

无线电电子设备印制板的 设计和生产的自动化

[苏]Б.И.巴赫金 著
何元庚 章宏淦 译
卢 玉 明 校

国防工业出版社

无线电电子设备印制板的 设计和生产的自动化

〔苏〕Б.И.巴赫金 著

何元庚 章宏涤 译

卢玉明 校

國防工業出版社

内 容 简 介

本书主要介绍印制板设计自动化的方法, 印制电路自动化设计的基本算题和最优化指标的相互关系, 解算组件配置和印制连线布线算题的形式命题和算法原理, 关于最优化指标、印制板结构和算法效果的研究, 印制板自动化设计和生产的技术组织, 印制板自动化设计和效率等。

本书可供研制和使用印制板自动化设计、电子设备设计自动化工作的科技人员、大专院校师生参考。

АВТОМАТИЗАЦИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Б. И. Бахтин

«Энергия» 1979

*

无线电电子设备印制板的设计和生产的自动化

〔苏〕Б. И. 巴赫金 著

何元庚 章宏涤 译

卢玉明 校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 4 82千字

1984年5月第一版 1984年5月第一次印刷 印数: 0,001—4,750册

统一书号: 15034·2678 定价: 0.43元

序

现代电子设备的复杂程度和可靠性要求越来越高，使用范围更为广泛，而且老产品不断被更新。为了适应这种发展趋势，以便现代化、优质化地发展电子设备，要求从科学研究、设计研制直至工业生产的整个过程采用全新的方法。这种方法以采用电子数字计算机为基础，使现代电子设备的设计和生产的各个阶段实现自动化。也就是说，需要将配有能反映产品设计过程和生产要求的、复杂的、综合程序的以及高生产效能的电子数字计算机，与程序控制的设计、加工自动机组成各种专用的自动化设计系统（САП）。

在苏联的第十个五年计划期间，自动化设计系统在电子设备制造、机器制造、船舶制造、飞机制造，以及国民经济的其他部门获得广泛的应用，并取得显著成绩。实践证明，自动化设计系统是进行工程分析、确定设计方案、编制工艺文件、保证生产的高度准确性和灵活性卓有成效的手段，而且在许多情况下是不可取代的手段。

电子设备的自动化设计系统，尤其是用以实现电子数字计算机本身以及其他数字计算装置设计自动化的自动化设计系统，在苏联及国外都达到了很高的发展水平。苏制的自动化设计系统，能够完成数字装置的结构设计和逻辑的最优化，单元的布局 and 配置，主体连线和印制连线的布线等现代电子数字计算机的逻辑设计和技术设计课题。作为大型电子设备

基础元件的混合型固体集成电路，其研制工作的所有阶段，更离不开自动化设计系统。目的在于使电路技术参数最优化，并对其在各种不平衡因素影响下的功能可靠性范围作出评价的无线电技术电路模型，在生产条件中正在日益得到推广。总而言之，借助自动化设计系统，可以解决有关在电子技术产品设计和生产中有关的各式各样的课题。

本书专门介绍印制线路板的自动化设计方法和设备。印制线路板的自动化设计，是电子设备借助自动化设计系统进行技术研制的迫切课题之一。因为从携带式日常用具到复杂的计算系统，和工程项目的综合控制装置等各种类型的电子设备都采用印制板，工业需求的印制板品种自然是相当多的，可是印制板设计的工作量很大，因此，必须将印制电路的设计和生产的自动化，作为发展新型电子产品生产的一个独立的和重要的方面。

《Автограф》自动化设计系统，是苏联最早用于设计印制板的自动化设计系统之一，它是在苏联国家奖金获得者Г. В. 奥尔洛夫斯基的领导下研制成功的，并且已在工业中获得广泛的应用。本书内容即系《Автограф》自动化设计系统的数学和技术保证的结构组成，以及对类似用途的自动化设计系统的发展趋势所作的某些归纳。书中有关方法、最优化指标和算法的研试成果，也是借助《Автограф》取得的。为了获得这种研试成果，对《Автограф》的数学保证能力，曾作了某些改变和扩充。书中援引的设计自动化和加工自动机的类型和技术经济参数，主要摘自苏联国内工业中广泛应用的技术资料。虽然本书为篇幅所限，不可能详尽探讨印制电路自动化设计的所有问题，但是，书中材料仍然系

统、综合地反映了印制部件自动化设计系统的现代水平，反映了这些自动化设计系统的数学和技术保证的基本问题及其解决的可能途径。

书中某些段落是为读者阅读方便起见而撰写的，内容有集论和图论的基本概念、数理统计的主要术语和一般原理。

作 者

目 录

第一章 印制线路板设计自动化的方法	1
1. 印制线路板概述	1
2. 印制电路自动化设计的基本算题和最优化 指标的相互关系	4
3. 解算组件配置和印制连线布线算题的 形式命题和算法原理	14
第二章 关于最优化指标、印制板结构和 算法效果的研究	45
4. 由自动化设计系统《Автораф》设计的印制板的 结构和工艺特点	45
5. 自动化设计时印制板的结构特点和工艺 特点的影响和计算	50
6. 算法和指标统计效果的研究方法	59
7. 方法、结构-工艺要求和最优指标的总结	72
第三章 印制板自动化设计和生产的技术组织	84
8. 工业用自动化设计系统的组织及其技术装备	84
9. 用程序控制坐标制图机制作样板底片的自动化	101
10. 自动化设计系统中传真装置的应用及其和电子数字 计算机的连结	107
11. 印制板生产自动化的设备	114
12. 印制板自动化设计的效率	118
参考文献	121

第一章 印制线路板设计自动化的方法

1. 印制线路板概述

印制线路板(印制板)是一块绝缘基板,上面覆以单面或多层彼此绝缘的箔片导线,每一条箔片导线至少有两个可供外接元件用的接点。

现代电子设备中用得最多的印制板〔3〕上的箔片导线,其作用相当于普通的(立体的)导线,叫做印制(平面的)导线。印制板和在板的一面或两面上安装的组件[●],组成印制部件。目前由多引线(多接点)组件装成的印制部件,其品种有增加的趋势。多引线的组件就是装在平面型壳体(有101CT14-1和301ПЛ14-1型[●])中的集成电路块(ИМС)。101CT14-1型壳体的外形尺寸为9.8×6.5×2毫米,沿它的两个长边各分布7个薄片引线(1.0×0.43毫米)。间距1.25毫米。301ПЛ14-1型壳体的外形尺寸为18.6×6.5×3.8毫米,沿它的两个长边各分布7个引线柱(0.5×0.25毫米),间距2.5毫米。集成电路块壳体的标准化,使集成电路块印制部件的组件密度指标也可以表示清楚,其表示形式是:一块双面布线的等价印制板上,集成电路块的单位安装面积。

- 本书将任何电子元件,如电阻、电容、平面的或立体的模件、集成电路块等都叫做组件。
- 101CT14-1和301ПЛ14-1型壳体的新标号分别为401.14-3(4)和201.14-1。

$$S_{yn}^0 = (S_n/n)z \approx \Delta x \Delta y z \quad (1)$$

式中 S_{yn}^0 ——集成电路块的单位安装面积 (厘米²/集成电路块);

S_n ——一层的安装面积 (毫米²);

n ——集成电路块的数量;

Δx 和 Δy ——集成电路块沿 X 和 Y 轴的安装距离 (毫米);

z ——布线层数目的等价系数 (两层, $z = 1$; 四层, $z = 2$; 余类推)。

刚性印制板的生产已经历了很长的发展过程, 目前已有很多制造方法, 工艺基础也十分完备。印制板的工艺决定于: 一, 导电箔片覆盖到绝缘基板的方法; 二, 印制导线图形移置到导电箔片的方法。印制电路专利和专利文件介绍过许多印制板的制造方法, 但是工业中只采用部门标准推荐的、经过充分研究的方法。其中以各种箔片照相法〔3〕最好。例如正片法, 它可以保证窄小的印制导线 (0.15~0.2毫米) 达到高精度, 而且工艺可靠, 因此在集成印制部件的成批生产中广泛采用。负片法的精度和正片法相近, 但生产率高。不过用负片法时印制导线的容许宽度较大, 所以只有层的安装密度低的印制板才能采用。在大量生产中应用箔栅法〔3〕, 它生产率高, 并能满足晶体管 and 晶体管-电子管设备对印制导线的精度和容许宽度的要求。

印制板按印制层的数目, 可分为单面印制板 (单面板)、双面印制板 (双面板) 和多层印制板 (多层板)。

单面板的工艺性最好, 可是转接能力最低。单面板只用于电子管和晶体管的电子设备, 因为这些设备常采用引线数目不多的立体组件。

双面板可以和立体组件或集成电路块组成印制部件。当印制板面积的利用系数不小于0.75时,双面板的转接能力能满足任何晶体管电路的印制布线。用图形法设计一块有45~55块集成电路块的中等复杂程度电路的双面板,可以保证 $S_{ya}^0 = 3.5 \sim 4.2$ 毫米²/集成电路块,其工作量为24~30人-日。如果在集成组件数字电路印制布线的设计过程中,对初始电路作如下的等价变换:将“门”按照集成电路块壳体重新配置,加进辅助的“门”以及将集成电路块的等价接点也重新配置;则可得到 $S_{ya}^0 = 2.2 \sim 2.5$ 毫米²/集成电路块。但这时一块印制板的设计工作量将增加到35~40人-日。所以“手工”设计时,一般不用电路的等价变换方法。

使用多层板可以提高线路板上集成电路块的安装密度。多层板是多层结构,是将布有印制导线的几层板压制而成,层间填有绝缘材料。内层的印制导线可以有层间连线,也可以没有;内层以引出线与外层连接,也可以没有引出线连接,但它装组件的一面有装配用的插口。按上述特征工业用多层板可分为两类,有层间转接的多层板(类型Ⅰ),和无层间转接但在安装组件的一面,有外露的插口通至内层的印制导线的多层板(类型Ⅱ)。

类型Ⅰ多层板的制造方法,有成对压制法(4层),通孔金属化法(8~12层),层增生法(4~5层)。类型Ⅱ多层板的制造方法,有外露插口法(6~8层),外露引线法(信号板达15层,换向板达25层)。关于双面板和多层板共同的和各别的结构要求以及它们的制造工艺,参考文献〔3〕中有十分全面的阐述。

当各层的连线形状没有双面板复杂时,可以将多层板上

的集成电路块安装得非常密集，并可以利用附加的屏蔽层来降低各层间信号导线的电磁干扰。但是，多层板的工艺可靠性不如双面板。要想提高多层板的工艺可靠性，必然会遇到制作高质量、尺寸要求严格的底图和底片的复杂工艺问题，它们决定着层与层相互配合的精度。图形法极难完成这些要求，而且要花费大量的时间。自动化设计不但省去制作底图这道工序，而且由于用程序控制的工艺设备制作分层底片，从而保证底片具有稳定的高的质量。

2. 印制电路自动化设计的基本算题和最优化指标的相互关系

用电子数字计算机设计印制板，需要建立数学模型。数学模型是一些独立的算题型式，这些算题按一定的顺序，在逻辑上、系统上组成相连系的设计结构。数学模型中的每一算题均用算法描写。算法，就是电子数字计算机按照规定的顺序，所完成的解析运算、逻辑运算和单值判定运算等的总和。算法用电子数字计算机所采用的指令和数字语言编成程序，组成自动化设计系统的数学保证程序组。

算题是随着印制板的自动化设计而出现的，并且有独立的算法含义。算题可以按照用途、解算方法、保证最终质量指标的显著性等来分类。本书不进行这样的分类，只按自动化设计时所解算的算题性质，分成基本算题和辅助算题两大类。

解算基本算题的算法有很严密的数学逻辑关系，并且对印制板的最终质量指标有决定性作用。这类算题有组件在印制板安装面积中的配置；线路（全套连线）的布设；给全套

连线编上外接头接点的号码，印制连线的布线和它的逐层分配。

辅助算题的式样多，数量也多，因为它有各种不同的设计功能。如执行各种输入控制、中间控制和输出控制，将补充信息输入机内的标准信息库，为设计自动机和加工自动机准备和制作机动信息载体等。在现代工业自动化设计系统的数学保证中，要完成这一类算题至少需要 50 个专用程序。编制和研究大部分辅助算题的算法时，都要涉及信息的最优变换和表示法这种重大的技术问题。因此，切不可把“辅助算题”这个术语的意思理解成次要的问题。此外，有了辅助算题，自动化设计系统的数学保证才得以综合成套，而成套的数学保证，是自动化设计系统在工业生产中使用和能够赢利的必要条件。

为了使工业自动化设计系统的数学保证和技术保证向一定目标进展，需要有适当的判据，以便客观地对各种算法、结构方法、基本算题中的最优化指标进行选择，直至对自动化设计系统的技术经济水平从整体上作出评价。判据可以是绝对值，也可以是相对值，在对大系统进行技术经济分析中，绝对判据的意思是，一种有目标的、工作的最终结果(效益) P ，同达到相应的质量所付出的费用的比值，效益 P 用单位质量指标 $\Pi_{x/i}$ (第 i 单位) 或综合质量指标 (综合几个 $\Pi_{x/i}$) 表示。这样定义绝对判据，是考虑了技术产品的研制和生产特点，因而能表示生产的技术经济效益。如果对已经建立的工业产品的设计和生产过程进行一些改变，则改变的效益和合理性可用相对判据来评价。相对判据是两个实质上可比较的绝对判据之比，即改变后和改变前的绝对数据之比，它表

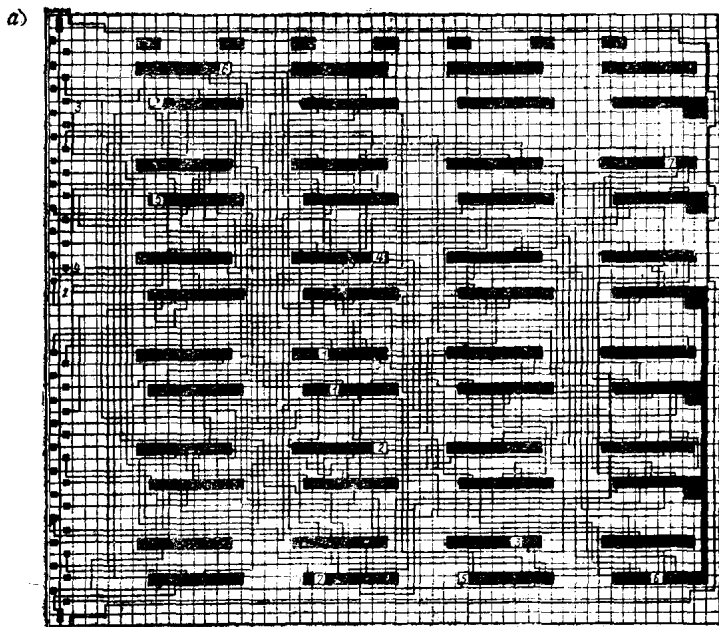
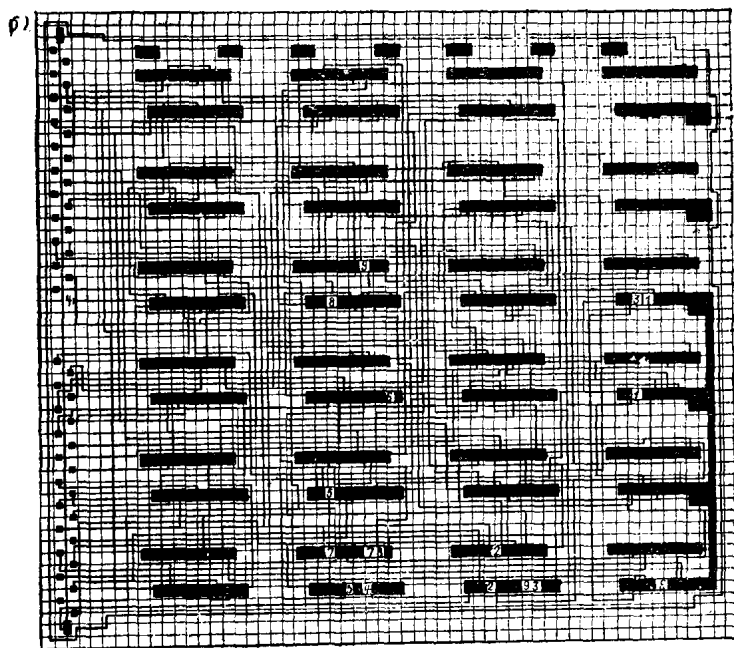


图1 集成电路块在双面

示生产效率提高的程度。

通过印制电路板设计和生产的全盘自动化，来提高现代电子设备生产的技术经济效益，是工业上使用印制板自动化设计系统的基本课题，或者说，是既定目标。同时，技术经济效益的定量表示，能说明新方案比传统方法或自动化设计系统的原方案提高的程度。这样，自动化设计系统的某个具体方案的数学保证和技术保证的完善水平，就可以有个客观的指标。

显而易见，印制板和印制部件生产效率的提高，在很大程度上取决于研制工作的整个设计技术周期是否是完全自动



板上的不同配置方案

化。为此，必须尽量减少或完全不用手工（非机动）作业。如果不可能作到，则必须力求使自动设计方案的手工修整工作量很小。从降低手工修整工作量着眼，还应当选出合适的印制电路板的最终质量指标，而不应当用设计工艺要求和使用的可靠性的指标。因为完成这些要求是任何设计方案的必要条件，而且它们的最优化一般也不会带来额外的技术经济效益。

常常采取非自动布线的连线（跨接线）和连线总数之比的百分数，作为印制电路自动设计的基本的、有时是唯一的最终质量指标。下面我们将两种机动布线方案加以对比，看

看这种指标是否合理。图 1 是同一种电路、不同布线的两块双面板，以不同的配置方案各配置 24 块带引线柱的集成电路块。配置方案 1 (图 1, a) 是初始配置。配置方案 2 (图 1, б) 是用成对重排算法，使图 1, a 初始配置的连线累计长度最小化而获得的。按照自动化设计系统《Автограф》的程序，用波动算法布设连线的结果如表 1。

表 1 电路布线结果的数据

方 案	接线法特点		连线自动布线结果			
	线路 数目	连线 数目	连线长度 (条件单位)	跨接线最短 累计长度 (毫米)	跨接线 百分比	布线机动 (M-220) 时间(分)
1	78	174	7913	850	4	70
2			7064	485	5	50

图 1 中用相同数字标注的集成电路块接点，是没有用自动布线连接的接点。方案 1 中跨接线的修整（非机动修整）大约要花费 4.5 小时，而且还有两条连线不能用印制法。方案 2 中跨接线的数目虽然较多，但是印制连线的分布较自由、较均匀，而且跨接线的累计长度减少了，只花了 1.5 小时就修整完毕。总之，跨接线数目较多的方案中，自动布线和非机动修整的累计工作量和完成同样工作但跨接线数目较少的方案相比，前者花费的工作量几乎低 3 倍。因此，应用使连线累计长度（以条件单位计量）最小的重排算法，虽然会导致跨接线的数目有所增加，但对降低工作量是有效的。

在用自动化方法进行印制板的工业设计中，上述实例是

非常典型的。它表明,假定跨接线的百分比能够稳定地等于零,当然可以把它当作机动布线的最终质量指标。还可以认为5%的跨接线比15~20%的好。就是说,当“不好的”方案中跨接线的百分比较高时,将跨接线数目降低2~4倍是可取的。可是,实际上许多现代自动化设计系统,只能使跨接线百分比稳定在不超过5~6%时,若将跨接线数目定在1~6%的范围,从降低机动布线方案修整工作量着眼,自然是不可靠的指标。在这种情况下,为了正确评价自动布线的最终质量,除了跨接线数目外,还需要有以下指标:各层印制导线的分布密度;该密度的分布方法;跨接线的最短累计长度;转接孔的数目;以及其他指标。这些指标的最优化始终有作用。因为具体的印制部件的复杂程度不同(如组件的类型和安装间距、连线数目、线路数目等),用数量表示上述布线的最终质量指标,就可以对连线自动布线的结果做出全面的、实际上客观的评价。如果只用一项具有一定物理意义的综合指标来代替印制布线各种最终指标,则是既困难而又未必能解决的课题。总之,用一组最终指标全面反映结构复杂程度和布线的工艺性,是比较实际的。

印制电路的最终质量指标,只有在印制连线布线完成之后才可以知道。因此每一道基本算题需要有效的局部指标。在各个算题的解算过程中,使这些指标直接最优化,实际上就是使阶段设计可靠地向最终主目标进展的过程。这些局部指标 $\Pi_{n/i}$ 叫做最优化的阶段指标。阶段(设计)指标可以是具体的结构工艺参数,即明显型;也可以用间接的解析函数表示,或者以定性型给定。明显型的局部指标 $\Pi_{n/i}$ 在物理实质方面,能够和印制电路的最终质量指标 $\Pi_{\kappa/i}$ 吻合($\Pi_{n/i} =$

$\Pi_{x/i}$), 因而最能表示印制连线布线题和印制层分配题的性质。在连线布线时, 属于指标 $\Pi_{n/i} = \Pi_{x/i}$ 的有: 已布设的印制连线的长度, 印制布线中 Γ 形和 T 形走线的数目, 待布设的连线的分布密度等。在印制层的分配题中, 明显型的局部指标, 是用必须最小化的转接孔数目和印制层的数目, 以及各层承担印制导线的均匀程度表示。组件配置算题和全套连线的布设算题 (在阶段设计时, 它们被分配在互为独立的算题中), 一般使用间接型的局部设计指标。它可用任一种解析函数 ($\Pi_{n/i}$ 的定量算题) 或用描写方法 ($\Pi_{n/i}$ 的定性算题) 表示。

对间接型以及某些明显型的局部指标 $\Pi_{n/i}$, 需要建立有关指标和较高秩局部指标算题的相关性程度, 以及和最终指标 $\Pi_{x/i}$ 的相关性程度, 并且对该相关性程度做出定量评价。找出自动布线的结果和组件配置过程中, 被最优化的局部指标之间所存在的显著的和稳定的关系, 具有特别重要的意义。对于配置指标和布线结果的显著性水平, 怎样阐明和怎样进行定量评价, 将在 § 6 中加以探讨, 这里只指出以下情况。在构造全套电路连线的算法中, 广泛采用的许多方法都具有诱发性。它导致布线过程中出现随机分量, 这分量迟早要同任一种配置的局部指标的随机分量通约掉。如果出现这种情况, 一些稳定性最差的最最终指标, 将会按照随机过程随着有关的配置指标的进一步优化, 而开始变化。这种随机过程的数学期望值可能是不变的, 也可能随着配置的局部指标的优化程度, 而有不明显的变化趋势。跨接线的百分比正是以这种方式, 随着连线的累计长度向极值趋近而变化。这时非常重要是判明以下情况: 所选定的配置指标是否确是最佳的,