

# 数字系统计算机辅助设计

〔英〕D. 卢因 著

赵兴耀 秦瑞祺 译

魏道政 沈理 校

科学出版社

1983

## 内 容 简 介

本书是介绍数字系统的计算机辅助设计,全书共分五章。第一章介绍计算机辅助设计的基本原理和有关程序设计的知识;随后各章对系统级和门级的模拟技术,系统综合方法,进行了系统的介绍和评价;最后介绍逻辑电路的测试和容错设计。各章之后都附有大量的参考文献和参考书目,这对于读者系统地学习研究是非常有益的。

本书可供从事数字系统的计算机辅助设计的工程技术人员和设计人员学习、参考,也可供高等院校有关专业的师生参考。

Douglas Lewin

COMPUTER-AIDED DESIGN OF DIGITAL SYSTEMS

Edward Arnold, 1977

## 数字系统计算机辅助设计

[英] D. 卢因 著

赵兴耀 秦瑞祺 译

魏道政 沈 理 校

责任编辑 黄岁新

科学出版社出版

北京朝阳区内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1983年2月第一版 开本: 787×1092 1/32

1983年2月第一次印刷 印张: 11 3/4

印数: 0001—7,750 字数: 258,000

统一书号: 15031·474

本社书号: 2960·15—8

定价: 1.80元

## 译 者 的 话

顾名思义，所谓数字系统计算机辅助设计，就是借助于现有的电子计算机，研制和设计新的计算机。通俗地讲，也就是用计算机设计计算机。

电子计算机发展之快是相当惊人的。特别是当大量地采用集成电路或大规模集成电路之后，电子计算机又有了一个很大的提高。但是，由于计算机的逻辑结构日趋复杂，其规模越来越庞大，这就给计算机的设计、制造、安装和调试，带来了许多的困难。常规的凭借经验和手工操作的方法，已大不相宜了。因为这样做，不仅仅要花费过多的人力、物力，而且会大大地拖长计算机的研制和制造周期。为此，当今人们非常重视计算机辅助设计的研究，希望它尽快地适用于数字系统的计算机辅助设计之中。

本书是D. 卢因主编的《计算机系统工程丛书》中的一册，是专门讨论数字系统计算机辅助设计的。本书从介绍计算机辅助设计的基本原理和有关的程序知识开始，而后对系统级和门级的模拟技术，系统综合方法，逻辑电路的测试和容错设计，进行了系统的介绍和评价。每章之后都附有大量的参考文献和参考书目，这对于读者系统地学习和研究是有益的。本书可供从事计算机辅助设计的研制人员和设计人员学习、参考，也可供高等院校有关专业的师生参考。

在翻译本书的过程中，对原书中的一些疏漏已作了勘正，较为重要的，我们附加了译者注。由于译者水平有限，译文中难免有错，恳请读者批评指正。

译 者

1981年12月

## 编 者 的 话

计算机科学的不断发展，对专业计算机工程技术人员说来，现在比以往更需要及时了解他那一领域的最新发展。此外，由于计算机技术已迅速地渗透到科学研究和工程技术的所有领域，甚至非专业人员也发现必须掌握这方面的专门知识。因此，就需要有计算机工程方面有关专题的可供阅读的最新课本，这些课本对于工程技术人员和科研人员都应该是一套有权威的教科书。

这套丛书就是为了满足这一需要的一种尝试。它主要是面向计算机技术方面的专业工程技术人员和大学毕业生，在许多情况下，也可以用作大学课程中的专题选读材料。

这套教科书包括了计算机系统设计的所有方面，重点是综合的软硬件系统工程。本丛书一般是介绍已被确认的理论和在系统设计中已经直接应用过的技术。然而，也将包含一些有希望的新的理论方法。

所有这些书籍都是以类似的基本方式叙述的，首先是回顾该课题的基本情况，继之述评这种技术的现状，其中有许多可供使用的设计实例。这套丛书的一个重要特点是，书中列举了有关的一些参考书目和参考文献，这些都选自比较重要的和基本的出版物。这样做的目的是使读者在此专业方面达到这样一种水平，他既能阅读当前的一些技术论文，又能把这些成果应用于他的研究和设计工作。总的来说，这些作者都是从他那一门专业的专家中遴选出来的，选自工业或科研单位，他们在通讯技术方面都是有经验的人员。

新书将陆续出版补充这套丛书，使本丛书成为计算机系统工程方面的一套最新的专业教科书。

D. 卢因

## 序

在数字系统工程中以数字计算机作为辅助工具，这并不是最近才有的事。实际上，从第一代计算机开始，就已经有了一些设计自动化（DA）方案。这些早期的系统，以及后来的大多数系统，主要是涉及印制板的布局和走线这样一类生产问题。而系统设计和逻辑设计，是由人们根据门级开关理论凭借经验和直观感觉来完成的。随着 LSI（大规模集成电路）逻辑组件的出现，情况迅速地发生了变化。现在的一些数字系统已经发展到这样的复杂程度，以致通常的工程设计方法已无法适用了。主要的问题完全是系统的复杂性造成的，因为目前的系统，有可能使用象运算部件，移位寄存器以及微处理器这样一些 LSI 子系统模块。为了处理和控制这种复杂性，在数字系统工程的初始说明和初始设计阶段，借助于计算机已经成为必不可少的了。此外，数字系统设计的主要问题，即确保可靠和安全操作，这或许只有利用比较形式的设计技术才能解决，而这种形式的技术只有在计算机上才能实现。因此，设计人员必须熟悉现有的一些数字系统设计的软件工具，例如，逻辑模拟程序，故障测试生成程序，硬件描述语言等；而且必须使他们为今后数字系统的充分开发必然会出现的一些新的设计技术作好准备。

本书的目的是，回顾计算机辅助设计的现状，并介绍一些至今已出现的基本原理。此外，书中所介绍的内容对于设计自动化系统的用户以及设计者来说都应该是有利的。本书

的第一章介绍计算机辅助设计的原理和有关的程序设计技术，随后各章将系统地说明和评价：系统级和门级的模拟技术，系统综合方法，最后是逻辑电路的测试和容错设计。每一章中都包含有广泛的参考文献和参考书目，它使得所叙述的内容（其中有很多的内容是从前没有以书的形式发表过）得以作进一步的研究。

本书主要是作为计算机科学和计算机工程方面研究生的专业书，同时也可以作为从事实际工作的工程师的入门书。然而，在某些情况下，也可以作为大学最后一年的选读教材。阅读本书时，读者应具有开关理论，逻辑设计，以及程序设计等方面的基础知识（以下从略）。

# 目 录

译者的话

编者的话

序

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第一章 基本原理 .....            | 1  |
| 1.1 引言 .....              | 1  |
| 1.2 设计自动化系统 .....         | 3  |
| 1.3 复杂性的问题 .....          | 6  |
| 1.4 开关理论及其对 CAD 的应用 ..... | 12 |
| 1.5 CAD 系统的程序设计 .....     | 14 |
| 1.6 交互式系统 .....           | 22 |
| 1.7 概要 .....              | 25 |
| 第二章 系统说明 .....            | 26 |
| 2.1 引言 .....              | 26 |
| 2.2 有向图 .....             | 31 |
| 2.3 转换图 .....             | 34 |
| 2.4 正则表达式 .....           | 36 |
| 2.5 PETRI 网 .....         | 42 |
| 2.6 LOGOS 系统 .....        | 49 |
| 2.7 PMS和 ISP描述系统 .....    | 55 |
| 2.8 寄存器传输语言 .....         | 63 |
| 2.9 结论 .....              | 94 |
| 第三章 模拟技术 .....            | 98 |
| 3.1 引言 .....              | 98 |

|      |               |     |
|------|---------------|-----|
| 3.2  | 逻辑级模拟         | 101 |
| 3.3  | 模拟技术          | 117 |
| 3.4  | 系统级模拟         | 134 |
| 3.5  | 结束语           | 141 |
| 第四章  | 逻辑网络综合        | 144 |
| 4.1  | 引言            | 144 |
| 4.2  | 组合逻辑的综合       | 147 |
| 4.3  | 时序电路的综合       | 204 |
| 第五章  | 逻辑电路测试        | 277 |
| 5.1  | 引言            | 277 |
| 5.2  | 组合电路的故障诊断技术   | 284 |
| 5.3  | 时序电路测试        | 301 |
| 5.4  | 可测和自诊断逻辑电路的设计 | 314 |
| 姓名索引 |               | 346 |
| 内容索引 |               | 348 |
| 参考文献 |               | 353 |



# 第一章 基本原理

## 1.1 引言

计算机辅助设计 (CAD) 研究的是数字计算机以及与其有关的技术对工程系统设计的应用。利用数字计算机辅助工程设计并不是一件新的事情；实际上，设计方程的数值求解就是计算机最早的应用之一。因此，术语 CAD 最初是用来描述计算机对于设计计算方面的应用。现在 CAD 有了更特殊的含义，它涉及到交互式系统。在此系统中，设计人员和计算机要密切配合进行工作。值得注意的是，这种系统并不试图把设计人员变成是多余的，而事实上在相互关系方面，设计人员倒应该是一个“高级的”合作者，他要进行全面的控制，并提出创造性的好方法。使用 CAD 系统，设计人员有可能研究一些新思想和新技术，计算机可通过图象显示或打印的形式把设计结果迅速地通知设计人员。用这种方法，有经验的设计人员可以很快地对有关的一些问题获得基本的了解，同时得到对于不同设计方法的有价值的经验。同提供分析和综合过程一样，使用 CAD 还能为工程人员编制设计资料，产生一些检查手段。

由于数字系统工程具有特殊的逻辑问题，例如产生布线细目表，机柜和印制电路板的布局等。因此计算机工业已是 CAD 方法的首要用户之一。MOS 和 LSI 组件制造也很快地感到 CAD 的优点，特别是晶片布局和工艺设计。随后 CAD

系统也变得更复杂了，它包含门级模拟、逻辑综合、测试设备、自动掩膜产生以及开始应用于组件布局，逻辑划分和走线。这样，现在可以利用完全的设计自动化系统，在试制和生产的全过程中，它能为设计人员提供自动的资料编制，布线和维护细目表等。为了提供完整的 CAD 系统，在许多情况下，是用一个公共的数据库来存放有关的信息，包括设计和生产数据，组件库，管理信息等。

计算机工业发现它特别需要采用和发展 CAD 技术，这是为什么呢？目前，一些计算机系统，既包含软的处理也包含硬的处理，它代表了当今社会上最复杂的先进技术之一。因此，为了达到所要求的可靠性和性能，使用 CAD 方法已成为根本的问题。但是 CAD 主要是用于工程化生产阶段，一些初始体系和逻辑设计过程仍然是用传统的方法完成。例如，大多数的 CAD 系统需要适当数字化的逻辑图作为初始输入。实际的设计程序（如逻辑综合程序包）还没有普遍使用。现在通常公认的唯一软件设计工具是逻辑模拟程序，这种程序能使工程人员用基本门级（或寄存器传输级）来模拟（和评价）它的电路。

遗憾的是，现有的技术同当前不断增长的数字系统的要求还不相适应。计算机系统的生产正慢慢地，但不可避免地达到这样一个阶段，在此阶段里，试图设计的系统的纯属物理和智能的复杂性正阻碍着进一步的发展。为了描述这种情况，早在 1969 年 Glazer<sup>(1)</sup>就提出过用语“复杂性障碍”。不幸的是，这种情况现在更加明显了。根据当前的工业情况，这种状况显然将继续存在。例如计算机系统常常延迟交货，并且在好多情况下，尽管完成了机器的最后安装，但仍然含有逻辑故障（同样道理，在 MOS，LSI 电路设计中，CAD

也只是做了应该做的工作中的很少部分。这主要是由于实现技术不经济,和过份依赖于容易出错的手工操作造成的)。

这本书的目的是对数字工程人员介绍计算机设计技术,这些技术对于大型数字系统的研制正迅速地成为必要的手段,同时还将概述一些有关的特殊问题。这样做是希望促进这一领域的发展,从而出现一些设计未来复杂系统所必须的软件工具。

我们将从描述典型的设计自动化系统开始,然后,在考虑到研制这样的系统要涉及到的某些基本困难的情况下,继之更详细地研究一些具体的技术,例如模拟、综合、测试等。但是我们将不过多地考虑针对生产的一些方法,例如组件布局和相互连接,因为我们认为主要的问题是在设计的初始阶段。

## 1.2 设计自动化系统<sup>[2, 3]</sup>

设计自动化(DA)主要关心的是在设计复杂的数字系统时,降低所需的成本和缩短研制的时间。一般地说,设计自动化限于如下的设计方面,它包括把系统的初始说明翻译成可行的逻辑设计,最后完成组装和制作详细的图表。虽然一个完全的DA系统包含有许多不同的功能,这些功能可以从图1.1中看到,但它们都有一个共同的目的,要消除重复的手工劳动和计算步骤。

使用设计自动化系统有许多优点:

(a) 允许采用形式的设计算法,它不需要冗长的手工计算,在许多情况下,不要求有熟练的理论知识。

(b) (假定初始说明已正确叙述)能快速、无误地设计

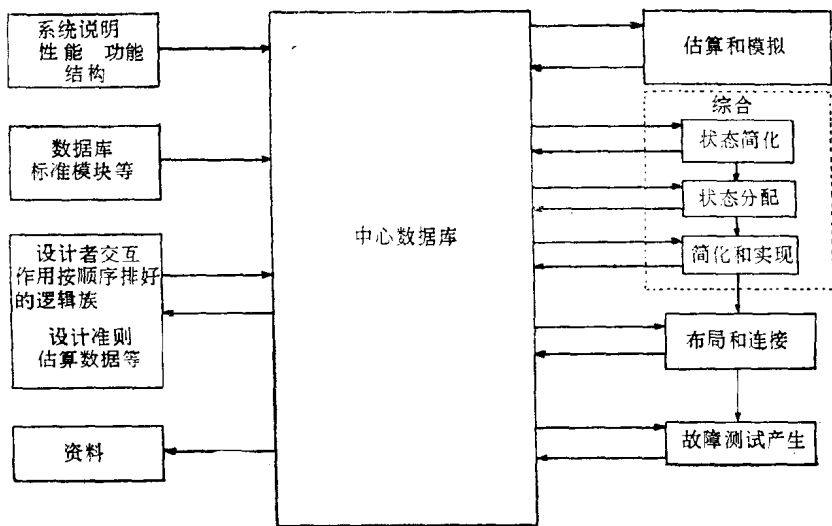


图 1.1 设计自动化系统

含有大量变量的系统。

(c) 通过重新叙述问题或者改变执行的参数,如极小化准则,逻辑模块,板的尺寸,布局等,设计自动化系统可以评价不同的一些设计。

(d) 公共数据库,存贮库和所导出的设计信息的建立,能为设计过程的各个阶段提供详细的文件。

(e) 走线细目表,电缆表,机柜和板子的布局以及其它一些制造数据能自动地准备好,或者也可以从数据库中取出并根据需要作修改。

(f) 容易实现设计数据的修改和编辑,而且没有出错的危险。

(g) 在着手最后实现之前,可用模拟程序包对逻辑设计作鉴定,以及校正错误。

(h) 能自动产生故障测试的细目表, 或者利用一些模拟技术手工产生故障测试的细目表。

在图 1.1 中展示了一个一般的设计自动化系统的方案, 这个方案是以公用数据库为中心的 (具有代表性的是以磁盘为基础的信息检索系统), 公用数据库直接同 CAD 系统的每个功能程序包联络, 也可以在一些选取的各个设计程序包之间进行联络。在操作中, 设计程序包的有关输入数据可以访问数据库得到, 也可以从其它程序包直接得到, 输出结果总是放回到数据库中。

DA 系统的外部输入, 原则上由设计人员产生, 他们先要编辑由子系统模块目录, 扇入扇出限制条件, 成本以及其它任何有关的设计参数组成的标准库。设计人员的另外一些输入来自交互式的实时终端, 理想的应包括系统的初始描述 (既有概念级又有功能级), 文件的请求, 库的更新、修改和改善, 设计准则的挑选等。要在 CAD 操作系统的命令控制下执行所有这些输入操作, 这种操作系统还要全面地控制整个 DA 系统的运行。例如, 对 CAD 程序包进行排序和挑选, 输入输出转换等。计算机辅助设计程序包可用于大多数数字设计, 从逻辑综合和分析到实现、布局和连接, 以至故障测试的产生。在所有阶段都可得到文件资料, 这些资料可以为设计人员或生产和维护人员提供信息。

现有的设计自动化系统主要是批处理的, 而不是交互式的系统。然而设计人员可根据他先前试算的结果用改变 DA 程序中的参数或者输入新的数据的方式等等, 来获得他所关心的数据。这种工作方式的缺点是, 研制一个设计需要较多的时间。这种时间实际上取决于计算机的解题周期, 也就是说, 为产生结果所需的操作和组织的全部时间。在某些情况

下，已经发现需要把整个计算机都用于 CAD 的工作，这对于许多比较小的公司来说当然是不可能的。

以电传打字机和图象终端为基础的交互式系统无疑比批处理系统更优越。而且，它可以直接访问 CAD 程序，这对于好多设计功能来说是必不可少的。例如，逻辑设计和模拟，LSI 电路的设计，元件设计等等。

在 DA 系统中包含综合程序包（连同适当的系统说明和评价方法）会大大提高系统的有效性，当同交互技术配合时更是如此。例如，这样的系统将允许设计人员对系统方案作详细的说明和评价。然后，直接利用硬件或软件模块着手实现。这样就产生了一可行的工程设计。这种“前端（处理）”系统的主要优点是减少了产生可靠设计所需的成本和时间，而且便于进行系统评价和优化。此外，随着设计人员熟悉了人机交互之后，他的创造能力会得到不断的增长。遗憾的是，这种类型的系统至今还没有完全研制出来<sup>[4,5]</sup>。

设计自动化方面的第一篇论文早在 1956 年就已经发表<sup>[6]</sup>，但在 DA 方面缺乏进展的一个理由是，制造者趋向于研制针对他们自己的机器和工程需要的特有的 DA 系统。此外，由于利用 DA 技术有非常多的技术和经济利益（并且在人力和计算方面要作相当多的投资），因此制造者不愿把他们的系统提供自由使用，这也是可以理解的。

### 1.3 复杂性的问题

在这里，为了估价设计数字系统和研制 CAD 软件工具有关的困难，必须更明确地定义复杂性的含义。一个复杂的逻辑系统可以认为是由好多功能子系统组成的，子系统之间

以特殊的方式相互作用才能够确定通过整个系统的信息流。在这种系统中，给出了各部分间的转换功能和它们相互作用的法则，要推导出整个系统的特性是一个复杂而困难的过程。从这个意义上说，整体要比各部分之和来得大。此外，为了描述和设计复杂的数字系统，似乎必须把整个系统分解成适当的一些功能子系统。在许多情况下，这些子系统符合层次的结构。

现在，一数字工程主要还是凭直观完成。当设计一个系统时，通常是利用 MSI 和 LSI 逻辑子系统，由低级向高级设计。虽然用这种方法可进行系统的划分，但未必能得到真正的层次结构。这就要求按子系统部件间所指定的关系来完成划分。这只有由顶向下的设计才可能做到，由顶向下的方法即由功能说明到实际的操作部件。注意，有许多不同的准则可以用来划分系统，例如逻辑操作，制造容易程度（板子的尺寸，插针的数目等），诊断测试，现有子系统的使用，软硬件的实现等等。理想的应该以许多不同的方法把该系统进行划分，以图对某些系统设计参数作全局的优化。例如，在研究和制造成本之间，以及可靠性和可维护性之间进行的调整。遗憾的是，由于现在缺乏适当的设计手段，因此在初始设计阶段常常必须给出正确划分的一个估测。一旦设计已经开始，要想再重新配置系统，往往要花费过多的时间和付出昂贵的代价。这种“做做停停”的工作方法在某种限度内同样也应用于子系统设计的低级阶段。

于是，除了难于获得的经验外，我们要在没有任何基本的设计基础的情况下研制复杂的系统，为了对付有关的复杂性，就必须把该系统分成子系统。但是，划分应以逻辑的方式来做，为的是获得一个可供工程设计用的层次结构。但至

今还没有哪种技术和方法能够为数字工程人员提供为完成这一工作所必需的工具。

系统模拟，自动设计，测试产生等 CAD 技术的使用，可能会改善这种情况。但直到表示系统和评价系统的合适方法被研制出来之前（在这一领域中，十分缺乏数学的形式化体系），将不会得到真正的改善。这一领域中目前的技术状态以及未来发展趋势的一些迹象，将在第二章中作评论，在那里要谈到系统说明。

另一方面，为了解决实际的（即具有大量变量的）问题，与逻辑系统自动设计有关的基本困难是需要巨大的计算量和存贮量。在人工智能方面也会遇到这些困难。例如，编制一个基于 Quine-McCluskey 算法<sup>[7]</sup>的布尔优化程序这是比较简单的，然而随着开关变量数目的增加，计算时间将会很快增长，到后来这种处理将无法进行了。能够容许的实际计算时间是随应用而变化的。在一次完成的批处理中，它只是一个经济问题，而在交互设计系统中，计算时间对系统功能可能会引起实际上的限制。

这种计算时间的快速膨胀，即所谓“组合爆炸”，在信息处理的所有领域中都是个限制因素。它不能使用形式算法来导出问题的最优精确解。基于这些方法的计算机算法，在学术的论文范围内是完全可以的，而在包含许多自由度的实际环境中，现有的计算设备还不能勉强得到一个解。

为了充分地了解这个基本限制因素，必须更明确地定义算法这个术语<sup>[8]</sup>，算法通常定义为有限的一组规则，它给出解决一类特殊问题的操作序列。一般说来，上面所归纳出来的这些困难是由于算法的有限性所引起的。无疑，一个算法总是在有限步后结束，但所含的步数是一个关键参数，它决



定着该算法在计算机上使用的效率。许多问题从算法上讲是可以解决的，但算出结果所需的时间可能是那样的长，以致那个问题在实际上还是不能解决。因此，一个实际(可计算)的算法，必须具有合理的能在现实的时间内执行完的有限步数(这种时间与应用的对象和所包含的变量个数有关)。

在许多非数值的数据处理领域内，特别是关于工程设计方面，不可能(或不希望)产生唯一的一个精确结果(在大多数情况下，唯一的结果是不存在的)。工程设计过程可以看作是一种选择的“尝试”过程，它要对所给的参数和限制条件进行优化。实际上，一般需要的是一种折衷解。通常理论上的最优是不可能得到的(或者是不经济的)。因此，根据工程上的可行性，符合要求的解就已满足了。术语“满意(Satisficing)”是由 Simon<sup>[9]</sup>首先提出的，用它来描述问题求解的过程，在这里为了得到满意解，牺牲了一些理想的性质。

这个问题对任何信息处理工作来说都是基本的，例如模式识别。为了达到最优的结果，必须利用该系统的所有基本的和派生的数据，在大多数实际情况中这是不可能的。希望得到满意的结果，问题在于重要的和代表特性的系统参数的选择。逻辑电路的设计从某些方面看是一个比较容易的问题。因为，假如要满足原始的开关要求的话，功能正确但不是最优的电路那总是能够得到的。

鉴于人工设计技术(和一般的问题求解)是搜寻满意解而不是精确解的这一特点，已经发展了在计算机上模仿这种处理的方法，即所谓试探程序设计。试探法通常是一组准则，按照这组准则可以得到一个解，但不能保证一定能得到解。在实践中，试探法(从求解的观点看)是算法的一种近似形式，