

■麻省理工学院、斯坦福大学、华盛顿大学、
哥伦比亚大学、俄勒冈卫生和科学大学等
国际著名高等学府经典教材

工程技术丛书

数字系统工程

〔美〕威廉·J. 达利 著
约翰·W. 波尔顿
辛 斌 译
刘家康 校



科学出版社
www.sciencep.com

工程技术丛书

数字系统工程

[美] 威廉·J. 达利 著
约翰·W. 波尔顿 译
辛 斌 校
刘家康 校

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系“工程技术丛书”之一。主要从系统的角度出发,针对数字系统中的核心问题进行全面的分析和讨论,其中包括数字系统的工艺与封装、导线的建模与分析、电源分配、噪声、信号传输规范与方法、时序与同步以及相关的电路设计等。书中既有较为详细的理论分析,同时配有具体的实例说明,以便于读者理解学习。有助于从系统级认识数字系统中的相关问题和掌握相关的处理方法。

本书可作为高年级本科生或研究生数字系统类的教材,也适合从事电子系统研究开发的技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

数字系统工程/(美)威廉·J. 达利(William J. Dally),(美)约翰·W. 波尔顿(John W. Poulton)著;辛斌译;刘家康校. —北京:科学出版社, 2006

(工程技术丛书)

ISBN 7-03-017968-4

I. 数… II. ①威…②约… ③辛…④刘… III. 数字系统工程-通信-微电子 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 102132 号

责任编辑:赵方青 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:朱 平

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 12 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 12 月第一次印刷 印张: 36 1/2

印数: 1—4 000 字数: 708 000

定 价: 70.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

数字系统工程

为什么我们计算机的运行速度有快有慢？为什么一些数字系统能可靠地运行很多年而另一些系统却每过几小时就会发生故障？为什么一些系统消耗上千瓦的功率而另一些却可以用电池供电？这些关于速度、可靠性和功率问题的答案都是由数字系统的系统级电子设计(包括电源分配、噪声管理、信号传输、时序与同步)决定的。

《数字系统工程》阐述了关于这些主题的全面处理方法。本书将各个领域中的基本原理精确地推导展开,并与实例电路、实践所运用的方法结合起来。本书不仅可以作为大学教材来填补电路与逻辑设计之间的缺口,还可以帮助数字设计者跟上现代集成电路在速度与功率方面的发展。本书描述了曾经只用于超级计算机,现在已经变成正确有效地操作任何类型的数字系统所必不可少的方法。

总的来说,本书描述了数字系统的基本电子问题:功率、噪声、信号传输与时序。书中介绍了处理这些问题的已知的最好方法,并讨论了实现这些方法的工作电路。在所有层次,本书都经过严格考证,方程全部得自基本原理。本书避免以手册方式来描述各项事情通常是怎样完成的,而是集中研究事情的缘由并指出当前方法的局限性。此外,书中还介绍了一些新型方法,这些方法将来可能会被采用。本书已经用于麻省理工学院的数字系统工程课的教学。

威廉·J. 达利是斯坦福大学的电子工程与计算机科学专业的教授,他同时还就职于贝尔电话实验室、加州理工学院以及麻省理工学院。他定期为高速数字设计领域中的公司提供咨询。他的客户包括 SGI/Cray 研究机构、DEC 公司和 Intel 公司。他的研究兴趣包括计算机体系结构、并行计算、计算机图形学、计算机辅助设计和 VLSI (超大规模集成电路)设计。

约翰·W. 波尔顿从 1981 年以来一直在北卡莱罗纳大学查普尔山分校计算机科学系担任讲师,目前他的职位是研究教授。他是多代像素平面图形引擎的协助发明者(与亨利·富克斯合作)和主工程师。这种机器是第一代采用定制的逻辑增强型存储芯片处理像素的系统之一。他的研究兴趣包括并行计算、计算机图形学和 VLSI 中的存储与通信系统的电路设计。

物理常数

名 称	符 号	数 值	单 位
真空光速	c	3.00×10^8	m/s
玻尔兹曼常数	k_B	1.38×10^{-23}	J/K
电子的电量	q	1.60×10^{-19}	C
300K 时的热电压	$\phi_T = k_B T / q$	25.9	mV
真空介电常数	ϵ_0	8.85×10^{-12}	F/m
真空磁导体	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m

与硅相关的常数

名 称	符号或公式	数 值	单 位	可选单位
硅的介电常数	$\epsilon_{Si} = \epsilon_{rSi} \cdot \epsilon_0$	1.04×10^{-10}	F/m	104 aF/ μ m
SiO ₂ 的介电常数	$\epsilon_{Si} = \epsilon_{rSiO_2} \cdot \epsilon_0$	3.45×10^{-11}	F/m	34.5 aF/ μ m
SiO ₂ 的击穿电压		7×10^8	V/m	0.7V/nm
电子迁移率	μ_n	0.135	m ² /V · s	
空穴迁移率	μ_p	0.048	m ² /V · s	
硅中的本征载流子浓度	n_i	1.45×10^{16}	1/m ³	

不同金属的电阻率

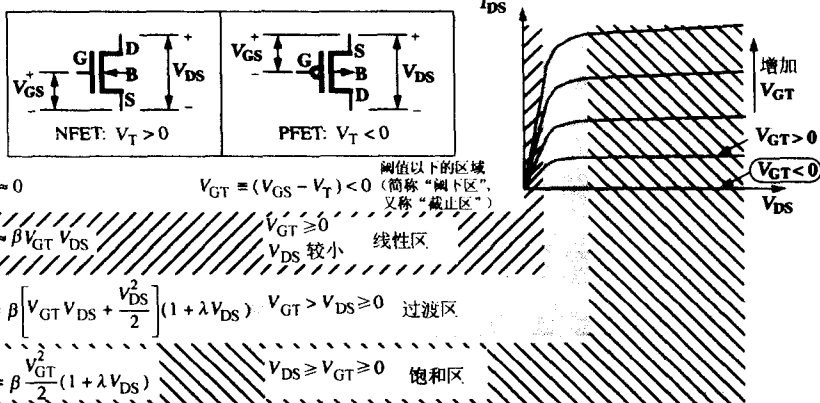
材 料	数 值
银(Ag)	1.6×10^{-8}
铜(Cu)	1.7×10^{-8}
金(Au)	2.2×10^{-8}
铝(Al)	2.8×10^{-8}
钨(W)	5.3×10^{-8}

不同材料的相对介电常数

材 料	数 值
硅氧化物(SiO ₂)	3.9
硅氮化物(Si ₃ N ₄)	7.5
氧化铍(BeO)	7.3
氧化铝(Al ₂ O ₃)	9.5
环氧玻璃(FR-4)	4.5~5.0
聚酰亚胺	3.5~4.5
聚四氟乙烯	2.2~2.8

MOSFET 方程

漏极电流



器件跨导 $\beta = k \frac{W}{L}$ W : 器件宽度 L : 器件长度

工艺跨导 $k = \frac{\mu \epsilon \text{SiO}_2}{T_{OX}}$ $\mu = \mu_n$, 电子迁移率 (NFET)
 $= \mu_p$, 空穴迁移率 (PFET)

阈值传导

当 $V_{GT} < 0$ 时, $I_{DS} \neq 0$

阈值漏极电流 $I_{DS} = I_{ST} \exp \left[\frac{V_{GS} + \sigma V_{DS} - V_T}{n \phi_T} \right]$ I_{ST} , σ 和 n 与工艺有关

体效应

体效应阈值电压 $V_T' = V_T|_{V_{SB} > 0} = V_{TO} + \gamma [(2|\phi_F| + V_{SB})^{1/2} - (2|\phi_F|)^{1/2}]$

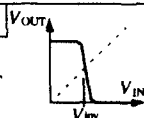
$V_{TO} = V_T|_{V_{SB} = 0}$, $|\phi_F| = \frac{kT}{q} \ln \frac{N}{n_i}$ N 是掺杂原子的浓度

0.35μm 工艺的典型参数

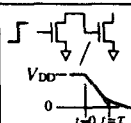
参数	描述	NFET	PFET
V_T	阈值电压	+0.5 V	-0.5 V
k	工艺跨导	200 $\mu\text{A}/\text{V}^2$	50 $\mu\text{A}/\text{V}^2$
T_{OX}	栅氧化物厚度	7 nm	
λ	沟道长度调制	0.1 V^{-1}	
γ	体效应参数	0.3 $\text{V}^{1/2}$	

反相器

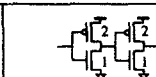
IN $\rightarrow$ OUT



$V_{inv} = \frac{V_{TN} + \sqrt{\beta_P/\beta_N}(V_{DD} + V_{TP})}{1 + \sqrt{\beta_P/\beta_N}}$



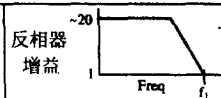
$\tau_n = \frac{V_{DD} C_{gate}}{I_{DSSN}}$



经过 FOI 反相器的延迟

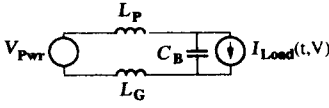
$\tau_{inv} = 3 \tau_n$

对于 0.35 μm 工艺, $\tau_{inv} \approx 30\text{ps}$



反相器的增益带宽积

$\omega_1 = \frac{g_m}{C} = \frac{I_{DSS}}{V_{DD} C} = \frac{1}{\tau_{inv}}$

功率与噪声	
旁路	$LC \text{ 电路谐振频率 } \omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ $\text{旁路电容的尺寸设置 } C_B > \frac{I_{avg}}{\Delta V} \left(k_i t_{ck} + \frac{LI_{avg}}{\Delta V} \right)$ $k_i = \max_t \left \frac{\int_0^t (I - I_{avg}) dt}{I_{avg} t_{ck}} \right$  t_{ck} 是时钟周期, I_{avg} 是时间平均的电流消耗 ΔV 是允许的最大纹波电压 k_i 的典型值为 0.25 ~ 0.5
噪声	信号传输系统中的噪声 $V_{Norse} = K_N V_{Signal} + V_{NFixed}$ 对于均匀的耦合线, $k_C = k_L$, 且有: 耦合传输线之间的串扰系数 $k_{NearEnd} = \frac{k_C + k_L}{4}$ $k_{FarEnd} = \frac{(k_C - k_L)}{2}$ 其中 k_C 和 k_L 分别是两条线之间的容性耦合系数和感性耦合系数 $k_{NearEnd} = \frac{1}{4} \left(\frac{C_M}{C} + \frac{L_M}{L} \right) = \frac{C_M}{2C}$ $k_{FarEnd} = \frac{1}{2} \left(\frac{C_M}{C} - \frac{L_M}{L} \right) = 0$ 电阻中的约翰逊噪声 $V_{JR} = (4k_B T R B)^{1/2}$ (热噪声) 散粒噪声 $I_{sR} = (2qIB)^{1/2}$ 其中 T 是以 K 为单位的温度, R 是以 Ω 为单位的电阻, B 是以 Hz 为单位的带宽, V_{JR} 的单位为 V。 其中 q 是电子的电荷, I 是电路中的电流, B 是以 Hz 为单位的带宽, I_{sR} 的单位为 A。 误码率 (BER) $P(error) = \exp\left(-\frac{VSNR^2}{2}\right)$ 其中 P 是信噪比为 $VSNR$ 的信号传输系统的错误概率。在典型的信号传输系统中, P 被每位采样一次, $P=BER$。

不同材料的热传导率

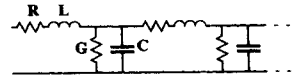
材料	数值
硅 (Si)	150
二氧化硅 (SiO ₂)	1.5
铜 (Cu)	420
铝 (Al)	240
氧化铍 (BeO)	220
氧化铝 (Al ₂ O ₃)	35
环氧玻璃 (FR-4)	0.2
聚酰亚胺 / 玻璃	0.3
聚四氟乙烯 / 玻璃	0.3

传输线方程

微损线

$$\text{特征阻抗 } Z_0 = \sqrt{\frac{R + Ls}{G + Cs}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \Big|_{R, G=0}$$

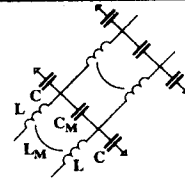
$$\text{传播速度 } v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Big|_{R, G=0}$$



耦合线

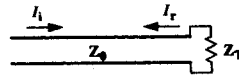
$$\text{偶模阻抗 } Z_{\text{Ev}} = \sqrt{\frac{L + L_M}{C - C_M}}$$

$$\text{奇模阻抗 } Z_{\text{Od}} = \sqrt{\frac{L - L_M}{C + C_M}}$$



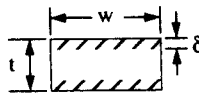
报务员方程

$$\text{反射系数 } k_r = \frac{V_r}{V_i} = \frac{I_r}{I_i} = \frac{Z_T - Z_0}{Z_T + Z_0}$$



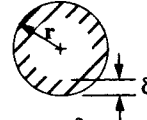
趋肤效应

$$\text{趋肤深度 } \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$



$$\text{趋肤深度频率 } f_s = \frac{\rho}{\pi \mu (t/2)^2}$$

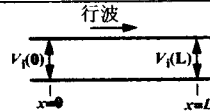
$$f_s = \frac{\rho}{\pi \mu r^2}$$



$$\text{趋肤深度电阻 } R(f) = \frac{\sqrt{\pi f \mu \rho}}{2w} = R_{\text{DC}} \left(\frac{f}{f_s} \right)^{1/2} \quad R(f) = \frac{\sqrt{f \mu \rho / \pi}}{2r} = \frac{R_{\text{DC}}}{2} \left(\frac{f}{f_s} \right)^{1/2}$$

有损线中的衰减

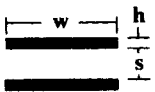
$$\text{衰减 } \frac{V_i(L)}{V_i(0)} = \exp[-(\alpha_R + \alpha_D)L] = \exp\left[-\left(\frac{R}{2Z_0} + \frac{GZ_0}{2}\right)L\right]$$



$$\text{导体损耗 } \alpha_R(f) = \frac{R_{\text{DC}}}{4Z_0} \left(\frac{f}{f_s} \right)^{1/2} \quad (\text{圆形}) \quad \alpha_R(f) = \frac{R_{\text{DC}}}{2Z_0} \left(\frac{f}{f_s} \right)^{1/2} \quad (\text{带状})$$

$$\text{介质损耗 (均匀)} \quad \alpha_D(f) = \frac{\pi \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta}{c} f \quad \text{介质损耗正切} \quad \tan \delta = \frac{G}{\omega C} = \frac{\sigma_{\text{Diel}}}{\omega \epsilon_r}$$

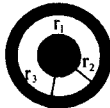
不同几何形状的 R、C、Z₀ (均匀介质, L=εμ/C)



$$R_{\text{DC}} = 2 \frac{\rho}{wh}$$

$$C = \frac{\epsilon w}{s}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu s}{\epsilon w}}$$



$$R_{\text{DC}} = \frac{\rho}{\pi r_1^2} + \frac{\rho}{\pi (r_2^2 - r_1^2)}$$

$$C = \frac{2\pi \epsilon}{\log(r_2/r_1)}$$

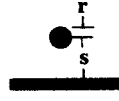
$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu \log(r_2/r_1)}{\epsilon \pi}}$$



$$R_{\text{DC}} = \frac{2\rho}{\pi r^2}$$

$$C = \frac{\pi \epsilon}{\log(s/r)}$$

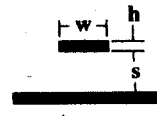
$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu \log(s/r)}{\epsilon \pi}}$$



$$R_{\text{DC}} = \frac{\rho}{\pi r^2}$$

$$C = \frac{\pi \epsilon}{\log(2s/r)}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu \log(2s/r)}{\epsilon \pi}}$$



$$R_{\text{DC}} = \frac{\rho}{wh}$$

$$C \approx \frac{\epsilon w}{s} + \frac{2\pi \epsilon}{\log(s/w)}$$

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\epsilon \mu}}{C}$$

译者序

目前,我国的电子工业基础仍然比较薄弱,尤其是代表半导体工艺技术水平微电子行业的发展整体上明显落后于发达国家。这种形势也使得我们的电子工业发展过多地依赖于国外的半导体工艺,进而导致很多数字工程师在各种数字系统的开发中仍然以逻辑设计为主,而对信号层次甚至工艺层次的问题认识不足。单纯的逻辑设计虽然简化了产品开发过程,但同时也容易使工程师们回避数字系统开发中可能遇到的从工艺到信号乃至电路的系统级问题。目前的大学教学中也普遍以数字设计为主,这固然体现出数字化的主流趋势,但也往往使得学生们缺乏对数字系统开发中系统级问题的认识,因而在遇到系统问题时难免不知所措。

《数字系统工程》正是一本介绍数字系统开发过程中可能遇到的系统级问题的优秀作品。这本著作作为麻省理工学院的教材已经使用了八年,收到了很好的教学效果。斯坦福大学和美国其他一些大学的电子工程及计算机工程专业也以本书为教材。本书的作者威廉·J. 达利和约翰·W. 波尔顿都是数字设计领域的专家,同时,他们分别担任斯坦福大学和北卡罗纳大学查普尔山分校相关专业的教学与研究工作,从事过很多大型数字系统的研究与开发,具有丰富的实践经验。

从内容方面讲,《数字系统工程》是一本知识面很广泛的综合性教材,其内容涉及底层的工艺封装、元器件、电源、噪声、信号传输以及时序等多个方面,与通信、微电子、电路与系统等专业知识有密切关系。本书从系统的角度对数字系统的组成与设计的原理与方法进行了比较全面的阐述,书中兼有理论分析和实例说明,便于读者理解与学习,有助于从事电子设计的工程人员从整体上把握数字系统的相关理论与方法。

译者目前于北京理工大学自动控制系统攻读博士学位。在本书翻译完成之际,感谢父母和亲友一如既往的鼓励和支持。在本书的翻译过程中,得到了北京理工大学电子工程系刘家康教授的指导,并得到了女友张艳伟的大力支持与帮助,在此对他们的辛勤劳动深表感谢。同时,与北京理工大学电子工程系贾冒华硕士、刘涛硕士以及李健博士的交流也使我受益匪浅。北京理工大学自动控制系统沈军老师和科学出版社崔炳哲编辑对本书的翻译也给予了帮助和支持,在此一并感谢。

译者的理论水平有限,译文中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

辛 斌

谨于 2006 年 7 月

前 言

今天,在数字系统的设计方式上我们正面临着一个巨大的变化。过去,许多数字设计者在以离散逻辑的方式设计他们的系统时,成功地忽略了一系列电子问题,从而简化了设计过程。当时,只有超级计算机和高速通信系统的设计者们需要关注数字的抽象概念,但是这种情况已经一去不复返了。随着技术的进步,数字系统的系统级工程问题已经变成所有数字系统设计的核心。

随着技术的继续进步,信号传输、时序、功率和噪声问题变得越发重要了。在高频信号领域,导线不能简单地视为等电位体,而必须以传输线的方式建模。一个芯片上门的数量和速度已经比其管脚的数量和速度增加得更快,这使芯片之间的通信成为一个系统瓶颈,并引起了对有效的信号传输和时序规范的重视。由于电路中的供电电压降低且电流增大,功率分配成为一个更具有挑战性的工程问题。在高频段必须仔细设计时序规范,以防止时钟信号的偏移和抖动造成系统性能的降低。正因为这些趋势,本书中所描述的曾经只用于超级计算机的各种技术,现在对正确而有效地操作任何类型的数字系统来说是必不可少的。

有两个方面的原因激发我们编写本书。首先是我们在构建高速数字系统(并行计算机、网络开关和高性能的图像系统)的研究中开发出了一些可以突破传统方法限制的信号传输、时序和功率分配技术。我们渴望和其他实践工程师分享这些方法以及相关的工程科学。第二个是为了避免我们在工业应用中曾经遭遇过的许多灾难再次发生。为了使某个公司的一个系统可靠地运行,我们曾经在那里花费了一年多的时间研究噪声问题;另一个系统则由于时序问题而多次更换专用集成电路(ASIC);还有一个系统则因为片上电源的波动而导致周期性地出现问题;第四个系统产品则因为在定制芯片设计过程中使用的触发器里的一个微妙错误而被耽误了六个月。这些问题延误了系统交货时间长达数月以至数年,而且因此直接导致了一些公司的破产。权宜的应急措施很少因为这些类型的问题而存在,但是如果有关的工程师在噪声、信号传输和时序方面具有丰富的知识,那么通过正确地设计就能够很容易地避免以上问题的发生。通过本书的撰写,我们希望有助于消除这些领域中广泛存在的知识欠缺的现象和经常产生的错误认识,并有助于今后避免这类灾难的发生。

本书的组织

本书从描述数字系统的主要工程问题(包括电源、噪声、信号传输和时序)开始,提出了目前已知的用于处理这些问题的最优技术,并描述了使用这些技术的工作电

路。本书中的材料在各个层次上都是经过严格考证的,书中所用公式从基本原理推导而得。本书避免以手册方式来描述各项事情通常完成的过程。虽然它对目前的工业实践做了一个很好的描述,但它强调需要去做一系列相关事情的原因,指出了当前方法的局限性,并描述了新兴的技术,如低压信号传输、闭环时序,而这些技术将来有可能成为完成任务和实现目标所采用的方式。

本书通过描述与数字系统相关的主要工程问题以及影响它们的技术趋势来引入数字系统工程的主题。然后,该书投入 3 章内容以描述“计算机的元件——导线和电路”为后续章节介绍这些问题的处理方法打下基础。这几章分析了用于构建现代数字系统的元件和互连器件,并建立这些元器件的工程模型以便在后续章节中对数字系统工程问题进行研究。

继引言之后,本书在第 5 章中处理电源分配(亦指“功率分配”)问题。当拉动含有与信号上升时间可比的频率成分的、较大的交流(AC)电流时,数字逻辑需要一个平稳的直流(DC)电源。这一章为片上和片外电源分配网络、负载建立了电路模型。本章不仅分析了片上分配方法(包括电源栅格布局、片上调节和共生旁路电容),也讨论了片外分配方法(包括旁路电容方法、局部调节方法、分路调节器技术和钳位技术)。这一章结尾部分对一个分配系统实例进行了介绍。由于电源噪声是数字系统中最大的噪声源之一,本章还为第 6 章介绍噪声的处理方法打下了基础,而第 6 章则相继为第 7 章中的信号传输规范做好了准备。

作为第 6 章的主题,噪声是数字系统工程设计中最重要的因素之一,但同时它也是最容易被忽视的因素之一。数字系统中的大部分噪声是由系统本身产生的,因此准确地说应该是干扰而不是噪声。本章给出了一种针对主噪声源(包括电源噪声、信号回路耦合、串扰、码间干扰以及参数偏移)的深入处理方法,而对次噪声源(包括 α 粒子、热噪声、散粒噪声和闪烁噪声)进行了简要的处理。这些噪声源的工程模型被用于引进噪声预算、抗噪声能力的概念以及基于统计噪声模型的误码率的计算。这种对噪声的处理方法有助于读者理解第 7 章和第 8 章所提出的信号传输系统设计中的主要问题。

用于从一端向另一端传输信息的信号传输技术是数字系统的核心。信号传输规范包括把信息编码成物理量(典型如电流或电压)、提供这个量的测量参考、将信号能量耦合到传输介质的发送器的设计、吸收能量并抑制有害反射的端接(终端)设计、控制信号转换限制传输能频谱的方法。信号传输规范在很大程度上决定了系统的可靠性、速度和功耗。一个好的信号传输规范能将信号与噪声隔离,提供抗噪声能力,而不是试图用噪声裕量来压制噪声。一般应用中的大多数信号传输规范是非常贫乏的,它们往往以系统中发生的各种故障的历史记录作为标准,而不是通过仔细的设计来隔离噪声源。因此,许多现代系统定义了它们自身的信号传输规范而不是使用这些标准。

第7章解决通过LC传输线和集总LRC参数互连传输信号的基本问题。这一章引入了电压模式与电流模式传输、单极性与双极性信号传输、串联与并联终端、参考以及差分信号传输的概念。此外,本章还对不确定性、上升时间控制、脉冲信号传输、多电平信号传输等问题进行了描述分析。我们建立了一套用于计算在噪声背景下能够可靠传输信号所要求的信号幅值的方法,并指出采用适当的噪声隔离技术,很低的信号压摆(100mV)足够用于信号传输。第8章描述了更先进的技术方法,其中包括处理有损RC和LRC传输线的技术、同步双向信号传输和AC信号传输。

数字系统在使用信号传输规范的同时还使用时序规范来管理何时在信号线上发送新的符号,以及在线路上采样和检测该符号。一个好的时序规范能够通过对偏移、抖动和时序噪声源进行降低和补偿来最大程度地提高系统性能。限制系统的运行速度的主要因素是信号时序的不确定性而不是延迟。第9章讨论了时序规范的原理,描述了用于对信号进行时序编码的方法,并引入了时序噪声和时序预算的概念。这一章继续讨论了采用开环和闭环时序技术最大程度地减少偏移与抖动的方法,并以分析讨论时钟分配技术收尾。

第10章讨论的主要内容是与时序紧密相关的同步问题。同步分析可以用于确定两个事件的相对顺序。当对进入同步系统的异步输入信号进行采样或者当信号跨越两个不同的时钟域的边界时,同步问题就显得尤其重要了。当信号被同步时,同步器有可能被驱动到一种亚稳态,导致同步器无法分辨系统中事件发生的先后顺序,如果长时间驻留在这种状态就会造成同步失效。这一章介绍了同步问题,描述了亚稳性、同步失效,并给出了计算同步失效概率的方法。关于同步器设计的一部分内容认同了关于同步的几个特例,并描述了利用这些特例来避免正常同步器延时的快速同步器的构造方法。最后,本章描述了可以避免同步中存在的问题的异步设计方法。

第11章和第12章分析描述了信号传输电路和时序电路。第11章介绍了用于构建第7、8章中描述的信号传输系统的发送器、接收器以及端接的工作电路,特别关注了噪声管理技术和对工艺、电压与温度变化的补偿技术。第12章分析讨论了时序电路,包括触发器、延迟线、压控振荡器、相位比较器和时钟驱动器。这部分的重点在于最大程度地减少偏移与抖动。这些章都在结尾部分描述了一个系统实例,从而把从第7章~第10章中的概念与第11章、第12章中的电路细节联系起来。

数字系统工程的教学

使工程师们能够掌握数字系统工程的最好方法是把该书作为电子工程和计算机工程专业的大学课程教材。在目前的大学课程中,电路设计(包含单个的逻辑器件与存储元件的电子设计)与逻辑设计及体系结构(二者用于处理数字系统的逻辑组织)之间存在一个缺口。当前的大学课程缺乏对系统级电子问题的介绍与分析。

期望该书能够填补电子工程和计算机工程课程中存在的这一缺口。本书按照教科书的形式撰写,以适于教学的顺序组织材料,并且每一章结尾都附带了习题。从一定程度上说,这本书适合电子工程领域的高年级本科生或一年级研究生使用。该书的草稿已被用来教授数字系统工程这门课程,在麻省理工学院由达利主持教学,在华盛顿大学则由我们的同事 Fred Rosenberger 承担该课程的教学。以本书为基础的数字系统工程课(代码 EE273)始于 1998 年秋,不久将会在斯坦福大学进行教授。

辅助的教学资料,包括课程安排表、演讲使用的幻灯片、仿真模型、问题集与解决方法,将会通过互联网提供(网址为 <http://www.cup.org/books/dally/dally.html>)。

我们在撰写本书的过程中既学到了很多知识也得到了很多乐趣。希望读者阅读本书至少能获得些许我们从写书中获得的见识与快乐。

威廉·J. 达利

斯坦福大学,加利福尼亚

约翰·W. 波尔顿

查普尔山分校,北卡罗纳大学

致 谢

我们要感谢所有对本书的创作作出贡献的人们。华盛顿大学的 Fred Rosenberger 仔细地审查了本书的原稿,而且是第一位勇于用本书进行教学但并非作者的学者。他的深刻见解大大提高了本书的质量。

许多人审查了原稿中的一章或多章内容。在这些人当中,特别感谢麻省理工学院的 Tom Knight 和 Gill Pratt 以及来自 Equator Technologies 的 Rich Lethin,他们对本书提出了重要的改进建议。

在麻省理工学院 1996 年秋季学期期间,获得 6.891 学分的学生们帮助排查了本书和课文早期草稿中存在的错误。

第 3 章中介绍的许多测量是由在 UNC 工作的 Steve Tell 和 Robert Palmer 完成的。

感谢我们的同事,正如此处所述,通过与同事们的互动交流,使我们在本书中的观点受到了巨大影响。这些同事包括斯坦福大学的 Mark Horowitz、Kunle Olukotun、Tom Lee、Ken Yang,UNC 的 Vernon Chi、John Eyles,密歇根大学的 Rich Brown、麻省理工学院的 Tom Knight、Gill Pratt、Steve Ward、Anant Agarwal,Myricom 的 Chunk Seitz,HP 的 Al Barber,Digital 的 Dan Dobberpuhl,Cray 的 Steve Oberlin,Mark Birrittella,Dan Mansour,Doug Kervin,Intel 的 Dave Dunning,Craig Peterson,Randy Mooney,Greg Fyler,Sun 的 Greg Papadopoulos,KLA 的 Lance Glasser,Avici 的 Phil Carvey,IDT 的 Steve Molnar,PixelFusion 的 Trey Greer,Secant Network Technologies 的 Fred Heaton。(以上排名无特别顺序。)

感谢和我们一起从事与本著作相关的研究项目工作的学生和员工们。我们从他们身上学到了很多。这些学生和员工有:Larry Dennison、Whay Lee,Duke Xanthopoulos、Mike Noakes、Jeff Bowers、Steve Keckler、Andrew Chang、Ed Lee 和 Richard An。

感谢剑桥大学出版社的 Alan Harvey 帮助我们通过了项目。感谢我们的项目经理 Andrew Wilson 和我们的编审 John Joswick,他们拿到的是非常粗糙的手稿,然而他们把它变成了一本精致的书。

感谢 DARPA 的 Gill Weigand、Bob Parker、Bob Lucas 在这些领域内的研究变得紧迫之前,他们富有远见地对这些研究进行了投资。

最后,感谢我们的家人 Sharon、Jenny、Katie、Liza Dally、Susan、Sarah 和 Wiona Poulton,她们作出了巨大的牺牲使我们有时间投身于写作。

目 录

第 1 章 数字系统工程概述	1
1.1 为何研究数字系统工程	2
1.2 数字系统的工程观	3
1.2.1 馈送通道与速度	4
1.2.2 信号传输规范	5
1.2.3 时序与同步	7
1.2.4 电源分配	8
1.2.5 噪 声	9
1.2.6 电路的系统观	10
1.3 技术趋势与数字系统工程	10
1.3.1 摩尔定律	11
1.3.2 芯片参数的变化比例	13
1.3.3 导线的变化比例	14
1.3.4 高度集成化使新方法成为可能	17
1.3.5 数字系统问题与解决方法在不断改变	18
1.4 本书的组织	18
1.5 目录说明	19
1.6 习 题	19
第 2 章 数字系统的封装	21
2.1 一个典型的数字系统	21
2.2 数字集成电路——片上布线	23
2.3 集成电路封装	24
2.3.1 接合线与焊球	24
2.3.2 封装类型	26
2.3.3 封装制造工艺	28
2.3.4 多芯片模块	29
2.3.5 一个典型的封装模型	29
2.4 印制电路板	32
2.4.1 PC 板结构	33
2.4.2 电子属性	33
2.4.3 制造过程	34

2.4.4 导 孔	35
2.4.5 尺寸限制	36
2.4.6 元件安装——表贴与过孔	36
2.4.7 插 座	37
2.5 机箱与机柜	38
2.6 背板与母板	39
2.6.1 子 卡	39
2.6.2 背 板	39
2.7 导线与电缆	40
2.7.1 导 线	40
2.7.2 信号传输电缆	41
2.7.3 汇流条	43
2.8 连接器	44
2.8.1 PC 板连接器	45
2.8.2 转接器	46
2.8.3 弹性连接器	46
2.8.4 电源连接器	47
2.8.5 导线连接器与电缆连接器	47
2.9 光通信	50
2.9.1 光发送器	51
2.9.2 光 纤	52
2.9.3 光接收器	54
2.9.4 复 用	55
2.9.5 光放大器	56
2.9.6 自由空间光互连	57
2.10 无线电通信	58
2.10.1 典型的数字无线电	58
2.10.2 功率方程	59
2.10.3 调 制	60
2.10.4 多径效应	62
2.11 目录说明	62
2.12 习 题	63
第 3 章 导线的建模与分析	64
3.1 几何属性与电子属性	65
3.1.1 电 阻	65

3.1.2 电 容	66
3.1.3 电 感	67
3.2 导线的电子模型	68
3.2.1 理想导线	68
3.2.2 传输线	68
3.3 简单传输线	71
3.3.1 集总导线	71
3.3.2 RC 传输线	73
3.3.3 无损 LC 传输线	74
3.3.4 有损 LRC 传输线	81
3.3.5 介质吸收	85
3.4 特殊的传输线	86
3.4.1 多支路总线	86
3.4.2 平衡传输线	88
3.4.3 共模阻抗与差模阻抗	89
3.4.4 隔离线路	90
3.5 导线成本模型	92
3.5.1 导线面积成本	92
3.5.2 终端成本	94
3.6 测量方法	95
3.6.1 时域测量	95
3.6.2 网络分析	99
3.6.3 描绘导线特征的 CAD 工具	101
3.7 一些实验测量	103
3.7.1 PC 板迹线中的频率相关衰减	103
3.7.2 耦合线中的串扰	107
3.7.3 容性不连续与感性不连续	111
3.7.4 IC 封装寄生效应的测量	114
3.7.5 测量实践	116
3.8 目录说明	117
3.9 习 题	117
第 4 章 电 路	122
4.1 MOS 晶体管	123
4.1.1 MOS 器件的结构	123
4.1.2 电流-电压特性	124