



普通高等教育“十一五”规划教材

VLSI设计方法与项目实施

邹雪城 雷鑑铭

邹志革 刘政林

编著



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”规划教材

VLSI 设计方法与项目实施

邹雪城 雷鑑铭 邹志革 刘政林 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以系统级芯片 LCD 控制器为例,以数模混合 VLSI 电路设计流程为线索,系统地分析了 VLSI 系统设计方法,介绍了其设计平台及流行 EDA 软件。

全书包含四大部分共 18 章,体现了 VLSI 项目的设计流程。第一部分(第 1, 2 章)为绪论。第 1 章介绍了集成电路设计项目管理的基础知识;第 2 章简要介绍了 VLSI 项目的设计流程,并对 LCD 控制器项目进行了整体介绍。第二部分(第 3~10 章)为数字集成电路设计。按照数字集成电路的设计流程依次介绍了 Verilog HDL 设计、FPGA 设计与原型验证、低功耗设计、综合、可测性设计、半定制版图的设计与验证、后仿真。第三部分(第 11~15 章)为模拟集成电路设计。第 11~14 章由浅入深地介绍了运算放大器、基准源、锁相环频率合成器的设计和仿真方法;第 15 章以锁相环为例,介绍了全定制版图的设计方法。第四部分(第 16~18 章)为数模混合集成电路设计,包括数模混合信号集成电路的设计方法、仿真技术和版图设计。

本书适于作为高等院校电子信息类专业的本科生教材,也适于相关专业科研人员和研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

VLSI 设计与项目实施/邹雪城等编著. —北京:科学出版社, 2007
普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-03-019451-0

I. V… II. 邹… III. 超大规模集成电路-电路设计-高等学校-教材
IV. TN470.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 112521 号

责任编辑:马长芳 潘继敏/责任校对:钟 洋

责任印制:张克忠/封面设计:陈 敬

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

*

2007年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007年8月第一次印刷 印张:31 1/4

印数:1—4 000 字数:613 000

定价:43.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<明辉>)

序

目前,国内外尚缺乏以一个完整项目为线索,系统讲述集成电路设计方法、设计平台及相关 EDA 软件的教材。针对这一缺憾,邹雪城教授与他的团队编著的《VLSI 设计方法与项目实施》一书做了一个很好的尝试。该书以 LCD 控制器为例,以数模混合信号超大规模集成电路设计流程为线索,系统全面、深入浅出地讲述了 VLSI 的系统设计方法、数模混合超大规模集成电路设计平台及相关 EDA 软件。书中将大量的集成电路设计理论深入浅出地融入工程性的设计方法和设计技巧之中,工程性极强。

邹雪城教授长期从事超大规模集成电路设计科研和教学工作,相信该书的出版能促进微电子专业本科生及研究生的人才培养,并为从事集成电路研究与设计的工程技术人员提供有价值的参考。

中国科学院院士 沈绪榜

2007 年 3 月 5 日

前 言

集成电路是 20 世纪最伟大的发明之一。经过科技人员的辛苦努力，人们轻松地让沙子变得比黄金还要贵重。地球上处处可见的“沙子”彻底改变了我们的生活。

集成电路从发明至今的 50 年间，无论是单颗芯片上的晶体管数目，还是芯片的面积，无论是芯片的工作速度，还是芯片的功能等，都经历了巨大变化。这些变化无不体现了科技人员孜孜不倦的创新精神。

在集成电路的设计和制造领域，目前中国暂时还落后于一些发达国家。好在政府从 20 世纪 90 年代就认识到了集成电路产业在整个国民经济中极其重要的地位，并在教育和产业上给提出鼓励措施。在整个集成电路产业中，最具增值潜力和创新价值的是集成电路设计。在当前的集成电路设计教育中，高等教育关注的重心是理论基础，企业培训关注的重心是工具使用。由于关注重心的不同，学生在学习阶段少有机会接触到真实的集成电路设计项目的全流程。作者在教学中经常碰到学生在开展集成电路设计（哪怕是一个小小的课程设计题目）时提出这样的疑问：集成电路设计的标准流程是什么？如何实施集成电路设计的每一个流程？集成电路设计的流行工具是什么，如何使用？如何进行合理的项目规划和项目管理？如何从工程实际角度开展集成电路设计？

我们发现，目前还没有一本专著或者比较完整的教材能回答学生们的这些疑问。为了满足学生们的这些需求，我们决定从实际科研中的集成电路项目中，挑选一个“LCD 控制器”芯片，并以此为线索编写一本集成电路设计方面的教材，试图去回答学生的这些疑问。我们选择的 LCD 控制器芯片是一个典型的数模混合芯片，包括数字电路、模拟电路、存储器等，通过讲述 LCD 控制器芯片设计的全部流程，学生将能全面、系统地理解集成电路设计的基本流程和方法。而且，由于是基于实际项目，书中的不少示例具有可操作性。只要有合适的设计平台和 EDA 工具，学生可以按照教材的提示，一步一步地进行实际操作。

本书全面而系统地讲授了数模混合电路的设计流程和基本方法，适合于高等学校学生、集成电路设计技术人员和管理人员阅读。不同的读者群，关注的重点各不相同。下面我们尝试给出一些阅读提示。

对于所有读者，全书第一部分是必须要阅读的。这一部分将告诉读者集成电路设计的整体概念以及如何对集成电路设计项目进行有效的规划和管理。

如果读者关注数字电路设计，可以重点阅读第二部分的第 3~8、10 章。

如果读者关注模拟电路设计，可以重点阅读第三部分的第 11~14 章。

如果读者关注版图设计，可以重点阅读第 9、15 章。

如果读者关注系统级的芯片设计，那么可以阅读全书。第 14 章属于内容稍微高深一些的内容，不是太容易理解。

邹雪城教授组织了全书的编写，并亲自编写了全书的第一部分，雷鑑铭老师撰写了第二部分，邹志革老师撰写了第三部分，刘政林副教授撰写了本书第四部分。刘三清教授对全书进行了审核。另外，全书的完成离不开实验室教师、在读研究生在项目具体实施中的奉献，包括：陈晓飞老师，博士生陈毅成、刘冬生、张涛、付智辉、曾永红、陈黎明、余凯，硕士生郭旭、范文、吴志伟、刘勇、曾劲、李育超、张璟、张阿珍、程帅、高俊、张宾、陈松涛、刘中唯等，在此向他们一并致谢。

由于时间仓促，而且本书是作者第一次尝试以项目为线索的方式编写集成电路设计方面的教材，因此错误在所难免。欢迎读者登陆 http://icc.hust.edu.cn/text_book.asp，在论坛上提出建议和意见。

作 者

2006 年 7 月于武汉

本书常用符号表

$A_{V\text{closed}}$	反馈放大电路的闭环电压增益
A_v	运放的增益
A	增益
α_T	电压温度系数
BW_p	全功率带宽
C_M	密勒补偿电容
C_{OX}	单位面积的栅氧化层电容
E_g	禁带宽度
ϵ_{ox}	二氧化硅的介质常数
f_{-3dB}	-3dB 频率
f_u	单位增益频率
F_V	电压反馈系数
g_m	MOS 管跨导
I_{LOAD}	负载电流
I_{OS}	输入失调电流
K'_i	第 i 个晶体管的 μ 与 C_{OX} 的乘积
PSRR	电源抑制比
$Ripple_{Output}$	输出电压的小信号变化量
$Ripple_{Power}$	电源电压小信号变化量
R_Z	调零电阻
S_i	第 i 个晶体管的 W 和 L 的比
T_{Hold}	保持时间
T_{Setup}	建立时间
μ_N, μ_P	NMOS、PMOS 管的载流子迁移速度
V_{BG}	带隙基准电压
V_{CC}	芯片输入电源
V_{DD}	数字核心电路的电源
V_{OS}	输入失调电压
V_{OS}	运算放大器的失调电压
V_o	输出电压

V_{REF}	基准电压
V_{TH}	MOS 管的阈值电压
V_{th}	MOS 管的阈值电压，二极管、BJT 的门槛电压
V_{T}	热电压
ω_z	零点频率

注：本书中，文字部分和公式部分都采用上述形式。但是为了表述的方便，书中的网表、计算机语言、计算机生成的图等形式中采用不分脚标的形式，比如文字叙述中采用 V_{DD} ，网表等其他形式则采用 VDD。

目 录

第一部分 绪论

第 1 章 集成电路设计项目管理	1
1.1 项目管理基础	1
1.2 项目计划与跟踪	4
1.3 项目风险管理	7
1.4 项目团队	9
1.5 集成电路设计项目文档工作.....	12
1.6 项目管理的工具软件.....	13
1.7 小结.....	17
第 2 章 ASIC 设计工程	18
2.1 ASIC 项目立项	18
2.2 总体结构设计.....	20
2.3 子模块的功能定义.....	21
2.4 子模块的设计和仿真.....	26
2.5 总体仿真、综合和测试向量生成.....	27
2.6 FPGA 原型验证.....	28
2.7 版图和后端阶段.....	28
2.8 ASICSign-Off	28
2.9 ASIC 测试	28
2.10 ASIC 设计数据归档	29
2.11 小结	30

第二部分 数字集成电路设计

第 3 章 数字集成电路设计概述	31
3.1 数字集成电路设计流程.....	31
3.2 规格定义.....	34
3.3 系统构架的基本原则.....	35
3.4 小结.....	39
第 4 章 数字电路的 Verilog HDL 设计	40
4.1 Verilog HDL 基础.....	40
4.2 Verilog HDL 程序设计.....	46

4.3	Verilog HDL 编码规范	61
4.4	Verilog HDL 设计仿真	65
4.5	小结	78
第 5 章	FPGA 设计与原型验证	79
5.1	FPGA 的基本概念	79
5.2	FPGA 验证方案的设计	82
5.3	FPGA 设计验证流程	86
5.4	小结	93
第 6 章	数字集成电路的低功耗设计	94
6.1	功耗的计算与分析	95
6.2	低功耗设计策略	98
6.3	低功耗设计实例	112
6.4	小结	115
第 7 章	综合	116
7.1	综合的基本概念	116
7.2	设定综合约束	122
7.3	设计优化	134
7.4	分析、解决设计问题	140
7.5	综合中的测试问题	145
7.6	综合与布局后优化	147
7.7	综合实例	151
7.8	静态时序分析	160
7.9	物理综合	168
7.10	小结	173
第 8 章	数字集成电路的可测性设计	174
8.1	DFT 的基本概念	174
8.2	扫描设计技术	179
8.3	TetraMAX ATPG	192
8.4	存储器测试技术	201
8.5	小结	216
第 9 章	数字半定制版图的设计与验证	217
9.1	版图设计的基本理论	217
9.2	基于 Astro 的版图自动布局布线	226
9.3	基于 Calibre 的物理验证	257
9.4	版图设计与验证举例	259
9.5	小结	276

第 10 章 后仿真	277
10.1 路径延迟建模	277
10.2 时序检测	287
10.3 延迟反标注后的仿真	292
10.4 小结	298

第三部分 模拟集成电路设计

第 11 章 模拟电路设计概述	299
11.1 “数字时代”下的模拟电路	299
11.2 模拟集成电路设计流程	301
11.3 模拟集成电路的 Hspice 仿真	307
11.4 小结	337
第 12 章 基本运算放大器的设计	338
12.1 运算放大器的基本特点及电路构成	338
12.2 运算放大器的设计指标	339
12.3 运算放大器的稳定性和频率补偿	344
12.4 二级运算放大器的设计过程	348
12.5 仿真及结果	353
12.6 性能提高途径	364
12.7 小结	365
第 13 章 基准源的设计	366
13.1 基准源的设计指标	367
13.2 基准源的电路设计过程	369
13.3 基准源的仿真及验证	378
13.4 小结	386
第 14 章 锁相环频率合成器的设计	387
14.1 频率合成器的设计指标	387
14.2 频率合成器系统参数的确定	388
14.3 建模与仿真	391
14.4 锁相环频率合成器模块电路晶体管级设计与仿真	395
14.5 小结	409
第 15 章 全定制版图的设计、验证及后仿真	410
15.1 模拟集成电路版图设计概述	410
15.2 模拟集成电路版图设计规则	412
15.3 设计及验证平台的建立	417
15.4 全定制版图设计技巧	422
15.5 锁相环模块版图设计及验证实例	429

15.6	频率合成器模块的后仿真·····	438
15.7	小结·····	440
第四部分 数模混合集成电路设计		
第 16 章	混合信号集成电路设计概述 ·····	441
16.1	混合信号集成电路设计的概念·····	441
16.2	混合信号集成电路设计流程·····	442
16.3	混合信号集成电路设计的关键技术·····	444
16.4	小结·····	445
第 17 章	混合信号集成电路仿真 ·····	446
17.1	混合信号集成电路仿真的意义·····	446
17.2	混合信号验证平台介绍·····	447
17.3	Nanosim-VCS 的仿真流程·····	454
17.4	小结·····	465
第 18 章	混合信号电路的版图设计 ·····	466
18.1	混合信号电路的设计规划·····	466
18.2	混合信号电路的电源规划·····	469
18.3	设计实例·····	472
18.4	小结·····	474
参考文献 ·····		475
附录 术语表 ·····		480

第一部分 绪 论

第 1 章 集成电路设计项目管理

随着科研和工程项目的日益复杂,项目管理技术被越来越多的科研单位和企业用于项目实施过程。项目管理技术的引入,使项目实施的效率得到较大提高。由于专用集成电路(ASIC)设计的复杂性和特殊性,ASIC设计项目除了具有一般项目的特征之外,还有许多值得特别关注的地方。作为ASIC设计工程师,尤其是ASIC项目负责人,有必要在掌握ASIC设计技术的同时,学习一定的项目管理知识,并在实践中加以运用。出于这样的意图,本章将从项目管理的基本概念入手,引出集成电路(IC)设计中有效的设计途径和管理方法。

本章的主要内容包括ASIC项目文档管理、项目计划与跟踪、项目风险管理、项目团队和人员管理,最后介绍在ASIC设计中广泛使用的两个项目管理软件——CVS和Microsoft Project。

1.1 项目管理基础

1.1.1 项目与项目管理

要讨论项目管理,首先就要理解项目这个概念。项目是为了完成某一独特的产品、服务或任务所做的一次性努力。项目无论简单还是复杂,都具有一些基本特征^[1]:

(1) 项目是一次性的。这是项目与常规任务最大的区别。项目有明确的开始和结束时间,没有完全可以照搬的先例,将来也不会再有完全的重复。

(2) 项目有独特的目的。在项目启动之初,就应该定义一个独特的、明确的目标。项目是从零开始的开创性工作,并且到某个具体的终点结束。项目自身有具体的时间期限、费用和性能质量等方面的独特要求。

(3) 项目具有不确定性。因为每一个项目都是唯一的,有时我们很难确切定义项目的目标,或准确估计完成项目所需的时间和成本。项目也不像普通任务一样可以试做,一旦项目失败将具有不可挽回的损失。因此,项目要求有精心设计、精心的准备和控制,以达到预期的目标。

任何项目都会在范围、时间及成本三个方面受到约束,这就是项目管理的三约束。项目管理,就是在项目活动中运用知识、技能、工具和技术,在范围、时

间、成本三者之间寻找到一个合适的平衡点，以更有效率的方式达到组织的目标。项目是一次性的，这要求项目经理要用系统的观念来对待项目，认清项目在更大的环境中所处的位置，这样在考虑项目范围、时间及成本时，就会有更为适当的协调原则。

在我们实际完成的许多项目中，很多时候只重视项目的进度，而不重视项目的成本管理。一般只是在项目结束时，才安排财务或计划管理部门的预算人员进行项目结算。对内部开展的项目，往往不做项目的成本估算与分析，使得项目相关人员认识不到项目所造成的资源浪费。因此，对内部开展的一些项目，强调成本管理是一件非常重要的工作。

1.1.2 项目管理的主要内容

美国项目管理学会（Project Management Institute, PMI）将项目管理划分为九个知识领域，可以用图 1-1 来表示。

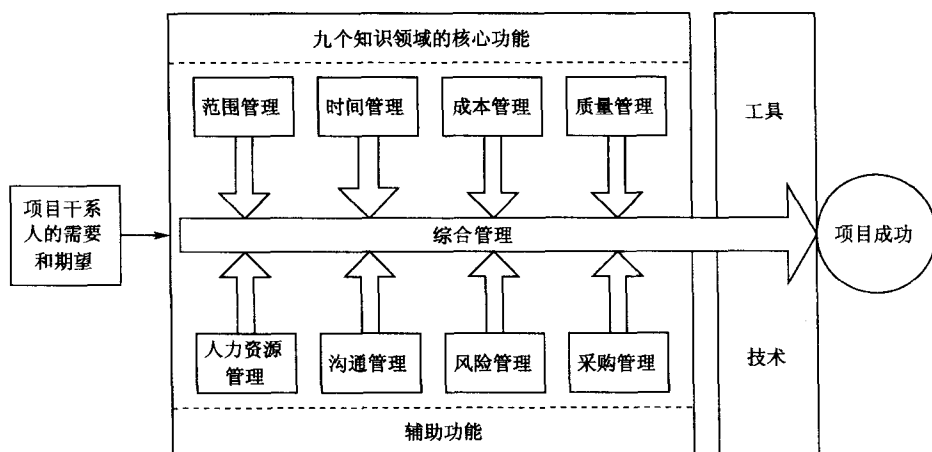


图 1-1 项目管理知识体系示意图

项目管理具体的九个方面内容分别为^[2]：

(1) 范围管理（Scope Management）。根据项目的目的，界定项目所必须完成的工作范围并对它进行管理，包括立项、项目范围的计划和定义、范围确认、范围变更控制。

(2) 时间管理（Time Management）。给出项目活动的定义、安排和时间估计，制定进度计划并实行控制。

(3) 成本管理（Cost Management）。确保项目在预算范围之内的管理过程，包括资源和成本的规划、成本预算和控制。

(4) 人力资源管理（Human Resource Management）。确保项目团队成员发挥最佳效能的管理过程，包括组织规划、人员招聘和项目团队的组建。

(5) 质量管理 (Quality Management)。确保项目满足客户需要的质量, 主要包括质量计划、质量保证和质量控制。

(6) 沟通管理 (Communication Management)。确保项目相关信息能及时、准确地得到处理, 包括沟通计划的制定、信息传递、过程实施报告和评估报告。

(7) 风险管理 (Risk Management)。确保项目能够成功实现, 需进行风险的识别、度量、响应和控制。

(8) 采购管理 (Procurement Management)。确保项目所需的外界资源得到满足, 包括采购计划、询价、资源选择、合同的管理和终结。

(9) 综合管理 (Integration Management)。确保项目各要素的协调工作, 包括项目计划的制定和执行, 项目整体变化控制。

1.1.3 项目管理的过程

项目管理包括五个过程: 启动、计划、实施、控制与收尾。这五个过程贯穿于项目的整个生命周期^[3]。

(1) 项目的启动过程。这是一个新的项目识别与开始的过程。从这种意义上讲, 项目的启动阶段显得尤其重要, 这是决定是否投资, 以及投资什么项目的关键阶段, 此时的决策失误可能造成巨大的损失。重视项目启动过程, 是保证项目成功的首要步骤。启动过程的最主要内容是进行项目的可行性研究与分析, 这项活动要以商业目标为核心, 而不是以技术为核心。

(2) 项目的计划过程。这是项目实施过程中非常重要的一个过程。通过对项目的范围、任务分解、资源分析等制定一个科学的计划, 能使项目团队的工作有序地开展。也因为有了计划, 在实施过程中, 才能有一个参照, 并通过对计划的不断修订与完善, 使后面的计划更符合实际, 更能准确地指导项目工作。在项目的不同知识领域有不同的计划, 应根据实际项目情况, 编制不同的计划。其中项目计划、范围说明书、工作分解结构、活动清单、网络图、进度计划、资源计划、成本估计、质量计划、风险计划、沟通计划、采购计划等, 是项目计划过程常见的输出, 应重点把握与运用。

(3) 项目的实施过程。一般指项目的主体内容执行过程, 但实施包括项目的前期工作, 因此不仅要在具体实施过程中注意范围变更、记录项目信息, 鼓励项目组成员努力完成项目, 还要在开头与收尾过程中, 强调实施的重点内容, 如正式验收项目范围等。在项目实施中, 重要的内容就是项目信息的沟通, 即及时提交项目进展信息, 以项目报告的方式定期汇报检查项目进度, 这样有利于项目控制, 对质量保证也提供了有效的手段。

(4) 项目的控制过程。这是保证项目朝目标方向前进的重要环节, 就是要及时发现偏差并采取纠正措施, 使项目始终朝向目标方向进展。控制可以使实际进展符合计划, 也可以修改计划使之更切合目前的现状。修改计划的前提是项目符

合期望的目标。控制的重点有如下几个方面：范围变更、质量标准、状态报告及风险应对。

(5) 项目的收尾过程。一个正式而有效的收尾过程不仅是对当前项目产生完整文档及对项目相关人的交代，更是为以后项目的开展积累宝贵的经验。在很多项目中，开发和管理人员更多重视项目的开始与过程，忽视了项目收尾工作，所以项目管理水平一直未能得到提高。

1.1.4 项目的组织

项目管理组织是指为了完成某个特定的项目任务而由不同部门、不同专业的人员所组成的一个特别工作组织，它不受既存的职能组织构造的束缚，并不能代替各种职能组织的职能活动。按照从面向功能到面向项目的程度不同，项目组织结构可以被划分为职能式、矩阵式、项目式三类。任何一种项目组织形式都有它的优点和缺点，没有一种形式是能适用于一切场合的。其比较如表 1-1 所示。所以项目管理组织在项目寿命周期内为适应不同发展阶段的不同要求而加以改变也是很自然的。因此，在实际工作中，项目应围绕工作来组织，工作改变，项目组织的范围也应跟着改变。

表 1-1 项目组织形式特征比较

组织形式项目特征	职能式	矩 阵 式			项目单列
		弱矩阵	平衡矩阵	强矩阵	
项目经理权限	很少或没有	有限	从小到中等	从中等到大	很高,甚至全权
全时在项目工作的百分比	几乎没有	0~25%	15%~60%	50%~95%	85%~100%
项目经理任务	半时	半时	全时	全时	全时
项目经理任务常用头衔	项目协调员/ 项目领导人	项目协调员/ 项目负责人	项目经理/ 项目主任	项目经理/ 计划经理	项目经理/ 计划经理
项目管理行政人员任务	半时	半时	半时	全时	全时

1.2 项目计划与跟踪

项目计划是项目管理的第一步，它可以让思想成为产品。项目跟踪就是及时发现实施中的问题，及时地修改计划，使整个项目处于控制之中。对集成电路设计项目进行计划和跟踪是项目的核心任务。

1.2.1 项目计划的制定

和大多数工作一样，一个好的结果来源于充分的计划以及项目经理的经验。

保持项目计划的随时更新，对项目进行精确的跟踪至关重要。在制定集成电路设计项目的计划时要特别注意以下几点：

(1) 对项目组所有成员而言，充分理解项目计划以及计划的原因非常重要。计划的基本内容包括项目必须完成的工作，这些工作开展的顺序以及由谁来完成这些工作任务。

(2) 在项目进行的不同阶段，其项目计划的详细程度是不同的。项目计划会随着项目的进展逐渐详细化。首先，最初的计划对项目进行可行性分析是必须的；其次，在芯片系统结构设计完成之后，可以形成更加详细的计划；最后，当模块被细分之后，要形成进一步详尽的计划。

(3) 要充分理解“功能、时间、成本”三者之间的关系，在三者中进行合适的均衡考虑。这种均衡考虑会因为产品或项目的不同而不同，比如说某种芯片是市场上急需的，可以投入更多的研发成本，并尽量减少该芯片的功能，以争取早日将该芯片推向市场。

(4) 任何项目都要制定项目计划。不要以为以前完成过类似的项目，就不制定项目计划。其实，当前的项目和以前的项目是不同的。根据项目的定义，如果两个“项目”完全相同，就不是项目了，而是任务。

(5) 如果一个公司或一个项目组是新成立的，最好从简单的项目起步。在逐步积累经验后，通过制定完整而详尽的计划，再去开展更加复杂的项目。

项目计划就是项目的设计书。计划的内容至少应该包含任务、时间和资源。集成电路设计项目计划的制定主要有五个步骤：

(1) 定义可交付的成果。在制定集成电路设计项目计划时，首先要定义项目目标，即对该项目所有可以交付成果的划分和定义。

依据公司市场部门提供的“功能需求规范”，制定出芯片的特性及功能。描述的时候可以采用“必须实现”或“期望实现”的字眼。对于那些“期望实现”的功能应该尽量删去。对芯片进行特征和功能的描述是非常重要的，否则就存在从项目的一开始就不清楚我们到底要做什么的危险。在确定芯片的最终功能时，研发部门和市场部门往往存在一些分歧，要通过协商达成一致。从上述达成一致芯片特征和功能规范中，可设计出一种合理的结构来满足所有的需求，并对主要的功能块进行定义——这就形成了最初的计划。

在本阶段，要注意划分出来的模块中哪些是需要自行设计的，哪些是采用“可复用”设计的。对于那些在今后的使用中具有可复用潜力的模块，也要事先定义，因为这类模块的设计可能会影响到系统的结构的变化。

(2) 工作任务细分。包括两个方面：模块设计工作和一般工作。

所谓模块设计工作，包括所有与模块设计、测试、综合相关的工作。在采用Top-Down设计流程的项目中，一般从顶层结构入手，每一个模块或功能模块都应划分成为尽可能小的子模块或子功能块。在这个阶段多花时间是值得的——准