

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

我国于 2008 年 8 月 1 日,开通第一条高速铁路——京津城际铁路以来,高速铁路得到迅猛发展。截至 2016 年底,全国铁路营业里程达 12.4 万千米,其中高速铁路 2.2 万千米以上,是世界上高速铁路营业里程最长的国家。伴随着高速铁路的相继建成和开通,已快速形成由高速铁路和普速铁路贯通运营的复杂客运网络。一方面,高速铁路和普速铁路具有竞争合作关系,研究成网条件下的运输组织方法,实现两者的优势互补,是当今交通领域研究的热点问题之一。另一方面,我国铁路多年来由于运输能力的不足,一直按照组织型运输方式进行列车运行组织,随着高速铁路和普速铁路贯通成网,将实现从组织型向规划型方式的跨越。因此,成网条件下的运输组织、客流组织等与运营密切相关的运营管理问题研究已被提上日程,迫切需要新的理论与之适应并提供技术支持。

铁路通过列车运行图把整个路网的运输生产活动联系成为一个统一的整体,列车运行图是铁路运输工作的综合计划、铁路行车组织的基础,是协调铁路各部门、单位按一定程序进行生产活动的工具。列车运行图是根据国民经济发展的需要和铁路运输能力的状况编制的,它体现着铁路工作的各种质量指标和数量指标,其编制质量的好坏,直接影响铁路运输工作的安全、效益和服务水平。而我国铁路运输具有需求大、客货混跑、单位线路运量居世界第一等特点,列车运行图编制需要解决来自提高客货服务质量和通过能力利用等多方面的冲突,铁路列车运行图编制的复杂性与困难性较其他国家更为突出<sup>[1]</sup>。虽然我国铁路已广泛采用计算机编制列车运行图,彻底改变了传统的手工作业编图方式,但随着高速铁路和普速铁路的贯通成网运营,铁路开行的旅客列车种类和数量繁多,路网复杂性增大,施工对运输组织的制约条件相比过去更加严格,既有列车运行图编制系统的自动化程度与实际要求相比还有较大差距,



在铁路列车运行图的编制工作中，人机交互调整的工作量仍然很大。旅客列车运行方案图的编制重点在于解决列车运行图的整体布局问题，它是铁路列车运行图的骨架和核心，在很大程度上决定了列车运行图的质量水平。但一直以来，对旅客列车运行方案图编制质量起着决定性作用的列车运行方案主要是人工凭经验通过反复试探得到的，列车运行方案图编制的智能化亟待深入研究。

## 1.2 路网条件下旅客列车运行方案图优化问题的复杂性

高速铁路和普速铁路贯通成网条件下，铁路客运网络愈加复杂。而且，还需要实现长途与短途普速列车、本线与跨线高速列车、城际与干线高速列车运行方案的优化。因此，旅客列车运行方案图优化问题变得更加困难。其复杂性特征主要表现在以下几方面：

### 1. 路网构成更加复杂，研究范围大大增加

在高速铁路与普速铁路贯通成网运营条件下（见图 1-1），旅客列车运行方案优化问题所研究的对象不再仅局限于高速铁路或普速铁路本身，而是既包括高速线路，也包括普速线路的整个相关路网；研究的范围既包括高速线路、普速线路上的旅客列车，还包括跨线旅客列车等整个路网上旅客列车运行方案。

### 2. 客流的跨线组织

路网条件下，高比例的跨线客流是我国铁路客运市场的重要特征之一。以京沪高速铁路线路为例（见表 1-1），跨线客流比例达到了 47%，某些区段跨线客流甚至超过了 50%。同时，高比例的跨线客流，使得旅客列车运行组织异常复杂。

表 1-1 2010 年京沪铁路运量水平（万人）

客流属性	京津	津济	济徐	徐蚌	蚌宁	宁常	常沪
高铁本线	1 371	1 170	1 132	1 078	1 291	1 843	2 168
跨线	1 372	1 360	1 665	1 852	1 827	1 387	1 181
区间小站	247	228	253	264	280	290	301



图 1-1 “十二五”铁路网规划图（来自中国铁路总公司）



### 3. 高速铁路与普速铁路列车运行线的协调

高速铁路与普速铁路列车运行线相互影响、相互制约。两者的协调主要体现为高速铁路、普速铁路列车运行线的合理接续和跨线列车与本线列车运行线能力协调。尤其是本线列车和跨线列车存在着速差，跨线列车运行线对本线能力利用影响显著。同时受本线列车等级、密度、天窗方案的形式及时间制约。因此，协调高速铁路与普速铁路运行线关系到整个列车运行方案图的编制质量。

### 4. 天窗方案的影响

一方面，目前开通运营的高速铁路均设置矩形综合维修天窗，天窗内禁止列车运行，造成列车无法夜间运行。但在高速铁路与普速铁路贯通成网运营条件下，长途高速列车可能需要在夜间运行。另一方面，列车运行线布局对普速铁路天窗设置存在直接影响，同时天窗开设方案又制约了跨线列车的开行时间域，直接关系到列车运行方案图的质量。

### 5. 旅客需求质量日益提高

随着经济的发展和人们生活水平的提高，旅客对出行质量的要求越来越高，旅行时间在 12 h 左右的列车应“夕发朝至”或“朝发夕至”，城际、高速铁路列车需满足分时段客流量需求，开行时刻应尽量规律化、节拍化，对不能组织直达运输的客流，应合理规划换乘列车在时间上的接续。因此，旅客列车运行方案编制必须坚持路网整体性、产品多样性、节拍式运输、换乘便捷性，以满足成网条件下客流形态特征、客流变化的影响因素以及客流的时空分布特点的需要，这对列车运行方案的优化提出了更高要求。

从以上分析可知：在高速铁路与普速铁路贯通成网的大背景下，列车运行方案图编制影响因素愈加复杂，相关理论和方法研究具有十分重要的现实意义和紧迫性。

## 1.3 国内外研究现状

自从高速铁路出现以来，国内外对它的研究就从来没有停止过。随着高速铁路的建设、投入运营以及不断发展，关于高速铁路与普速铁路

贯通成网条件下运输组织模式、开行方案、运行图等问题也成为诸多专家学者研究的热点和重点。

(1) 总结国外列车运行方案图编制理论，分析研究成果对于我国的适用性。

国外高速铁路经过几十年的发展，已形成了比较先进、完善的运营理念。日本、法国、德国等高速铁路技术发达国家，依托先进的技术装备，结合本国的经济发展水平、社会文化发展程度、高速铁路网的特征及其与普速铁路的衔接情况，形成了与本国国情相匹配的列车运输组织方法（见表 1-2），取得了良好的经济效益和社会效益。此外，我国台湾，目前运行的高速铁路线路为台北—高雄线，线路全程为 345 km，并采用换乘方式完成跨线客流的输送，即高速列车只在高速铁路本线上运行，旅客需进行换乘作业才能从高速铁路换乘到铁路普速线路上。与发达国家相比，我国铁路具有 3 个重要特点<sup>[2]</sup>：一是负荷高，这使运输过程中相关因素之间的协调难度呈几何级数增加<sup>[3]</sup>，建模的难度也迅速增加；二是长距离列车多，夜间行车的列车组织模式及设备维修计划等问题，极大地增加了计划编制过程的复杂性；三是需要考虑高速铁路、普速铁路的运营协调与兼容，涉及的网络复杂度显著增加。并且，从我国的现实条件出发，跨线运行方式将是我国铁路在一定时期内完成跨线客流输送作业的主要方式。以该方式为主，换乘和下高速线方式为辅，承担起繁重的跨线客流输送任务<sup>[4-17]</sup>。

表 1-2 国外高铁的发展状况对比表

国别	模式	线路特征	运营特征
日本	新干线模式	高速铁路标准轨距、 普速铁路窄轨	旅客换乘·高速铁路旅客列车专用
法国	TGV 模式	新建部分高速铁路· 部分普速线路改造	高速列车可下普速线路运行· 高速铁路旅客列车专用
德国	ICE 模式	全部新建高速铁路	旅客换乘·客货列车分时段使用
英国	APT 模式	部分普速线路改造	采用摆式列车·客货列车混用

因此，基于国情、路情的不同，国外相关研究主要围绕高速铁路宏观发展<sup>[16]</sup>、效益评价<sup>[18]</sup>、调度优化<sup>[19, 20]</sup>、需求预测<sup>[21]</sup>、运行图优化<sup>[22-32]</sup>等；也有基于相关因素为优化目标的高速铁路与普速铁路客运市场划分<sup>[33]</sup>、



多条轨道径路选择的研究<sup>[34, 35]</sup>,但侧重于交通分配理论,涉及铁路路网运输组织的内容不多。这是因为国外铁路大多能力相对富裕,不存在客货争能、运量与运能矛盾突出的问题,且新、旧平行线之间独立运行,所以很少有关于高速铁路与普速铁路之间运输组织协调理论研究的相关文献。

(2) 现有研究是否解决了路网条件下旅客列车运行方案图编制问题?

现有部分研究关注了单一普速铁路或高速铁路旅客列车运行方案图编制优化方法。其中,符卓教授<sup>[36]</sup>通过定量化方法将旅客列车运行方案图编制问题转化为一个多目标优化问题,给出了第一层优化目标——方便旅客旅行的启发式算法。并将一天 24 h 划分为多个方便程度不同的时间段,将方便旅客旅行问题转化为指派问题<sup>[37]</sup>。以方便旅客旅行为目标方面,郭富娥研究员<sup>[38]</sup>通过讨论列车会让、枢纽站行车间隔、运行线调整等处理方法,提出了人机相结合方法编制旅客列车运行方案图。特别是史峰教授<sup>[39]</sup>考虑了旅客对列车发车时间的偏好选择,设计了基于旅客列车始发时间分布的旅客出行选择网络,提出以旅客出行总费用最少为优化目标,建立了旅客列车始发时间分布的双层规划模型。Cadarsso 先生<sup>[40]</sup>以乘客最大满意度为目标对旅客列车运行方案图编制优化方法做了研究。以经济合理使用车底为目标方面,符卓教授<sup>[41]</sup>提出通过 3 个阶段,得到既方便旅客旅行,又经济合理的使用客车车底的方法。王慈光教授<sup>[42]</sup>应用同余理论,采用代数方法,分别对旅客列车无约束条件的合理发车范围、照顾途中大站的合理发车范围等情况,进行了详细的讨论。张玉召博士<sup>[43]</sup>提出了以客运站始发旅客列车车底在配属站和折返站停留时间之和最少为目标的旅客列车始发时间域数学优化模型。潘锋硕士<sup>[44]</sup>分析了车底需要数与车底在站停留时间之间的关系,讨论了提高动车组运用效率问题。以方便换乘为目标方面,陈玲玲硕士<sup>[45]</sup>为使各方向旅客列车的到达时刻相互衔接,以先到达途中换乘站的列车发车时刻为基点,用代数方法计算出后到达列车的发车时刻。徐瑞华教授<sup>[46]</sup>以多线换乘接续的可达性和合理性,建立多向列车换乘衔接模型,提出了网络首末班列车发车时间域的计算方法。考虑到乘客的中途换乘时间,Bo Fan 先生<sup>[47]</sup>以中间换乘时间最小为目标对旅客列车运行方案图编制优化方法做了研究。但需要指出的是,我国铁路运能,特别是大型客运站车站能力紧张,仅仅从旅客或者企业角度为目标得到的运行方案可实施性不高,难以为列车运行图编制提供必要支撑。

另外，也有部分研究关注基于部分约束条件的运行方案编制。以客运站设备能力为约束方面，陈团生博士<sup>[48]</sup>考虑单个客运站到发线发车能力和旅客列车必须在合理的时间范围发车等约束条件下，以方便旅客出行程度最大为目标，建立了旅客列车发车时间域的目标规划模型。西南交通大学全国铁路列车运行图编制研发培训中心对普速铁路路网条件下旅客列车运行方案图编制优化方法做了深入研究，提出了基于客运站到发线和客车整备线能力协调的旅客列车运行方案图编制优化方法，并提出了降低普速线路网复杂度的有效方法。同时，还对高速旅客列车的运行方案图编制问题进行了一定的研究，得到初步的研究成果<sup>[49-61]</sup>。以天窗条件为约束，张玉召博士<sup>[62]</sup>分析了客运专线开设垂直矩形天窗条件下跨线旅客列车的合理发车域的确定方法。特别是马建军教授<sup>[63]</sup>以基于网状线路高中速列车行车组织模式为前提，研究了跨线中速列车在普速铁路始发、终到时间域的计算方法。但需要指出的是，旅客列车运行方案图的编制受到诸如旅客需求、运行成本、线路能力、车站能力、天窗方案等众多影响因素的制约，不能仅仅单一考虑某个或某几个约束。尤其在路网条件下，还需要考虑高速铁路与普速铁路的协调。

## 1.4 现有研究主要问题

通过对国内外研究现状的分析，现有相关研究中还存在一些不足：

### 1. 旅客列车运行方案图的可实施性考虑不足

既有研究，无论是普速铁路列车运行方案图，还是高速铁路列车运行方案图编制优化研究，主要是在无约束条件下，以旅客的方便性和企业的经济性这两个目标为主要考虑因素，未考虑车站、线路能力及路网天窗方案等的制约，与实际应用需求存在较大差距，难以为列车运行图编制工作提供有效支撑。一方面，我国铁路大型客运站需要开行大量的列车，造成线路、车站能力相对紧张；另一方面，列车运行线布局对天窗方案存在直接影响，同时天窗开设方案又制约了跨线列车的开行时间域，直接关系到铁路开行跨线列车的能力大小。两者之间存在相互影响、相互制约的关系。

### 2. 高速铁路与普速铁路运行线协调研究不足

已有研究大多只是对高速铁路与普速铁路运输组织协调的定性分析，



较少涉及跨线列车与本线列车运行线协调优化。高速铁路与普速铁路运行线的协调，主要体现在两者运行线的接续和跨线列车运行线布局。尤其是高速列车下普速线路运行，一是对普速线能力造成影响，二是对普速线行车组织造成干扰。因此，深入研究高速铁路与普速铁路运行线协调优化方法，对路网条件下旅客列车运行方案图编制具有十分重要的作用。

### 3. 未综合考虑成网条件下旅客列车运行方案图编制的复杂特征

首先，已有研究对列车运行方案图编制的研究范围集中在某个运行区段内，也有少数单一考虑普速路网和高速路网的情况，没有涉及高速铁路与普速铁路贯通成网的情况。其次，列车运行方案图编制考虑的影响因素都比较单一，而列车运行方案图受到客流需求、车站能力、线路能力、天窗方案、动车组运用等众多影响因素制约。因此，有必要深入研究路网条件下旅客列车运行方案图综合优化方法。

## 1.5 研究内容

本章针对现有研究存在的问题，深入研究路网条件下旅客列车运行方案图编制关键问题，分别研究了普速铁路、高速铁路及路网条件下旅客列车运行方案优化理论与方法，并研究了旅客列车运行方案图协调优化理论与方法。

### 1. 旅客列车运行方案图关键问题研究

包括研究高速铁路车站通过能力计算方法，以及高速铁路天窗设置与旅客列车合理开行时间协调优化方法。

### 2. 旅客列车运行方案图优化理论与方法

包括研究基于车站能力的旅客列车运行方案优化理论与方法、跨线旅客列车运行方案优化理论与方法、高速铁路列车运行方案图优化理论与方法、新旧交替列车运行方案图编制优化方法以及路网条件下旅客列车运行方案图优化理论与方法。

### 3. 旅客列车运行方案图协调优化理论与方法

包括研究旅客列车运行方案图与机车周转图及动车组交路协调优化理论与方法。



