



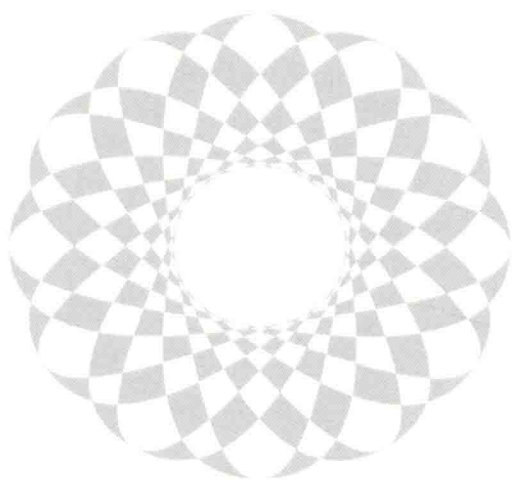
工业和信息化部“十二五”规划专著

装配流水线 平衡和投产排序

——模型、算法与仿真

Assembly Line Balancing and Sequencing:
Models, Algorithms and Simulations

宋华明 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

工业和信息化部“十二五”规划专著

装配流水线平衡和投产排序 ——模型、算法与仿真

宋华明 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

装配线的平衡与排序问题是生产调度的一个重要而且活跃的分支,无论在问题表述方面还是求解算法方面都已自成体系。本书介绍了装配流水线平衡和投产排序问题的基本框架以及部分前沿和热点,使读者对装配线平衡和排序的研究有一个总体的认识 and 了解。

本书主要讨论装配流水线平衡和投产排序的问题,给出了模型、算法与仿真,主要包括不同目标类型的装配线平衡问题、不同布局方式的装配线平衡问题,混合装配线平衡与产品投产排序问题,对模型的求解算法也做了进一步的说明。

本书可以作为管理科学与工程、工业工程、系统工程和计算机软件及理论、应用数学等相关专业的研究生以及高年级本科生的参考教材,也可以作为从事运作管理等相关领域研究的科研人员、企业管理人员和工程技术人员的参考书籍。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

装配流水线平衡和投产排序:模型、算法与仿真/宋华明著. —北京:电子工业出版社, 2016. 6

工业和信息化部“十二五”规划专著

ISBN 978-7-121-28031-3

I. ①装… II. ①宋… III. ①装配(机械)-流水生产线-研究 IV. ①TH163

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 003126 号

策划编辑:王志宇

责任编辑:王志宇

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:11.5 字数:266 千字

版 次:2016 年 6 月第 1 版

印 次:2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价:39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254523, wangzy@phei.com.cn。

序 言

生产调度问题，特别是其中的装配线平衡和产品投产排序问题，一直是管理科学与工程、工业工程和系统工程等研究领域的重要而且活跃的一个分支。尽管已有大量的相关学术书籍和学术文章论及这一问题，但是一直没有一本系统的专门针对装配线平衡和产品投产排序问题的中文专著，而《装配流水线平衡和投产排序——模型、算法与仿真》一书的出版恰好弥补了这一缺憾。

事实上，只要是规模化生产，无论是标准化的产品还是定制化的产品，装配线平衡和产品投产排序都是必须面对的话题。本书内容在足够的深度和宽度上涵盖了装配线平衡和产品投产排序的主要议题，把装配线平衡中的许多理论研究和实际运作管理问题提炼出来并进行了系统研究，可以说直面这一领域中学术研究的前沿问题和实际应用困难的挑战，对生产与运作管理的理论研究与实践都有着重要的意义。

本书的作者多年来一直坚持从事装配线平衡的研究工作，发表过许多高水平的学术论文。由此可见，本书是作者长期从事装配线平衡和投产排序的成果的积累。从总体上看，这部著作具有以下特点。

1. 较好的理论性和系统性

本书重点在于问题描述、模型建立以及算例展示。作者花了很多笔墨详解装配线平衡问题的内在本质，这可以让读者更好地抓住问题的核心，而对相对比较成熟的求解算法则侧重在现有数学规划求解软件的应用上。这一处理方法简洁、生动、易于理解，又便于借助软件工具解决运算问题，也因此避免过于数学化。

2. 较好的实用性

本书针对每一类装配线平衡和投产排序问题都给出了一个算例，对该问题的研究背景、模型以及算法加以说明和解释。这些算例较好地反映现实生产与运作管理中的情况，把复杂的问题简单化，对从事实际管理工作的人士具有很好的示范性和启发性，因此，有较好的应用价值。

3. 较好的学术参考价值

本书所涉及的内容中，有不少都是学术研究上的热点问题，对于从事装配线平衡、产品投产排序问题研究的学者有着较好的参考价值，对于初次涉及这一领域的研究者具有较好的引导作用。

总之，这是一部具有重要理论意义和实际应用价值的著作，希望它的出版能为装配线平衡和产品投产排序的研究和发展做出贡献，更希望能为促进我国企业生产管理水平提高做出贡献。

非常感谢作者为装配线平衡和产品投产排序写出这样专业的著作。

华中科技大学管理学院教授、博士生导师

马士华

前 言

装配流水线平衡和投产排序是生产调度中一类重要的组合优化问题,广泛应用于管理科学与工程、工业工程、计算机科学和工程技术等许多领域,是生产调度领域的一个非常活跃的经典分支。自从20世纪50年代以来,装配线平衡和排序问题的研究不断深入扩展。从单一产品扩展到多产品,从单独的平衡问题扩展到联合平衡和排序问题,从车间运作管理扩展到供应链管理。

本书是在作者多年从事学术研究工作的基础上,经过多年的酝酿完成的。本书主要讨论装配流水线平衡和投产排序的问题,给出了相应的模型、算法与仿真。重点是对装配线平衡与排序问题的描述和数学模型的刻画。对于其中涉及的算法部分,基于“Matlab + Yalmip + Cplex/Gurobi”的模式求解,充分利用成熟的高性能专业软件。同时,采用经典装配线平衡的数据文件,进行了大量的仿真与测试。

本书共分10章,第1~7章介绍各类装配线的平衡问题,第8章介绍混合装配线的排序问题,第9章介绍混合装配线平衡和排序联合优化问题,第10章介绍装配线平衡的算法与仿真。

为使本书便于初学者和从事运作管理实践的人员阅读,对于每一种模型尽量给出相应的应用背景。对于每一个装配线平衡和排序问题,我们先给出问题的介绍和描述,然后基于数学语言建模,并用数值示例进行解释。对于算法只介绍基本步骤和流程,不介绍算法的内核。本书可以作为管理科学与工程、工业工程、系统工程和计算机软件及理论、应用数学等专业的研究生以及高年级本科生的参考教材,也可以作为从事运作管理等相关领域研究的科研人员、企业管理人员和工程技术人员的参考书籍。

在本书即将付梓之际,诚挚感谢我的研究生导师——南京理工大学经济管理学院韩玉启教授和贾大龙教授在我研究生学习生涯中给予的指导,是他们引导我从事装配线平衡与排序的研究。在本书的成书过程中,得到了我的在校研究生学生的大力支持,包括博士研究生刘克宁、黄甫、王利莎、马东升,硕士研究生元鹏宇、官粲然、张丹、马坤云、曹喆岫,他们对书稿进行了校对,提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢。

同时诚挚感谢我的博士后导师——华中科技大学管理学院马士华教授,他为本书写了推荐序言,为本书的出版增色许多。

还要衷心感谢电子工业出版社王志宇编辑在本书出版过程中耐心地给予咨询指导和不断督促,是她出色的工作使得书稿及时出版。

由于作者的水平所限,加之时间仓促,书中肯定会有许多错误和不妥之处;恳请读者及同行批评指正。

宋华明

目 录

第 1 章 装配线平衡的基本概念	1
1.1 装配线的概念与分类	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 装配线的特征与分类	3
1.1.3 装配线设计中的问题	6
1.2 装配线平衡的基本概念	7
1.2.1 基本术语	7
1.2.2 装配线平衡的目标	9
1.2.3 装配线平衡问题的类型	10
1.3 装配线平衡的方法	11
参考文献	12
第 2 章 简单装配线平衡问题	13
2.1 简单装配线平衡问题概述	13
2.2 第一类装配线平衡问题(SALBP-I)	14
2.2.1 第一类装配线平衡问题的描述	14
2.2.2 模型建立	14
2.3 第二类简单装配线平衡问题(SALBP-II)	20
2.3.1 第二类装配线平衡问题的描述	20
2.3.2 模型建立	20
2.4 装配线工作站负荷均衡问题(SALBP-III)	22
2.4.1 装配线工作站负荷均衡的概述	22
2.4.2 装配线工作站负荷均衡的数学模型	23
2.4.3 装配线工作站负荷均衡实例	24
2.5 装配线平衡中作业元素之间的相关性问题	25
2.6 装配线平衡中效率优化问题(SALBP-E)	26
参考文献	28
第 3 章 随机型装配线平衡问题	29
3.1 随机型装配线平衡问题概述	29
3.2 第 II 类目标的随机型装配线平衡	30
3.2.1 作业时间为一般分布情形	30
3.2.2 作业时间为正态分布情形	30

3.2.3 第Ⅱ类目标的随机型装配线平衡实例·····	32
3.3 成本优化的随机型装配线平衡·····	33
3.4 第Ⅰ类目标的随机型装配线平衡·····	34
参考文献·····	36
第4章 U型装配线的平衡问题 ·····	37
4.1 第Ⅰ类目标的U型装配线平衡(UALB-I)·····	37
4.1.1 引言·····	37
4.1.2 单一U型装配线平衡的数学模型·····	39
4.1.3 单一U型装配线平衡的数值算例·····	41
4.2 第Ⅱ类目标的U型装配线平衡(UALB-II)·····	42
4.2.1 第Ⅱ类目标的U型装配线平衡的数学模型·····	42
4.2.2 第Ⅱ类目标的U型装配线平衡的数值算例·····	43
4.3 联合U型装配线平衡·····	44
4.3.1 联合U型装配线问题描述·····	44
4.3.2 联合U型装配线平衡问题·····	44
4.3.3 联合U型装配线的序贯平衡实例·····	45
4.3.4 联合U型装配线的并行平衡·····	48
参考文献·····	49
第5章 混合装配线平衡问题 ·····	50
5.1 引言·····	50
5.2 混合装配线运营中的管理决策问题·····	50
5.3 混合装配线平衡问题·····	53
5.4 混合装配线第一类平衡问题数学模型·····	54
5.5 混合装配线平衡的数值算例·····	55
参考文献·····	57
第6章 资源约束的装配线平衡问题 ·····	58
6.1 资源约束的装配线平衡问题概述·····	58
6.2 第一类资源约束的装配线平衡问题·····	58
6.2.1 第一类资源约束的装配线平衡问题描述·····	58
6.2.2 第一类资源约束的装配线平衡问题的数学模型·····	59
6.2.3 算例分析·····	60
6.3 第二类资源约束的装配线平衡问题·····	62
6.3.1 第二类资源约束的装配线平衡问题描述·····	62
6.3.2 第二类资源约束的装配线平衡问题的数学模型·····	62
6.3.3 算例分析·····	64
6.4 第三类资源约束的装配线平衡问题·····	66

6.4.1	第三类资源约束的装配线工作平衡问题概述	66
6.4.2	第三类资源约束的装配线平衡问题的数学模型	67
6.4.3	算例分析	69
6.5	资源约束的 U 型装配线平衡问题	74
6.5.1	资源约束的 U 型装配线平衡问题描述	74
6.5.2	资源约束的 U 型装配线平衡问题的数学模型	74
6.5.3	算例分析	75
	参考文献	77
第 7 章	双边装配线平衡问题	78
7.1	双边装配线平衡问题概述	78
7.2	双边装配线第一类平衡问题(TALBP-I)	79
7.2.1	双边装配线第一类平衡问题描述	79
7.2.2	模型建立	80
7.2.3	数值算例	82
7.3	双边装配线第二类平衡问题(TALBP-II)	85
7.3.1	双边装配线第二类平衡问题描述	85
7.3.2	模型建立	86
7.3.3	数值算例	87
7.4	双边多工作站装配线平衡问题	90
7.4.1	双边多工作站装配线第一类平衡问题描述	90
7.4.2	模型建立	92
7.4.3	数值算例	94
	参考文献	96
第 8 章	混合装配线的投产排序问题	97
8.1	引言	97
8.2	混合装配线投产排序问题	98
8.3	混合装配线投产排序的目标追踪法	99
8.4	混合装配线投产排序的产品比例倒数法	100
8.5	混合装配线投产排序的数值算例	101
	参考文献	103
第 9 章	混合装配线平衡与投产排序的联合优化	104
9.1	引言	104
9.2	基于 makespan 目标的联合优化	105
9.2.1	混合装配线 makespan 的含义	105
9.2.2	混合装配线上 makespan 的联合优化模型	107
9.2.3	联合优化与串行优化中 makespan 的比较	108

9.3	混合装配线中基于物流平准化的联合优化	109
9.4	混合装配线上基于负荷的联合优化	111
9.4.1	封闭型工作站的情形	115
9.4.2	开放型工作站的情形	120
9.4.3	算例分析	121
	参考文献	122
第 10 章	装配线平衡与排序的算法	123
10.1	引言	123
10.2	基于特定搜索规则的启发式算法	123
10.2.1	动态阶位算法 DRPW	124
10.2.2	DRPW 算法与 RPW 算法的比较	129
10.2.3	动态阶位算法与其他启发式算法的比较	130
10.3	基于人工智能的搜索方法	137
10.3.1	遗传算法的步骤	138
10.3.2	直线型装配线平衡 SALBP 问题的遗传算法	138
10.3.3	遗传算法与其他启发式算法的比较	140
10.3.4	U 型装配线平衡的遗传算法	147
10.3.5	U 型装配线平衡的算例	149
10.4	装配线平衡与投产排序的最优化算法	151
10.4.1	算法设计	151
10.4.2	算法实验	152
10.5	序贯优化算法	166
	参考文献	173

第1章

装配线平衡的基本概念

1.1 装配线的概念与分类

1.1.1 引言

汽车工业技术水平与管理水平的提升与发展见证了装配线的发展与变迁。一百余年的汽车工业发展史上有过两次重大的生产方式变革：一次是20世纪20年代福特的大批量生产方式否定了单件生产方式；另一次是20世纪80年代丰田的多品种小批量精益生产方式战胜了单一品种大批量生产方式。这两次装配生产线变革不仅极大地推动了汽车工业的发展，而且大大地推动了世界经济的发展，带动了整个产业运营与管理水平的提升。

装配线这种生产组织方式于1914年诞生于福特公司(Ford Motor Company)，其应用极大地提高了劳动生产率。在装配线诞生之前，1913年的8月，福特公司装配车间每件汽车底盘由一位工人操作，每装配完成一件的时间是12.5小时。当装配线模式成功应用以后，完成一件汽车底盘的操作时间仅为93分钟，劳动生产率提高了8倍多。

随后，伴随着流水生产组织技术的不断改进并应用于零件的机械加工过程，福特汽车公司的生产效率远远超过其他工厂。装配线创造出巨大的汽车市场，使福特公司一款汽车(T型车)的价格在10年间从2000多美元逐步下降到263美元，汽车开始进入普通家庭，同时也使福特公司的生产规模超过了通用汽车公司。因此，可以说福特公司发明的装配线揭开了现代化大生产的序幕，引起了制造业的一个根本性变革。近一个世纪以来，流水生产方式在制造业及服务业中都获得了广泛的应用，在内容和形式上也不断地发展。

20世纪80年代以来，出现了被称为“准时制”的新型生产方式，促使制造业从单一流水生产方式向多品种混合流水生产方式发展。单一流水生产方式体现的是“以生产为中心”的管理思想，混合流水组织方式体现的是生产与经营一体化的管理思想，是生产组织方式的一大进步。20世纪90年代，美国华盛顿大学一个专家小组对新兴技术发展做了预测，提出世界未来的85项新兴技术，其中就包含大批量定制技术：一种兼顾大量生产与个性化需求的生产模式，这种定制技术推动了多品种混合流水生产组织方式向更具柔性的方向发展。

企业要在日趋激烈的市场竞争中生存，成本是竞争要素QCDS(质量、成本、交货期及服务)中的首要因素。降低成本的有效途径之一就是大量规模化生产，在大批量生产的

情况下,装配线是一种生产过程的先进组织形式,这种方式可以实现劳动生产率、设备利用率和满足市场需求三者之间的平衡,提高企业的竞争优势。

在 20 世纪 70 年代,Chase^[1]对使用装配线的 95 家制造企业调查发现:仅有 5% 的制造商采用公开发表的装配线平衡技术来平衡装配线。这种情况维持到 20 世纪 90 年代,仍然没有多大的改观。

Milias^[2]在《装配线平衡——让我们揭开这块神秘的面纱》一文中报道:多数的装配线平衡设计工作是通过“感觉”或以往的经验,以不断的试错(Trial-and-Error)方法来获取装配线的平衡,常常导致大量的无效劳动。这种情况在日复一日、年复一年地发生着。

根据有关资料统计,即使在美国这样工业发达的国家,在工业装配生产中,平均有 5% ~ 10% 的装配时间浪费在平衡延迟中,所以多年来装配线平衡问题一直受到人们的重视^[3]。

为什么会产生上述的这种现象?Shin 和 Min^[4]提出两种假设:①装配线平衡方法的不适用;②实际从业者对装配线平衡技术和方法不了解。从实际情况来看,多数是因为第二种情形。

据统计,装配线的规划设计成本一般占装配线总投入的 9% ~ 12%,因此,装配线规划具有重要的地位^[5]。然而长期以来,我国装配线规划设计水平相对较弱,装配线的规划和设计方法比较落后,大多数企业借助经验进行装配线设计,难以求得较优或最优的设计方案。这使得设计的装配线生产能力或效率偏低,主要表现为:装配线上各工位的负荷相差很大,不仅产生大量的闲置时间,而且还会造成不必要的资源浪费,使得整条装配线的效率低下。因此,迫切需要研究如何提高装配线的设计水平,特别是对于目前应用广泛但研究较少涉及的双边装配线,亟须进行深入的研究。

中国期刊网上,检索 1985—2014 年关于装配线平衡的研究文献,查询主题词为中文“装配线平衡”或者英文“assembly line balancing”,检索的文献大概有 500 篇。按照年代排序排列(如图 1.1 所示),可看出,近年来对装配线平衡的学术研究投入逐年增加。由于管理研究反映的是社会经济发展,这说明国内企业的运营管理水平不断提升,已经步入向管理要效益的内涵式发展之路。

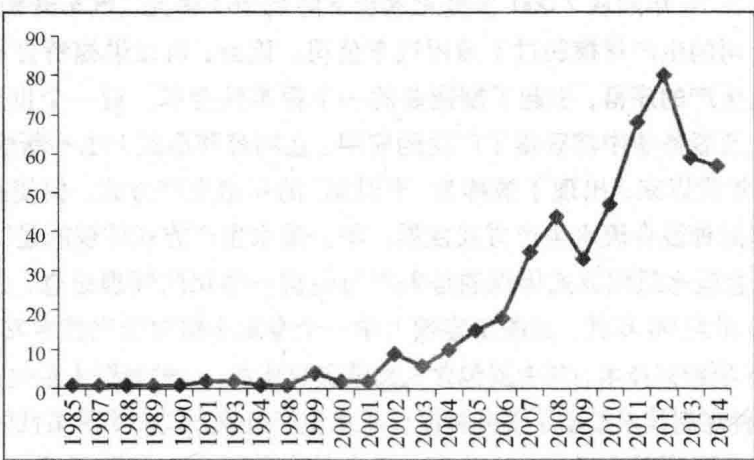


图 1.1 国内关于装配线平衡研究的趋势(数据来源于中国期刊网)

在 SCIE 科学引文数据库中检索主题词“assembly line balancing”，显示了近 20 年 (1996—2015 年) 关于装配线平衡的研究文献，按照年代排序排列 (如图 1.2 所示)，可看出，近年来国际上对装配线平衡的学术研究兴趣也在增加。

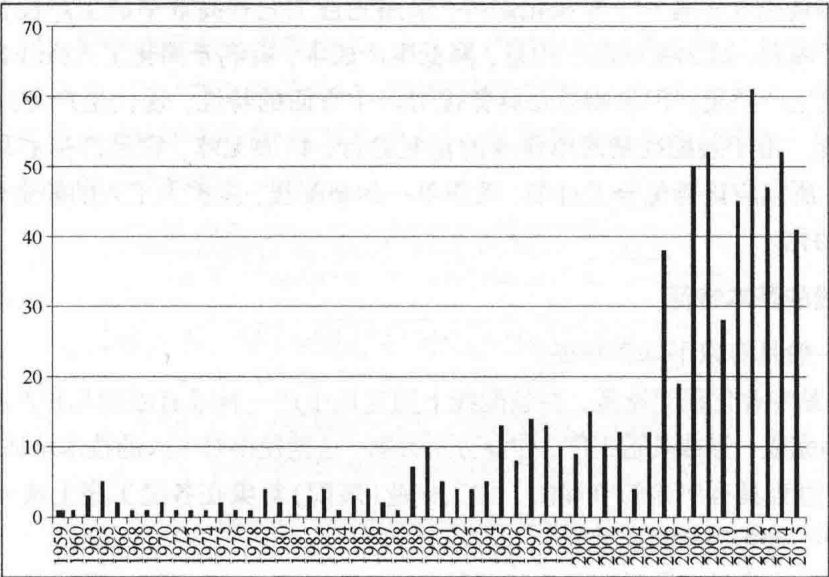


图 1.2 国际上关于装配线平衡研究的趋势 (数据来源于 Web of Science)

目前装配线平衡的中文学术专著较为鲜见，本书的出版，希冀为装配线的学术研究与实践应用尽微薄之力。

1.1.2 装配线的特征与分类

所谓装配线就是把工作站按产品加工路线的先后顺序排列，使加工对象按照规定的速度，一件接一件，像流水似地通过所有的工作站转换成产品 (零件、部件或成品)。

装配线上生产的产品范围包罗万象，例如玩具、汽车、飞机、枪炮、工具、衣物、电子产品等。在某种程度上完全可以说，任何一种产品，只要它由多个部件构成而且被大批量生产都应该使用装配线。装配线是一项重要的技术，它能够将空间组织中的对象原则与时间上平行方式的优点结合在一起。

采用装配线的生产形式的关键在于通过各种技术组织措施，安排工序的单件时间使之与节拍相等或成倍数的关系，这是生产线平衡的主要目标。装配线平衡 (ALB, Assembly Line Balancing) 关系整个生产过程的组织是否合理，关系产品的产量、质量和成本等。因此，要想使装配线发挥作用与效用，必须知道装配线的平衡问题。

从本质上讲，一般的生产流水线的平衡与装配线的平衡没有区别，因此本书对装配线与一般的生产流水线不做区分。

装配线技术是在科学管理和劳动分工原理的指导下取得的，即使在今天仍然被应用于大批量生产的组织。随着社会经济的不断发展，装配线的原理和方式也不断发展和改进。最初的装配线只生产单一品种产品，当社会需求出现多样化趋势后，这种生产方式受到挑

战。第二次世界大战以后,丰田汽车公司顺应市场需求,创造出“准时化”(JIT, Just In Time)生产的新型流水生产方式。它保留了流水生产高效率的优点,克服了转换产品困难的缺点,使一条装配线能够同时生产多种结构相似的产品。

装配线的优点在于有利于专业化生产,采用先进工艺和高效率的生产设备,提高生产率,缩短生产周期,减少在制品占用量,降低生产成本,有利于简化工人操作技术,提高熟练程度,稳定生产质量。但事物总是具备优劣两个方面的特性,现代生产方式与传统生产方式也是如此。由于装配线是简单作业的重复进行,枯燥无味,容易产生心理疲劳,也会增加失业率,所以应该避免分工过细、动作单一的装配线,应扩大工人的职责面,或者将装配线全盘自动化。

1. 装配线的基本特征

装配线一般具有以下基本特征。

(1)工作站专业化程度较高。在装配线上固定地生产一种或有限的几种产品,而在每个工作站固定地完成一道或几道工序,作业分工很细,这就使得对工人的技术培训要求不高。

(2)生产过程具有明显的节奏性。加工作业(装配)对象在各道工序上按一定的时间间隔投入及产出,即按节拍进行生产。

(3)各道工序的设备数量与各道工序的作业时间之比近乎相等。也就是流水装配线内各道工序的生产能力大致相等,以保证生产过程的比例性和平行性。

(4)通常,工序过程是封闭的。工作站按照工艺顺序排列成链状,加工对象在工序间做单向移动接受连续的加工,中间不接受线外的加工,也就是装配线具有封闭性和顺序性;劳动对象如同流水一样从一个工序转到下一个工序,最大限度地避免或减少生产过程的积压与生产过程的闲置时间,使得装配线具有高度的连续性。

2. 装配线的分类准则

装配线的形式多种多样,有多种分类准则。

(1)按生产对象的移动方式可以分为固定装配线(fixed assembly line)和移动装配线(transferred assembly line)。

固定装配线生产对象位置固定,生产工人携带工具沿着生产对象移动。它主要用于不便运输的大型产品的生产,如重型机械的装配、船舶的制造、大型部件的焊接加工等。而生产对象移动,工人和设备以及工具位置固定的装配线称为移动装配线,大多数装配线是生产对象移动的装配线。

(2)按照装配线上生产产品的数目和投产方式可以分为单一品种装配线(single-model assembly line)、多品种装配线(multiple-model assembly line)和混合装配线(mixed-model assembly model line)。

单一品种装配线是指装配线上只生产一种产品。因此,要求产品的数量应足够大,以保证装配线上的设备有足够的负荷。

当单一产品的产量不能保证设备的足够负荷时,应组织混合装配线,即将结构、工艺相似的两种以上的产品,统一组织到一条装配线上,这样的装配线就是多品种装配线。多

品种装配线的特点是集中轮流生产固定的几个产品，当某一种产品的一批制造任务完成以后，相应地调整设备和工艺装备，然后再开始另一产品的生产。实际上，在某一时间内，装配线上仅生产一种产品，从而在这段时间内可以认为它是单一产品装配线。

混合装配线是一种特殊的多品种装配线，在装配线上的几种产品不是成批轮番生产，而是在一定时间内同时或顺序地组织生产，由于生产对象是按照成组加工工艺和使用专门的装备工艺来完成的，因而在变换品种时，基本不需要调整工艺和设备。这种生产能够满足顾客多样化需求，同时降低库存(实现零库存)，也是准时制生产方式的一种重要组织形式。这几种装配线的形式如图 1.3 所示。

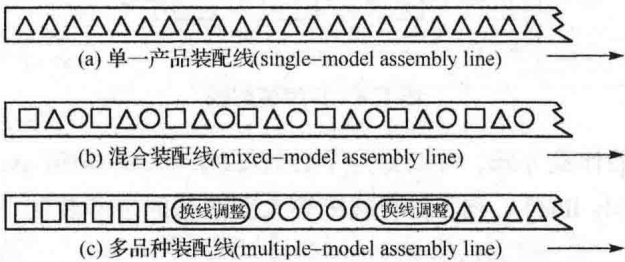


图 1.3 单一品种和多品种装配线^[6]

(3)按照装配线的节奏性可以分为强制节拍装配线(paced assembly line)和自由节拍装配线(unpaced assembly line)。

强制节拍要求准确地按照节拍生产出产品，它一般由专门的装置来实现这个要求，工人必须在规定的时间内完成自己的工作。强制节拍装配线的优点是能够严格地控制生产节奏有利于实现自动化生产。

自由节拍装配线的特点是各个工序的加工时间与节拍相差很大，如果按节拍组织生产，就会使工人和设备处于时断时续的状态。为了充分地利用人力物力，只要求装配线每经过一个合理的时间间隔，生产等量的产品，而每道工序并不按节拍生产。

(4)按工序作业时间可以分为确定型装配线和随机型装配线。

在确定型装配线上，工序作业时间是固定不变的，例如自动化机械作业。而随机型装配线上各工作站内的作业元素的时间是一个随机变量，如在人工装配线上，工序作业时间的长短受到工人心情以及外界环境的影响，完成作业的时间在一定范围内变动。装配线的分类见表 1.1。

表 1.1 装配线类型的划分

分类标准	装配线类型		
移动方式	固定装配线		移动装配线
品种数量与投放方式	单一品种装配线	多品种装配线	混合装配线
流水节奏	强制节拍		自由节拍装配线
作业时间	确定型时间装配线		随机型时间装配线
自动化程度	自动化装配线	半自动化装配线	人工装配线
连续性程度	连续装配线		间断装配线
布局形状	直线型装配线		U 型装配线
作业方式	单边装配线		双边装配线

(5)按照装配线的布局形状,可以分为直线型装配线和 U 型装配线。U 型装配线可以实现一人多机,便于实现柔性作业人数。U 型装配线的布局如图 1.4 所示。

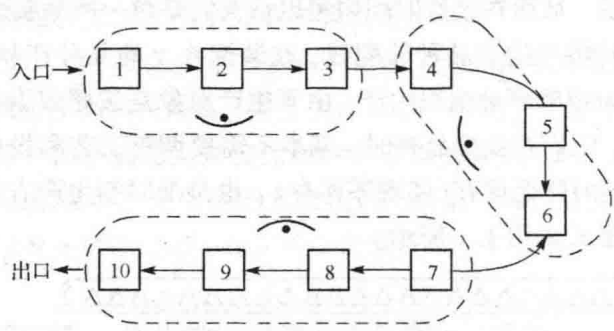


图 1.4 U 型装配线

(6)按照装配线的作业方式,可以分为单边装配线(single-sided assembly line)和双边装配线(two-sided assembly line)。汽车、装载机等大型产品的生产装配往往采用双边装配线,如图 1.5 所示。

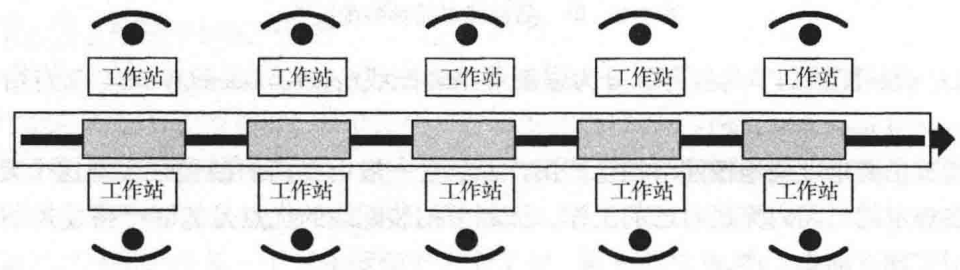


图 1.5 双边装配线

其他的分类标准还有按照自动化程度划分、按照连续性程度划分等。

1.1.3 装配线设计中的问题

现实中,装配线上通常生产多种产品,满足客户多样化的需求。因此,单一品种的装配线比较少见。由于涉及多种产品的生产问题,混合装配线包括两个方面的内容:

(1)装配线的平衡问题(ALB, Assembly Line Balancing),集中于生产资源的分配方面,如机器、人员、工具、材料等在不同工作站的安排;

(2)装配线的投产排序(Scheduling),即排程问题,集中于生产资源的利用与市场需求的快速响应方面,决定产品的投放顺序。

装配线平衡问题是生产管理中的中长期决策问题,涉及投资、厂房及设备的布局规划,一旦制定,短期内难以改动。

在装配线平衡的基础上,排产用来决定混合装配线上不同产品的投入顺序,以保证生产的均衡化。由于市场需求在变化,生产制造系统存在调整的必要。因此,排程决策在每月、每周、每天、每个班次都需要制订,是一个短期的决策问题。而且排程的工作量大,其质量的好坏对生产计划控制系统的运行效果影响很大。

如图 1.6 所示,平衡与排程是混合流水生产系统的两个相互联系的有机组成部分,平衡模块的信息输出是排程模块的信息输入,同时可以根据排程输出的反馈信息对混合流水装配线的参数进行调整,直到输出满意的平衡结果。

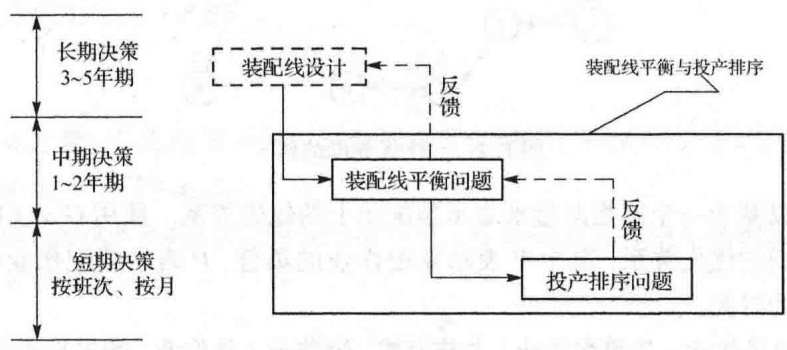


图 1.6 装配线设计中的线平衡和投产排序问题

1.2 装配线平衡的基本概念

1.2.1 基本术语

装配线的平衡问题就是将一系列的作业分配到一定数量的工作站上,使得每个工作站的作业时间总和不超过给定的节拍,目标是使所有工作站的空闲时间最小。下面是装配线平衡的一些常用术语。

工作站 (workstation): 也称工作地,是作业人员为了完成指定的作业,在装配线上的工作位置。一般一个工作站只配一个作业人员,但也有根据实际情况分配两个或两个以上的作业人员。有时也把工作站称为“作业工位”或“作业工序”。通常用 N 表示装配线上的工作站数,使用下标 k 表示第 k 个工作站, $k = 1, 2, \dots, N$ 。

周期或节拍 (cycle time): 周期或节拍就是装配线上装配一个产品所需要的时间,即相当于从装配线上出来成品的时间间隔。通常用 C 来表示节拍。

作业 (task): 不能或者无需再分的一系列动作叫做作业。例如一个作业可能包括以下一些动作:递过一把扳手,把住它,走到产品前,躬身,拧紧一个螺丝。实际上这个作业是不考虑再分的。因此这项作业不必要分配给两名作业者去做。如果装配一个产品的所有作业有 n 个,记所有的装配作业构成的集合为 $V = \{1, 2, \dots, n\}$,用 $i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 个作业元素。

优先图 (precedence diagram): 执行作业先后顺序的一种直观表示法。装配线的平衡问题变得很复杂,原因就在于产品设计和产品工艺技术决定的各项作业的先后关系。

装配作业之间的这种先后关系决定了各项作业在生产和装配的顺序。直观上,优先图通常以包含圆圈和箭线的有向图来表示。其中,圆圈表示作业,圆圈上面的数字表示该作业时间,圆圈之间画有箭头,表示这些作业之间有先后关系,无箭头连接的表示无先后关系。

一个优先图的例子如图 1.7 所示, 图中圆圈上方的数字代表相应的作业元素时间。

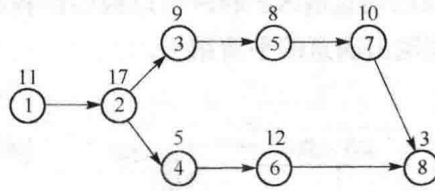


图 1.7 一个优先图的例子

数学上可以基于一个网络向量来表示装配线上的优先关系。使用 $G = (V, P, t)$ 三个元素来表示装配线的优先关系, 其中 V 表示装配作业的集合, P 表示装配作业的优先关系, t 表示装配作业的时间。

实际上, 如果作业 i 必须在作业 j 之前完成, 称作业 i 是作业 j 的先行作业, 作业 j 是作业 i 的后续作业。数学上表示成一个数对或者一个向量 (i, j) , 也可以记为 $i < j$ 。

如果 $i < j$, 当作业 i 与作业 j 相邻时, 称作业 j 为作业 i 的直接后续作业, 作业 i 为作业 j 的直接先行作业; 当作业 i 与作业 j 不相邻时, 则称作业 j 为作业 i 的间接后续作业, 作业 j 为作业 i 的间接先行作业。显然, 关系 “ $<$ ” 具有传递性, 即

如果 $i < j$, 且 $j < k$, 则有 $i < k$ 。

记作业 i 的所有后续作业(包含直接与间接后续)的集合为 $Fell_i^*$, 所有直接后续作业的集合为 $Fell_j$ 。

记作业 i 的所有先行作业(包含直接与间接先行)的集合为 $Prec_i^*$, 所有直接先行作业的集合为 $Prec_i$ 。

优先关系矩阵(precedence matrix): 将装配作业之间的优先关系用矩阵的形式表示出来, 就称为优先关系矩阵。一般地包含 n 个作业的优先关系矩阵是一个 $n \times n$ 的方阵。

对于装配线上含有 n 个作业元素的产品, 它的优先关系矩阵为 $n \times n$ 方阵 P 。

$$P = (p_{ij})_{n \times n}$$

其中优先关系矩阵的元素 $p_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$ 取决于第 i 个作业元素与第 j 个作业元素的优先关系, 即

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果作业元素 } i \text{ 是作业元素 } j \text{ 的先行元素} \\ 0, & \text{如果作业元素 } i \text{ 不是作业元素 } j \text{ 的先行元素} \end{cases}$$

一个优先关系矩阵的例子:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$