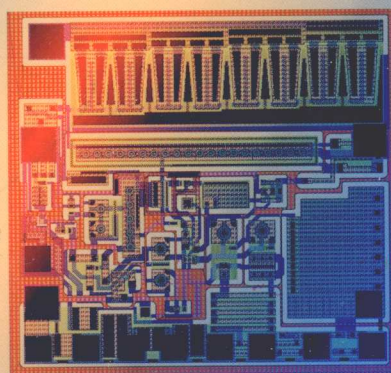
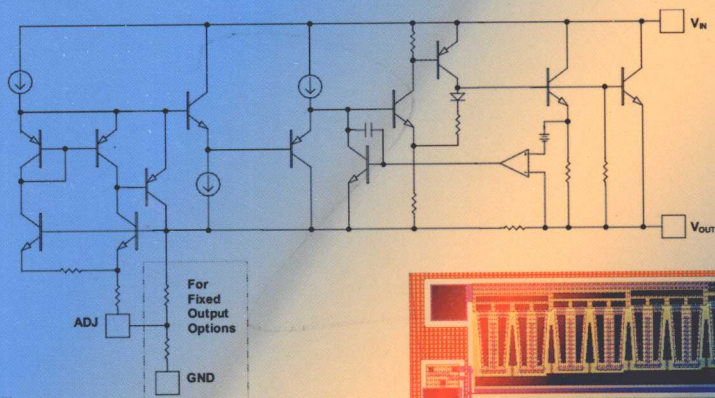



# 电源管理芯片 设计教程

廖永波 鞠家欣 编著



DIANYUAN GUANLI XINPIAN SHEJI JIAOCHENG

 冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 电源管理芯片设计教程

廖永波 鞠家欣 编著

北京  
冶金工业出版社  
2012

## 内 容 提 要

本书简要介绍了稳压电源及 DC-DC 变换器的发展趋势和基本原理; 根据功能要求和性能指标, 在简明电路总体设计的基础上, 对各功能模块和整体电路进行了设计、仿真与验证的说明; 此外, 根据某工艺线的  $0.5\mu\text{m}$  工艺规则进行了版图设计和验证。本书内容包括绪论, Workview 软件, DC-DC 变换器的基本原理, 控制电路中各子模块设计与仿真验证, 整体电路仿真, 工艺、版图设计和验证。

本书适合微电子专业的大学生、研究生和从事模拟 IC 设计的工程师阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电源管理芯片设计教程/廖永波, 鞠家欣编著. —北京:  
冶金工业出版社, 2012. 5

ISBN 978-7-5024-5922-2

I. ①电… II. ①廖… ②鞠… III. ①稳压电源—电源  
电路—电路设计 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 091163 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 王雪涛 美术编辑 李新 版式设计 孙跃红

责任校对 郑娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5922-2

北京慧美印刷有限公司印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销

2012 年 5 月第 1 版, 2012 年 5 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 9.75 印张; 176 千字; 144 页

24.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100010) 电话: (010)65289081 (兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

# 前 言

---

在过去三十多年，CMOS 技术已经快速地覆盖了模拟集成电路的设计范围，以其低成本、高性能的解决方案，已成为市场的主流。尽管双极性晶体管和 III ~ V 族元件仍然有应用范围，对于当今复杂的混合信号集成电路系统而言，只有 CMOS 技术才是最佳的选择。虽然沟道长度不断缩小并且出现了 3D 晶体管，但是 CMOS 技术将在未来很长一段时间里，满足电路设计的需求。

基于对电源管理芯片设计的执著和热爱，我们把多年来从事电源管理芯片设计工作中的体会、理解和实践经验编撰成书，旨在为集成电路的初学者提供一种通过设计流程来衔接各个电路模块的设计、整体电路的设计以及集成电路版图的设计。

本书包含了六个章节，分别介绍了电源管理芯片的发展状态；集成电路的设计软件；电源管理芯片的基本工作原理；电源管理芯片中各个模块的设计与仿真；电源管理芯片的设计与仿真；电源管理芯片的版图设计与验证。其内容和顺序都经过仔细的挑选和编排，以便于大学三、四年级学生的课堂学习。

本书第 1、2 章由鞠家欣撰写；第 3 ~ 6 章由廖永波撰写。肖建辉、刘辉、罗卢杨对本书的编撰工作给予了很大的帮助，在此表示感谢。

作 者

2012 年 4 月

# 目 录

---

1 绪论 .....	1
1.1 直流稳压电源的发展 .....	1
1.1.1 开关电源的发展趋势 .....	3
1.1.2 开关电源的分类 .....	3
1.2 本书研究的意义 .....	5
1.3 本章小结 .....	7
2 Workview 软件 .....	8
2.1 安装步骤 .....	8
2.2 运行软件的操作步骤 .....	12
2.2.1 创建项目 .....	12
2.2.2 加入元件库 .....	12
2.2.3 原理图编辑 .....	16
2.2.4 创建 Symbol .....	16
2.2.5 创建网表 .....	21
2.2.6 元件调用 .....	23
2.2.7 原理图绘制 .....	25
2.2.8 项目设置 .....	28
2.3 本章小结 .....	30
习题 .....	30
3 DC-DC 变换器的基本原理 .....	32
3.1 DC-DC 变换器概述 .....	32
3.2 DC-DC 变换器基本结构和工作原理 .....	33

3.2.1	DC-DC 变换器基本结构 .....	33
3.2.2	DC-DC 变换器的工作原理 .....	37
3.2.3	DC-DC 变换器开关控制的实现 .....	40
3.3	DC-DC 变换器的采样方式和调制方式 .....	41
3.3.1	数据采样方法 .....	41
3.3.2	调制技术 .....	41
3.4	本章小结 .....	45
	习题 .....	45
<b>4</b>	<b>控制电路中各子模块设计与仿真验证 .....</b>	<b>46</b>
4.1	电路的总体结构 .....	46
4.2	各个单元电路设计 .....	47
4.2.1	带隙基准电压源电路及其辅助电路 .....	48
4.2.2	过热保护电路 .....	67
4.2.3	内部振荡器电路 .....	80
4.2.4	电压比较器电路 .....	86
4.2.5	驱动保护电路 .....	95
4.3	本章小结 .....	103
	习题 .....	103
<b>5</b>	<b>整体电路仿真 .....</b>	<b>105</b>
5.1	总体电路仿真 .....	106
5.1.1	输入电压范围 2.7~5V 的仿真验证 .....	106
5.1.2	输出电压纹波小于 $\pm 40\text{mV}$ 的仿真验证 .....	106
5.1.3	转换效率最高可达 90% 的仿真验证 .....	109
5.1.4	关断模式、空载情况下输出电流的仿真验证 .....	110
5.1.5	最高开关频率 800Hz 的仿真验证 .....	111
5.2	本章小结 .....	112
	习题 .....	112
<b>6</b>	<b>工艺、版图设计和验证 .....</b>	<b>114</b>
6.1	工艺设计 .....	114

6.2 版图设计与验证 .....	118
6.2.1 版图设计方法 .....	118
6.2.2 版图设计技术 .....	119
6.3 版图设计规则检查(DRC)和版图与电路一致性检查(LVS) .....	121
6.3.1 版图设计规划检查(DRC) .....	122
6.3.2 版图与电路一致性检查(LVS) .....	122
6.4 后仿真 .....	123
6.5 DC-DC 转换器芯片版图 .....	124
6.6 本章小结 .....	125
习题 .....	125
附录 运算放大器参数的基本仿真方法示例 .....	126
参考文献 .....	139

# 1 绪 论

---

电源是一切电子设备的动力心脏，其性能的优劣直接影响到电子设备的安全性和可靠性。直流稳压电源作为电源系统的一个分支，广泛应用在通信、计算机、家用电器等领域中。稳压电源分为线性稳压电源和开关稳压电源两大类。线性稳压电源是指电压调整功能的器件始终工作在线性放大区的一种直流稳压电源，是发展最早、应用最广泛的一种稳压电源。其技术比较成熟，并且已有大量集成化的线性稳压电源模块，具有电源稳定度及负载稳定度高、输出电压纹波小、瞬间响应速度快、线路结构简单、使用可靠、没有开关干扰、隔离性能好等特点；但功耗大、效率低（其效率一般只有45%左右）、体积大、质量大，不能微小化、必须有较大容量的滤波电容，这些缺点限制了线性稳压电源的使用。现在开关电源已逐渐取代线性电源。开关电源可分为 AC - AC 电源、DC - DC 电源、AC - DC 电源、DC - AC 电源。开关电源以其效率高、体积小等优点，在通信、计算机及家用电器等领域得到广泛应用，特别是现在便携式设备市场需求巨大，DC - DC 开关电源的需求也越来越大，性能要求越来越高，因此对 DC - DC 开关电源的设计也越来越具挑战性。

## 1.1 直流稳压电源的发展

稳压电源的发展历史可追溯到几十年前。20 世纪 50 年代电子管稳压电源时期，大多采用硒整流器和电子管稳压器；60 年代晶体管稳压电源时期，相继采用了晶体管串联调整稳压器；从 60 年代以来，特别是 70 年代中期以来低性能稳压电源时期，无工频变压器的开关电源风靡于世界各个工业国家。到了 80 年代，由于微电子技术的迅速发展，大规模集成电路工艺水平飞速提高，使得开关电源控制电路的单片集成成为可能，从而大大简化了控制电路的复杂程度，降低了成本，提高了可靠性。同时，随着大功率 MOS 场效应晶体管的



出现,开关电源的开关频率也提高到 $100 \sim 700\text{kHz}$ ,进一步提高了开关电源的性能;进入90年代高性能的开关稳压电源时期,开关电源相继进入各种电子、电器设备领域,程控交换机、通信、电子检测设备电源、控制设备电源、便携式电子产品等都已广泛地使用了开关电源,更促进了开关电源技术的迅速发展。

近20多年来,集成开关电源沿着两个方向不断发展:

(1) 开关电源的核心单元(控制电路)实现集成化。1977年国外首先研制成功脉冲宽度调制(PWM)控制器集成电路。美国摩托罗拉公司(Motorola)、硅通用公司(Silicon General)、尤尼特德公司(Unitrode)等相继推出一批PWM芯片,典型产品有MC3520、SG3524、UC3842。

(2) 中、小功率开关电源实现单片集成化。这大致分两个阶段:20世纪80年代初,意-法半导体有限公司(SGS-Thomson)率先推出L4960系列单片开关式稳压器;该公司于90年代又推出了L4970A系列。其特点是将脉宽调制器、功率输出级、保护电路等集成在一个芯片。

现在,新一代电源正在向电信业发展,以适应电信业的新需求;同时,由于消费类电子产品的巨大市场和发展潜力,适合于电池供电的便携式电子产品的小功率、低功耗、高效率、小体积、轻质量的DC-DC变换器更是异军突起。在国外,美国凌特(Linear Technology Corporation)、美国国家半导体(National Semi)、美国德州仪器(TI)等公司根据市场需求,开发出了大量适合于便携式设备的电源管理芯片,例如2002年美国国家半导体公司推出了全球第一款CMOS低电压功率器件——LP3883。这款芯片主要适用于低电压、大电流的设备,如机顶盒、服务器、个人PC等。2005年凌特公司推出采用恒定频率、电流模式架构的高效率4MHz同步降压型稳压器LTC3412A。

我国的晶体管开关电源研制工作开始于20世纪60年代初,到60年代中期进入了实用阶段,70年代初开始研制无工频降压变压器开关电源。1974年研制成功了工作频率为 $10\text{kHz}$ 、输出电压为5V的无工频降压变压器开关电源。多年来,我国的许多研究所、工厂和高等院校已研制和生产出了多种型号的工作频率为 $20\text{kHz}$ 左右,输出功率在 $1000\text{W}$ 以下的无工频降压变压器开关电源,并应用于计算机、通信、电视等方面,取得了较好的效果。工作频率为 $100 \sim 200\text{kHz}$ 的高频开关电源于20世纪80年代初就已开始试制,90年代初试制成功,目前已进入了实用阶段。尽管我国在这方面投入了大量的人力和物力,做

出了巨大的努力，并取得了可喜的成就。但是，目前我国的开关电源技术与世界上先进的国家相比仍有较大的差距。

### 1.1.1 开关电源的发展趋势

高频、高可靠、低耗、低噪声、抗干扰和模块化是开关电源的发展趋势。

(1) 小型化、轻量化和高频化。开关电源的体积、质量主要由储能元件（磁性元件和电容）决定，因此，开关电源的小型化实质上就是尽可能减小储能元件的体积。在一定范围内，开关频率的提高，不仅能有效地减小电容、电感以及变压器的尺寸，而且还可抑制干扰、改善电源系统的动态性能。因此，高频化是开关电源的主要发展方向。

(2) 高效率和高可靠性。开关电源使用的外围元器件大大少于连续工作电源，因此提高了可靠性。电容、光电耦合器以及功率 MOS 等元器件的寿命决定开关电源的寿命，因此，要尽可能采用较少的元器件，提高集成度。另外，开关电源的工作效率高，会使自身发热减少并且散热容易，从而达到高功率密度、高可靠性。

(3) 低噪声和良好的动态响应。开关电源的缺点之一是噪声大。单纯追求高频化，噪声也会随之增大。采用部分谐振转换电路技术，既可以提高频率，又可以降低噪声。

(4) 低电压、大电流、高功率。低电压、大电流、高功率变换技术，使电压从 4.3V 降至 1.0V，电流已达几十至几百安培，同时，电源的输出指标，如纹波、精度、效率、启动时间、启动过冲以及动态特性等，也得到了进一步提高。它的研究内容非常广泛，包括电路拓扑结构动态问题（尤其是负载的大信号动态问题）、同步整流技术、控制技术以及其他相关技术，诸如布线、磁集成、新兴电容、封装和高压大功率器件等。从目前至今后一段时间内，开关电源都是电力电子行业的研究热点。

### 1.1.2 开关电源的分类

开关电源是利用现代电力电子技术，控制开关晶体管开通和关断的时间比率（占空比），维持稳定输出电压的一种电源。根据分类的原则不同，开关电源有很多种分类方法。

根据输入输出类型，开关电源可分为 DC - DC 变换器和 AC - DC 变换器。

一般由脉冲宽度调制 (PWM) 或脉冲频率调制 (PFM) 控制 IC 和功率半导体器件 (一般为 MOSFET) 构成, 具有功耗小、效率高 (可高达 70% ~ 95%)、体积小、质量轻、稳压范围宽、滤波效率高、不需要大容量的滤波电容等优点。

目前, DC - DC 变换器已实现模块化, 且设计技术及生产工艺在国内外均已成熟和标准化, 并得到用户的认可, 但 AC - DC 的模块化, 因其自身的特性使得在模块化的进程中, 遇到较为复杂的技术和工艺制造问题。

### 1.1.2.1 AC - DC 变换器

AC - DC 变换器是将交流电变换为直流电, 其功率流向可以是双向的, 功率由电源流向负载的称为整流, 功率由负载返回电源的称为有源逆变。AC - DC 变换器输入为 50 ~ 60Hz 的交流电, 因为必须经整流、滤波, 因此体积相对较大的滤波电容器是必不可少的, 同时因遇到安全标准 (如 UL、CCEE 等) 及 EMC 等的限制 (如 IEC、FCC、CSA), 交流输入端口必须加 EMC 滤波及使用符合安全标准的元件, 这样就限制了 AC - DC 电源体积的小型化。

AC - DC 变换器按电路的接线方式可分为半波电路、全波电路; 按电源相位数可分为单相、三相、多相; 按电路工作象限又可分为 I 象限、II 象限、III 象限、IV 象限。

### 1.1.2.2 DC - DC 变换器

DC - DC 变换器是将固定的直流电压变换成可变的直流电压, 也称为直流斩波器。它有两种工作方式: 一种是脉冲宽度调制方式 (PWM), 周期 ( $T$ ) 不变, 导通时间 ( $t_{on}$ ) 可改变; 另一种是脉冲频率调制方式 (PFM), 导通时间 ( $t_{on}$ ) 不变, 周期 ( $T$ ) 可改变。其基本原理框图如图 1.1 所示。

根据驱动方式, DC - DC 变换器可分为自励式和他励式。

根据控制方式, DC - DC 变换器可分为脉冲宽度调制式 (PWM)、脉冲频率调制式 (PFM) 以及 PWM 和 PFM 混合式。

根据电路组成, 可分为谐振型和非谐振型。

此外, DC - DC 变换器还可分为单端正激式和反激式、推挽式、半桥式、全桥式、降压式、升压式和升降压式等。

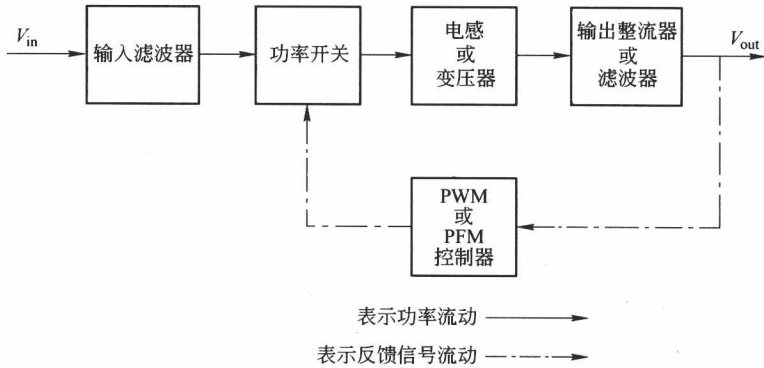


图 1.1 DC-DC 变换器的基本原理框图

## 1.2 本书研究的意义

电源管理 IC 通常分集成式和分离式，集成式又称为电源管理单元 (PMU)。对于便携设备来说，电源管理单元是非常重要的和关键的组件。例如，媒体播放器，电源管理 IC 是价格仅次于主解码芯片的半导体元件；手机、电源管理 IC 是继基频、内存后成本所占比例排名第三的半导体元件。

根据 IHS iSuppli 公司的电源管理市场研究报告指出，由于受到消费支出普遍减缓以及 2011 年 3 月日本强震导致供应链中断等影响，2011 年全球电源管理半导体市场成长速度将较预期缓慢。

2011 年电源管理半导体营收达到 331 亿美元，较 2010 年的 310 亿美元增加 6.7%——远低于 2010 年市场所展现惊人的 37.8% 成长。预计明年这一市场将微幅成长 3.9%，营收约达 344 亿美元。

根据 IHS 指出，整体而言，未来的电源管理半导体市场营收仍可望成长，年平均成长率约 7.2%。

其中，最具有市场前景的是逆变器，预计将从 2010 年的 42 亿美元营收成长到 2015 年的 75 亿美元。逆变器设备能用于使直流电转换成交流电，许多市场领域都需要这些高效率的逆变器，包括汽车、太阳能与风力涡轮机、家电与工业自动化所用的马达控制等。

在国内，经历了多年的快速增长之后，我国电源管理芯片的市场基数已经越来越大，而且随着整机制造向我国转移趋势的减缓，我国电源管理芯片市场

很难出现前几年的高速增长态势。因此, 2008年后我国电源管理芯片市场的发展速度将会逐渐减缓, 而且随着中国市场占全球市场比重的增长, 二者的变化趋势将基本保持一致。赛迪顾问预计我国市场的增长率在未来几年仍然将会高于全球市场的增长率, 但二者增长率差距将逐渐缩小。到2012年, 我国电源管理芯片市场将达到649.2亿元, 未来5年, 我国电源管理芯片市场复合增长率为16.3%。

第一, 我国半导体产业环境向好。近年来, 笔记本电脑、数码相机和其他IT产品的生产基地都大规模向中国转移, 中国已经成为世界IT产品的生产基地, 这将带动电源管理市场平稳快速发展。

第二, 新应用的发展将为未来我国电源管理芯片市场带来新的驱动力。如3G牌照的应用、推广必将成为我国网络通信类电源管理芯片市场新的增长点, 此外, 高清电视等方面的应用也将在一定程度上激发电源管理芯片市场的快速发展。

第三, 产品结构升级将带动电源管理芯片市场的发展。整机产量的增加以及产品结构的升级一直是芯片市场的两个基本推动力, 整机产量的增加带来芯片产品数量的增加, 而产品结构升级往往可带来价格的提升, 目前, 电子产品更新换代的速度越来越快, 同时, 新应用也带来新需求, 例如便携产品就要求电压更低、集成度更高的产品。未来, 产品的结构升级还将继续, 而且是驱动电源管理芯片市场的一个重要因素。

DC-DC电源管理芯片是电源管理芯片中非常重要的一员。电源管理芯片的良好市场前景也预示了DC-DC电源管理芯片的需求将进一步加大。

同时, DC-DC变换器自身的性能和功能也需要满足终端产品的要求, 如效率要进一步提高, 使能源能有效利用; 同时要有良好的动态特性, 以满足CPU、DSP、手机等的高要求。

目前, 我国电源管理芯片市场的品牌构成仍是以国外厂商为主, 其中美国德州仪器(TI)是最大的供应商, 2005年其电源管理芯片的销售额达到21.8亿美元, 市场占有率为10.4%, 美国国家半导体(NS)、飞兆半导体(Fairchild)、意法半导体(ST)和凌特(Linear)分列市场排名的第二至第五位。此外, 安森美(On Semiconductor)、美信(Maxim)、国际整流器(IR)、Inter-sil以及Power Integration也是目前市场中的重要厂商。从厂商格局可以看出, 美国厂商仍然具有明显优势。以上十大厂商2005年的市场份额合计为49.0%。所以, 发展便携式电子产品的DC-DC变换器芯片的设计及开发, 对打破外国

电源管理芯片的垄断，提升民族品牌的竞争力，具有非常重要的现实意义。

本书主要从动态特性、稳定性、电压和负载调整率及效率等方面，对开关电源作了分析，并且介绍了一款同步开关电容电荷泵 PFM 调制升压式 DC - DC 变换器的设计。该变换器采用 PFM 调制方式，适用于需要电池作电源的便携式设备及板载电源。

DC - DC 变换器的特点如下：

- (1) 输入电压范围：2.7 ~ 5V；
- (2) 输出电压：5V ± 4% V；
- (3) 输出电压纹波：小于 ± 40mV；
- (4) 转换效率：可达 90%；
- (5) 输出电流：关断模式下电路的输出电流小于 5 $\mu$ A，空载情况下最大输出电流为 30 $\mu$ A (4.3V 时)；
- (6) 开关频率：最高可达 800kHz。

为减小工艺制作的复杂性，降低芯片成本和缩小芯片面积，采用某工艺线的 0.5 $\mu$ m N 阱 P 衬底 CMOS 工艺，同时利用与 CMOS 工艺兼容的技术制作了纵向双极型 PNP 晶体管，工艺文件版本为 HL50S - S4.4S。

### 1.3 本章小结


本章是本书的绪论，首先从开关电源的发展入手，着重介绍了开关电源的重要性及当前和以后的发展趋势；然后介绍了开关电源的主要分类；最后从市场的角度分析了本书设计的合理性并简明扼要地提出了本书所设计芯片的主要技术参数和使用的工艺库。

## 2 Workview 软件

模拟电路设计是一个系统工程，从前端的系统设计、电路图设计，到后级的布版、DRC 和 LVS 以及后仿真都要有相应的 EDA 软件做支持。本书侧重于前端设计，所以着重讲解一部电路录入和网表生成软件。如果读者对后端软件比较感兴趣，可以查阅相关资料。

本书采用 Viewlogic 公司的 Workview 软件作为平台，采用的电路录入工具为 Viewlogic 公司的 Workview 2.0，故简要叙述其安装及使用流程。

### 2.1 安装步骤

在获得 Workview 软件以后，打开文件夹，找到其中的安装文件，并确认 license.dat 文件是否正确，点击程序安装图标 ，进行安装，如图 2.1 所示。

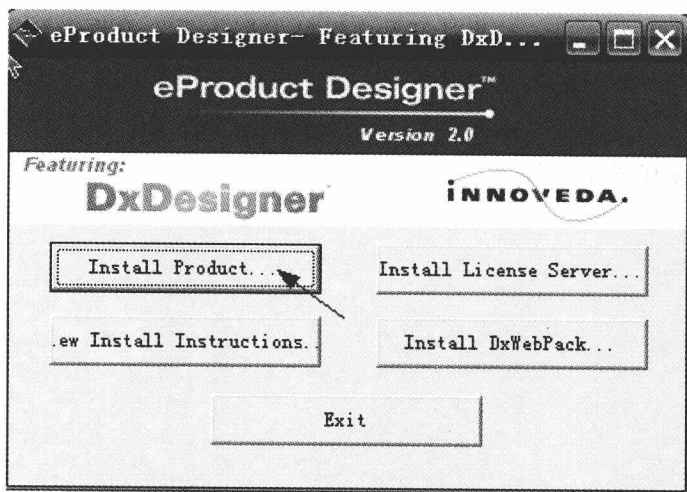


图 2.1 安装界面（一）

点击 Install Product 进入安装程序，界面显示如图 2.2 所示。

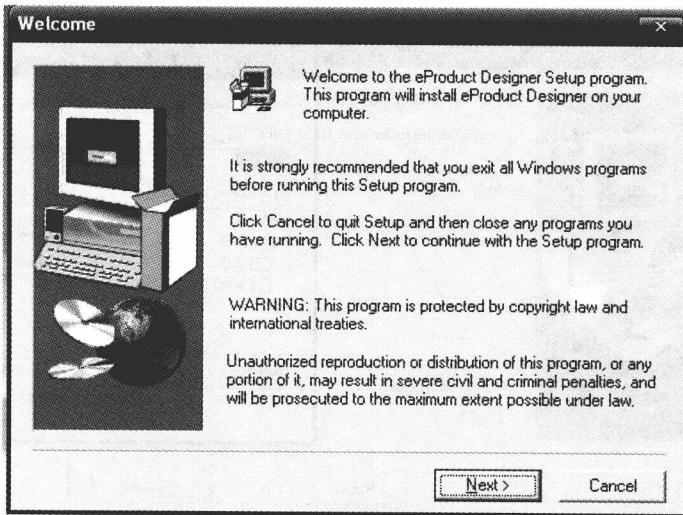


图 2.2 安装界面（二）

点击 Next 进入下一步，如图 2.3 所示。

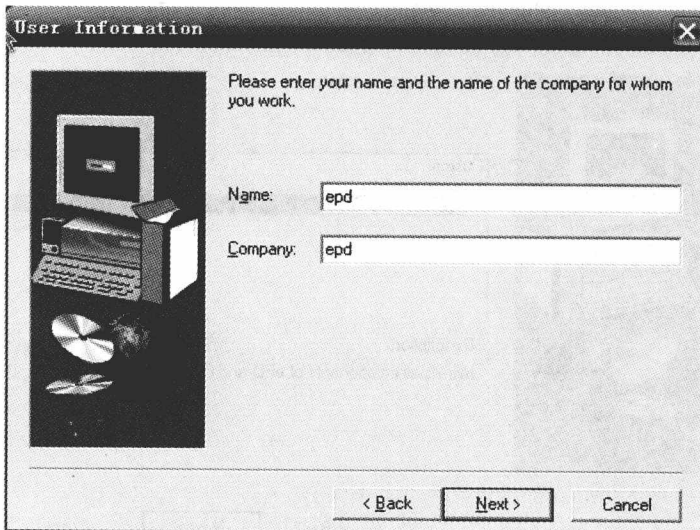


图 2.3 安装界面（三）



在 Name 和 Company 可以注明用户名和公司名，例如：Name: epd, Company: epd, 点击 Next 进入下一步，如图 2.4 所示。

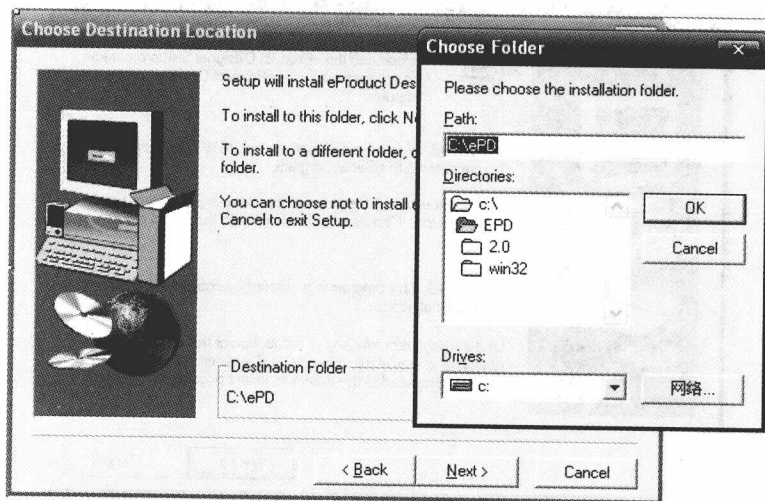


图 2.4 选择路径

选择安装程序保存路径，例如：c:\EPD，然后点击 Next，进入下一步，如图 2.5 所示。

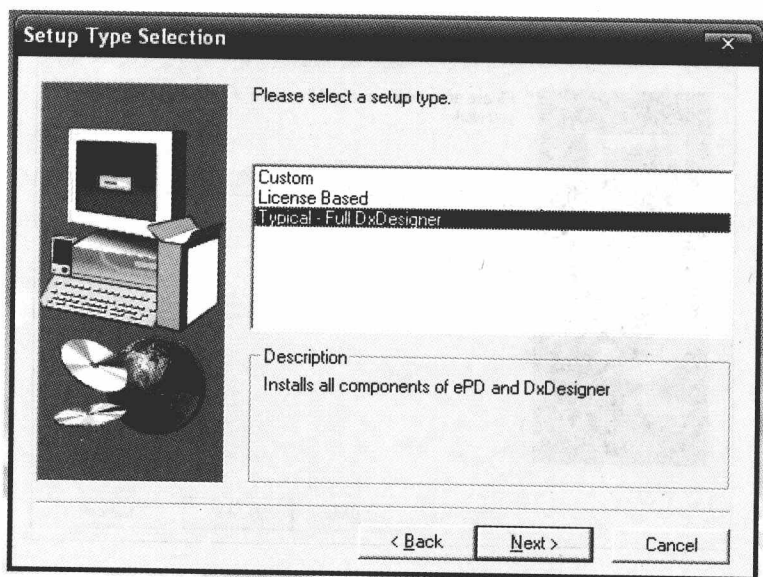


图 2.5 选择安装类型