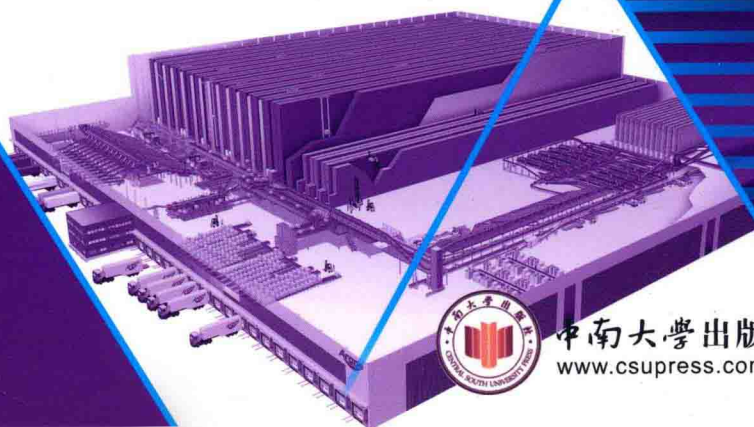


货物装载布局 模型与算法

雷定猷 朱向 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

国家自然科学基金资助项目 (71371193)
湖南省教育厅优秀青年资助项目 (16B134)
中南大学教育基金会资助出版
熊辉女士资助出版

货物装载布局 模型与算法

雷定猷 朱向 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目 (C I P) 数据

货物装载布局模型与算法 / 雷定猷, 朱向著. --长沙: 中南大学出版社, 2016. 12

ISBN 978 - 7 - 5487 - 2647 - 0

I. ①货… II. ①雷… ②朱… III. ①货物运输—装载—布局
IV. ①F502

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 296136 号

货物装载布局模型与算法

HUOWU ZHUANGZAI BUJU MOXING YU SUANFA

雷定猷 朱 向 著

☐责任编辑 胡小锋

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址: 长沙市麓山南路

邮编: 410083

发行科电话: 0731 - 88876770

传真: 0731 - 88710482

☐印 装 湖南众鑫印务有限公司

☐开 本 710 × 1000 1/16 ☐印张 8.75 ☐字数 176 千字 ☐插页 2

☐版 次 2016 年 12 月第 1 版 ☐印次 2016 年 12 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 2647 - 0

☐定 价 35.00 元

图书出现印装问题, 请与经销商调换

作者简介

Introduction

雷定猷 中南大学交通运输工程学院教授，博士，博士生导师，中南大学综合交通系统研究所所长。从 1993 年开始一直从事交通运输组织的教学和科研工作。在国内外发表学术论文 70 余篇，国际三大检索论文 40 余篇。主持了国家自然科学基金项目“铁路超限超重货物运输组织理论研究”和“陆运货物装载布局理论与方法研究”及系列超限超重货物运输和货物装载布局的铁道部(铁路总公司)重点课题；主持开发了站段级、铁路局级和铁道部级三个层次的超限超重货物运输决策软件和货物装载加固决策软件。软件目前在全路使用。

朱向 湖南女子学院经济管理系讲师，博士。从 2006 年开始一直从事物流及交通运输领域教学和科研工作。在国内外发表学术论文 20 余篇，其中 EI/SCI 检索 5 篇，研究成果曾获 2012 年全国博士学术论坛(高速列车安全与运营管理)优秀论文等奖项。参与了 2 项国家自然科学基金项目，主持湖南省教育厅优秀青年项目“定制条件下物流系统集成装载优化研究”。

内容简介

Introduction

本书将货物重量在容器中的均衡分布作为装载优化布局的前提,以装载空间与能力最大化为优化目标,建立平衡装载布局问题的数学模型,设计相应的布局方法。重点探讨一车多件货物平衡装载、多车多件货物平衡装载、带轴重约束平衡装载、带集重约束平衡装载和多阶段带时间约束装载布局问题。

前 言

装载布局问题广泛存在于工业领域,涉及到工业生产的各个方面,比如加工行业的板材型材下料、印刷行业的排版、现实生活中的包装、物品的整理和工厂设施的规划等。在实际应用中,装载布局问题的解决效果影响最直接的领域是物流运输行业。

随着我国市场经济的发展,物流活动越来越显示出它的重要性,物流技术的应用和发展受到越来越多的重视。如何提高物流效率、降低物流成本成为一个迫切需解决的实际问题。装载布局作为物流配送过程中的一个关键性技术,对提高配送业务的自动化水平、提高货物装载的优化程度、提高配送业务的工作效率和规范业务流程都有重要意义。

货物装载布局是货运业务的基础工作,也是物流的关键环节,现代物流发展对货物装载质量和效率提出了更高的要求。中小型成件货物属于装运工作中常见且运量较大的一类货物,研究其在各种运输工具中合理布局,对实现安全高效装载、提升货运业的效益与效率具有十分重要的意义。货物装载布局问题包括货物、运输工具、装载约束和目标函数等要素。从理论上讲,该问题隶属于数学意义上的布局问题,布局问题属于典型的 NP 完备问题,并且不同研究领域和不同行业的布局问题特征、约束因子及追求目标不尽相同。即便同是运输行业,不同运输方式的布局特征、约束因子及追求目标也不尽相同。本书将货物重量在容器中的均衡分布作为货物装载优化布局的前提,根据不同运输方式、货物装运条件和平衡装载的要求,以装载空间与承载能力最大化为目标,建立平衡装载布局问题的数学模型;根据装载问题特点及平衡约束,设计相应的布局方法。

第1章 货物装载布局概论。介绍在不同的划分基础上的基本装载布局分类,描述装载布局问题的现行解法,并根据两种情况分别论述装载布局的模型与算法。

第2章 货物装载布局重量因素分析。从重心约束、轴重约束、集重约束、多车平衡装载、平衡装载因素间关系五个方面对货物装载布局重量因素进行分析,描述每一方面的原理、标准、成因或特征等,并针对这一问题提出了计算方法或处理办法等。

第3章 一车多件货物平衡装载布局模型与算法。通过集重和重心两个方

面对布局约束进行讨论,构建一车多件货物装载布局模型,引入长方体装载布局函数,提出带已布物群约束的布局算法,构建中心骨架,最终呈现一车多件货物装载布局算法。

第4章 多车多件货物平衡装载布局模型与算法。建立多车多件货物装载布局模型,对装载货物进行合理划分,提出多车多件货物装载布局算法,并引入实例论证算法的可行性。

第5章 带轴重约束货物装载布局模型与算法。对单箱带轴重约束平衡装载布局问题进行描述并建立数学模型,提出相应的求解算法,并引入算例验证算法的可行性。

第6章 带集重约束货物装载布局模型与算法。描述单箱带集重约束平衡布局问题,并建立相应的数学模型,提出该问题的求解算法,并引入算例验证算法的可行性。

第7章 多阶段带时间约束货物装载布局模型与算法。对多阶段带时间约束平衡装载布局问题进行描述,并建立数学模型,提出相应的求解算法,并引入算例验证算法的可行性。

本书出版之际,作者感谢国家自然科学基金委员会。限于作者水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

雷定猷 朱向

2016年10月

目 录

第 1 章 货物装载布局概论	(1)
1.1 货物装载布局简介	(1)
1.2 货物装载布局分类	(2)
1.3 货物装载布局方法	(3)
1.3.1 单容器装载布局方法	(4)
1.3.2 多容器装载布局方法	(12)
1.3.3 本章小结	(15)
第 2 章 货物装载布局重量因素分析	(16)
2.1 重心约束分析	(16)
2.1.1 装载重心平衡要求	(17)
2.1.2 装载重心位置计算	(18)
2.2 轴重约束分析	(21)
2.2.1 轴重限制标准	(21)
2.2.2 轴重上限计算	(23)
2.3 集重约束分析	(26)
2.3.1 集重成因分析	(26)
2.3.2 避免集重方法分析	(27)
2.4 多车平衡装载分析	(36)
2.4.1 多车平衡装载特征分析	(36)
2.4.2 多车装载问题处理方法	(36)
2.5 装载布局重量因素间关系分析	(39)
2.6 本章小结	(41)
第 3 章 一车多件货物平衡装载布局模型与算法	(42)
3.1 问题描述	(42)
3.1.1 问题描述	(42)
3.1.2 数学模型	(43)

3.2	长方体装载布局函数	(45)
3.2.1	数据结构	(46)
3.2.2	定位规则	(48)
3.3	带已布物群约束的布局	(51)
3.3.1	已布物群约束布局	(51)
3.3.2	剩余空间的合并	(52)
3.3.3	已布物群约束的布局算法	(52)
3.4	中心骨架	(54)
3.4.1	s 中心骨架	(54)
3.4.2	核心集合	(55)
3.4.3	相似性	(56)
3.4.4	中心骨架移动	(57)
3.5	一车多件货物装载布局算法	(60)
3.6	算例	(61)
3.7	本章小结	(66)
第4章	多车多件货物平衡装载布局模型与算法	(67)
4.1	问题描述	(67)
4.1.1	问题描述	(67)
4.1.2	数学模型	(68)
4.2	货物划分	(70)
4.3	多车多件货物装载布局算法	(72)
4.4	算例	(74)
4.5	本章小结	(79)
第5章	带轴重约束货物装载布局模型与算法	(80)
5.1	问题描述	(80)
5.1.1	问题描述	(80)
5.1.2	数学模型	(81)
5.2	求解算法	(83)
5.2.1	布局方案构造	(84)
5.2.2	可行性分析及重心调整	(87)
5.2.3	解的改进	(91)
5.3	算例	(92)

5.4 本章小结	(97)
第6章 带集重约束货物装载布局模型与算法	(98)
6.1 问题描述	(98)
6.1.1 问题描述	(98)
6.1.2 数学模型	(99)
6.2 求解算法	(100)
6.2.1 塔集生成	(101)
6.2.2 塔基布局	(102)
6.2.3 解的优化	(106)
6.3 算例	(108)
6.4 本章小结	(112)
第7章 多阶段带时间约束货物装载布局模型与算法	(113)
7.1 问题描述	(114)
7.1.1 问题描述	(114)
7.1.2 数学模型	(115)
7.2 求解算法	(119)
7.2.1 初始解生成	(119)
7.2.2 解的改进	(123)
7.3 算例	(124)
7.4 本章小结	(128)
参考文献	(129)

第1章 货物装载布局概论

1.1 货物装载布局简介

货物按形态可分为成件货物和不成件货物。我们采用铁路零担托运成件货物标准,即单件(或经过包装或捆绑的多件货物)体积大于或等于 0.02 m^3 。我们把成件货物再分为大件货物和小件货物两类。大件货物主要指长大货物^[1],长大货物以外的成件货物统称为小件货物。不成件货物包括液态货物和干散货物等,这类货物由于它的自流动性一般可自适应容器的形状,它的装载简单,一般不需要优化。本书主要研究小件货物的装载布局问题。

装载布局问题是一个具有复杂约束条件的组合优化问题,是一个典型的NP难问题。所谓组合优化,是指在离散的、有限的数学结构上,寻找一个满足给定条件,并使其目标函数值达到最值的解。一般来说,组合优化问题通常带有大量的局部极值点,往往是不可微的、不连续的、多维的、有约束条件的NP完全问题。

货物装载布局问题归属于经典三维装箱(three dimensional bin packing problem, TDBPP)问题的范畴,将具有相同或不同形状和尺寸的货物放入有一定规格与载重量限定的容器中,以实现最大化利用容器装载能力或获得某种最佳效益的目的。现实中的货物装载布局通常还需要满足各种约束条件,以满足装运实践的要求。

(1) 方向约束:在装载布局过程中,货物的摆放方向是受到约束的。例如,某些货物不能够倒置等。一般情况下,货物的方向约束有三种:任意旋转、水平旋转、不能旋转。

(2) 货物承载能力约束:货物的承载能力是由货物本身的性质和包装盒的

结构决定的。例如,某些货物上方不可以摆放其他货物,所以要考虑装载层数的限制,以及装载次序的限制。

(3) 稳定性约束:承载工具的稳定性在实际装载过程中是非常重要的,这关系着运输过程中的安全。一般,货物的重心应在承载工具的几何中心附近。由于货物相互叠放和不同放置的组合,所以只考虑承载工具整体的稳定性是不够的,还需要考虑个别叠放的货物的承重情况。同时将同类货物相邻放置可以减少货物之间的间隙从而提高稳定性。另外对于货物之间的空隙可以用泡沫塑料填充或是捆绑到一起固定货物。

(4) 重量分布约束:针对大密度货物的装载,要求货物的重量在装载空间或平面内均衡分布,以保持装载重心平衡及防止负荷应力集中,从而保证货物及运载工具的安全。

(5) 装载顺序约束:考虑不同的送货目的地、货物保鲜和相互间影响等情况,货物的装载有先后次序要求或在空间内的布局保持一定区隔,从而形成相应带装载顺序约束的特定装载问题。

1.2 货物装载布局分类

装载布局问题有许多不同的分类方法:按照容器的空间维度,装载布局问题可以划分为一维、二维和三维问题,这三种问题对应着不同的应用。根据目标的不同,三维装载布局问题还可分成以下几类:箱柜装载问题(简称 3D - BPP),是把所有给定的货物装入给定的容器中并使容器占用数量最少的问题;容器装载问题(3D - CPP),是把所有给定的货物按约束条件合理装入一个不限尺寸的容器中并使容器体积最小的问题;背包装载问题(简称 3D - KLP)是将给定价值的货物尽可能多地装入一个体积固定的容器的问题。而箱柜类装载根据装载所使用的容器不同又可细分为单元装箱问题(bin packing problem)、集装箱装载问题(container loading problem)和托盘装载问题(pallet loading problem)等。托盘(pallet)是一种只有底面没有四周墙壁和顶面的托盘,根据待装物体尺寸是相同还是不同,可以分为生产商托盘装载和批发商托盘装载。

按照待装货物的形状划分,装载布局问题又可以划分为规则物体装载布局问题和不规则物体装载布局问题。迄今为止,研究比较多的是规则物体的装载布局问题,而对于不规则物体装载布局问题,主要采用启发式算法来解决。

按照装载过程划分, 装载布局问题还可以划分为离线装载布局问题、在线装载布局问题和半在线装载布局问题。如果在货物装载之前, 预先知道待装货物的所有信息, 就可以按照某种装载布局算法进行统一处理, 即为离线装载布局问题; 在线装载布局问题和半在线装载布局问题即在货物装载之前, 不知道后继待装货物的任何信息, 完全按照货物到达的顺序进行装载, 但在装载当前货物时, 半在线算法可以对已装入容器的货物进行一定的调整。

按照使用容器数量划分, 装载布局问题还可以分为单容器问题 and 多容器问题。单容器装载布局的目的都是为了使所利用的容器的综合利用率最大化, 而多容器问题虽然不受容器的数量限制, 但是依旧需要尽量减少其使用数量。

按照待装载货物类型划分, 装载布局问题还可以划分为单一货物装载问题、弱异类问题和强异类问题。如果只有一种装载货物即为单一货物问题; 如果待装载货物的种类只有少数几种, 并且每类货物都有固定的数量, 那么这一类问题属于弱异类问题; 如果待装载货物的种类较多时, 这一问题属于强异类问题。

按照装载过程中是否含有惩罚函数, 装载布局问题还可以划分为带拒绝装载布局问题和不带拒绝装载布局问题。在带拒绝装载布局问题中, 惩罚函数的主要目的是通过让那些在空间无对应可行解的货物的适应度函数值降低, 从而降低该个体进化到下一代的概率; 而不带拒绝装载布局问题不受惩罚函数的约束。

1.3 货物装载布局方法

由于不同类别货物的尺寸和质量存在差异, 且所涉及约束多种多样, 问题的组合空间庞大, 属于典型的 NP 难问题, 相关求解方法大多是针对特定装载技术条件及目标约束而设计的。目前该领域研究成果更多是根据装载使用容器的数量来划分的, 即分为单容器装载问题 and 多容器装载问题。其中, 研究数量更多的是单容器问题, 一方面是因为单容器装载组合空间相对较小, 算法设计相对简单些, 另一方面单容器装载的算法可作为多容器装载问题算法的基础。但多容器问题有其自身特点, 求解的思路与过程也有不一样的地方。下面结合目前的主流研究, 分别对单容器和多容器装载布局问题的求解方法进行介绍。

1.3.1 单容器装载布局方法

单容器装载布局问题的情形为：给定宽度为 W ，长为 L ，高为 H 的矩形容器和 n 种矩形货物，第 i 种货物的属性包括三维尺寸 l_i 、 w_i 、 h_i ，重量 d_i 和其他属性，同种货物有 m_i 个 ($i = 1, 2, \dots, n$)，同种货物所有属性相同；要求制定货物在容器内的布局方案，在满足一定约束的情况下，实现放入货物的总价值最大。总价值包括总体积、总重量或运费等指标，一般多以容器的空间利用率最大为目标。布局约束除了不超出容器边界、互不重叠等基本要求外，还包括载重量、稳定性、重心平衡及承载力等现实约束条件。

人类在长期从事各种特殊活动中积累了大量有用的实践经验，可将其转化为经验规则并融入优化搜索机制，从而形成针对特定问题的启发式算法 (heuristic algorithm, HA)。启发式算法可追溯到 Simon 的有限合理性原理 (bounded rationality)，在随后近二十年的研究中，它作为一个重要的科研领域取得较大进展，在各不同的优化领域获得广泛应用。迄今为止，启发式算法存在两种定义，一种将其定义为一种直观或经验的构造算法，另一种将其定义为一种技术，二者的共同点是寻找在可接受的范围内的可行解，存在的问题是无法判断所得解与最优解的差距。

从国内外的相关研究中可看出，启发式方法已成为求解装载布局这一 NP 难问题的有效方法。目前研究者多采用构造型启发式算法与邻域搜索算法相结合的方式求解此问题。其中构造型算法多借助人類在砌砖、砌墙、货物堆放及下围棋等方面的实践经验，求解方法主要包括砌墙法、块排列法、极大空间法、堆构造法、穴度法等。在此基础上，结合遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法、树搜索算法、随机搜索算法、变结构邻域搜索算法等以进行邻域搜索。下面归纳货物装载布局中常用的启发式构造法，包括定序定位规则、空间划分与合并、装载单元构造等。

1.3.1.1 定序定位规则

将启发式策略加入到算法求解过程当中，需要考虑应用适合的启发式定位和定序规则，确定货物装载的先后顺序及其在空间内布局的位置，否则将影响求解的效率和最终装填方案的质量。

1. 定序规则

装箱时,各待装货物在操作中的重要程度是不同的,认为比较重要的可以优先装入,认为不甚重要的可后装入,由此组成货物装载布局的序列。在长期装载实践中总结出一些简单的定序规则,典型的包括:

- (1) 按布局物体体积递减定序;
- (2) 按布局物体最长边递减定序;
- (3) 按布局物体最短边递减定序;
- (4) 按布局物体同种类型数目递减定序;
- (5) 按布局物体可行域递减的顺序定序。

2. 定位规则

按照一定的先后顺序,将待装货物逐个放入当前货物在容器可用空间中的位置的规则叫做定位规则。已有关于物体布局的定位规则,主要包括:

- (1) 占角策略,即货物首先摆放在承载工具空间的某一角。
- (2) 顺放策略,即从一个角开始,沿着承载工具空间的某一边顺序摆放。
- (3) 在装箱问题中,先沿着边放,再填中心。

应用领域不同,选择的定位规则也不同。分析发现,大部分的定位规则都是先占角,在不能占角的情况下占边,最后填中心,即“金角银边草肚皮”。在采用占角优先策略作为货物装箱时的定位规则时,一般可将货物定于当前空间的后部左下角。

此外,装载过程中也可制定可用空间填充的顺序,依次为正上方、前方、右方。这种装填次序首先保证沿容器高度方向进行填充,避免高度方向的空间浪费,并且与人工装箱的实际过程相符,最主要的是有助于确保货物装载的稳定性。

1.3.1.2 空间划分与合并

1. 空间划分

目前许多启发式算法均基于三分空间的方法。当一个货物在摆放入一个容器后,该容器被分割成为前部、右部和上部三个子空间。同理,每个子空间在充填过程中,被摆放入货物后,同样被继续分割为三个空间,而原空间消失,直至没有待布局物体满足要求或无可利用空间为止。在集装箱装载研究领域,何大勇和姜义东较早引入三分空间法,利用二叉树这种数据结构存储划分的空

间,并用深度优先方法处理二叉树,通过将布局空间依次分割,每次放入相对于当前布局空间来说是满足特定条件的最优布局块,以此确定不同大小的三维矩形物体布局方案^[2]。

在装载过程中,任一时刻容器内部对应可行放置区域,即可用空间,一般来说,可以被表示为一个由长方体构成的列表。比如当没有货物被装载的时候,容器本身是个长方体的可用空间。当一个货物被放置于空间的一个角落,未被占用的空间构成一个多面体形状的空间,称之为剩余空间。剩余空间可以通过不同的方法表示为几个长方体空间的并集,称之为剩余空间划分方法。

当一个货物放入一个容器后,该容器被分割成前部、右部和上部三个子空间。同理,每个子空间在充填过程中,被摆放入货物后,同样被继续分割为三个空间,而原空间消失,直至没有待布局货物满足要求或容器无可利用空间为止。由此剩余空间被表示为三个不相交长方体的并集,这三个长方体构成多面体的一个划分,这样的划分总共有6种(如图1-1所示)。这种经常使用的剩余空间划分法称为长方体划分法或三分空间法。

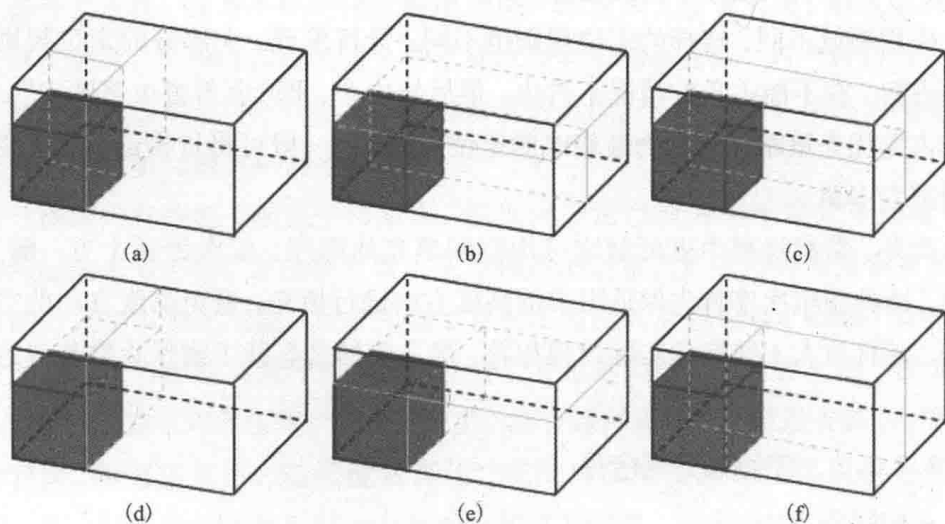


图1-1 长方体空间划分法

另一种将剩余空间表示成长方体的方法是最大覆盖划分法,它使用三个极大长方体形成多面体的一个覆盖。极大长方体是指在空间内部的一个与所放置的块不相交且自身不可再增大的长方体。如图1-2所示,剩余空间中不同的极

大长方体最多只有三个，它们相互之间存在重叠区域。

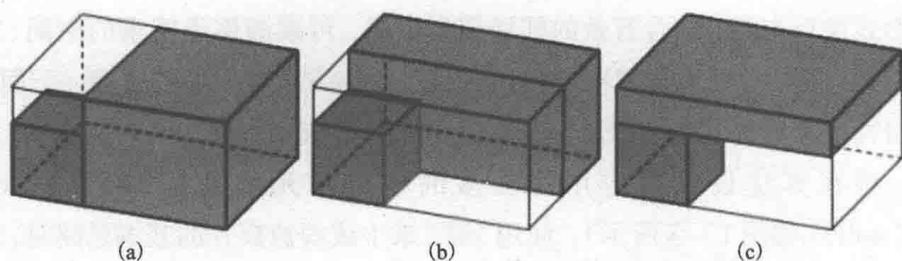


图 1-2 最大覆盖空间划分法

很多构造算法使用这种空间划分方法，通过将布局空间依次分割，每次放入相对于当前布局空间满足特定条件的布局单元来完成整体布局方案的确定。而在某些情况下，要求装载方案满足称之为一刀切 (guillotine-cut constrain) 的约束，即存在一个正交于坐标轴的平面能够把装载方案 P 分为两个分离的子装载方案 P_1 和 P_2 ，满足 P_1 和 P_2 包含的货物分别位于平面的两侧，并且 P_1 (同理 P_2) 或者只包含一个小容器，或者也满足一刀切约束。一般而言，长方体划分法对可用空间的表示可满足一刀切约束，而使用长方体覆盖法并不满足。使用长方体划分法表示空间可能排除掉搜索空间中产生最优解的部分，使用长方体覆盖法则不存在类似问题。

2. 空间合并

空隙是指不能装入货物的剩余空间，空隙是造成装载率低的重要原因。空间合并是指将装载过程中对剩余空间与空隙、空隙与空隙进行结合形成尺寸更大的完整可用空间，以便放置未装货物。通过空间合并，减少空间的浪费，实现容器空间利用率的提高，从而有效改善算法的性能。

空间合并一般结合装载的稳定性等约束并考虑相邻子空间尺寸关系来进行。如优先合并高度相同的两个空间以满足稳定性要求，其他情况则根据合并产生空间的长度决定从哪个方向进行合并，以避免狭长空隙产生。另外，可利用数组将所有的空隙储存起来，进行多次空隙的搜索，最大限度地可将可融合空间合并在一起，实现对空隙的充分填补和再利用。

1.3.1.3 装载单元构造

启发式构造法的基本思想是，在分析货物品种及数量分布状况的基础上，