



“十二五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

PCB组装车间工艺规划和 调度的动态集成优化

· 李宗斌 杜 轩 李 鸥 著 ·



科学出版社

013059813

TN410.5
08

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

“十二五”国家重点图书出版规划项目

21 世纪先进制造技术丛书

PCB 组装车间工艺规划和 调度的动态集成优化

李宗斌 杜 轩 李 鸥 著



科学出版社



北航

C1665845

TN 410.5
08

内 容 简 介

本书对 PCB 组装过程优化问题进行了深入研究。基于多色集合理论,提出了基于多色集合模型的 PCB 组装工艺规划与调度集成优化理论和方法。实现了基于 PCB 可组装分析的 PCB 组装工艺规划与调度动态集成优化,解决了 PCB 设计、工艺与组装生产环节的信息沟通问题,便于将 PCB 设计数据轻松流畅地转换为完全优化的电子组装方案,使高效和动态集成优化的 PCB 组装工艺规划与调度更加容易实现,从而提高 PCB 组装的效率和质量。

本书适合 PCB 组装企业、科研单位中从事 PCB 组装系统工艺规划、生产调度、生产管理、企业信息化工程等工作的管理人员和工程技术人员,以及高等院校相关专业的教师、研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

PCB 组装车间工艺规划和调度的动态集成优化 / 李宗斌, 杜轩, 李鸥著.
—北京: 科学出版社, 2013

(“十二五”国家重点图书出版规划项目: 21 世纪先进制造技术丛书)

ISBN 978-7-03-037941-2

I. ①P… II. ①李…②杜…③李… III. ①印刷电路—生产工艺②印刷电路—组装 IV. ①TN410.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 134766 号

责任编辑: 刘宝莉 / 责任校对: 朱光兰

责任印制: 张 倩 / 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>

骏主印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张: 12 1/2

字数: 232 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编:熊有伦(华中科技大学)

编 委:(按姓氏笔画排序)

丁 汉(上海交通大学/华中科技大学)

王 煜(香港中文大学)

王田苗(北京航空航天大学)

王立鼎(大连理工大学)

王国彪(国家自然科学基金委员会)

王越超(中科院沈阳自动化所)

冯 刚(香港城市大学)

冯培恩(浙江大学)

任露泉(吉林大学)

刘洪海(朴次茅斯大学)

江平宇(西安交通大学)

孙立宁(哈尔滨工业大学)

李泽湘(香港科技大学)

李涤尘(西安交通大学)

李涵雄(香港城市大学/中南大学)

宋玉泉(吉林大学)

张玉茹(北京航空航天大学)

张宪民(华南理工大学)

周仲荣(西南交通大学)

赵淳生(南京航空航天大学)

查建中(北京交通大学)

柳百成(清华大学)

钟志华(湖南大学)

顾佩华(汕头大学)

徐滨士(解放军装甲兵工程学院)

黄 田(天津大学)

黄 真(燕山大学)

黄 强(北京理工大学)

管晓宏(西安交通大学)

雒建斌(清华大学)

谭 民(中科院自动化研究所)

谭建荣(浙江大学)

熊蔡华(华中科技大学)

翟婉明(西南交通大学)

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪,先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点,同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展,为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术,出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合,产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战,要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展,激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升制造学科的学术水平。我们相信,有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,本丛书将为发展制造科学,推广先进制造技术,增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物,在制造业中的应用范围很广,从喷漆、焊接到装配、抛光和修理,成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科,已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一,并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展,因此,本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。

熊有伦

华中科技大学

2008年4月

前 言

电子产品制造作为现代工业的一个支柱产业，对推动社会经济发展和科技进步有着重要作用。在电子产品制造中，根据设计要求，将各种不同尺寸、形状和功能的电子元器件准确、可靠地组装到印制电路板（printed circuit board, PCB）上实现电气连接和机械连接要求的过程称为 PCB 组装。PCB 的组装过程复杂，是电子产品制造的关键环节。在动态的组装生产环境下，客户需求的不断变化，产品混合度及复杂性的日益提高，混合组装生产线和多重数据库导致的工艺复杂性的提高以及设备利用率低、转产调整时间长等制造压力，使得 PCB 组装规划变得非常困难，即使是优化的工艺设计方案也不得不在动态的组装生产过程中被修改，从而影响 PCB 组装质量、效率和成本。为提高产品的质量和生产效率，降低成本，增强企业的市场竞争能力，PCB 组装过程优化受到了学术界和企业界的大量关注。

本书深入研究 PCB 组装过程优化问题，提出了基于 PCB 可组装性分析的 PCB 组装工艺规划与调度动态集成优化的理论、方法，解决了 PCB 设计、工艺与组装生产环节的信息沟通问题，以便于将 PCB 设计数据轻松流畅地转换为完全优化的电子组装方案，使高效和动态集成优化的 PCB 组装工艺规划与调度更加容易实现，从而提高 PCB 组装的效率和质量。

本书的内容包括四个方面：首先，综合考虑 PCB、组装元件和设备的信息，实现了单台设备上 PCB 组装的元件组装顺序优化和供料器布置优化，本书不仅有效地实现了这两个相互联系问题的集成优化，而且还考虑了元件尺寸、设备结构、供料器布置策略等对组装过程的影响。

其次，介绍了多组装任务、多设备的 PCB 组装车间工艺规划与调度动态集成优化的建模理论和方法。利用多色集合的递阶结构和模型描述形式一致化的特点，建立了一个包含 PCB 组装工艺规划和调度优化的集成模型。为了清楚地描述问题和方便求解，分别将用于描述各种约束关系和动态特性的约束模型建立在集成模型的逻辑层上，将用于优化计算的数学模型建立在集成模型的数量层上。该模型的建立显著缩小了求解空间，有效降低了算法的复杂性，提高求解效率，并保证解的有效性。

然后,基于多色集合模型与智能优化算法构建了一个混合优化算法框架。利用逻辑层和数量层的 PS 模型与 GA (genetic algorithm) 相结合,实现了具有复杂约束的多目标 PCB 组装工艺规划与调度动态集成优化。在求解效率和求解质量上比传统算法具有很大优势。

最后,基于上述的理论和方法,实现了一个 PCB 组装规划原型系统。PCB 组装规划人员通过友好的人机交互界面,能方便、快速实现 PCB 在单台设备、组装生产线上的组装过程优化,以及 PCB 组装车间的组装工艺规划与调度动态集成优化。并建立了电子元件三维模型库,能对 PCB 组装过程进行仿真、系统运行过程描述和组装可行性分析。

这些研究为高效求解复杂大规模 PCB 组装规划问题提供了有效方法。

全书介绍了作者近年来对 PCB 组装系统优化的最新研究成果。材料来源于我们课题组近年来在国内外重要期刊和学术会议上发表的科研论文、学位论文和科研报告等资料。张屹副教授,研究生李登桥、彭安功、余刚等的工作在本书中得到了体现。本书中涉及的有关研究工作还得到了国家自然科学基金项目(51275274)、湖北省教育厅重点项目(D20121306)、三峡大学科研基金项目(KJ2010B020)和三峡大学 2011 计划的资助,在此表示衷心感谢。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 问题描述	1
1.1.2 PCB 组装概述	5
1.2 相关研究现状与进展	8
1.2.1 PCB 组装工艺规划的研究现状与进展	8
1.2.2 PCB 组装调度的研究现状与进展	12
1.2.3 工艺规划与调度集成的研究现状与进展	13
1.2.4 目前研究工作存在的问题	15
1.3 研究目的与内容	16
1.3.1 研究目标	16
1.3.2 本书的主要研究内容与特色	17
1.4 全书的结构安排	20
参考文献	21
第 2 章 PCB 组装工艺规划与调度集成的体系结构	25
2.1 PCB 组装工艺规划与调度集成研究框架	25
2.2 多色集合理论简介	25
2.2.1 多色集合基本概念	26
2.2.2 多色集合的运算	30
2.2.3 多色图	31
2.3 PCB 可组装性分析	32
2.3.1 当前 PCB 设计与组装生产存在的主要问题	32
2.3.2 PCB 可组装分析研究内容	33
2.3.3 PCB 设计文件的数据格式	35
2.3.4 PCB 组装分析的数据模型	37

2.3.5	PCB 可组装性分析系统结构	43
2.4	PCB 组装工艺规划	44
2.4.1	PCB 组装工艺优化问题结构	44
2.4.2	设备层 PCB 组装工艺优化	45
2.4.3	车间层 PCB 组装工艺优化	45
2.5	PCB 组装调度	46
2.5.1	PCB 组装调度问题及其特点	46
2.5.2	PCB 组装调度与工艺规划的关系	47
2.6	遗传算法概述	48
2.6.1	遗传算法实现方式及特点	49
2.6.2	遗传算法中的复杂约束处理	49
2.6.3	多目标优化遗传算法	50
2.6.4	多目标元胞遗传算法	51
2.7	本章小结	57
	参考文献	57
第 3 章	转塔式贴片机的 PCB 组装过程优化	61
3.1	转塔式贴片机结构及贴装过程分析	61
3.2	转塔式贴片机的并行贴装过程模型	71
3.2.1	PCB 工作台移动时间	71
3.2.2	供料架移动时间	72
3.2.3	转盘转动时间	72
3.2.4	元件取贴时间	73
3.2.5	PCB 组装时间优化模型	73
3.3	基于 PS 模型的混合遗传算法设计	75
3.3.1	组装元件的多色集合表示	75
3.3.2	染色体编码与解码	76
3.3.3	基于 PS 围道矩阵的种群初始化	78
3.3.4	遗传操作	79
3.3.5	适应度计算	81
3.4	转塔式贴片机贴装过程优化结果分析	82
3.5	本章小结	85
	参考文献	85

第 4 章 多贴装头动臂式贴片机的 PCB 组装过程优化	87
4.1 多贴装头动臂式贴片机结构及贴装过程分析	87
4.2 多贴装头动臂式贴片机贴装过程优化模型	88
4.2.1 元件分组和供料器布置	88
4.2.2 元件组拾取	90
4.2.3 元件组贴装顺序	90
4.2.4 动臂式贴片机贴装过程优化模型	91
4.3 混合遗传算法设计	92
4.3.1 染色体编码与解码	93
4.3.2 元件分组启发式算法	94
4.3.3 NNH 法确定元件组间取贴顺序	97
4.3.4 遗传操作	98
4.4 动臂式贴片机的贴装过程优化结果分析	100
4.5 本章小结	102
参考文献	102
第 5 章 复合式贴片机的 PCB 组装过程优化	104
5.1 复合式贴片机结构及贴装过程分析	104
5.2 复合式贴片机的贴装过程优化模型	105
5.2.1 元件取贴顺序	105
5.2.2 供料器布置	106
5.2.3 元件分配	106
5.2.4 复合式贴片机贴装过程优化数学模型	107
5.3 混合遗传算法设计	109
5.3.1 染色体编码与解码	109
5.3.2 种群初始化	110
5.3.3 遗传操作	111
5.3.4 适应度值计算	111
5.4 复合式贴片机的贴装过程优化结果分析	112
5.5 本章小结	114
参考文献	114
第 6 章 PCB 组装生产线上 PCB 分配与元件分配优化	115
6.1 连续生产线上元件分配问题分析	115

6.2	多条生产线间的 PCB 分配问题分析	116
6.3	生产线层的 PCB 组装优化算法设计	117
6.3.1	染色体的编码	117
6.3.2	种群初始化	117
6.3.3	适应度函数和选择	119
6.3.4	交叉与变异	119
6.4	应用实例	120
6.5	本章小结	121
	参考文献	121
第 7 章	基于多色集合的 PCB 组装工艺规划与调度集成建模技术	123
7.1	车间层 PCB 组装概述	123
7.2	PCB 组装工艺规划数学模型	125
7.2.1	连续生产线上的 PCB 和元件分配优化	127
7.2.2	PCB 组装车间的 PCB 和元件分配优化	128
7.3	PCB 组装调度优化数学模型	130
7.4	PCB 组装工艺规划与调度集成优化数学模型	131
7.4.1	PCB 组装集成优化问题的目标函数	133
7.4.2	PCB 组装集成优化问题的约束条件	133
7.5	基于多色集合的 PCB 组装规划集成模型	135
7.5.1	多色集合模型的层次结构	135
7.5.2	PCB 组装规划集成模型的结构	136
7.5.3	PCB 组装工艺规划与调度集成模型	136
7.6	PCB 组装系统模型的分析	140
7.6.1	PCB 组装工序组成及设备能力分析	141
7.6.2	PCB 组装模型适应性分析	143
7.7	本章小结	143
	参考文献	144
第 8 章	PCB 组装工艺规划与调度集成优化方法研究	145
8.1	PCB 组装工艺规划与调度集成优化算法	145
8.1.1	基于问题分解的混合优化算法	146
8.1.2	混合多目标优化遗传算法	147
8.2	基于多色集合模型的混合遗传算法原理	147

8.2.1	PCB 组装集成优化问题的遗传编码	148
8.2.2	多目标遗传优化的适应度计算	148
8.2.3	PCB 组装优化问题中复杂约束的处理	149
8.2.4	PCB 组装优化过程中不确定性因素的处理	149
8.3	基于多色集合的 PCB 组装优化约束模型	150
8.4	基于问题分解的 GA 结合分派规则的优化算法	153
8.4.1	基于 PS 模型的编码与解码	153
8.4.2	基于 PS 模型的遗传操作方法	154
8.4.3	基于约束模型的多目标适应度计算	156
8.5	混合多目标优化遗传算法	157
8.5.1	基于 PS 模型的染色体编码与解码	158
8.5.2	基于 PS 约束模型的遗传操作	161
8.5.3	基于 PS 模型的多目标适应度计算	162
8.6	PCB 组装工艺规划与调度集成的动态优化方法	167
8.6.1	动态组装环境的模型描述	167
8.6.2	动态优化策略	168
8.7	计算结果分析	168
8.8	本章小结	172
	参考文献	173
第 9 章	PCB 组装规划原型系统实现	175
9.1	系统分析与设计	175
9.2	原型系统体系结构	176
9.3	系统功能模块的实现	177
9.3.1	PCB 组装信息管理模块	178
9.3.2	电子元件参数化模型库	179
9.3.3	PCB 可组装性分析	180
9.3.4	设备层 PCB 组装优化	180
9.3.5	生产线层 PCB 组装优化	181
9.3.6	车间层 PCB 组装优化	182
9.4	系统运行环境及特点	183
9.5	本章小结	184

第 1 章 绪 论

电子产品制造作为现代工业的一个支柱性产业,对推动社会经济发展和科技进步有着重要作用。在电子产品制造中,根据设计要求,将各种不同尺寸、形状和功能的电子元器件准确、可靠地组装到印制电路板(PCB)上实现电气连接和机械连接要求的过程称为 PCB 组装。PCB 组装过程复杂,是电子产品制造的关键环节^[1]。

在动态的组装生产环境下,客户需求的不断变化,产品混合度及复杂性的日益提高,混合组装生产线和多重数据库导致的工艺复杂性的提高以及设备利用率低、转产调整时间长等制造压力,使得 PCB 组装过程优化变得非常困难。即使是优化的工艺设计方案也不得不在组装生产过程中被修改,从而影响 PCB 组装质量和效率。本章首先对 PCB 组装工艺规划及调度问题进行了描述和分析。对相关问题的研究现状及进展进行了综述,最后阐述了本书的主要研究内容。

1.1 概 述

随着电子组装技术的发展,可以根据 PCB 的不同技术要求、设计参数和组装生产环境采用不同的组装技术实现 PCB 组装。目前 PCB 组装常用的是通孔插装技术(through hole technology, THT)、表面贴装技术(surface mounted technology, SMT)及混合组装技术。在 PCB 组装过程中,根据不同组装工艺和生产环境,每种 PCB 的组装过程需在一台或多台独立的组装设备(可将一条固定的生产线看作一台独立的设备)上完成 PCB 上多个不同类型元件的组装。为保证组装质量,提高生产效率,需要根据不同的 PCB 组装工艺,为不同 PCB 组装任务选择合适的设备,并确定其不同设备上的工艺参数和组装顺序,减少 PCB 组装任务的完工时间和延迟交货时间。

1.1.1 问题描述

与其他制造系统相比,PCB 组装系统具有如下特点:

(1)为了适应快速多变的市场需求,使得电子产品制造更加灵活,越来越多的

电子产品制造商采用 EMS(电子制造服务)策略,许多原始设备制造商(OEM)主要专注于产品的设计和营销,而将生产制造部分外包,导致电子产品及 PCB 的设计和组装环节是完全分离的,二者之间的信息交流缺乏柔性。

(2)PCB 组装企业根据设计文件,按用户订单组织生产,特别是中小型的 PCB 组装企业大多采用多品种、大中小批量混合交叉的定制生产方式。PCB 组装系统中,设备状态变化、原材料供应情况变化和用户需求变化等不确定性因素大量存在,而且会对系统的运行产生严重影响。

(3)PCB 组装工序是由 PCB 的组装工艺流程和需组装的元件在不同设备上的分配结果所确定的。由于组装设备,元件类型和元件数量较多,因此 PCB 组装工艺规划的柔性较大。

(4)PCB 组装工艺流程复杂。在多品种小批量组装生产方式下,PCB 组装车间中多个任务同时进行组装,针对不同类型的元件,需要使用不同的设备或者手工,采用不同的方式进行组装。需要满足工艺、设备和时间等众多约束。

在 PCB 组装过程中,特别是新订单试产及工艺定型过程中存在的主要问题是:技术准备时间长(设计文件转换、工艺参数设置、编程等);物料、工具、备件准备时间长;外协件到货周期长;产品品种转换准备时间长;多变的订单常常引起物料短缺,停工待料;生产不均衡、设备利用率低;生产成本低、交货周期长等。这些问题严重妨碍了企业生产技术和水平的提高。为提高产品的质量和生产效率,增强企业的市场竞争能力,PCB 组装规划受到了学术界和企业界的大量关注。

PCB 组装规划包括 PCB 组装工艺规划和组装调度两个重要环节。PCB 组装规划问题结构如图 1.1 所示。

在 PCB 组装的生产准备阶段,由工艺人员根据 PCB 设计信息、设备信息、生产订单信息等进行 PCB 组装工艺规划,其主要内容包括确定 PCB 组装工艺流程;确定 PCB 及元件分配,平衡设备工作负荷;PCB 组装设备的工艺参数优化等。PCB 组装工艺规划分为设备层和生产线层两个层次。设备层的工艺规划主要考虑单台设备的主要工艺参数,优化其加工性能,包括优化 PCB 上元件的组装顺序和不同类型元件在组装设备上的布置,减少元件的组装时间;生产线层的工艺规划主要通过生产线上各设备间的元件分配和 PCB 分配优化,确定 PCB 的组装工序及组装设备的组成,减少 PCB 上元件的组装时间和调整时间^[2],平衡设备工作负荷。

PCB 组装调度是由车间生产管理人员在生产任务下达前,根据工艺规划结果、组装车间的设备、生产订单及原材料供应等信息完成的。主要是确定各组装设备

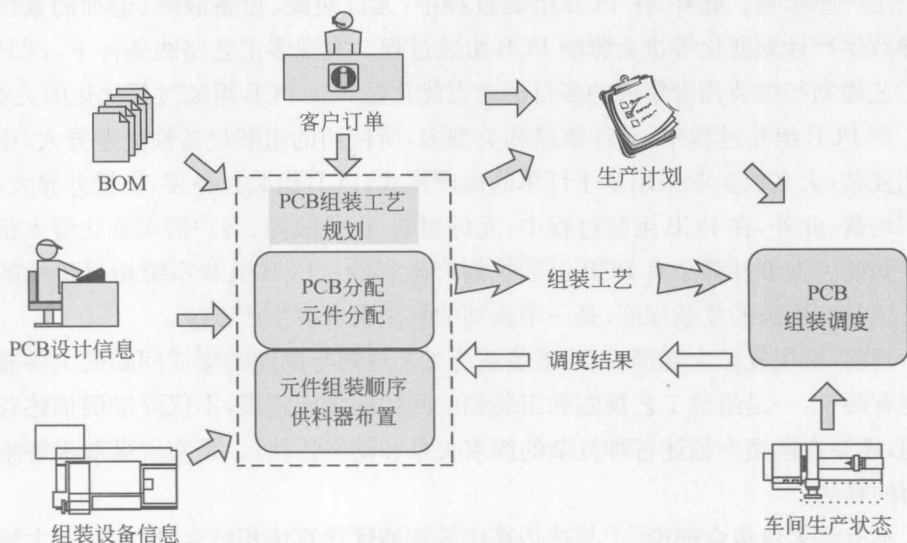


图 1.1 PCB 组装规划问题结构示意图

上的 PCB 组装工序的组装顺序,及各组装工序的组装起止时间。车间层的多 PCB 组装任务的组装调度优化问题包括优化不同设备上各 PCB 组装工序的组装顺序,确定各工序的开始组装和组装结束时间,以缩短 PCB 组装完工时间,减少订单交货延迟时间。

PCB 组装的工艺规划与调度之间是紧密联系的。在 PCB 组装系统中,工艺规划是组装调度最主要的输入信息来源,而组装调度结果则是工艺规划与实际生产资源相匹配的具体实现。在生产资源、组装任务经常变化和存在多种可选工艺方案的情况下,工艺规划为调度系统提供了详细的操作指导^[3],PCB 组装调度不仅取决于生产资源的情况,还依赖于工艺规划的结果^[4],同时组装过程优化的结果又可以反映出组装的最优工艺方案。实现工艺规划和调度集成,可以在生成调度结果的同时决策出每项任务的最优工艺路线,使最优工艺路线规划结果和最优调度结果同时生成。有利于提高产品的质量和生产效率。而在 PCB 组装过程优化中,传统方法将 PCB 组装工艺规划与调度视为两个独立的环节,二者之间是串行的。这种串行的工作方式割裂了 PCB 组装工艺规划与调度之间的联系,所产生的组装工艺规划结果没有考虑实际的生产环境中设备的生产能力和状态等信息。在 PCB 组装调度环节中,大量的 PCB 组装工艺规划结果被迫由生产管理人员进行调整,而无法反馈到工艺规划环节由技术人员进行修改。这必然对 PCB 组装质量和效

率产生严重影响。此外,在 PCB 组装过程中,元件短缺、设备故障、追加的紧急订单导致生产计划变化等也会影响 PCB 组装过程。实现多工艺路线条件下,PCB 组装工艺规划与组装调度集成的多目标动态优化是实现 PCB 组装过程优化的关键。

在 PCB 组装过程中,元件数量和类型多,所使用的组装设备性能差异大,组装工艺复杂;大多数企业采用基于订单的生产模式,PCB 组装任务多,批量差异大,生产不均衡;此外,在 PCB 组装过程中,元件短缺、设备故障、客户需求变化等大量不可预知的突发事件都会对 PCB 组装规划产生影响。PCB 组装系统相对传统的生产系统具有更高的复杂程度,是一个典型的复杂大规模生产系统。

当前,解决复杂大规模 PCB 组装系统工艺规划与调度的集成问题的主要瓶颈问题有两个:一是组装工艺规划和组装调度问题的集成建模,不仅要准确描述各子问题,还要在模型中描述各种复杂的约束关系和动态特性;二是实现高效求解集成模型的算法。

本书将多色集合理论^[5,6]与遗传算法等智能优化算法相结合,构建复杂大规模 PCB 组装系统优化研究框架。采用分层方式分别建立逻辑层的约束模型和数量层的数学模型。用逻辑层的约束模型描述系统中的各种复杂的约束关系和动态特性,将数量层的数学模型直接用于智能优化算法中的目标函数值计算。在建模过程中,采用多色集合理论的递阶结构来描述 PCB 组装系统中设备层、生产线层和车间层的 PCB 贴装过程优化问题及其相互间的联系,用多色集合的统一颜色描述问题的整体性质,用个人颜色描述贴装设备、PCB 和电子元件等元素的属性,用统一颜色和个人颜色的关系描述问题间的联系。从而使用形式相同的围道矩阵描述工艺规划和组装调度问题。通过逻辑层的约束模型和数量层的数学模型的集成建立复杂大规模 PCB 组装系统的整体模型。

PCB 组装系统中的各层次优化问题都是典型的组合优化问题,当问题规模增大时,其计算复杂性随问题的规模增加呈指数上升,理论上无法在合理时间内求解,属于“NP 难”问题^[2]。因此需要创新的理论和系统化方法,在有效时间内求近优或满意解。由于多色集合采用集合和围道矩阵的方式描述模型,并能方便地与各种优化算法结合,本书所提出的这种混合优化算法的框架,不仅有利于模型的描述,还能利用约束模型保证优化搜索始终在问题的可行解空间中进行,从而大大减小了求解空间,提高优化求解的效率。

本书的研究成果不仅能为复杂大规模生产系统的工艺规划和生产调度集成建模及优化提供新的理论基础和方法,而且研究成果的应用能直接提高 PCB 组装系统的组装质量和生产效率,对于提高电子产品生产企业对外界环境变化的响应能