度要求。

我们仍以需要测量 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 温度范围的系统为例。在该系统下，采用 1°C 精度对温度进行检测是完全可行的。然而，如果希望该系统可以按 0.1°C 精度对温度进行检测时，我们就会发现，由于该系统使用的温度传感器无法对温度的 0.1°C 的变化进行准确测量，因此要实现新的精度指标，就需对设计方案进行某种调整，以便适应新的要求。

考虑进行校准方案时，还要考虑后续的一些事情，例如，温度传感器部件是否应该与实现精度校准系统的部件装配在一起。如果不这样做的话，我们在进行

校准后将很难使两个不同的部件协调工作。除此之外,如果现场工程师不得不对传感器进行更换的话,那么必须保证工程师同时对变化后的系统进行新的精度校准。在大规模生产情况下,要考虑到在装配过程中增加校准步骤和更换一个更精确的传感器哪一个经济可行。

在多数情况下,我们可以利用软件对校准参数进行计算并将其存档。例如,假设我们希望系统(或系统中使用的传感器)在一个确定的温度范围内对输出进行测量。从理论上来说,理想的传感器应该可以为特定的温度 T 产生一个对应的输出电压 X ,但实际上,系统中使用的实际传感器为同一温度产生的输出电压却为 Y 。为了解决这种问题,通过测量几个温度分别对应的输出值,我们可以建立一个温度与该传感器输出电压值的对照表并将该表存储在系统微处理器的内存中。每当该处理器从传感器读入新的信号时,它将通过检查该表的内容(或进行某些计算)来确定实际检测到的温度是多少。

如果可以将校准信息存储在传感器中的话,那么在更换传感器时就可以不再需要进行新的校准操作。图1.1中给出了三种实现校准的方法。在图A中,一个微处理器通过电缆与一个远程传感器连接在一起。该处理器将校准信息存储在其内部配置的电可擦除只读存储器(EEPROM)或闪存中。这种方法有下述三个特点:

- 一旦该系统实现了校准,则其远程传感器就必须与该系统的微处理器配合运行。如果系统的传感器或微处理器有变化,则必须对改变后的系统进行重新校准。
- 如果在传感器或微处理器出现变更时没有对系统进行重新校准,其结果将导致测量结果错误。在这种情况下,除非该微处理器具有识别特定传感器的功能,否则我们无法确认测量结果是否正确。
- 与其他校准方法相比,上述方法中所有传感器使用的数据都可以在一个固定位置存储,因此使用的存储空间最少。除此之外,如果通过计算实现校准的话,则该方法不仅可以节省存储对照表使用的存储空间,而且对于所有同类传感器来说,它们都可以使用同一软件进行校准计算,惟一不同之处是每个传感器需要使用适合自己的校准常数。

图1.1中的B图给出了另一种控制远程传感器的方法。如图所示,该图中存储有校准数据的电可擦除只读存储器与传感器配置在同一控制板中。该EEPROM器件可以是一种小型集成电路,系统微处理器可以通过PC总线或Microwire总线(第2章中介绍这两种总线的具体功能)对其进行访问。该方法具有如下特点:

- 由于每个传感器都可以在控制板内存储自己使用的校准数据，因此这种系统中传感器和微处理器的更换不会对测量结果产生影响。这种配置的最大优点是使用的备用传感器可以提前进行独立校准。
- 需要较多的存储空间，这种校准方法要求每个需要校准的传感器都配置自己所需的校准数据存储单元。

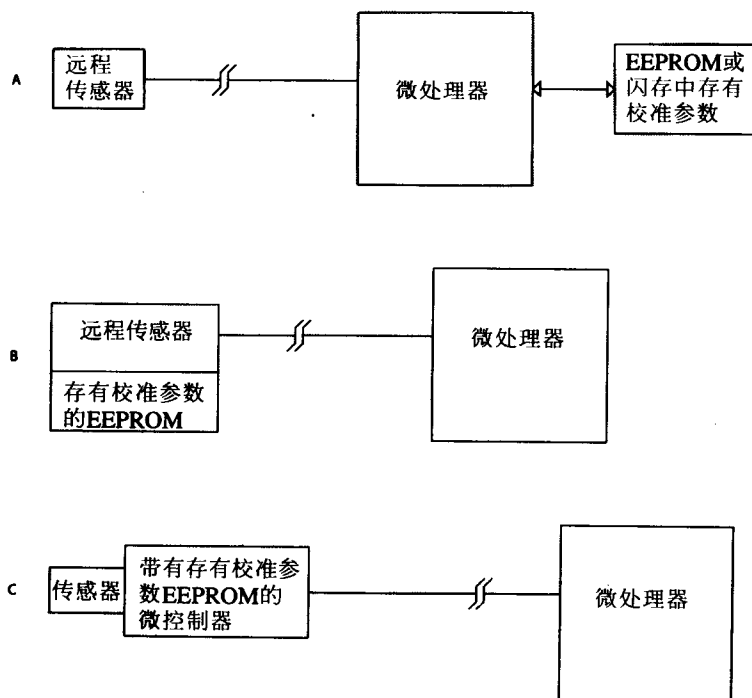


图1.1 实现传感器校准的三种方法

图1.1中C图给出了第三种校准方法。与上述两种方法相比，该方法在概念上最为先进，特点是在每个传感器板上增加了一个微控制器。该微控制器可以在本地执行校准计算并可以将校准需要的数据存储在内配置的电可擦除只读存储器或闪存中。该方法具有下述三个特点：

- 这种系统使用的处理器数量最多，而且需要对各个处理器中的程序固件进行维护。对于那些对软件文档要求较高的应用来说（如小型医疗设备或军用装置），这种配置会明显加大开发成本。
- 该系统的中央微处理器不需要对校准进行任何干预。对于诸如温度测量之类的任务来说，所得到的数值总是相同的，与使用的传感器的输出误差无关。

- 如果这类系统中使用的传感器因某种原因必须在生产过程中进行更换的话，由于新的传感器中的内部微控制器可以自行实现内部功能，因此不会对系统的中央处理器产生影响。

影响校准效果的另一种情况是人为因素。如果某个系统需要在现场对其传感器进行校准的话，是否要求现场维护人员在伸长胳膊举着校准装置的同时在键盘上按下校准开始键？是否要考虑在该传感器附近配置一个开关装置，以便维护人员不需在校准过程中在显示器与传感器之间来回奔走？是否可以利用自动处理过程来将人工校准操作步骤最小化？从理论上来说，校准过程中需要的人工操作越多，则产生校准错误的可能性就越大。

带宽考虑

几年以前，作者曾经参与过一个成像系统的设计。该系统利用一个电荷耦合器件（CCD）传感器对数据进行采集。按照设计要求，该系统每次扫描可采集1024个像素。该系统要求以200像素每英寸（1英寸 $\approx$ 2.5cm）的分辨率对每秒移动150英尺（1英尺 $\approx$ 30cm）的对象进行扫描。采集到的每个像素都通过一个8位模数转换器转换为长度为1个字节的像素数据。按照这种要求，该系统的数据传送速率应为 $150 \times 1024 \times 200$ ，也就是每秒30 720 000个字节。

该系统当时计划使用VME总线作为系统总线。在这种模式下，来自于CCD的每一次扫描结果都必须读入到处理器中进行校正，滤波后转换为每个像素都用个比特位来表示的黑白单色图像数据。在决定该系统使用何种体系结构的讨论会上，参与设计的一个工程师始终坚持要通过VME总线来传输所有数据。在当时的情况下，VME总线的最大带宽为40兆字节每秒，而在实际应用中，几乎没有什么系统可以实现该总线的理论带宽传输。该系统需要使用的带宽如下：

从摄像头读入系统的数据为30.72兆字节每秒。

把数据传递给校正部件的速率为30.72兆字节每秒。

把数据传递给滤波器的速率为30.72兆字节每秒。

把数据传递给单色数据转换器的速率为30.72兆字节每秒。

把单色数据传递给输出接口的速率为3.84兆字节每秒。

如果将上述所有要求的传输速率加在一起的话，其总传输速率就将为126.72兆字节每秒，远远超出了当时VME总线的理论带宽。在作者最近参加的一个同类的成像系统项目中，该系统采用了数字信号处理器（DSP）和先进的PCI多总线结构。即使在这种系统中，如果需要实现的数据采集处理任务较多的话，则其系

统需要使用的带宽也几乎达到PCI总线的理论传输速率。强调带宽的目的是要求我们事先对需要传输的数据的数量和传输数据使用的总线有一个明确的了解，如果要使用诸如以太网或Firewire之类的标准总线的话，一定要事先确认这类总线可以实现的带宽。

处理器吞吐量

在很多应用中，处理器吞吐量是一个非常重要的指标。仍以前面介绍的成像系统为例，由于目前各类微处理器都无法完成如此繁重的数据处理任务，因此这类系统往往利用硬件来对数据进行直接处理。随着处理器速度的不断提高，我们可以把更多的数据处理任务交给软件来实现。在决定应用所需的吞吐量时，我们必须考虑如下几个关键因素。

中断

中断发生的频率为多少？每个中断服务程序（ISR）的工作量有多大？最慢也必须在多长时间内响应一个中断请求？如果某个中断所需的服务时间较长的话，是否需要将其他中断暂时屏蔽？这种中断屏蔽是否会影响其他中断的等待时间？在实际应用中，有时需要使用两个（甚至多个）处理器来响应中断，其中一个用来响应等待时间要求较短但处理过程比较简单的高速中断请求，另一个则用来响应服务时间较长的低速中断请求。

接口

系统面对的是哪些设备？数据是怎样传输进来或发送给外部设备的？设备之间的接口需要哪些硬件来支持？软件在实现接口功能方面需要做哪些工作？举例来说，在一个微控制器中通过软件对二进制位进行操作实现的PC接口对总线吞吐量的影响要比使用硬件设备实现的同类接口大得多。出现这种问题的主要原因是该接口一般要使用多个中断的缘故（如果读者对PC总线不太了解的话，可以参阅本书第2章内容）。

硬件支持

一个使用存储器直接存取控制器（DMA）对批量数据进行传输的图像应用并不需要配置利用软件对同类数据进行传输所需的高速处理器。从处理器指令系

统来看，利用处理器内部硬件支持的块移动指令对数据进行传输，处理器的工作效率要比只能使用简单移动指令构成块移动循环的处理器高得多。同理，如果系统处理器带有浮点运算部件（FPU）的话，这种系统的浮点处理速度就要比只能通过软件实现浮点运算的处理器快得多。

数据处理需求

如果系统是一个图像应用的话，那么仅使用一个处理器来把成批数据从一个部件（如摄像接口逻辑部件）传送给另一个部件（如系统中的滤波逻辑部件）就需要占用处理器的大量时间。如果处理器必须用软件实现滤波算法的话，那么，仅实现数据滤波一项功能就需要占用处理器大量时间。如果事先不对应用的数据处理需求进行分析和估算的话，就很难为应用选择一种可行的设计方案。

操作系统的考虑

如果应用中使用了某种操作系统（OS）的话，该系统对中断的屏蔽时间为多长？该时间能满足应用要求的中断响应时间吗？如果所使用的操作系统有可能偶然中断当前的处理任务并利用几秒钟时间对硬盘进行清理的话，应用是否会受到影响？操作系统的这种特点是否会引发应用数据丢失？是否应考虑为具有实时响应要求的应用配置必要的实时操作系统？

程序设计语言与编译器

如果应用编程希望使用诸如C++之类的面向对象的程序设计语言，这时就要考虑如何保证处理器对内存碎片进行整理时数据不会丢。在极端的情况下，为了尽量缩短内存碎片整理时间，选择C++编程语言就意味着需要把一个速度为100MHz的处理器更换为一个速度为1GHz的处理器。

选择合适的运算速度

虽然选择足够快的系统总线 and 高速处理器以满足工作需要是很重要的，但避免系统速度过快也是一个必须考虑的因素。有时，某些应用并不适宜使用过快的总线和过快的微处理器。总的来说，制约总线和处理器速度的因素有两个，一个是成本，另一个是电磁兼容性（EMC）。

成本因素

举例来说，PC/104标准中为嵌入应用定义了使用个人电脑主板必须具备的机械和电气指标。PC/104处理器主板配置了标准的PC/104总线，该总线在电气和时序指标方面与个人电脑中使用的工业标准结构总线（ISA）大致相同，其最大数据传输速率为5兆字节每秒。除此之外，还有一些处理器主板则配置新型的PC/104 Plus总线，这种新型总线的性能与PCI总线类似，其数据传输速度最高可达133兆字节每秒。尽管高速总线通常是设计人员的首选目标，但对于应用者来说，使用低速PC/104总线实现的外设接口要比使用PC/104 Plus高速总线的成本低得多。由于驱动PC/104低速总线的时钟速率较低，因此可以使用低速逻辑电路来实现接口。如果一个PC/104处理器主板上要与多个模拟I/O外设接口的话，那么低速PC/104总线较为宽松的时序要求就可以使得外设接口的设计比较简单。对于批量较小的应用来说，其收益甚至无法与采用高速PC/104 Plus总线所要付出的高额开发成本相抵。当然，上述考虑都是以低速总线可以满足应用要求为前提的。依此类推，上述考虑方法也适用于诸如PCI之类的其他总线。

电磁兼容性（EMC）

几乎所有基于微处理器的设备开始在美国或欧洲销售之前都必须通过EMC测试。EMC测试的主要内容是限制产品可能产生的辐射总量，其目的是为了避免对诸如电视机或无线电接收设备产生干扰。总的来说，系统时钟速率越高，则该系统生成的辐射就越大。目前实施的EMC标准是对频率在30MHz到1GHz之间的辐射进行测试。运行在6MHz时钟下的处理器不会产生任何在此测试范围内的基波电磁辐射，惟一可能产生的在此测试频率范围内的频率是来自处理器时钟的第五谐波和高于第五谐波的分量。从理论上来说，谐波次数越高则其具有的能量就越少。一个33MHz的处理器则在其基波频率以及高于基波的频率上都产生在测试频段内的电磁辐射。此外，较高的处理器时钟速率意味着较快的逻辑电路和电路所使用的高速脉冲外沿，从而在高次谐波频段内产生较多的辐射。尽管在最高速度可为2GHz的奔腾处理器系列中选择6MHz时钟处理器看起来有些落后，但这种选择是有其道理的。EMC规则的限制要求我们只能选择满足实际应用需要的总线和处理器。当然，上述考虑不应该过分限制系统的设计。设想一下，如果我们在设计中选择的处理器只可以刚刚满足当前应用的需要，那么一旦应用功能需要扩充或系统发现问题需要修改时，该处理器将无法胜任。