

双边装配线 平衡算法及其应用

胡小锋 金 烨 著



科学出版社

双边装配线平衡算法及其应用

胡小锋 金 烨 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以新型的双边装配线为对象,结合装载机和发动机等装配线规划的实例,论述了双边装配线平衡问题的算法理论。全书共分为6章,主要包括:双边装配线平衡的启发式规则、遗传算法、分支定界算法、基于分解策略的双边装配线平衡算法和基于仿真的双边装配线平衡方法研究等。

本书可作为机械制造、工业工程和管理科学等专业的研究生及高年级本科生参考教材,也可以作为从事相关领域研究的科研人员和工程技术人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

双边装配线平衡算法及其应用/胡小锋,金烨著. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-043514-9

I. ①双… II. ①胡…②金… III. ①装配(机械)-线平衡-算法-研究
IV. ①TH163

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第040128号

责任编辑:魏如萍 / 责任校对:刘亚琦
责任印制:李 利 / 封面设计:无极书装

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:237 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

装配线是一种高效率的生产方式，广泛应用于发动机、工程机械和汽车等装备制造业。由于此类产品具有零部件数量繁多、体积庞大、结构复杂等特点，致使装配线过长、装配过程中搬运、夹装困难，严重影响装配线的运行效率，增加制造成本，降低产品的竞争力。新型的双边装配线允许在装配线的两侧同时进行装配作业，共用夹具，从而缩短装配线的长度，有效降低搬运和夹装次数。该类装配线造价很高，多达上亿元。因此，如何规划与设计高效、低成本的双边装配线显得尤为重要。装配线平衡是装配线规划和设计的核心。

与单边装配线相比，双边装配线的约束条件和平衡目标增加，使平衡问题变得更加复杂。而且，传统单边装配线平衡方法不再适用，需要研究适合双边装配线特点的平衡方法。近几年来，关于双边装配线平衡问题的研究已受到越来越多的关注，也取得了比较大进展，但离工程实际应用还有较大的差距，有待进一步提高。因此，针对双边装配线平衡问题的研究具有重要的意义与价值。

作者在国家自然科学基金等项目支持下，长期从事双边装配线平衡问题的研究。本书是作者及其科研团队多年研究成果的总结。在内容上，本书主要是将这些年来这一领域内的研究论文系统化，在全书的编排上，主要以某装载机和某发动机的双边装配线为工程背景，围绕双边装配线平衡问题的主要特点，使用不同的方法系统而全面地展开双边装配线平衡问题的研究。主要包括启发式规则、遗传算法、分支定界算法、基于分解策略的双边装配线平衡算法和基于仿真的双边装配线平衡方法研究。这种模块式编排，便于读者有针对性地进行阅读。

本书可供装配线设计与规划、机械制造和工业工程等领域的教学、科研与生产管理人员阅读与参考，也可作为相关专业研究生教学或教材参考书。本书出版，只期抛砖引玉，由于作者水平有限，不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

本书编写过程中，得到了吴尔飞博士、张亚辉博士研究生、杨红光硕士研究生等的帮助，在此一并表示衷心的感谢。此外，本书的完成得到了国家自然科学基金“时空耦合约束下随机装配线再平衡方法研究”（51475303）、国家自然科学基金青年基金“基于自适应分解的多目标大规模双边装配线平衡算法研究”（71001065）、上海市自然科学基金“多目标大规模双边装配线平衡算法研究”（09ZR1414100）、教育部博士点新教师基金“大规模双边装配线平衡的优化算法研究及应用”（200802481112）等基金项目的资助，在此谨致谢忱。

胡小锋

2015年元月于上海交通大学闵行校区

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 装配线的功能与特点	2
1.2 装配线平衡问题	3
1.3 装配线平衡算法	11
1.4 本书的主要内容	19
参考文献	20
第 2 章 双边装配线平衡的启发式规则	25
2.1 双边装配线平衡模型	25
2.2 基于有阶位置权重的启发式算法	27
2.3 基于先序任务数量的启发式算法	29
2.4 快速更新最优分配启发式算法	32
2.5 Hoffmann 算法	36
2.6 应用案例	39
参考文献	59
第 3 章 双边装配线平衡的遗传算法	60
3.1 现有遗传算法的应用及不足	60
3.2 基于序列组合编码的遗传算法	66
3.3 应用案例	74
参考文献	78
第 4 章 双边装配线平衡的分支定界算法	80
4.1 基于任务枚举的分支定界平衡算法	80
4.2 基于工位枚举的分支定界平衡算法	93
参考文献	106
第 5 章 基于分解策略的双边装配线平衡算法	108
5.1 基本概念	108
5.2 算法的执行与改进	112
5.3 应用案例	119
参考文献	133

第 6 章 基于仿真的双边装配线平衡方法研究	134
6.1 双边装配线的仿真建模	134
6.2 基于仿真的随机双边装配线稳定性分析	139
6.3 面向产量波动的发动机双边装配线再平衡	156
参考文献	170
附录 装配线仿真程序代码	173
附录 A 初始化代码	173
附录 B 装配线的仿真运行代码	177
附录 C 仿真数据采集和数据分析代码	180

第1章 绪 论

1913年10月7日,亨利·福特在密执安州海兰帕克的汽车制造厂建成了世界上第一条装配生产线(简称为装配线),当时,所有汽车制造工厂都是装配的汽车固定,工人走动完成装配作业。而在福特公司,则是汽车沿着250英尺($1\text{ft}=3.048\times 10^{-1}\text{m}$)长的装配线慢慢传送过去,工人们站在装配线旁边进行装配作业。这样做的结果就是在不到3小时内,一台汽车就能被制造出来。当时市场对汽车的需求呈几何倍数增长,这样的生产效率使得福特在市场上有了巨大的竞争力,仅在1914年,就生产出了近25万辆“T型”汽车,价格的下降和产量的提升使得福特汽车在世界上打响了品牌,获得了巨额的利润和巨大的影响力。装配线为现代汽车生产打下了扎实的基础,而且随着装配线的不断完善和推广应用,它极大地提升了企业的生产效率,提高了实际产量,优化了人们的生活。

装配线的出现不仅使管理层有了巨大的进步,也为标准化零件的产生提供了实践依据。由于当时大批量生产技术上也已经达到了一定的水平,所以说装配线的实现可谓是水到渠成。随着科学技术的不断发展,人们对装配线的研究与重视程度不断提高,随之带来的是装配线的原理以及实践经验等领域的不断发展。从最初福特公司的单一品种生产线到丰田公司创造的“准时化生产”,以及至今还在发展的柔性装配生产。

近年来,随着世界制造业中心向中国转移,我国制造的汽车、工程机械和发动机等产品在市场上的需求量日益增加。《金融时报》的调查结论称,保守估计,到2020年,中国家用轿车保有量将达到7200万辆。家用轿车将成为轿车乃至整个汽车工业增长最重要的拉动力量。为适应市场需求,提高市场竞争力,企业纷纷采用各种方法:提高产品的生产能力,使生产达到规模效应,从而降低产品生产成本;设计和引进新品种,满足消费者的不同需求,等等。这些都需要新建、改建或扩建装配线。据不完全统计,2007年国内各大汽车新建、改建或扩建各类装配生产线20余条^[1]。

像汽车、装载机等大型产品的生产装配往往采用双边装配线。该类装配线的投资很大,少则几千万元,多则上亿元(目前在建的福州戴姆勒汽车厂NCV2装配线,投资约需2亿元人民币;上海大众为引进Model S车型而对Passart生产线的改造,投入约需7000万元人民币)。因此,如何规划设计一条高效、低成本的装配生产线,正越来越受到人们的关注。

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, 生产装配线规划具有重要的地位。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。

通过研究、设计较优或最优的装配线方案, 可以减少装配线的闲置时间, 提高装配线的生产能力或效率; 可以最大限度地挖掘现有制造资源的生产能力, 满足市场的需要, 避免盲目新建装配线, 减少装配线的重复建设, 等等。这对降低企业的生产成本, 提高企业的竞争力具有重要的意义。

1.1 装配线的功能与特点

1.1.1 装配线的基本特征

在生产制造过程中, 装配线是一种被广泛使用的生产方式。装配线通常由若干个工位以及连接这些工位的传动装置组成, 被加工对象按照一定的工艺路线, 顺序通过装配线的各个工位, 并按照一定的生产速度完成各自的装配作业。

装配线的形式多样, 可分成多种类型。按被加工件在工位中的移动方式, 可分为同步装配线 (paced assembly line) 和异步装配线 (unpaced assembly line); 根据被加工对象的种类, 可分为单一品种装配线 (single-model assembly line)、多品种混批装配线 (multi-model assembly line) 和混合品种装配线 (mixed-model assembly line), 等等。

装配线一般具有以下基本特征^[2]:

(1) 专业化程度较高。在装配线上固定地生产一种或者几种产品, 在每个工位上固定地完成一道或者几道工序。

(2) 生产具有明显的节奏性。被加工(装配)对象在各个工位上按一定的时间间隔投入及产出, 即按节拍进行生产。

(3) 工序过程是封闭的。工位按照工艺顺序排列成链状, 加工对象在工位间做单向移动, 接受连续的加工。

装配线作为流水生产的一种常见方式, 常用于汽车、家电等大批量生产。在组织生产之前, 需要对装配线进行规划设计。装配线平衡是装配线规划设计的一项重要内容, 它是组织连续流水生产的必要条件, 也是缓解生产瓶颈、减少空闲

时间、提高劳动生产率和缩短产品生产周期等的重要方法^[a]。

1.1.2 双边装配线的特点

双边装配线，顾名思义，就是将装配线分成左、右两边，即两个独立的操作区，工人在各自区域内并行、独立地进行装配作业。与传统单边作业的装配线相比，双边装配线具有“能缩短装配线长度”等优点；然而，装配方式的变化（双边装配），也产生了许多附加的约束条件，使得在进行任务分配（平衡）过程中需要考虑更多的影响因素，增加了装配线平衡的复杂性。

与传统单边装配线相比，双边装配线具有诸多优点，包括：

1) 能缩短装配线的长度，从而缩短产品的下线时间

对于给定产品的一组装配任务，如果不考虑任务在装配时的约束（如任务之间的优先顺序关系约束等），理论上，采用双边装配线安排生产将比传统的单边装配线最多可缩短一半的装配线长度。

对于企业来讲，在保证产品生产率的前提下（给定节拍时间），所需的装配线长度越短，意味着车间占地越少，单位面积的利用率越高；而且，装配线长度越短，表示产品在线上停留的时间越短，下线速度越快，等等。这些可以有效地降低企业的生产成本，增强企业对市场的反应力，提高企业的竞争力。

2) 能提高工装、夹具等的利用率，减少设备投资

对于双边装配线来讲，左右两边的工位只需一次夹装，工人们即可同时进行装配作业。因此，与传统单边装配线相比，它不仅可以减少夹具开、关的次数，节省花在夹具装夹上的无效劳动时间，提高工人的劳动生产率；而且，它还将减少夹具的需求数量，减少企业的投入。

另外，在双边装配线中，通过合理的安排与调度，左右两边工位可以共用某些工装设备，这不仅可以提高工装设备的利用率，也将减少企业在设备上的投入。

3) 能减少工人的无效劳动时间，提高工人的劳动生产率，等等

在双边装配线中，工人固定在装配线的一边进行装配作业，他们无需围绕装配体（产品）来回走动，这将减少工人的移动时间，提高工人的劳动生产率。

而且，由于双边装配线中左右两边的工人可方便地进行交流、沟通和协作，因而可以更有效地完成装配作业，以及应付一些突发的情况。因此，与传统单边装配线相比，工人往往具有较高的工作满意度。

1.2 装配线平衡问题

装配线平衡，就是在满足一定的约束条件下（生产工艺约束和节拍时间约束

等), 将一组装配任务尽可能均匀地分配到各个工位上, 追求一个或多个目标的优化。装配线平衡实质上是一种组合优化问题。然而, 与一般的组合优化问题(如装箱问题)不同, 在装配线平衡中任务分配需要满足任务之间的优先顺序约束。因为产品结构和工艺的限制, 任务之间存在一定的先后装配顺序关系, 这种顺序约束关系被称为“优先关系”或“先序关系”(precedence relation)。

一个产品的所有装配任务及其先序关系可构成该产品的“装配优先顺序图”(precedence graph), 如图 1.1 所示。在图中, 一个圆圈表示一个任务; 圆圈内数字表示该任务的编号; 圆圈右上角的数字表示该任务的装配作业时间; 圆圈之间的箭头表示任务之间的优先顺序关系(图 1.1 中, 任务 2、3、4 与 5 都必须等任务 1 完成之后才能被装配)。

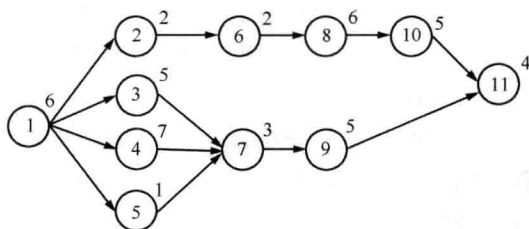


图 1.1 装配优先顺序图

在装配线平衡中, 任务之间的优先顺序关系约束, 使得任务分配变得相对复杂; 而且, 随着问题规模的增加, 任务分配方案的数量会急剧增加, 以至于难以在有限时间内获得平衡的近优解(最优解)。因此, 如何快速有效地实现装配线平衡, 一直备受学术界的关注。

1.2.1 简单装配线平衡问题

根据研究的对象、内容, 以及约束条件等不同, 可将装配线平衡问题分成多种类型。根据 2006 年德国 Friedrich-Schiller 大学教授 Becker 和 Scholl 在 *A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing* 一文中给出的最新分类方法, 将装配线平衡问题划分为两大类: 简单装配线平衡问题(simple assembly line balancing problem, SALBP)和一般装配线平衡问题(general assembly line balancing problem, GALBP)^[4]。

简单装配线平衡问题通常有较为严格的假设^[5]:

- (1) 装配品种单一, 装配工艺确定;
- (2) 装配线的节拍固定, 工件在工位间同步移动;
- (3) 装配任务的作业时间确定, 且与工位无关;
- (4) 除优先顺序约束外, 任务分配无其他约束限制;

(5) 装配线呈直线布置,工人单边作业;

(6) 装配任务可在任何一个工位上完成。

由于在简单装配线平衡问题中,工人单边作业(或视同单边作业),因此,通常又称其为“单边装配线平衡问题”。虽然简单装配线平衡问题的假设条件不符合大多数生产实际情况,但它是研究装配线平衡问题的基础。一般装配线平衡问题则是通过对简单装配线平衡问题中约束条件的细化、松弛等,使平衡问题更符合实际的生产状况。一般装配线平衡问题包括双边装配线平衡、U形装配线平衡等。

根据优化目标的不同,简单装配生产线平衡问题一般又分成两类^[6]:

(1) 第一类平衡问题(SALBP-1):给定节拍时间,求最短装配线长度;

(2) 第二类平衡问题(SALBP-2):给定装配线长度,求最小化节拍时间。

SALBP-1问题一般出现在装配线的设计阶段。在大规模生产方式下,装配线设计主要考虑的是生产能力要满足市场需求,减少系统投资和追求装配线的高效率。在预期的生产目标下(给定节拍时间),所需装配线越短(即工位数量越少)就意味可以减少设备和人员的投入,提高厂房的利用率及单位面积的产出,等等,这对于动辄需要数百万元至上千万元投入的装配线而言,具有重要的意义。

SALBP-2问题一般出现在装配线的运行阶段。由于设备与人员基本固定,以及存在“学习效应”,装配线上工人的操作技能会越来越熟练,装配作业时间也越来越短;而且,随着技术发展,产品结构和工艺也可能发生变化,这均需要对已有装配线进行调整、优化,提高工人的劳动生产率、最大化装配线的产出,等等。另外,在装配线设计阶段,场地或生产设备的限制,使得装配线长度相对固定,而企业对产品产量、生产时间等有相对较大弹性时,该设计问题亦可转化为第二类平衡问题来处理。实际上,这两类平衡问题是相通的。

如不考虑装配任务之间的优先顺序约束时,简单装配线平衡问题可以退化为装箱问题(bin packing problem)。装箱问题属于公认的NP难类组合优化问题,因此简单装配线平衡问题也一定属于NP难类问题^[6]。

随着问题规模的增加,NP难类问题的组合数目将会急剧增加,计算时间呈指数方式增长,从而使寻优过程变得十分复杂。对于简单装配线平衡问题而言,影响其平衡复杂性的因素很多,主要包括以下几个方面^[7]:

1) 装配任务的数量

简单装配线平衡问题在某种程度上可以看成是装配任务的排列组合问题,如果不考虑任务之间的优先顺序约束,对于具有 n 个装配作业任务的装配线而言,任务的组合排列数就有 $n!$ 种。因此,随着装配任务数量的增加,组合数量将呈

指数方式增长, 这使平衡寻优过程变得十分复杂。

2) 任务作业时间的分布

对一组装配任务来讲, 如果它们作业时间的分布比较集中, 而且数值上比较接近节拍时间, 那么就很难将它们组合分配到装配线上。对于装配线而言, 各工位上将存在大量的空闲时间, 装配线平衡的效果较差; 反之, 如果任务作业时间的分布比较均匀, 则相对容易组合, 获得平衡的较优(最优)解。

3) 先序关系约束的构成

对于平衡问题来讲, 较多先序关系约束, 一方面可以限制可行任务排列组合的数量, 减少平衡的复杂性; 但另一方面也会导致发现最优解的过程变得更为复杂。另外, 产品装配先序关系图的结构也会影响平衡的复杂性。在先序关系图中, 源节点越多, 任务节点的分支越多, 那么在枚举过程中可选任务将越多, 任务的分配决策将变得越烦琐, 平衡变得越复杂。

4) 工位数量

工位数量对计算复杂性的影响也具有两面性。当工位数量较少时, 对每个工位而言, 工位上分配的任务数量将增加, 相应地任务组合的数量也将增加, 平衡变得复杂。然而, 当工位数量较少时, 每个任务可供枚举的工位数量将减少, 目标函数值接近最优的可能性更大。

1.2.2 一般装配线平衡问题

有关简单装配线平衡问题的研究已进行大半个世纪, 并取得了许多成果。然而在实际生产应用中, 这还稍显不足。因为简单装配线平衡问题的研究有着严格的假设条件, 而这与实际的生产条件之间存在一定差异。而且, 随着生产技术的发展, 装配线的布局方式、生产的品种数量等均有所变化, 这些都需要研究人员进行进一步的研究。根据 Becker 和 Scholl 的分类准则^[4], 把这些更接近实际生产环境下的装配线平衡问题, 统称为一般装配线平衡问题。

一般装配线平衡问题, 实际上是对简单装配线平衡问题中的假设条件进行松弛和细化, 使之更符合实际的生产状况, 具体表现在以下几个方面:

1. 装配线布局、作业方式的变化

传统的装配线都是直线形, 工人单边作业。而随着社会的发展, 市场的需求的变化, 新的装配线布局、作业方式(U形、双边装配线等)不断被采用, 产生新的装配线平衡问题。

1) U形装配线

随着精益生产方式的推广, 越来越多的装配线采用U形布局。与传统单边

作业的直线形装配线相比, U形装配线更具柔性。因为对于U形线来讲, 装配线入口和出口在同一位置, 因此, 其可按准时化的思想, 按后工序的领取数量进行生产。

与传统单边装配线相比, U形线作业的分工相对较粗, 工人往往要完成相对多的装配作业, 因而他们大都是多面手。这有效地减轻了传统装配线上因工作单调、枯燥无味, 而产生心理疲劳、工作效率低等问题。而且, 这也使得他们在装配线发生故障或者产品质量出现问题时, 能够发挥团队精神去解决问题, 提高了劳动生产率和产品质量。

另外, U形装配线上的工位相距较近, 工位之间的联系简单, 简化了物料的运输, 降低了库存, 使产品计划和过程控制变得相对容易。因而, U形装配线平衡问题的研究得到越来越多研究人员的关注^[8~10]。

2) 双边装配线

对于汽车、装载机等产品来讲, 装配体的体积一般都比较大, 采用传统的单边装配线进行装配时, 工人需围绕产品来回走动, 产生大量无效的行走时间。而且, 该类产品的装配作业任务往往比较多, 所需装配线的长度也较长, 需占用大量的厂房空间。

面对日益上涨的原材料、劳动力成本等压力, 制造业企业采取各种手段来降低生产成本, 提高劳动生产率。针对汽车、装载机等产品生产装配来讲, 由于此类产品的体积较大, 能容纳多人同时进行装配作业, 因此, 不少企业纷纷采用双边装配线来安排生产, 即在装配线的左右两边各自安排一定数量的工人, 左右两边工人并行、独立地进行装配作业。

与传统单边装配线平衡相比, 双边装配线具有缩短装配线的长度, 从而加快产品的下线速度, 减少工人的无效行走时间, 提高工人的生产率等优点, 因此, 有关双边装配线平衡问题的研究也吸引着越来越多研究人员的目光。

2. 装配品种数量的变化

由于市场需求的细化, 以及用户需求的个性化, 难以再用单一、一成不变的产品来面对市场, 而是需要根据市场的需求, 提供多种不同品种的产品。为避免重复建设生产线, 减少生产成本, 人们尝试在同一条装配线上生产多个不同品种的产品, 从而产生了多品种混合装配线平衡问题^[11~14]。

3. 装配作业时间的变化

在手工装配线中, 由于任务的复杂性、工人技术水平, 以及工人走动速度等不同, 对于同一装配任务所需的操作时间不是确定、唯一的, 而是符合某种分布

状态,如正态分布等。由于装配任务作业时间的不确定性,产生了随机装配线平衡问题。与简单装配线平衡问题相比,它更具挑战性,也吸引了许多研究人员的关注^[15~17]。

4. 任务分配区域的变化等

在简单装配线平衡中,在满足任务之间优先顺序约束的前提下,假定任务可以被分配到任何一个工位。然而在实际生产中,任务的分配受到众多因素的影响。有些任务需要特殊的工装设备或对工人的操作技术有一定要求,因此在分配时尽可能分配在同一工位(或同一区域)内;有些任务由于工艺上的要求(像加燃油与安装电火花),必须分配到不同工位(或区域)中。因此,产生了带有“位置”约束的装配线平衡问题^[18~21]。

1.2.3 双边装配线平衡问题

与传统单边装配线平衡一样,双边装配线中任务的分配也要满足“优先顺序关系约束”、“不可拆分约束”等原则。即对于任务(i)来讲,只有当它的前序任务全部被安排后,它才可以被装配;而且,它也必须作为一个“整体”被分配到某一工位中,而不能被拆分安排到多个工位。

此外,由于装配形式的变化,在双边装配线中任务的安排还要满足自身特有的一些约束条件,包括:

1. 任务的“操作方位”约束

双边装配线往往应用于大型产品的装配,如汽车、装载机等。这些产品的装配作业空间较大,可以使左右两边的工人同时、并行地进行装配作业。然而,也正是由于大型的装配体积给工人的装配作业区域带来一定的约束。对于装配线左边的工人来讲,他难以处理装配体右边区域内的装配任务;而对于装配线右边的工人来讲,他也不便处理装配体左边的装配任务。只有当装配任务位于装配体的中间部位时,左右两边工人才都可以装配。像这种任务只能由左边、右边的工人,或者左右两边工人均可装配的操作属性,称为任务的“操作方位”约束。

以某装载机的装配为例,油箱、空气滤清器和工具箱安装在机体的左边,要由左边的工人来完成;电池、空气罐和消音器等安装在机体的右边,需由右边的工人来完成;而像传动轴等安装在机体的中间位置,左右两边的工人均可装配。

因此,对于双边装配线而言,并不是所有的任务都可以分配到装配线的任意一边,而是需要根据任务的“操作方位”约束,将任务分配到装配线左边或是右边相应的工位上。

2. “序列相关”的完成时间约束

单、双边装配线的一个主要的区别就是,在双边装配线中,左右两边的工人是同时、并行地进行装配作业。左右双边并行作业提高了装配线的生产效率,然而也正是因为并行作业,极大地增加了平衡的复杂性。

在双边装配线中,存在特有的“等待”时间。当左边的工人 A 完成任务 a 后,准备开始下一个任务 b 的装配时,有时会发现不能马上开始装配作业,而需等待一段时间后才能开始,因为任务 b 的前序任务 c (安排到装配线的右边)还没有完成装配。根据任务之间的优先顺序关系约束,工人 A 必须要等右边的工人 B 完成任务 c 的装配后,才能开始任务 b 的装配。

这种在双边并行作业模式下,左右两边工位上的任务通过优先顺序关系约束相互关联、相互制约,将产生无效的“等待”时间。而且,“等待”时间的产生与否、“等待”时间的大小和左右工位上任务的装配作业顺序密切相关(通过调整工人 A 、 B 的装配作业顺序,如延迟任务 b 开始装配的时间,或是提前任务 c 开始装配的时间,可以减少“等待”时间甚至避免“等待”时间的产生)。因此,在双边装配线平衡中,任务的分配是“序列相关”的,要考虑包含“等待时间”在内的“序列相关”的完成时间约束(所有任务需在节拍时间之内完成)。

单边装配线平衡问题属于 NP 难类组合优化问题^[22],随着问题规模的增加,可行解的数量将呈指数方式增加(组合爆炸),使得平衡寻优过程变得十分困难。双边装配线是单边装配线一般化,而单边装配线是双边装配线的一种特例。因此,双边装配线平衡问题也属于 NP 难类组合优化问题^[23]。而且,与单边装配线平衡相比,双边装配线平衡要更加复杂。因为:

(1) 在同等情况下,采用双边装配线组织安排生产将比采用单边装配线进行装配拥有更多的任务分配方案(平衡解),因此,从中寻找近优解(或最优解)将变得更加困难。

在双边装配线平衡中,除了那些必须分配到装配左边(L形任务)或右边的任务(R形任务)之外,还有一些任务既可以分配到装配线左边,又可以安排到装配线的右边(这些任务被称为E形任务)。E形任务的存在,使得任务的安排具有更多的可选性,因而将产生更多的平衡方案。在双边装配线平衡中,E形任务的数量越多,所产生的可行任务分配方案也越丰富,寻优也越复杂。

另外,在单边装配线平衡中,在满足任务之间优先顺序关系的前提下,工人可以按任意顺序进行装配作业,而不影响整个工位的完成时间。这也就是说,对于单边装配线平衡来讲,平衡与工位上任务操作顺序无关。因此,只要工位上分配的任务内容相同,不管它们的装配顺序是否一致,完成时间都是相同的,因此

这些分配方案都是等价的。基于这个特性，可略去大量装配内容一致，但装配顺序不同的任务分配方案的搜索，减少寻优时搜索的空间，减轻搜索的压力。

然而，在双边装配线平衡中，由于装配线左右两边工位上的任务将通过优先顺序关系相互关联、相互制约，平衡的结果与工位上任务的装配顺序紧密相关，即平衡是“序列相关”的。因而，就算工位上装配任务的内容是相同的，但是装配顺序不同，也需将它们视为不同的分配方案，一一进行搜索、判断。

因此，同等条件下，采用双边装配线组织安排生产，将拥有更多的任务分配方案，相应地，从中寻找近优解（或最优解）也将变得更加复杂。

(2) 在双边装配线平衡中，任务分配时的约束条件变多了，而且，关于约束条件的判断也更难了，这使得平衡变得更加复杂。

在单边装配线平衡中，任务的分配过程相对简单。根据任务的优先顺序关系约束，依次将无前序或前序任务都已被安排的任务分配到装配线的各个工位上，当工位上所分配任务的作业时间总和要超过节拍时间时，关闭当前工位，开启下一个工位，继续分配直至所有的任务都完成分配。

在双边装配线平衡中，任务的分配变得相对复杂。因为，任务的分配不仅要满足任务之间的优先顺序关系约束，而且，还要满足“操作方位”约束。另外，由于装配线左右两边工位上分配的任务可通过优先顺序关系相互作用、相互制约产生“等待”时间，而“等待”时间的大小和任务的装配顺序又紧密相关。因此，平衡需要考虑包含“等待时间”在内的“序列相关”的完成时间约束。这就不能像单边装配线平衡中，根据简单地累加工位上所分配任务的作业时间大小来判断是否满足节拍时间约束。这使得双边装配线平衡过程变得更加复杂。

(3) 在双边装配线平衡中，左右两边的工位可以全部启用，也可以根据需要只启用一边的工位，保持另一边工位为空。这给生产安排提供了一定的柔性，但同时也增加了装配线平衡的复杂性。

在双边装配线平衡中，通过合理地安排任务，有时可以减少启用工位的数量，而不增加装配线的长度（即装配线上某些位置只开启一边的工位）。同等条件下，装配上启用工位数量越少，意味着所需的装配工人也越少，相关的工装设备等投入也将减少，这些都有助于节省企业的生产成本，提高企业的竞争力。

因此，在双边装配线平衡中，有时并不需要全部启用装配线左右两边的工位，在某些位置只需开启装配线一边的工位。这种可以全部或部分开启装配线两边工位的特性，使得在平衡时的任务分配具有更多的可选性，因而将产生更多的平衡方案，也对寻优造成更大的压力。

1.3 装配线平衡算法

1.3.1 单边装配线平衡算法

自 20 世纪 50 年代 Salveson^[24] 首次提出简单装配线平衡问题以来, 研究人员提出大量的平衡算法, 概括起来分为两个方面^[22]: 一种是从问题本质出发, 追求平衡的最优解; 另一种是从生产实际出发, 为大规模问题快速寻找近优解 (或最优解)。前者对应的平衡算法为精确求解算法; 而后者则属于非精确求解算法 (又称启发式算法)。对于每一类算法, 又有多种平衡技术方法, 大致可概括如下 (图 1.2)。

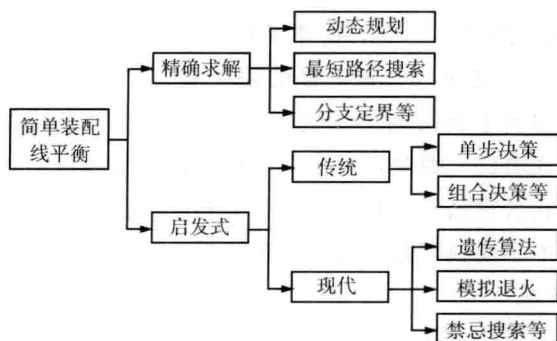


图 1.2 简单装配线平衡算法类型

1. 精确求解算法

在精确求解方面, 研究主要集中在动态规划方法、最短路径搜索与分支定界方法等几个方面。

1) 动态规划方法

1956 年, Jackson 首次运用动态规划方法来求解简单装配线第一类平衡问题^[13]。从装配线的第一个工位出发, 找出当前工位所有可能满足优先顺序关系约束、节拍时间约束且具有最大任务集的工位组合; 然后在给定分配的基础上, 继续枚举下一个工位的所有可能组合, 依此类推, 直至得到所有可行的分配方案, 从中找到平衡问题的最优解 (通过动态规划方法得到的最优解可能不止一个)。Jackson 从数学上证明了基于最大任务集规则的搜索, 一定可以得到平衡的最优解。为减少枚举搜索的空间, Jackson 提出两种支配规则来判断当前搜索的分支是否可能成为问题的最优解, 及时停止不能达到最优解分支的进一步搜索。