



分组列车运输组织建模 方法与优化应用



陈崇双 唐家银 薛锋 / 著

西南交通大学出版社
成 都

图书在版编目 (C I P) 数据

分组列车运输组织建模方法与优化应用 / 陈崇双,
唐家银, 薛锋著. —成都: 西南交通大学出版社,
2022.12
ISBN 978-7-5643-9052-5

I. ①分… II. ①陈… ②唐… ③薛… III. ①铁路运
输管理—组织管理—建立模型—研究 IV. ①U2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 236853 号

Fenzu lieche yunshu zuzhi jianmo fangfa yu youhua yingyong

分组列车运输组织建模方法与优化应用

陈崇双 唐家银 薛 锋 / 著
责任编辑 / 宋浩田
封面设计 / 原谋书装

西南交通大学出版社出版发行
(四川省成都市金牛区二环路北一段111号西南交通大学创新大厦21楼 610031)
发行部电话: 028-87600564 028-87600533
网址: <http://www.xnjdcbs.com>
印刷: 成都中永印务有限责任公司

成品尺寸 170 mm × 230 mm
印张 13.5 字数 201 千
版次 2022 年 12 月第 1 版 印次 2022 年 12 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-9052-5
定价 69.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言



车流组织是铁路行车组织工作中的重要内容，也一直是国内外铁路行业专家以及运筹管理领域学者们研究的课题之一。由于铁路运输组织的行业特殊性以及大规模网络尺度，指导运输生产的各种计划和方案相互关联，相互影响，使得车流组织优化既非常复杂，也非常困难，至今仍未圆满地解决。分组列车作为其中的一种车流组织形式，在以美国和加拿大为代表的铁路货运发达国家非常普遍。但由于铁路管理体制的不同以及运输组织模式的差异等方面的原因，国外的研究成果难以完全应用于我国实际。而在国内，车流组织研究主要集中于单组列车，很少涉及分组列车；实际生产中分组列车的比例也非常低，目前主要在牵引定数递减情形以及集装箱五定班列中有过采用，但并不广泛。因此，分组列车的理论成果和实践经验还非常缺乏。

相比单组列车，分组列车组织较为复杂，要求编成站具有较大的改编能力和较多的调车线路等。尽管如此，仍有其有利性存在，如有利于保证列车满轴正点和不违编，远程车流在换挂站部分改编而停留时间较短，减轻沿途技术站的负担等。既然分组和单组列车各有利弊，那么二者相互配合，扬长避短，发挥各自的优势对提高运输效率和效益将很有现实意义。另外，在列车的构成上，单组列车和摘挂列车都可以视为特殊的分组列车。从这个角度来说，分组列车的内涵更大，其理论研究也更具普适性。因此，对分组列车组织的相关问题研究，具有实际应用价值和学术研究价值。

本书在分析铁路车流组织原理、总结国内外编组计划优化方面的理论和方法的基础上，运用系统工程原理以及微观机理融合宏观机制的指导思想，采用定性分析与定量测度相结合，理论推导与仿真实验相融合

的方法，比较系统地研究了分组列车组织特征、集结特性、组织条件、编组方案优化等相关问题，主要包括以下几个方面的内容：

（1）现有研究成果对比分析：在总结大量相关文献的基础上，从研究对象、建模方法、求解算法三个方面分别介绍国内外编组计划的研究现状，对比并评述国内外编组计划在编制流程、构成内容和建模方法三个方面的特点。

（2）分组列车车流组织特征分析：在对车流组织的含义、内容、组织方案以及我国车流组织经验概述的基础上，分析了分组列车的基本特征，包括技术作业特点，编成站、换挂站和终到站的作业流程，货车构成，利弊分析，组织条件分析以及各种组织形式分类，并与单组列车进行了相应的对比。

（3）分组列车集结特性研究：以双组形式又尤以其中的固定重量形式分组列车为研究对象，对其集结特性进行定性分析和定量测度。将固定重量形式分组列车的总集结耗费划分为固有和附加两类，根据集结过程的动态特性和车流到达的不确定性，将到达批中的车辆数和间隔时间都视为随机变量，在独立同分布的假定下，描述固定形式分组列车在编成站和换挂站的集结过程。进一步假定到达批中的车辆数服从泊松分布以及间隔时间服从指数分布，应用随机过程知识，理论推导了集结特性的三个表现方面：集结批次、集结占用时间以及集结消耗，采用数值计算方法分析了单参数的灵敏度以及双参数的耦合影响，并给出三者均值的估计公式。

（4）分组列车组织条件研究：本书也以双组形式的固定重量分组列车为研究对象，其组织条件主要包括列车编成辆数最佳分配和开行适用条件。对于前者，将其描述为，在车流到达特征已定的条件下，如果车流量递减，通过确定基本组和补轴组重量的最佳组合，使得平均每列车的集结耗费最小或者集结占用时间最小，建立整数优化模型。模型采用分阶段逐步求解的思路，首先通过数值计算探究最佳固定重量的影响机制，然后基于挖掘的信息采用回归方法给出经验计算公式。对于后者，基于固定重量形式分组列车与单组列车集结耗费的比较分析，以分组列车相对单组列车的总净节省作为其综合效益的度量，构建了其开行适用

性条件，并采用离散事件系统仿真方法进行验证。

(5) 分组列车编组方案优化参数：研究了分组列车编组方案的优化参数，具体包括计划车流量，固定和非固定形式的集结参数，部分改编相对无改编通过增加时间参数，部分改编相对完全改编减少时间参数，途中改编次数，以及最大车流组号数。

(6) 分组列车编组计划优化模型：以途中仅换挂一次的双组列车为研究对象，在同时采用分组和单组列车形式进行车流组织的框架下，根据编组去向在车流和列流之间的过渡和衔接角色，重构车流组织任务，定性分析综合编组方案的内容和特点。基于车流组织任务的分解和我国的实际情况，忽略列车接续子问题，进而以路网编组去向方案、编组去向接续方案以及路网列流方案为 0-1 决策变量；考虑物理方面的车站调车线数约束和改编能力约束，车流组织制度方面的车流接续归并和车流不拆散约束，以及决策变量之间的逻辑约束；以列车集结和车流改编的总耗费最小为目标函数，建立车流径路已知条件下综合编组方案优化模型 OMITFP。针对模型的特点，对其中编组去向接续子问题 (CBAP)，以路网编组去向方案和编组去向接续方案为 0-1 决策变量，考虑避圈约束、最大改编次数约束、决策变量之间的逻辑约束以及筛除显然不利方案，构建数学模型并设计了方案树法和回溯算法。

本书可供交通运输工程、管理科学与工程、应用统计等相关专业的研究生和高年级本科生使用，也可供从事行车组织管理、分组列车编组等领域研究、规划等方面的科研人员、工程技术人员参考。

本书的出版得到了教育部人文社会科学研究规划基金项目 (20XJAZH009) “基于统计机器学习的先进轨道交通装备全寿命周期可靠性分析方法研究”，西南交通大学研究生教材专著建设、西南交通大学数学学院学科经费的资助。本书编写过程中，得到了西南交通大学数学学院领导、同事的支持和帮助，西南交通大学出版社的诸位同志做了认真的编辑工作，在此一并致谢！

由于作者水平有限，书中存在疏漏之处在所难免，欢迎专家、学者及读者批评指正。

作 者

2021 年 12 月

目 录

//////

| | |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 研究对象和意义 | 3 |
| 1.3 结构及研究思路 | 5 |
| 第 2 章 国内外研究现状 | 9 |
| 2.1 国内研究现状 | 9 |
| 2.2 国外研究现状 | 19 |
| 2.3 国内外研究评述 | 26 |
| 2.4 本章小结 | 29 |
| 第 3 章 分组列车组织特征分析 | 30 |
| 3.1 车流组织概述 | 30 |
| 3.2 分组列车基本特征分析 | 34 |
| 3.3 本章小结 | 45 |
| 第 4 章 分组列车集结特性研究 | 47 |
| 4.1 集结特点分析 | 47 |
| 4.2 集结过程动态描述 | 51 |
| 4.3 集结批次测度 | 56 |
| 4.4 集结占用时间测度 | 63 |
| 4.5 集结耗费测度 | 76 |
| 4.6 本章小结 | 84 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| 第 5 章 分组列车组织条件研究 | 86 |
| 5.1 分组列车固定车组重量优化模型 | 86 |
| 5.2 分组列车开行适用条件模型 | 106 |
| 5.3 本章小结 | 126 |
| 第 6 章 分组列车编组方案优化参数 | 127 |
| 6.1 计划车流量 | 127 |
| 6.2 集结参数 | 128 |
| 6.3 节省时间参数 | 138 |
| 6.4 途中改编次数 | 141 |
| 6.5 最大编组去向数 | 142 |
| 6.6 本章小结 | 143 |
| 第 7 章 分组和单组列车编组计划综合优化模型 | 144 |
| 7.1 综合编组方案分析 | 144 |
| 7.2 综合编组方案优化模型构建 | 156 |
| 7.3 模型讨论 | 168 |
| 7.4 CBAP 构造问题 | 174 |
| 7.5 综合编组方案算例 | 181 |
| 7.6 本章小结 | 188 |
| 第 8 章 结论与展望 | 190 |
| 8.1 主要研究结论 | 190 |
| 8.2 研究展望 | 193 |
| 参考文献 | 195 |

第 2 章 国内外研究现状

基于系统规划在空间范围、时间期限、投资规模和决策水平等方面的差异, Assad (1980) [23]将铁路系统规划分为战略层 (Strategic)、战术层 (Tactical) 和日常运营层 (Operational), 三者分别对应长期规划、中期规划和短期规划 [24]。其中, 战术规划处于中间层次也是核心的位置。货物列车编组计划优化问题 (Train Formation Plan, TFP), 也简称编组计划, 与车流径路安排、车流接续改编方案、车站之间改编负荷分配、列车服务 (频率) 方案等优化内容, 都可归属于该层次。

2.1 国内研究现状

国内许多专家学者就编组计划进行了长期大量的研究和探索。总体上讲, 国内对编组计划的研究始于 20 世纪 50 年代, 而大量的研究工作是在 1978 年以后进行的。本节从研究对象、建模方法、求解算法三个方面着重对近期的研究现状进行综述, 具体成果按照其所属作者和发表时间的先后顺序进行组织。

2.1.1 按照研究对象分类

列车编组计划是铁路行车组织工作的基础性技术文件, 主要包括装车地直达列车编组计划、技术站列车编组计划和区段管内列车开行计划三大部分, 其中技术站列车编组计划又细分为单组列车编组计划和分组列车编组计划, 是编组计划的核心 [32-40]。

1. 装车地直达列车编组计划

装车地直达列车即始发直达列车, 是相对于技术直达列车而言的, 其主要利用自装车流来组织直达列车, 很多是在中间站编组始发。按照列车产生方式的不同, 可分为一站始发直达列车、阶梯直达列车、基地

直达列车。始发直达车流在装卸区的组织方案有：非直达送至前方编组站、非直达送至卸车区；装车地直达、非直达送至卸车区；装车地直达、直达送至卸车区三种形式。而基地直达车流在装车区的组织方案又包括：摘挂或小运转列车送往前方技术站、到技术站解体的直达、直达卸车站的直达。组织装车地直达列车可以减轻沿途技术站的改编作业负荷，加速车辆周转，加快货物送达，有利于稳定列车运行秩序，有利于货流与车流更好地结合等。装车地直达列车虽然是一种经济合理的车流组织形式，但是必须具备一定的条件，诸如：货源充足且货流流向集中；拥有一定的装车、调车和卸车设备；装车和卸车能力足够；稳定可靠的空车供应等。该领域主要代表文献的特点如表 2-1 所示。

表 2-1 装车地直达车流组织主要文献一览表

| 文献作者 | 规划层次 | 模型结构 | 目标函数 | 求解方法 |
|------------|------|------------|--------------------------|-----------|
| 黄民 (1990) | 战术层 | 线性 0-1 规划 | 装卸、途中运行总消耗最小 | 直达列车到达站树 |
| 林柏梁 (1995) | 战术层 | 非线性 0-1 规划 | 装卸消耗和途中改编消耗总和最小 | 模拟退火算法 |
| 曹学明 (2006) | 战术层 | 线性 0-1 规划 | 装卸、途中改编消耗和用 户库存成本总和最小 | CPLEX |
| 曹学明 (2007) | 战术层 | 线性 0-1 规划 | 装运卸储成本总和最小 | CPLEX |
| 纪丽君 (2009) | 战术层 | 线性 0-1 规划 | 物流系统的成本最小 | LINGO |
| 强丽霞 (2009) | 战术层 | 线性 0-1 规划 | 装卸、途中改编和径路运 行消耗总和最小 | 蚁群算法 |
| 赵鹏 (2009) | 战术层 | 非线性多目标规划 | 耗费最小与通道流量最大 | 最小费用最大流算法 |
| 乐逸祥 (2010) | 战术层 | 线性 0-1 规划 | 装卸、途中改编和径路运 行消耗总和最小 | 蚁群算法 |

表 2-1 表明, 该领域的文献基本都从战术规划层次以总费用或者总消耗最小为目标函数, 以车流组织方案为决策变量, 一般考虑方案唯一性约束、装卸能力限制。曹学明等 (2006, 2007) ^{[41]、[42]}、纪丽君等 (2009) ^[43] 从更加广泛的角度考虑物流系统 (铁路企业、发货方与收货方三者构成) 总消耗, 强丽霞 (2009) ^[44]、乐逸祥等 (2010) ^[45] 考虑径路选择, 他们都借鉴林柏梁等 (1994) ^[46] 文献中的同构变换方法建立了线性规划模型。赵鹏等 (2009) ^[47] 和林柏梁等 (1995) ^[48] 都建立了非线性规划模型, 前者由于受非对流限制而引入二次项并考虑多目标; 后者引入阶跃函数刻画装卸能力的必要条件。

2. 技术站列车编组计划

技术站列车编组计划指技术站所有车流的编挂方案, 其车流具体包括未被装车地直达列车和空车直达列车吸收的车流、到达技术站解体的装车地直达列车中的远程车流以及本站装卸完毕的重空车。其目标是, 在给定各技术站的集结时间参数、无改编节省时间参数、计划车流量以及车流径路的条件下, 确定铁路运输网络上最佳的直达编组去向方案和车流的改编中转方案, 满足列车的改编中转站依次限制在各自的径路上以及各技术站的改编能力和调车线数量限制。

相较于其他研究对象, 该类研究成果最为丰富, 又尤以林柏梁教授为主要代表, 包括文献[50-59]等。张震 (1979) ^[49] 提出基于车流无改编通过支点站的最大次数以及有利性判别式, 探讨技术直达列车编组计划的优化方法。文献错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。分别研究车流集结占用股道数与车流强度之间以及改编费用与改编作业负荷之间, 都存在非线性关系情形下的编组计划优化问题。文献错误!未找到引用源。建立有改编能力限制非线性 0-1 规划模型 (TFPC)。文献错误!未找到引用源。基于支点站、编组去向、无改编技术站三者的关联, 设置改编作业时间和无调作业成本取代无改编节省参数, 建立机车长交路条件下的技术站列车编组计划无调作业参数模型 (NTFP)。文献[54-56]都以车流合并变量 (改编变量) 和编组去向方案为 0-1 决策变量, 考虑方案唯一性约束、改编能力约束、调车线数量约束, 构建列车编组计划和

技术站作业分工优化的双层规划模型。其中上层都是确定列车始发终到站，下层基于流量平衡思想确定车流的改编方案。但在处理中略有差异，前者基于车流接续最远站法则，后两者都由优化模型计算确定，文献错误!未找到引用源。称其为 Train Connection Service，简称为 TCS。三者都针对大规模问题设计模拟退火算法，并采用实际数据计算，其中文献错误!未找到引用源。模型的总成本降低了 20.8%。许红等（2006）^[60]综合考虑车站编组能力、解体能力、调车线容车数限制条件，构建技术站车辆集结消耗、改编消耗整体最小以及技术站改编能力均衡利用协同优化的多目标非线性 0-1 规划模型。

3. 编组计划综合优化

装车地直达列车编组计划与技术站列车编组计划，相互影响、相互制约。一方面，前者的单独优化，需要给定后者来判断其是否合理；另一方面，后者的单独优化，其车流参数又依赖于前者的确定。二者的局部优化、分阶段确定，都不能保证车流组织方案的整体最优。而这样的考虑，也是不得已而为之。因为其中任意一个问题，都是大规模组合优化方面的问题，实践证明求解是非常困难的。如果同时考虑，则车流之间的相互交织和关联，将会使问题变得更加复杂，也更难于处理。

所幸的是文献错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。等已在这方面进行了探索，取得了较好的成果。文献错误!未找到引用源。最早提出系统化思想，即采用“同时算法”优化装车地和技术站车流组织方案。该方法实质是，对每个可能的技术站车流运行方案枚举装车地列车运行方案，以确定最优方案。由于列车运行方案数将随路网规模的扩大呈指数增长，从而限制了该方法的实际应用。朱松年等（1993）^[62]改造装车地直达列车编组计划的 0-1 模型和技术直达列车编组计划的 0-1 模型，建立综合优化的线性 0-1 规划模型。同时，对二者的二次 0-1 规划模型进行整合和移植，建立综合优化的二次 0-1 规划模型。两个模型各具特点，前者逻辑结构简约严谨、变量较少而约束条件较多，既有算法难以求解实际问题；后者约束条件显著减少，而变量却有一定程度的增加，既有算法一般可适应铁路网求解。

编组计划综合优化的另一个方向是,编组计划与车流径路的整体考虑。车流径路与列车编组计划是紧密相关的,这种相关性表现为车流的途中改编站必须限制在其车流径路上,以及终到站相同且在途中同一个车站改编的车流必须合并为一支车流,即车流接续归并原则。林柏梁等(1996)^[57]从网络流和组合优化的角度研究车流径路和编组计划问题(Train Routing and Make up Plan Problem, TRMP)的整体优化。在车流的输送方案中融入径路选择信息作为决策变量,以技术站的集结和改编消耗、装卸消耗、径路运行消耗总和最小为目标函数,考虑方案唯一性、线路通过能力限制以及装车区的必要条件等约束,建立大规模非线性0-1规划模型及混合整数规划模型。文献错误!未找到引用源。在其基础上又考虑了技术车流的守恒约束和不拆散限制,建立技术车流和始发车流的整体组织模型。随后文献错误!未找到引用源。研究直达与区段列车编组计划、车流运行径路的整体优化问题。史峰等(1997)^[63]以编组去向的径路为要素,根据编组去向径路合成得到车流径路这一特征,从安排编组去向径路出发描述二者的关系。纪丽君等(2011)^[64]研究了车流分配和径路选择问题。

其他方向,如林柏梁等(1998)^[65]建立了关于重载和非重载列车运行方案综合优化的多目标0-1规划模型;黎浩东等(2010, 2011)^[66、67]研究了列车编组计划与技术站布局的综合协调优化;田亚明等(2011, 2012)^[68、69]考虑了编组站改编扩能决策,前者引入始发直达比重(始发直达列车运输的车流量占总车流的比例)的上下界约束限定始发车流和技术车流的组织方案,后者引入车流增长系数的同时考虑了重载和非重载直达方案(编成辆数不相等)与车流改编决策,等。

4. 分组列车编组计划

分组列车是不同于单组列车的另一种车流组织形式,由两个及以上不同到站的车组构成并按去向分组选编,且在沿途技术站至少进行一次车组换挂作业。目前该领域研究成果相对较少。李夏苗等(2004)^[70]分析采用分组列车组织快运货物运输(文中称之为分组快运货物列车),考虑发车间隔时间约束、列车牵引条件和调车作业能力要求,以运输收

入最大为目标, 经过方案比较确定现实可行和经济有利的组织方案。梁栋等 (2006) [71] 从车小时节省的角度对合并式和衔接式两种分组列车形式作了分析, 并与单组列车进行技术经济比较, 在已知最优单组列车编组计划的条件下, 提出技术站分组列车编组计划的 0-1 规划模型。该文围绕对单组和分组列车编组计划的整体优化进行了尝试。王志美等 (2011) [17] 在给定单组列车编组计划的基础上, 建立了路网减重方向分组列车 (换挂站进行减轴作业) 编组优化模型。赵钢 (2005) [18] 和郭玉华等 (2011) [19] 分别定性分析和定量研究了中转班列开行模式。

5. 枢纽及区段管内车流组织

区段管内车流组织的任务是经济合理组织未被装车地直达列车、空车直达列车和技术直达列车吸收的车流, 也即是在区段内各中间站到发的车流, 其组织形式有摘挂列车、区段小运转列车等。区段管内列车为大运转列车服务, 在满足大运转列车满轴正点出发以及枢纽内装卸作业、取送作业、解编作业允许的条件下, 对区段管内列车的种类、开行数量、始发终到地点和时刻等进行优化。该领域主要代表文献的特点如表 2-2 所示。梁万荣 (1995) [72] 提出枢纽小运转列车编组方案的经济数学模型。徐行方等 (2000) [73] 提出直通摘挂列车的概念。严余松等 (2000) [74、75] 研究枢纽小运转列车的运行方案及径路选择的综合优化问题。牛惠民等 (2001) [76] 研究给定路网车流组织方案条件下枢纽内各编组站的车流组织优化问题, 即决定编组出发列车在枢纽内各编组站之间的分配。史峰等 (2003) [77] 研究了区段管内列车的停站方案。

表 2-2 枢纽及区段管内车流组织主要文献一览表

| 文献作者 | 规划层次 | 模型结构 | 目标函数 | 求解方法 |
|------------|------|------------|---------------|--------------|
| 严余松 (2000) | 战术层 | 非线性 0-1 规划 | 径路运行和等待消耗总和最小 | 遗传算法与二进制组合算法 |
| 严余松 (2001) | 战术层 | 网络模型 | 机车消耗最少和机车数量最少 | 分层逐步求解 |

| | | | | |
|---------------|-----|------------|------------------------|-----------------|
| 牛惠民 (2001) | 战术层 | 非线性 0-1 规划 | 枢纽内作业、走行、 停留总耗费最小 | 遗传算法 |
| 史峰 (2003) | 战术层 | 线性混合整数规划 | 集结消耗、停留消耗 和调车作业费用最小 | 分解算法与线 性规划算法 |

6. 计算机系统设计

编组计划编制问题的高度复杂性以及受车流的相互影响,仅凭经验、手工计算的方法获得高质量的车流组织方案几乎不可能。而计算机编制则是其必然趋势,并为车流组织提供了现代化管理手段和技术支持,主要代表文献为[78-82]等。其系统构成一般可归结为三大类:输入信息模块,包括路网结构和系统参数,诸如改编能力及其预留、调车线数量及其预留、集结参数、去向编成辆数、无改编节省时间等;计算模块,诸如数据及参数处理、车流结构调整、专家干预、智能优化等;输出信息模块,包括编组计划文件、车流去向范围及站名、编组计划执行现状和网络接口等内容。

2.1.2 按照建模方法分类

1. 动态规划法

该方法将 TFP 抽象为一个多阶段决策网络图,一个车站对应一个阶段,每个阶段的点代表后方车站通过该阶段的车流的组合情况,然后根据 Bellman 最优化原理求解。该方法虽能够获得全局最优解,但摆脱不了车流组合指数增长的固有缺陷。

2. 网络流方法

该类建模方法以史峰教授为主要代表,包括文献错误!未找到引用源。,[83-86]等。该方法将各个车站视为点,各编组去向视为弧,各开行方向的集结耗费视为弧的固定耗费(每个站所有去向的集结耗费相同),改编中转额外耗费视为该弧的长度,从而将车流组织问题转化为具有固定耗费的网络流模型。文献错误!未找到引用源。就直线方向无约束情形首次提出具有固定耗费的网络流模型,文献错误!未找到引用源。推广到小规模路网无约束情形。在此基础上,文献错误!未找到引用源。考

考虑改编能力和编组去向数目限制情形。模型求解给出贪婪算法，在当前非直达编组去向中，选择使得车小时消耗下降幅度最大的一个直达去向添加到编组去向集合，直至不能下降为止。对其求解算法，雷广萍等（1989）^[87]提出基于加弧换弧和减弧换弧操作的近似算法。文献**错误!未找到引用源**。基于组合式车流径路提出合并式编组方案的概念，指出同终点车流编组方案具有树形结构，从而在给定每个站的编组去向方案集的条件下 TFP 转化为以各站为终点的普通最短路问题，并且不同的最短路具有不同的终点站。李映红等（2002）^[88]将 TFP 转变为网络计算问题，其中编组网络图的节点为车站，弧为组成列车的车组，目标是使整个铁路网范围内的车流总费用最小。

3. 鲁棒优化模型

在编制编组计划的过程中，选择经济有利、现实可行的优化方案时需要确定相关参数，具体包括列车编成辆数、计划车流量、集结参数、节省时间参数。其中，列车编成辆数依赖于列车途经区段和车站所规定的牵引质量和列车长度标准，计划车流量一般以计划年度日均车流量估计，后两者可通过实际查定。实际中，由于车流变化、车站技术作业波动以及运输设施设备故障、施工、行车事故、自然灾害等因素，使得这些参数变得不确定。目前 TFP 的研究主要还集中于确定性环境下的考虑，定值常数不仅不能完全反映复杂多变的实际情况，而且优化方案在其扰动下不能保证最优性甚至不可行。

迄今为止，该领域已有一定的研究。林柏梁等（1997）^[89]考虑车站改编能力和线路通过能力的软约束，建立点线能力协调的模糊非线性 0-1 规划模型。王保华等（2009）^[90]利用机会约束刻画日均车流量的波动，构造车流改编方案随机优化模型。杨立兴等（2011）^[91]针对列车径路选择、列车频率、流量分配的综合优化问题，建立确定性环境下为混合整数规划模型；当涉及参数（线路和车站的通过能力、列车输送能力、径路上单位流量费用等）为随机模糊变量（Random Fuzzy Variable）^[91]时，应用机会测度（Chance Measure）理论^[92-94]，分别建立悲观、乐观和折中三种准则下的优化模型，其中前两者分别等价于 minmin 问题和

minmax 问题，第三种为前两者的加权组合。

4. 数学规划模型

该类模型采用数学规划方法求解，该类建模方法最早可以追溯到文献错误!未找到引用源。根据决策变量的类型，可分为 0-1 规划模型（还可细分为线性 0-1 规划模型^[96、97]和非线性 0-1 规划模型^[98]）、混合整数规划模型、二次 0-1 规划模型。在处理含有径路选择问题时，0-1 规划模型的改编变量相当于车流在某站是否进行首次改编，这意味着技术车流量为递推形式，因此其模型的具体化将导致高次项出现。与之不同的是，混合整数规划模型以车流在途各站的改编量代替。文献错误!未找到引用源。建立的二次 0-1 规划模型非常巧妙，将编组方案归结为车流“独立的作业方式”的组合，通过排除“非独立的作业方式”减少变量数目，建立线性紧约束，系数矩阵的元素均为 0 或 1 且分布具有稀疏性和分块对角特点。这三类模型的特点总结如表 2-3 所示。

表 2-3 编组计划数学规划建模主要文献一览表

| 模型 | 决策变量 | 约束条件 | 适用范围 |
|-----------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| 0-1 规划 | 0-1 型车流直达方案、改编方案 | 方案唯一性；发站合并；到站合并 | 有序组合树法求解小规模，无法处理大规模问题 |
| 混合整数规划 | 整数型改编车流量、0-1 型直达方案 | 车流量平衡约束；方案关联约束 | 变量和约束都较少，适用于小规模问题 |
| 二次 0-1 规划 | 0-1 型车流直达方案、一次和多次改编变量 | 方案唯一性 | 分解成独立子问题求解，适用于直线情形 |

2.1.3 按照求解算法分类

对于编组计划优化问题的求解，早期的研究者们主要根据铁路运输组织的实践提出各种近似处理的方法和技术，尤以 20 世纪 70 年代的筛选法为代表；而后期的研究者们则以模型和算法并重，在对该问题模型化描述的基础上采用各种启发式算法求解。

1. 传统求解方法

传统求解方法具体包括绝对计算法、表格计算法等。其中，绝对计算法实质上是穷举法。该类方法主要原理是，筛除不利方案之后，对所有的编组方案逐一计算车小时消耗，方案值最小的即为最优方案。该方法的算法思想简单，但计算工作量很大，当支点站数目较多时，其选优难以实现。表格计算法，首先通过一定的判别条件删除或者排除部分不利方案达到精简方案，其次对保留方案采用绝对计算法比选择优。根据直达列车集结车小时消耗和无改编通过节省时间参数，提出诸如绝对条件、必要条件和充分条件。该方法直观、简便，在支点站数不多而且直线方向上，能够方便地找出最优或者接近最优的方案，应用较为普遍。

苗邦均等(1979)^[100]提出可靠分析计算法，基于确定和随机两种淘汰准则近似筛选直达方案，该方法保持了绝对计算法的可靠性和分析计算法的简单性。杨明伦等(1981)^[101]将最优去向组合方案选择转化为最短路问题，然后采用树结构及最短路算法求解。吴汉琳(1987)^[102]提出直达列车方案树方法，根据装车条件来判断是否形成直达列车方案。何邦模等(1990)^[103]对于单组技术直达列车编组计划的选择提出分析计算法。黄民等(1990)^[104]依据列车到达站树确定直达车流可能组合方案。查伟雄等(1996)^[105]基于车站的当前状态，以满足限定编组去向数为目标，建立寻找有利编组去向的数学模型，并针对模型的特殊结构，利用增量法设计了有效的多项式算法。随后，文献错误!未找到引用源。将该模型推广到路网情形，基于给定路网环境参数、车流量以及车流径路，并考虑接续车流的影响，根据服务系统选址 λ -增量法算法思想建模。在将TFP描述为线性规划问题基础上，可采用运筹学的成熟算法，如单纯形法、分枝定界法(Branch-and-Bound)等精确求解，还有采用商业软件CPLEX^[41、42]，LINGO^[43]等。

2. 现代优化算法

从数学上描述TFP，模型的规模将因车流和路网结构的复杂性而变得非常庞大。因此，编组计划编制问题属于超大规模的组合优化问题，是NP-hard(Nondeterministic Polynomial-hard)问题，求解非常困难，

应用传统的分枝定界或者逐步寻优方法进行求解时,在精确性和可靠性方面都不能完全保证。在采用启发式算法求解 TFP 方面,有蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)^[44、45]、模拟退火算法(Simulation Annealing, SA)^[48、50-59、98]、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[60、74、107]、禁忌搜索算法(Tabu Search, TS)^[66]、神经网络算法(Back-propagation Neural Network, BPNN)^[108]等,都为该问题的求解提供了新的思路。

2.2 国外研究现状

通过运输组织优化,特别是区域路网车流组织优化以减少运营成本和各种相关费用,提高运输效率和经济效益,一直是国外铁路系统规划与优化领域研究的热点之一。20 世纪 80—90 年代是研究的高峰期,来自美国、加拿大等铁路货运发达国家的 researchers 们深入研究取得许多成果,Cordeau 等(1998)^[109]都对其进行了介绍。国外编组计划优化模型并不完全适合我国的实际情况,但仍有一定的借鉴作用。为了便于与国内 TFP 研究特点进行对比,现也从研究对象和范围、建模方法以及求解算法三个方面分别介绍国外相关成果。

2.2.1 按照研究对象分类

国外对 TFP 问题的研究对象和范围界定与国内有较大差别,根据其编制流程,概括起来主要包括编组去向方案优化、列车运行方案优化、列车营运方案优化三个阶段。

1. 编组去向方案优化

编组去向方案优化问题(Railroad Blocking Problem, RBP),其目标是确定每个站编组的去向以及每支车流的径路和接续方案。RBP 以车流 OD 作为考虑对象而非列车,这不同于其他研究问题。RBP 的求解结果为 Train Blocking Plan (TBP),作为车站的 Blocking Policy。TBP 确定了编组站的改编负荷和网络中车站作业分工。主要代表文献的特点如表 2-4 所示。

表 2-4 表明,该领域的文献基本都从战术层规划角度建立混合整数规划(Mixed Integer Programming, MIP)模型,其中决策变量为 0-1 型

的编组去向方案和实数型的车流改编量，一般都考虑组织要求（车流平衡约束）和物理限制（车站的改编能力、调车线数量）两大类约束。此外，Bodin 等（1980）^[110]还考虑了编组去向最少车数（类似于我国车流强度约束）和最多车数（类似于我国调车线长度约束）限制和车流接续归并约束，将其视为多商品网络流问题（Multi-Commodity Network Flow）。Assad（1983）^[111]研究直线单方向的编组去向问题。Newton 等（1998）^[112]将编组计划问题转化为服务网络设计问题（Service Network Design），即将物理网络中的车站（相当于我国的技术站）视为节点、编组去向为弧，建立编组去向网络（Rail Blocking Network）。Ahuja 等（2007）^[114]研究现实环境中的铁路编组计划优化问题，将其归结为内涵更加丰富的 Consolidation Problem，该模型具有大规模、多商品、网络流设计的特点。不同于这些文献，Yaghini 等（2011）^[115]将车流归并变量视为 0-1 型，建立纯 0-1 规划模型，采用 Islamic Republic of Iran Railways 的数据计算表明，成本和计算时间都能显著减少。

表 2-4 编组去向方案优化主要文献一览表

| 文献作者 | 规划层次 | 模型结构 | 目标函数 | 求解方法 |
|--------------------|-------|-----------|-----------------|------------------|
| Bodin (1980) | 战术层 | 非线性混合整数规划 | 径路运输、改编和延迟总费用最小 | 启发式分解 |
| Assad (1983) | 日常运营层 | 最短路 | 改编成本最小 | 动态规划 |
| Newton (1998) | 战术层 | 线性混合整数规划 | 径路运输费用最小 | Dantzig-Wolfe 分解 |
| Barnhart (2000) | 战术层 | 线性混合整数规划 | 径路运输费用最小 | Lagrangian 松弛分解 |
| Ahuja (2007) | 战术层 | 线性混合整数规划 | 改编费用和延迟费用总和最小 | 邻域搜索 |

第 2 章 国内外研究现状

| | | | | |
|-------------------|-----|------------|----------|------|
| Yaghini (2011) | 战术层 | 线性纯 0-1 规划 | 径路运输费用最小 | 蚁群算法 |
|-------------------|-----|------------|----------|------|

2. 列车运行方案优化

列车运行方案优化问题，其研究目标是确定列车径路、开行数量以及编组去向分配方案（Block-to-Train Assignment, BTA），也即是列车的编组内容。TBP 作为该问题的输入或者给定条件。主要代表文献的特点如表 2-5 所示。

表 2-5 列车运行方案优化主要文献一览表

| 文献作者 | 规划层 | 模型结构 | 目标函数 | 求解方法 |
|----------------------|-------|------------|-----------------------|---------------------------|
| Assad (1980) | 战术层 | 非线性混合整数规划 | 列车费用、延迟费用最小 | Benders 分解和 Lagrangian 松弛 |
| Crainic (1984) | 战术层 | 非线性混合整数规划 | 改编、集结、列车频率和服务延迟最小 | 启发式分解 |
| Haghani (1989) | 日常运营层 | 非线性混合整数规划 | 径路运输和延迟费用最小 | 启发式分解 |
| Keaton (1992) | 战术层 | 线性 0-1 规划 | 列车费用、径路运输、改编成本总和最小 | Lagrangian 松弛 |
| Martinelli (1996) | 战术层 | 非线性 0-1 规划 | 径路运输和在站作业时间消耗总和最小 | 神经网络算法 |
| Marin (1996) | 战术层 | 非线性整数规划 | 车辆、机车和投资费用最小 | 邻域搜索 |
| Jha (2008) | 战术层 | 线性 0-1 规划 | 径路运输费用最小 | Lagrangian 松弛 |
| Yaghini (2012) | 战术层 | 线性混合整数规划 | 运输（变动）费用和列车（固定）费用总和最小 | 单纯形法、模拟退火混合（SB-SA） |

| | | | | |
|-------------------|-----|----------|---------------------------|-----------------|
| Yaghini (2012) | 战术层 | 线性混合整数规划 | 运输(变动)费用和列车 (固定)费用总和最小 | Local Branching |
|-------------------|-----|----------|---------------------------|-----------------|

表 2-5 表明, 该领域的研究文献, 也基本都从战术规划层建模, 其中决策变量为整数型的列车开行数量和实数型的车流到列车分配变量, 0-1 型的列车径路弧选择或者路选择两种。一般都考虑车流平衡约束和列车输送能力限制。具体地, Assad (1980)^[23]研究车流径路和列车吸收车流综合优化问题。由于文中考虑的列车仅为单组列车, 也即是在途中的中转站不进行车组换挂作业, 因此每个车站开行的列车变量也蕴含了该站的编组去向方案。Crainic 等 (1984)^[116]研究列车径路、车流径路、编组去向方案、列车吸收车流以及改编任务分工的综合优化, 依据 Canadian National Railroads 的数据测试, 结果表明模型显著降低成本。Haghani (1989)^[117]研究动态的列车径路、编组计划和空车分布的综合优化, 将模型分解为机车分配优化(间接考虑列车数量)和重空车分配优化两个子问题进行求解。根据 Chicago Area Railroad 设置算例网络和费用参数, 随机生成需求 OD, 模型结果平均超出下界 9.7%, 最高达到 19%。Keaton (1989, 1992)^[118、119]研究列车开行种类和频率、编组去向以及车流径路安排的综合优化。Martinelli 等 (1996)^[120]采用神经网络方法求解 TFP, 其网络构成包括输入层、隐含层和输出层, 其中输入层的神经元代表 OD 需求, 输出层的神经元代表列车的编组内容(OD 需求组合)。作者还提出 6 种评价准则测试解的可靠性。Marin 等 (1996)^[121、122]以列流方案和车流分配为整数型的决策变量, 考虑车站改编能力和列车输送能力约束, 建立铁路货物运输设计模型。Jha 等 (2008)^[123]在已经确定编组去向与列车运行方案的基础上, 研究将编组去向分配到列车的优化问题。基于时空网络将 BTA 问题转化为多商品流问题。模型求解采用 CPLEX、贪婪算法、朗格拉日松弛算法。根据 CSX 的数据, 求解结果的 Gap (定义为上下界差与上界或者下界之比, 为相对误差) 为 1% ~ 2%。Yaghini 等 (2012)^[124、125]研究了编组去向的编挂方案和列车频率确定问题,

考虑流量守恒约束、列车输送能力约束、车站始发列车数目约束以及车站改编能力约束。采用伊朗铁路的实际数据进行计算，两种算法都能获得满意解且寻优时间较少。

3. 列车营运方案优化

编组去向方案优化和列车运行方案优化两个问题，描述了货物输送径路、列车编组内容和频率等内容，但都没有确定列车运行的出发终到时刻，这样可能会出现铺画运行图时无法安排列车运行线的情况。而列车营运方案优化问题，在前两者的基础上，还考虑了列车调度问题（时刻表），强调编组计划与列车运行图之间的协调与配合，提高了计划的可行性。该领域主要代表文献的特点如表 2-6 所示。

表 2-6 列车营运方案优化主要文献一览表

| 文献作者 | 规划层次 | 模型结构 | 目标函数 | 求解方法 |
|-------------------|-------|---------------|---------|--------|
| Huntley (1995) | 日常运营层 | 非线性混合整数 规划 | 运营总成本最小 | 模拟退火算法 |
| Gorman (1998) | 日常运营层 | 非线性 0-1 规划 | 运营总成本最小 | 遗传算法 |

表 2-6 表明，Huntley 等（1995）^[126]研究货物径路和列车运行方案的综合优化。决策变量为列车的发到站和出发时间；满足货物径路中列车发到站之间的序贯性，以及出发时间递增约束。在 166 个车组和 41 个车站的实例中，模型得到与实际相似的方案且费用更小。Gorman（1998）^[127]研究列车运行方案和需求流量分配的综合优化问题。约束条件包括：所有需求必须完成、货物到达与列车出发间的时间制约（非线性形式）、列车的输送能力限制、列车开行车站和运行区间的硬性约束。决策变量为 0-1 型的列车运行方案以及反映输送径路和列车信息的双态变量。模型分解为确定列车运行方案和需求流量分配两个子问题。Godwin 等（2007）^[128]研究客货共线运输网络中货物列车的径路选择和运行方案综合优化问题，单列车情形改进 Dijkstra 算法求解；多列车情形设计 Stepwise Dispatching Heuristic 算法。

2.2.2 按照建模方法分类

根据 2.2.1 节的介绍,国外针对不同的研究对象从不同的规划层次分别进行建模。同时,结合表 2-4、表 2-5、表 2-6 中研究成果特点的对比,不难发现基本上都建立确定环境下的数学规划模型,并且主要以成本费用最小为目标函数。Shafia 等(2010)^[129]研究 OD 的车流量和重量存在扰动下 TFP 的鲁棒优化。另外,国外也考虑过由于输送货物而产生的效益^[141],但这样的思路不多,且在成本费用选取上亦有所区别。例如,文献错误!未找到引用源。的列车费用包括人员开支、燃料费用、机车费用、延迟成本(运行、堵塞、交会和越行等造成)、车站成本(技术检查、改编费用以及排队或者等待造成的车站延迟)。文献错误!未找到引用源。的费用具体包括:计划期内的重空车和机车在径路上的运行费用、物理网络中弧上的堵塞费用、车站改编费用、改编延误和等待出发的延误费用、未满足预定的空车惩罚费用(单调增的凸函数)以及期末未到达目的地的重车惩罚费用。文献错误!未找到引用源。的费用为燃料成本、人员工资、机车成本和货车租赁费用。文献错误!未找到引用源。的总成本包括固定成本和变动成本,其中前者主要指人员开支,与列车开行直接相关,后者通过边际成本刻画,即单位货物的各种成本,主要包括燃料消耗、机车占用时间和改编成本。

2.2.3 按照求解算法分类

编组计划优化模型都属于大规模的组合优化模型,并且问题的非线性使得求解异常困难。现代优化算法是国外常见的求解手段之一,如 Martinelli 等(1996)^[120]采用神经网络算法,Ahuja 等(2007)^[114]和 Marin 等(1996)^[121、122]采用邻域搜索算法,Huntley 等(1995)^[126]采用模拟退火算法,Gorman(1998)^[127]采用遗传算法,Masoud 等(2011)^[115]采用蚁群算法等。

除此之外,还有更加巧妙的处理思路,值得借鉴。

其一是,采用 Lagrangian 松弛技术。松弛一些难约束并以惩罚的形式添加到目标函数,一般为能力约束或者约束数量较多的约束族,从而根据决策变量类别将原问题的目标函数和约束条件分解为规模较小的若

于子问题^[130、131]。如文献错误!未找到引用源。松弛决策变量间的关联约束后将原问题分解为多商品网络流优化子问题 FLOW 和编组去向优化子问题 BLOCK; 文献错误!未找到引用源。松弛列车输送能力约束将原问题分解为确定货物需求的最优分布和列车频率两个子问题; 文献错误!未找到引用源。松弛整数型的机车分配变量从而将原问题 (General Problem, GP) 分解为机车分配优化的子问题 GPI 和重空车分配优化的子问题 GPR; 文献错误!未找到引用源。采用对偶策略松弛原问题 (Railroad Operating Plan Problem, RROP) 的列车输送能力、编组去向数目和货物运输时限限制三类约束条件后, 分解为车流分配优化子问题 CAR 和列车开行种类和数量优化子问题 TRAIN; 文献错误!未找到引用源。松弛区间通过能力约束并按照编组去向进行分解。

其二是, 对于包含两种及其以上不同性质或者类别决策变量的综合优化问题, 例如同时优化车流与径路, 或者车流与列流等, 首先给定其中一种变量的可行方案, 作为上层或者外层; 然后求解原问题, 从而确定另外一类变量在该条件下的最优作为下层或者内层; 最后将下层的结果代入上层, 并继续优化。子问题之间相互关联互为条件, 分别求解集成获得原问题的下界 (针对最小化问题), 同时改造不可行解获得原问题的上界, 以上下界作为启发式信息在子问题间依次迭代直至逼近最优解。而且, 上下界也能评价满意解的质量, 这也是该类处理方法可靠性的保证。如, 文献错误!未找到引用源。将铁路货物运输设计模型 (Rail Freight Transportation Design Model, RFTDM) 分解为径路车流量优化模型 RM (也等价于车流最优径路选择) 和调整列车频率模型 GM; 文献错误!未找到引用源。将模型分解为确定列车运行方案 Train-scheduling Problem 和需求流量分配 Demand-flow Problem 两个子问题。

其三是, 采用诸如 Danzig-Wolfe 分解、Bender 分解等技术, 如文献错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。等。Danzig-Wolfe 将原问题变换为等价且具有较少约束条件的主问题 (Master Problem) 和若干相互独立子问题^[132-134]。前者求解可采用列生成算法 (Column Generation)^[135]; 后者对应原问题的简单约束 (系数矩阵中呈分块的部分约束) 且规模一般较小。Benders 分解是另一种常用分解算法, 主要思想是固定

原问题中的复杂变量（如整数型）得到 **Auxiliary Problems**；固定变量的结果来自 **Master Problems**，该问题仅含原问题的部分约束和决策变量，由于结构简单使得求解相对较为容易^[136、137]。这两种方法，通过分解降低原问题的复杂程度，分解的子问题之间的结果相互迭代，直至通过最优性检验。

2.3 国内外研究评述

总的来说，国内外学者都以本国的铁路网系统和各自的运输组织模式为背景，对编组计划问题做了深入的研究，其思路和方法各有所长，各具特点，概括如下。

1. 编组计划的编制流程

编组计划的编制都具有分阶段特点，但是却又有区别。国外是从问题的逻辑上进行分层：一般先生成编组去向方案，确定每个车站的编组去向和每支车流的径路和接续方案。然后确定列车运行方案，包括列车的径路、开行数量以及编组去向分配方案 **BTA**，其中 **BTA** 确定了列车的编组内容。最后确定列车营运方案，以前两者为基础，安排列车运行的始发终到时刻等调度问题，实现编组计划与列车运行图之间的衔接和协调。而国内则是根据车流的性质在编组计划的内容上进行分阶段考虑：先确定装车地直达和空车直达列车编组计划，未被其吸收的直达车流向就近的技术站集中，然后编制技术站列车编组计划，最后对剩余的车流再确定区段管内列车编组计划。处理方式存在差异主要是由于管理体制的不同。国外铁路多为公司性质，而我国铁路以国家铁路为主，目前沿用国家铁路集团公司、铁路局、站段三级和区域分割的管理体制。

2. 编组计划的构成内容

国外的列车并不区分装车地直达和技术直达，列车编组内容以编组去向（车流组号）为单元，每列车允许挂有多个组号，在组号到达其终到站前，整个组号的编组内容不会发生变化，这与我国的分组列车相同。

但是在模型中没有体现换挂车组（部分改编）与改编费用消耗的差别。我国的编组计划优化过程中，一般不涉及开行列车数量，而是在其内容编制完后的确定与检查阶段，根据吸收的车流量和列车编成辆数计算。另外，我国编组计划也不涉及时刻表，另由列车运行图确定。其中，编组计划中确定的列流、运行径路、行车量等信息以及相关作业时间标准都是列车运行图编制的条件和参数。

国外研究列车营运方案时，考虑了列车调度问题，以此为基础周期循环，有些类似我国的基本运行图。根据其研究时间范围，调度方案有 Daily Problem 和 Weekly Problem 之分，其中后者一般研究 1~2 周的时间，称之为 Schedule Length 或者 Planning Horizon，前者结果的简单复制是后者的特殊方案（不一定最优甚至可行），相比于前者，后者的规模更大也更复杂。同时由于时间维的引入，能够方便刻画重空状态转换以及列车接续等组织过程，使得车流和列流成为名副其实的动态流。为了解决该问题，国外学者借鉴了动态交通分配中的离散时间时空网络法构建时空网络^[117-123]，其中节点为扩展物理网络中的每个节点为 IN 和 OUT 的节点（分别对应接发列车）并在时间轴上复制，弧代表了列车径路运行、始发终到，以及货车在站的改编和停留（待解待编等延迟）。

列车编组条件也是铁路运营的一项内容，我国有定点发车和定编发车模式，国外分别称之为 Schedule-based 与 Tonnage-based，文献错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。又分别称之为 Scheduled 和 Demand-driven。其中，定编策略是以规定的列车编成辆数（列车长度或者重量标准）作为车列集结结束的条件，其出发时刻以及运行线的选择允许有一定的波动；而定点策略以运行图指导车站工作^[138-139]。两者在运输组织方式上的不同，决定了其在服务水平方面存在差异，定点策略由于严格执行运行图从而容易保证货物时限要求，如我国开行的五定班列就为快捷货物运输提供了准时可靠的服务。在国外研究中，Ahuja 等（2005）^[140]阐述了两种策略的利弊；Ireland 等（2004）^[141]介绍了 Canadian Pacific Railway 采用 Schedule-based 策略在劳动生产率、机车燃料节省和生产率、货车周转提高等方面获得比较显著的效益；Papola 等（2009）^[142]基于货主需求和铁路运营成本综合权衡提出 Hierarchical Hybrids of

Tonnage and Schedule-based Approaches。

3. 编组计划的建模方法

在 TFP 建模方面，国外主要是以编组去向网络为基础建立带有能力限制的多商品网络流模型（Capacitated Multicommodity Network Design, CMND）^[143-146]，其中网络的节点为铁路车站（主要是技术站），可能的编组去向为弧。这也同我国的网络模型思想不谋而合。另外，国内 TFP 研究的另一大分支还以每支车流的组织方案（直达或者改编）为决策变量，设为整数型变量，更多的是设为 0-1 型变量。不过，国内外都曾出现以数学规划模型进行建模的思路，具体从目标函数和约束条件两个方面分析。

2.2 节的叙述中，国外主要以成本费用最小为目标函数。而国内的目标函数比较统一，基本都选用车流的时间消耗，以始发站的集结消耗和途中改编相对于无改编通过的额外消耗进行描述。消耗都以车小时进行度量，这与我国铁路运输能力较为紧张的实际背景有关。车小时消耗反映了在固定设备能力限制的前提条件下，移动设备的利用或者占用情况。而国外铁路以运输企业为主体，更关心成本效益。对比较明显的是，国外没有集结消耗（与车流量无关），取而代之的是延误费用，但与车流量有关，车流量越大，每车的延迟费用越少。编成一个编组去向的代价与其车流量正相关。国内外的大量文献的模型都具有非线性特点，但造成的原因却有不同。国外主要由于目标函数刻画费用，如采用二次形式的凸函数或者分段函数；国内则主要是由于车流接续归并引入的高次项造成，以及在刻画车流集结占用股道数与车流强度^[50]以及改编费用与改编作业负荷^[51]的关系时，都采用分段函数描述。

国外针对不同的研究对象，考虑约束条件也不全相同，但一般都要考虑编组去向能力约束（类似于我国的调车线长度约束）、编组去向数量约束（类似于我国的调车线数量约束）、车站的改编能力约束、线路通过能力约束（径路选择模型）。与我国差别比较大的是，国外研究基本上不要求车流的接续归并，目前仅发现文献错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。考虑这一因素，并将其称为“Pure Strategy”，具体可参见文

献错误!未找到引用源。中的相关叙述：“every railcar originating or reblocked at yard i and destined for yard k must travel in a block to the same next reblocking yard”。

2.4 本章小结

本章首先从研究对象、建模方法、求解算法等方面分别介绍了国内外货物列车编组计划的研究现状。然后在此基础上，对比并评述了国内外编组计划在编制流程、构成内容和建模方法三个方面的特点。