

计 算 机 科 学 丛 书

HZ BOOKS  
华章教育



# 嵌入式系统接口

## 面向物联网与CPS设计

[美] 玛里琳·沃尔夫 (Marilyn Wolf) 著

佐治亚理工学院

王慧娟 刘云 译

侧重于硬件，涵盖接口技术及工艺，关注电路功能以及驱动和负载的电气特性

### Embedded System Interfacing

Design for the Internet-of-Things (IoT)  
and Cyber-Physical Systems (CPS)

Marilyn Wolf



MK

### Embedded System Interfacing

Design for the Internet-of-Things (IoT) and Cyber-Physical Systems (CPS)



机械工业出版社  
China Machine Press

计 算 机 科 学 从 书

# 嵌入式系统接口

## 面向物联网与CPS设计

[美] 玛丽琳·沃尔夫 (Marilyn Wolf) 著  
佐治亚理工学院  
王慧娟 刘云 译

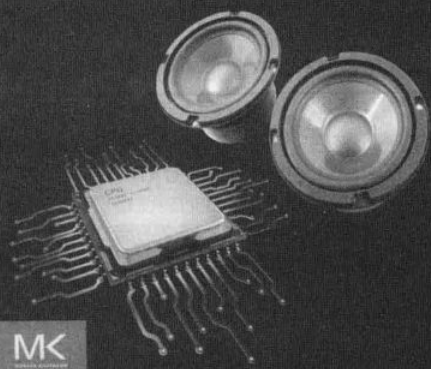
### Embedded System Interfacing

Design for the Internet-of-Things (IoT) and Cyber-Physical Systems (CPS)

### Embedded System Interfacing

Design for the Internet-of-Things (IoT)  
and Cyber-Physical Systems (CPS)

Marilyn Wolf



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式系统接口: 面向物联网与 CPS 设计 / (美) 玛里琳·沃尔夫 (Marilyn Wolf) 著; 王慧娟, 刘云译.  
—北京: 机械工业出版社, 2020.5

(计算机科学丛书)

书名原文: Embedded System Interfacing: Design for the Internet-of-Things (IoT) and Cyber-Physical Systems (CPS)

ISBN 978-7-111-65537-4

I. 嵌… II. ①玛… ②王… ③刘… III. 微型计算机-接口技术 IV. TP364.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 079746 号

本书版权登记号: 图字 01-2019-6620

Embedded System Interfacing: Design for the Internet-of-Things (IoT) and Cyber-Physical Systems (CPS)

Marilyn Wolf

ISBN: 9780128174029

© 2019 Elsevier Inc. All rights reserved.

Authorized Chinese translation published by China Machine Press.

嵌入式系统接口: 面向物联网与 CPS 设计 (王慧娟 刘云 译)

ISBN: 9787111655374

Copyright © Elsevier Inc. and China Machine Press. All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from Elsevier (Singapore) Pte Ltd. Details on how to seek permission, further information about the Elsevier's permissions policies and arrangements with organizations such as the Copyright Clearance Center and the Copyright Licensing Agency, can be found at our website: [www.elsevier.com/permissions](http://www.elsevier.com/permissions).

This book and the individual contributions contained in it are protected under copyright by Elsevier Inc. and China Machine Press (other than as may be noted herein).

This edition of Embedded System Interfacing: Design for the Internet-of-Things (IoT) and Cyber-Physical Systems (CPS) is published by China Machine Press under arrangement with ELSEVIER INC.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本版由 ELSEVIER INC. 授权机械工业出版社在中国大陆地区 (不包括香港、澳门以及台湾地区) 出版发行。

本版仅限在中国大陆地区 (不包括香港、澳门以及台湾地区) 出版及标价销售。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受民事及刑事法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

### 注意

本书涉及领域的知识和实践标准在不断变化。新的研究和经验拓展我们的理解, 因此须对研究方法、专业实践或医疗方法作出调整。从业者和研究人员必须始终依靠自身经验和知识来评估和使用本书中提到的所有信息、方法、化合物或本书中描述的实验。在使用这些信息或方法时, 他们应注意自身和他人安全, 包括注意他们负有专业责任的当事人的安全。在法律允许的最大范围内, 爱思唯尔、译文的原文作者、原文编辑及原文内容提供者均不对因产品责任、疏忽或其他人身或财产伤害及 / 或损失承担责任, 亦不对由于使用或操作文中提到的方法、产品、说明或思想而导致的人身或财产伤害及 / 或损失承担责任。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 赵亮宇

责任校对: 李秋荣

印刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版次: 2020 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 12

书号: ISBN 978-7-111-65537-4

定价: 69.00 元

客服电话: (010) 88361066 88379833 68326294

投稿热线: (010) 88379604

华章网站: [www.hzbook.com](http://www.hzbook.com)

读者信箱: [hzsj@hzbook.com](mailto:hzsj@hzbook.com)

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

此为试读, 需要完整 PDF 请访问: [www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的优势，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，计算机学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅肇划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的计算机产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对计算机教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其计算机科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀计算机教材将对我国计算机教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、MIT、John Wiley & Sons、Cengage 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从它们现有的数百种教材中甄选出 Andrew S. Tanenbaum、Bjarne Stroustrup、Brian W. Kernighan、Dennis Ritchie、Jim Gray、Afred V. Aho、John E. Hopcroft、Jeffrey D. Ullman、Abraham Silberschatz、William Stallings、Donald E. Knuth、John L. Hennessy、Larry L. Peterson 等大师名家的一批经典作品，以“计算机科学丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。大理石纹理的封面，也正体现了这套丛书的品位和格调。

“计算机科学丛书”的出版工作得到了国内外学者的鼎力相助，国内的专家不仅提供了中肯的选题指导，还不辞劳苦地担任了翻译和审校的工作；而原书的作者也相当关注其作品在中国的传播，有的还专门为其书的中译本作序。迄今，“计算机科学丛书”已经出版了近500个品种，这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也被越来越多实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着计算机科学与技术专业学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外计算机教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：[www.hzbook.com](http://www.hzbook.com)

电子邮件：[hzsj@hzbook.com](mailto:hzsj@hzbook.com)

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



## 译者序

Embedded System Interfacing: Design for the Internet-of-Things (IoT) and Cyber-Physical Systems (CPS)

嵌入式技术是 IT 产业中发展最快的。嵌入式系统的应用领域非常广泛，随着物联网技术的飞速发展，嵌入式技术在产业发展中的重要性不断提升，具有广阔的发展前景。

作为嵌入式专业的老师，译者曾讲授嵌入式系统课程多年。见到这本书，首先想到的是了解一下这本书的内容与之前接触的相关书籍有何不同。在通读全文后发现，这是一本涉及嵌入式接口电路设计的概要性书籍，虽不涉及软件编程，却将接口设计与软件设计的关系介绍得非常清晰。本书并非针对特定的接口电路实例来进行设计，而是通过介绍接口设计所涉及的原理，让我们了解如何从头构建设计或者修改现有的设计。目前市面上的嵌入式接口书籍多介绍实例设计，侧重于针对接口的代码编程，对电路原理讲解得相对较少，而其他电路书籍内容则较为宽泛。本书则是专门针对嵌入式系统接口电路的电路原理进行讲解，做到了有的放矢，有助于读者快速找到自己关注的内容。本书为那些想学习电路设计原理的工程师、学生提供了有效的补充，全书篇幅较短，列出了电路设计中的主流设计技术及原理，符合现在快节奏的生活方式。

翻译这本著作，是想完善自己的知识体系，同时也希望对更多相关专业的高校教师、同学及业内工程师有所帮助。

本书中文版能够顺利出版，要衷心感谢南开大学嵌入式系统与信息安全实验室的宫晓利老师在翻译过程中提供指导和支持；感谢北华航天工业学院计算机应用系的邢艺兰老师在全书翻译过程中提供支持；感谢机械工业出版社的各位编辑鼎力协助。在嵌入式领域，有前辈或同仁翻译了很多其他译著，阅读这些译著令我们受益匪浅，特表示感谢。限于译者的水平和经验，书中难免存在不当之处，恳请读者提出宝贵意见。

所有计算机都需要输入和输出设备才能完成有用的工作，I/O 系统对嵌入式计算机尤为重要。虽然我们可以在嵌入式系统中使用标准输入输出设备，但通常需要设计专用接口。即使在使用标准输入输出设备时，也需要确保所选接口符合系统要求。本书致力于介绍嵌入式系统接口的艺术、科学和工艺。

我搭建了自己的 Heathkit 无线收发器：GR-64 短波接收器、HD-10 电子键控器和 HW-16 新手收发器。我和我的朋友 Art Witulski 试图建立一个基于开关的加法器，但当意识到我们的焊接技术远远达不到 PCB 图案化技术要求时，我们放弃了。

我的爱好让我学会了很多，我的父亲也教会了我很多。我在斯坦福大学的教授让我成为一名称职的电气工程师，在这里请允许我向教我 8 年电路知识的教授致敬，他们是 Aldo Da Rosa、Robert Dutton、Umram Inan、Malcolm McWhorter、Ralph Smith 和 David Tuttle。

我和 Perry Cook 在普林斯顿大学教授“普适信息系统”课程多年。我们会教学生如何设计嵌入式系统。“物联网”一词尚未出现之前，我们的学生就早已接触了许多与物联网相关的概念。Perry 是硬件设计师，他构建了一个用于电源插头的电感耦合器环路，以确保学生不会触电伤亡。

但是现在构建自己的电子产品远不如半个世纪前有意义。手工制造的电子设备的衰落有利于高度集成设备的发展，其中有几个原因：无线电以更高的频率工作，许多组件是表面贴装的，且集成电路可提供更高水平的集成。集成电子设备比你自己在电路板上设计的更好，比如噪声更低、失真更低（因为匹配更好）、功耗更低等。

有些嵌入式接口书籍采用食谱的形式，即为特定应用提供示例化设计。虽然这类书籍确实占有一席之地，但我认为技术概要类书籍可以成为食谱式书籍的重要补充。在食谱式书籍中找到的解决方案可能没有足够的解释，修改原设计来实现自己的特定目标并不容易。而原理可以帮助你了解如何制定设计决策，也可以帮助你修改现有设计或从头开始构建新的设计。

为了使对电路设计的介绍相对简短和独立，我对一些传统的电气工程教学法进行了简化。我对传统的无源 / 有源电路的区别不感兴趣，在某种程度上，我并不担心数字与模拟，而是更侧重于功能，包括从简单到复杂的各类功能。书中设计的东西价值有限，从这个意义上来说，逻辑非常简单，我还专注于驱动和负载的电气特性。如放大器只是

改变信号的功率；滤波器和检测器修改信号；数据转换建立在这些技术的基础上，以弥补模拟信号和数字信号之间的差距。电源中也会用到这些电路原理，所以了解电路特性也有助于我们确定电源的重要特性。

在此过程中，我强调一种自上而下的方法。在进行设计之前，需要清楚地理解给定功能的规范。

正如我所写到的，我认为接口设计中的关键决策存在两个边界：CPU 上运行的软件与连接到 CPU 的接口之间的软件 / 硬件边界，以及接口内的模拟 / 数字边界。系统规范有助于确定这些边界的位置，也就是说，对于简单的消费电子设备而言，高速且高价值系统的一系列决策可能没有意义。

写作本书的初衷是提供关于该领域的概要描述。本书适用于混合信号设计的短期课程，对有趣且重要的技术主题做了概述。如果你想了解有关某个主题的更多信息，请深入阅读其他资料。互联网使各种各样的资料更易于获得，本书的参考文献中提供了相关技术主题的来源。

自 20 世纪 70 年代和 80 年代以来，有些技术没有大的变化。在这种情况下，早期的书籍仍然可以作为参考。下面给出一些有用的书：

- *ARRL Handbook*，每年更新一次，近一个世纪以来成为所有 EE 项目的首选指南。
- *Lancaster's Active Filter Cookbook*，该书介绍了有源滤波器的理论和实践，还提供了 20 世纪 70 年代电子产品集锦，包括生物反馈和迷幻照明设备。
- Walter G. Jung 的 *IC Op-Amp Cookbook*，涵盖了线性和非线性运算放大器电路的所有方面。

其他一些技术发生了深刻的变化。比如，FPGA 从根本上改变了我们的逻辑设计方法，现场可编程模拟阵列（FPAA）使微控制器能够提供简单、集成、可配置的模拟功能。

我的网站 ([marilynwolf.us](http://marilynwolf.us)) 上提供了实验练习及本书问题部分的具体操作，还包括相关的其他资源。

非常感谢密歇根大学的 Robert Dick 教授给出了全面而深刻的评论。

电子设计给我的生活带来了快乐。我希望你能像我一样享受这种快乐。

Marilyn Wolf, W2MCW  
美国佐治亚州，亚特兰大

出版者的话

译者序

前言

**第 1 章 绪论** ..... 1

1.1 将计算机连接到物理世界 ..... 1

1.2 目标和技术 ..... 1

1.3 各种微处理器 ..... 3

1.4 信号 ..... 3

1.5 电阻电路 ..... 6

1.6 电容和电感电路 ..... 9

1.7 电路分析 ..... 10

1.8 非线性和有源器件 ..... 13

1.9 设计方法和工具 ..... 15

1.10 如何阅读本书 ..... 17

问题 ..... 18

**第 2 章 标准接口** ..... 21

2.1 简介 ..... 21

2.2 RS-232 ..... 22

2.3 I<sup>2</sup>C、CAN 和 I<sup>2</sup>S ..... 26

2.4 USB ..... 28

2.5 WiFi ..... 32

2.6 ZigBee ..... 33

2.7 蓝牙和低功耗蓝牙 ..... 34

2.8 LoRaWAN ..... 35

2.9 联网设备 ..... 35

问题 ..... 36

**第 3 章 逻辑** ..... 37

3.1 简介 ..... 37

3.2 数字逻辑规范 ..... 37

3.3 CMOS 逻辑电路 ..... 38

3.4 高阻抗和漏极开路输出 ..... 42

3.5 示例：漏极开路和高阻抗总线 ..... 44

3.6 寄存器 ..... 45

3.7 可编程逻辑 ..... 47

3.8 CPU 接口结构 ..... 49

3.9 逻辑电路保护和噪声 ..... 50

3.10 辅助器件和电路 ..... 51

3.11 示例：轴角编码器 ..... 53

延伸阅读 ..... 56

问题 ..... 56

**第 4 章 放大器** ..... 57

4.1 简介 ..... 57

4.2 放大器规范 ..... 57

4.3 电路分析方法 ..... 58

4.4 MOSFET 晶体管模型 ..... 59

4.5 MOSFET 放大器拓扑 ..... 62

4.6 示例：驱动低阻抗负载 ..... 67

4.7 功率放大器 ..... 71

4.8 集成放大器 ..... 72

4.9 运算放大器 ..... 73

4.10 噪声、干扰和串扰 ..... 75

4.11 示例: 驻极体麦克风放大 电路 .....	77	第 7 章 电源 .....	122
延伸阅读 .....	78	7.1 简介 .....	122
问题 .....	79	7.2 电源规范 .....	122
第 5 章 滤波器、信号发生器和 探测器 .....	80	7.3 交直流电源 .....	123
5.1 简介 .....	80	7.4 电源变换器 .....	127
5.2 滤波器规范 .....	80	7.5 电池 .....	129
5.3 RLC 槽路 .....	83	7.6 示例: 线性稳压电源 .....	130
5.4 传递函数 .....	86	7.7 热特性及散热 .....	134
5.5 从滤波器规范到传递函数 .....	89	7.8 电源管理 .....	136
5.6 运算放大器滤波器 .....	91	延伸阅读 .....	136
5.7 示例: 低音增强滤波器 .....	93	问题 .....	136
5.8 高级滤波器类型 .....	96	第 8 章 接口设计 .....	138
5.9 数字滤波器 .....	97	8.1 简介 .....	138
5.10 脉冲和定时电路 .....	98	8.2 嵌入式系统应用案例 .....	138
5.11 信号发生器 .....	100	8.3 接口规格 .....	139
5.12 示例: 任意波形发生器 .....	104	8.4 接口的体系结构 .....	139
5.13 信号检测器 .....	105	8.5 选择正确的平台 .....	140
5.14 示例: 耳机插孔检测器 .....	107	8.6 构建技术 .....	143
延伸阅读 .....	110	8.7 控制和闭环系统 .....	144
问题 .....	111	8.8 硬件 / 软件边界 .....	146
第 6 章 模拟 / 数字和数字 / 模拟转换 .....	112	8.9 示例: 一个简单的驱动器 .....	148
6.1 简介 .....	112	8.10 模拟 / 数字边界 .....	150
6.2 奈奎斯特速率 .....	112	8.11 接口设计方法 .....	150
6.3 转换规范 .....	113	8.12 示例: 拍手检测器 .....	152
6.4 数字 / 模拟转换 .....	114	8.13 示例: 电机控制器 .....	153
6.5 模拟 / 数字转换 .....	116	延伸阅读 .....	161
6.6 示例: R-2R 数字 / 模拟 转换器 .....	118	问题 .....	161
问题 .....	120	附录 A TTL 逻辑 .....	162
		附录 B 双极放大器 .....	166
		参考文献 .....	182

# 绪 论

## 1.1 将计算机连接到物理世界

想使用计算机就需要某种输入和输出设备，我们看不到的计算并不会有多大吸引力。早期的计算机使用原始 I/O 设备：灯、纸带、原始显示器。新的 I/O 设备与 CPU 并行发展。

输入输出对嵌入式计算系统尤为重要。嵌入式计算系统具有广泛的覆盖面，从简单设备到复杂车辆及工业设备等，而这一系列的 I/O 均需要全面的接口技术手册。

嵌入式系统接口是电气和计算机工程之间的概念接口——我们需要两个领域的技能来设计良好、实用的接口。计算机工程师并不总是有很多传统电气工程方面的经验。因此，本书将覆盖该方面的知识。具有电路专业知识的读者可以随意跳过某些部分，直接使用计算机的接口电路。

嵌入式系统接口是混合信号设计，即组合模拟和数字元件电路设计的一个很好的例子，模拟和数字元件结合使用可以提供强大的功能，但也必须小心处理。另外，我们必须注意数字逻辑的电路特性，例如驱动和负载，因为这些在纯数字设计中不是问题，但在混合电路中就没那么简单了。接口设计还需要硬件 / 软件协同设计，从而将运行于 CPU 上的软件功能与混合信号电路结合在一起。

本章中，1.2 节介绍接口设计的目标以及我们用于实现这些目标的技术；1.3 节介绍微处理器；1.4 节介绍电信号；1.5 节和 1.6 节回顾了电气工程的定律——首先是电阻电路，然后是电容和电感电路；1.7 节描述了电路分析的基本技术；1.8 节介绍了非线性 and 有源器件；1.9 节回过头来考虑接口设计的方法和工具；1.10 节概述了本书的其余部分。这几节将概述电气工程中的一些基本概念和术语，供以后参考，我们将在后面的章节中根据需要补充这些概念。

## 1.2 目标和技术

嵌入式计算机系统在各种场景中都有应用，对嵌入式计算机及其接口进行分类的一种有趣方式是，考虑将会构建的系统的副本数量：实验者和业余爱好者往往会建立一个或者几个系统；工业应用中可能会构建一次性设备，也会使用数百到数万个中等制造水

平的专业设备；消费产品的制造量更大，从数万到数千万。接口设计技术在这些设备类型的制造中都有所应用。

许多集成电路是片上系统（Systems-on-Chip, SoC），这些片上系统包括处理器、I/O设备和一些板载内存。这些设备的设计及其与计算系统的连接是 SoC 设计的关键方面。虽然许多 SoC 不包括模拟电路，但数字设备必须具有与之相连的模拟设备的特性。先进的封装技术使得整个系统可由多个采用不同制造技术的芯片组成。

然而，并非所有设计都集中在集成电路上。许多大容量设备主要由印制电路板上组装的标准部件构成，工程师通常称之为板级设计。印制电路板也是工业电子设计的支柱，电路板设计中，允许通过元件和制造技术的控制进行定制电路设计，这比设计集成电路所需的成本和时间少得多。

然而，许多设计仅需要少数传统的电气工程原理，如晶体管原理、电阻器原理、电容器原理、电感器原理。大多数板级设计将集成电路组合在一起，每个集成电路都执行专门的功能，运算放大器是集成电路的一个典型示例，它以易于使用的形式封装了复杂的电路。

虽然使用晶体管设计电路很有趣，但这通常是不现实的。集成电路不仅节省了我们的时间，而且通常能比分立元件制成的电路提供更好的特性。但理解电路设计的基本原理仍然很重要，也很有用，因为我们需要知道如何评估特定应用的集成电路的适当性，也需要能够验证我们是否已经为它们设计了正确的电路连接。例如，逻辑门的输入如果提供的电流不足，将导致其发生故障。

为了正确设计板级系统，我们需要能够编写设计规范，还需要了解电路板组件的规格。这些规格也就是电路的基本特征：

- 增益。
- 频率响应。
- 非线性特征，如上升时间、振铃。
- 噪声。

此处，设计就是使用可用组件找到那些规范的实施方式的过程。电路理论为我们提供了如下重要的设计概念：

- 驱动和负载。
- 过滤。
- 放大增益和带宽。

我们通常通过将接口分解为更小的接口的设计方式来实现整个接口。使用自上而下的设计技术将规范细化进而实现，自下而上的设计方式便于我们估计候选设计的特征。

我们将在第 8 章中看到嵌入式系统接口要求我们回答的两个问题：

- 软件 / 硬件的边界在哪里？CPU 上的软件以及接口的内容有哪些？
- 数字 / 模拟的边界在哪里？接口的哪些部分用数字硬件执行，哪些部分用模拟电路执行？

### 1.3 各种微处理器

微处理器是指以集成电路形式构建的 CPU，当今几乎所有的 CPU 都是微处理器。计算机系统不仅包括 CPU，它还需要内存、I/O 设备以及这些设备之间的互联。术语“平台”通常用于描述完整的计算硬件（也可能是较低级别的软件栈）。我们经常根据平台的大小和复杂程度对平台进行分类。

一个微控制器就是一个完整的片上计算机系统，包括 CPU、存储器、I/O 设备和总线。我们通常用微控制器描述较小的系统，即更简单的 CPU、适度的内存量和基本 I/O。许多微控制器提供 4 位或 8 位 CPU，其中一部分微控制器提供不到一千字节的内存。尽管 Cypress PSoC 5LP<sup>[16]</sup> 具有 32 位 CPU，但它仍然是一款微控制器。该款微控制器可提供一个 ARM Cortex-M3 CPU、三种类型的存储器（闪存、RAM、EPROM），以及数字和模拟外设。

数字信号处理器（Digital Signal Processor, DSP）是针对信号处理应用而优化的微处理器。DSP 的最初用法是指硬件乘法器、哈佛式独立程序和数据存储器的组合。今天，DSP 优化包括用于阵列计算的寻址模式。

片上系统（SoC）这一术语通常应用于更复杂的芯片。除了专为包括多媒体和自动汽车在内的多种应用而构建的复杂平台，智能手机处理器也是 SoC 的典型示例。NXP S32V234<sup>[46]</sup> 是一款用于汽车应用的 SoC-a 视觉处理器，它包括四个带有 SIMD 指令的 ARM Cortex-A53 CPU、两个 ARM Cortex-M4 CPU、一个视觉加速器，还包括 GPU、图像传感器处理器、图像传感器接口以及对安全保障性的支持。

### 1.4 信号

一个信号是一段时间内的某个物理状态，在数学上将信号表示为随时间变化的函数定义的值。

下面我们来讨论一下与时间值相关的信号：

- DC（直流）信号不随时间变化。而实际上，直流信号会缓慢地变化。
- AC（交流）信号会随时间变化。该术语来自正弦信号，我们普遍将其应用于时变值。

做出这种区分，是因为我们在分析 DC 和 AC 信号和电路时使用的技术不同，DC 分

析使用的技术更简单。

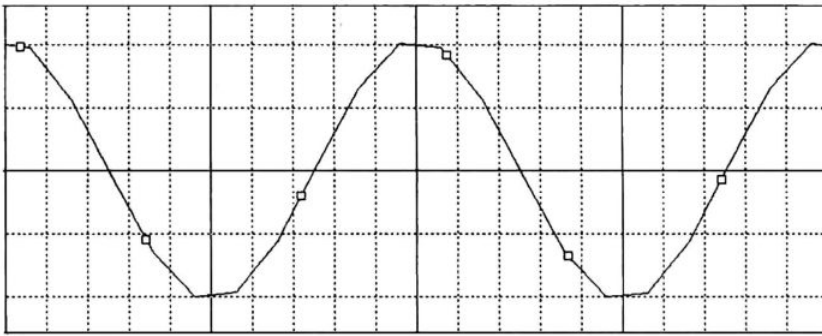
AC 信号可能具有任意波形或形状。出于分析的目的，我们处理两种主要形式的信号：正弦信号和指数信号。正弦信号由其幅度  $A$ 、频率  $\omega$  和相位  $\varphi$  决定：

$$v(t) = A \sin(\omega t) + \varphi \quad (1.1)$$

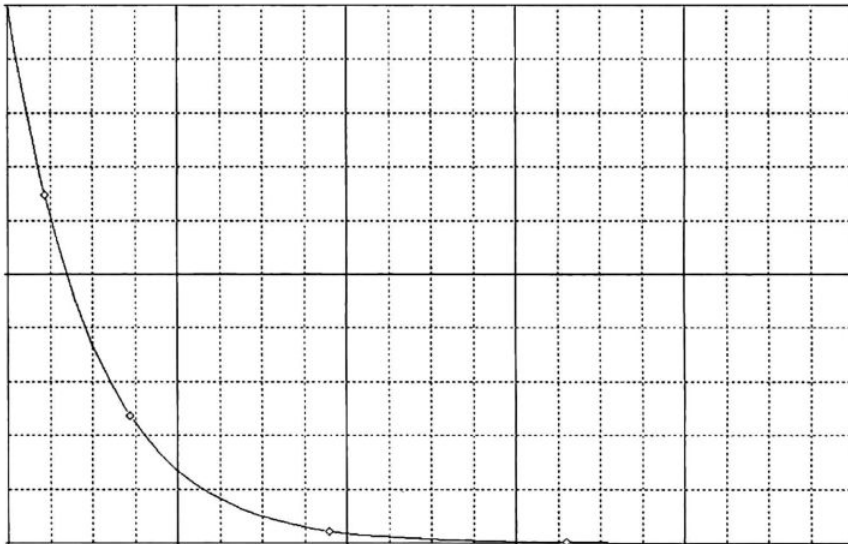
指数信号由其幅度  $A$  和时间常数  $\tau$  决定：

$$v(t) = Ae^{-t/\tau} \quad (1.2)$$

正弦信号和指数信号的例子如图 1.1 所示。



正弦信号



指数信号

图 1.1 正弦信号和指数信号

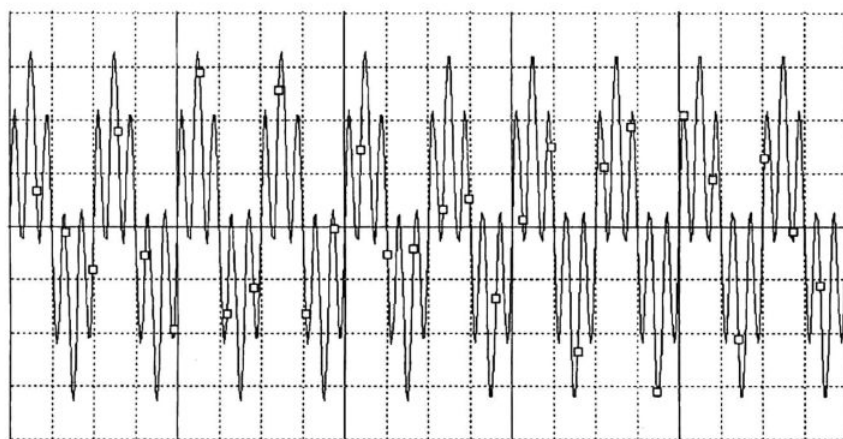
噪声就像杂草，噪声信号在很多情况下都是不受欢迎的。噪声可能来自我们无法预

测的随机信号源或我们能够明确的信号源。当不需要的信号来自可预测的信号源时，我们可能会使用其他术语（例如“干扰”或“串扰”）来描述它。

我们也对信号所在的域进行讨论：

- 时域信号是时间的函数。
- 频域信号是频率的函数。

实际上，这两种表示方法是等效的，因为我们可以将时域信号转换为其频域等效信号，也可以将频域信号转换为其时域等效信号。我们可以使用傅里叶变换及其计算形式的快速傅里叶变换（FFT）将信号在时域和频域之间进行转换。图 1.2 显示了由两个正弦曲线的乘积形成的信号的两重表示，一种是时域的，一种是频域的。频域表示中显示了两个正弦分量的频率（频域信号包括幅度和相位分量，这里我们仅关注信号的幅度部分）。



信号的时域表示



信号的频域表示

图 1.2 一个信号的时域表示和频域表示

数字电路设计人员几乎完全依赖于时域技术，因为数字电路的非线性特性不适合做时域分析；相反，线性电路使用频域和时域分析方法，其中频域分析对于线性电路设计的许多方面尤其有用。

我们可以用如下两个单位中的任何一个来指代频率：变量  $\omega$ ，对应 rad/s（弧度 / 秒）；

变量  $f$ , 对应 Hz (赫兹)。根据定义,  $1\text{Hz} = 2\pi \text{ rad/s}$ 。

信号可以覆盖较大动态范围而得到一些非常大的数字。我们可以通过使用分贝 (dB) 来减小得到的值的大小, 分贝这个单位是十分之一贝尔 (Bel, 一个以 Alexander Graham Bell 命名的强度单位), 我们可以使用分贝来表示值的比率或表示相对于某个参考值的值。由于分贝指的是功率, 所以应该将电压比称为分贝伏 (dBV), 但我们已经通用化地把这些值错用 dB 来描述了。

分贝曲线用于描述滤波器和放大器的响应。一个常见的规格是半功率点, 也称为 3dB 点或拐角频率, 如图 1.3 所示, 该图显示了作为频率函数的功率。伯德图方法让我们可以使用渐近线来近似描述频率响应曲线, 该曲线由两个渐近线定义: 左边是一条平线, 右边是每十倍频程下降 20dB 的线, 速率等于每倍频程 6dB, 曲线上比左侧渐近线低 3dB 的点的功率值是渐近线最大值的 1/2。由于功率与电压的平方有关, 因此相应的电压下降了  $1/\sqrt{2} = 0.7071$ 。我们经常将半功率频率称为拐角频率。在 5.4 节中将更详细地讨论伯德图。

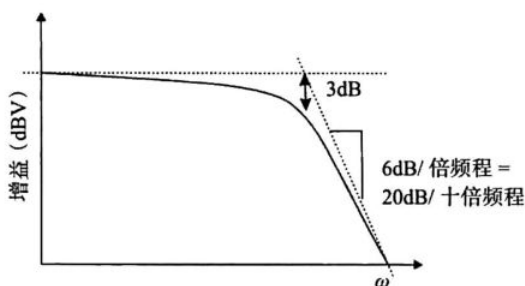


图 1.3 半功率点和截止频率

## 1.5 电阻电路

电是一种基本的物理现象。电气工程 (EE) 是研究电力 (在某种程度上也包括磁力) 控制技术的学科。

电气工程主要关注两个物理量:

- 电流, 通常由变量  $I$  表示。
- 电势, 也称为电压, 由变量  $V$  表示 (或有时用  $E$  表示电动势)。

电流是电势影响下电子运动的宏观表现。电子在持续移动, 但是其净移动是零。电动势导致电子的净移动, 我们可以将其测量为电流。

欧姆定律是电气工程的基本定律之一, 表示如下:

$$V = IR \quad (1.3)$$

器件或区域两端的电压与流过该器件的电流及其电阻  $R$  成正比。电阻值以欧姆 ( $\Omega$ ) 为单位给出。

我们有时更喜欢使用电导  $G$ ：

$$G = 1/R \quad (1.4)$$

电导以西门子 (S) 为单位。

图 1.4 显示了电阻两端的电压和通过电阻的电流。根据欧姆定律，如果我们知道系统参数  $\{I, V, R\}$  中的两个值，就可以确定第三个值。

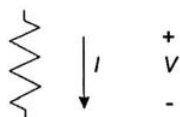


图 1.4 一个电阻中的电流和电压

当我们将几个电阻连接到网络时，另外两个定律描述了电压和电流之间的关系。其一为基尔霍夫电压定律 (Kirchoff's Voltage Law, KVL)，该定律说明围绕环路的电压总和为零：

$$V_1 + \dots + V_n = 0 \quad (1.5)$$

基尔霍夫电流定律 (Kirchoff's Current Law, KCL) 指出进入节点的电流总和为零：

$$I_{12} + \dots + I_{1n} = 0 \quad (1.6)$$

图 1.5 给出了一个示例电路：节点  $\{1,2,3\}$  代表我们评估基尔霍夫电流定律的点，边缘  $\{12,13,23\}$  用于评估基尔霍夫电压定律。我们可以定义沿边缘的电压变化和流入或流出节点的电流。当标记这些值时，需要选择哪个方向为正，哪个为负。只要在标记中保持一致，如何选择正负就不重要了。图 1.5 中显示了电流的两个极性，即  $I_{13} = -I_{31}$ ，其下标给出了每个电流的源点和汇点。在实际情况下，我们经常为每个电流选择一个极性并给它一个下标，这里我们使用双下标表示法来强调每个电流的源点和汇点。同时，还可以在电阻上定义反极性电压。

根据基尔霍夫电压定律，环路  $\{V_{12}, V_{23}, V_{32}\}$  的总电压总是为零。对于通过电路的任何闭合路径，在不重复任何电路元件的情况下， $\sum V_{ij} = 0$ 。

根据基尔霍夫电流定律，进入每个节点的电流总是为零，例如， $I_{21} + I_{31} = 0$ 。当比较不同节点的基尔霍夫电流定律方程时，我们必须确保节点之间的极性是一致的。给定一致的极性，对于电路中所有节点， $\sum I_{ij} = 0$ 。

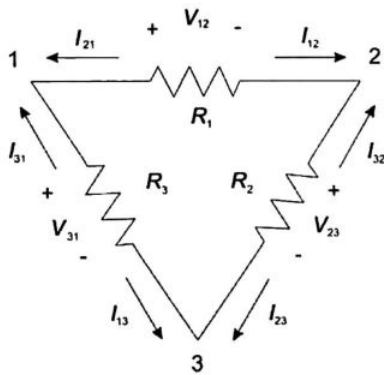


图 1.5 基尔霍夫电压定律和电流定律的示例

戴维南等价定理告诉我们，给定两个节点，我们可以确定电压和电流，可以找到一个研究这两个节点的等效网络，该网络必须包含一个与电阻串联的电压源。

在图 1.6 所示的例子中，可以找到这个三个电阻构成的网络的等效电阻。我们首先利用并行等价定理来减少并联组合  $R_2, R_3$ ：

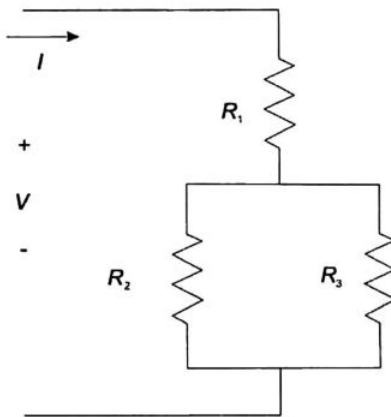


图 1.6 戴维南等价定理的示例

$$R_{23} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)} \quad (1.7)$$

然后使用系列等价定理来减少序列组合  $R_1, R_{23}$ ：

$$R_{123} = R_1 + R_{23} \quad (1.8)$$

$R_{123}$  是戴维南等效电阻。诺顿等价定理提供了这种变换的电流源等效公式：电压源和电阻网络可以表示为与电阻并联的理想电流源。图 1.7 显示了戴维南等价定理和诺顿等价定理的表示形式。