



TieLu ShuZi XuanXian SheJi  
LiLun Yu FangFa

# 铁路数字选线设计 理论与方法

蒲浩◎著



科学出版社

# 铁路数字选线设计理论与方法

蒲 浩 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书阐述了铁路数字选线设计理论与方法,内容包括:数字地面模型;线路优化;铁路平面线形模型;铁路数字选线新方法;铁路线路三维可视化设计;铁路数字选线系统的研发与应用等。书中内容反映国内外相关领域的发展动态及中南大学数字选线课题组最新的研究成果。

本书可供高等院校道路与铁道工程专业高年级学生及研究生选读,也可供铁路选线设计技术人员及数字选线系统软件开发和使用人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

铁路数字选线设计理论与方法/蒲浩著. —北京:科学出版社, 2016.6  
ISBN 978-7-03-048469-7

I. ①铁… II. ①蒲… III. ①数字技术-应用-铁路选线-设计  
IV. ①U212.3-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第119638号

责任编辑:李梦华 梁广平 王晓丽/责任校对:何艳萍  
责任印制:张 伟/封面设计:梨 园

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>

北京康华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2016年6月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:340 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

铁路选线设计是铁路建设总揽全局的核心工作，它是决定项目的投资、运营、社会 and 环境保护合理性的先决条件，也是控制这些因素的根本性问题，其基本任务是根据设计项目的功能需求，结合所经地区社会、经济环境和自然环境，确定线路技术标准和空间位置，多目标协调统一布设各种结构物。目前，随着我国“一带一路”发展战略顺利开展，“西部大开发”战略深入实施，我国铁路建设任务日益繁重，建设环境日趋复杂，研究铁路数字化选线技术对提高铁路设计质量、效率和水平具有极其重要的意义。铁路数字化选线技术已成为铁路设计中必不可少的重要手段，成为铁路测设现代化的主要标志之一。

历经 20 余年，作者带领的中南大学数字选线研究团队与中铁第一、第四勘察设计院集团有限责任公司、中铁二院工程集团有限责任公司、中铁上海设计院集团有限责任公司、中铁工程设计咨询集团有限公司、西南交通大学，北京交通大学等单位的工程技术人员和有关专业教师友好合作，结合国家自然科学基金，湖南省，原铁道部和企业联合攻关项目等科研课题，在铁路数字化选线设计技术上进行了多方面的开发研究，取得一批成果，包括“铁路数字地球选线系统”“新建铁路数字选线系统”“既有铁路改建与新增二线数字选线系统”“铁路枢纽数字选线系统”“地铁数字选线系统”等铁路数字化选线系列软件产品，现已集成为铁路全数字化选线设计平台，全面覆盖了铁路选线各个设计阶段的各项设计内容。这些成果均已通过了省、部级鉴定，且在实际生产中得到了推广应用，产生了显著的经济效益和社会效益，获得了省部级科技进步奖二等奖两项，全国优秀工程设计金奖一项，全国优秀工程设计软件二等奖一项，省部级优秀工程设计软件一等奖四项。

编写本书的目的是将在开发这些成果中所研究的理论和方法加以总结，汇编成册，与国内外同行交流，以期得到进一步的提高。

在这些科研工作中，中南大学詹振炎教授、常新生教授、张怡高级工程师，中铁二院工程有限责任公司的胡光常教授级高工、胡建平教授级高工，中铁第一勘察设计院有限责任公司的孟存喜教授级高工、冯威教授级高工，中铁第四勘察设计院有限责任公司的彭先宝教授级高工等专家以及课题组的宋占峰、李伟等老师和作者指导的研究生作出了重要的贡献。

在本书编写过程中得到中南大学土木工程学院、科学出版社的大力支持与帮

助。课题组工作人员张洪、王雷、罗诗潇等给予热情帮助，作者在此对各方的支持表示由衷的感谢。

由于作者水平和实践经验所限，书中难免有不足及疏漏，敬请读者批评指正。本书的出版得到了国家自然科学基金（51378512、50708117）的资助。

蒲 浩

2016年1月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 铁路选线设计发展回顾	2
1.3 铁路数字化选线设计的发展	6
1.4 铁路数字化选线关键技术	13
1.5 编写本书的目的及主要内容	16
参考文献	17
第 2 章 数字地面模型	18
2.1 概述	18
2.2 空间索引	21
2.3 Delaunay 三角网快速构建算法	24
2.4 约束 Delaunay 三角网快速构建算法	39
2.5 DTM 的编辑修改算法	47
2.6 数字地面模型在线路设计中的应用	50
参考文献	51
第 3 章 线路优化	53
3.1 概述	53
3.2 梯度投影法	59
3.3 动态规划法	67
3.4 遗传算法	83
3.5 距离变换算法	91
参考文献	105
第 4 章 铁路平面线形模型	108
4.1 概述	108
4.2 线元组合线形模型	109
4.3 参照线形模型	132
4.4 复合参照线形模型	140
参考文献	143

<b>第 5 章 铁路数字选线新方法</b> .....	144
5.1 基于 Google Earth 的铁路线路规划 .....	144
5.2 关联约束选线设计 .....	157
5.3 线路方案的组合设计 .....	170
5.4 既有线重构与增改建设计 .....	175
参考文献 .....	194
<b>第 6 章 铁路线路三维可视化设计</b> .....	195
6.1 铁路三维场景组织与管理 .....	196
6.2 基于 OSG 的铁路场景三维建模 .....	204
6.3 铁路三维模型简化 .....	226
6.4 铁路三维场景交互技术 .....	240
参考文献 .....	249
<b>第 7 章 铁路数字选线系统的研发与应用</b> .....	251
7.1 铁路数字地球选线系统简介 (GACAD) .....	252
7.2 新建铁路数字选线系统简介 (RACAD) .....	255
7.3 既有铁路改建与增建二线数字选线系统简介 (EACAD) .....	260
7.4 铁路枢纽数字选线系统简介 (TACAD) .....	263
7.5 地铁数字选线系统简介 (MACAD) .....	265
7.6 推广应用情况 .....	268

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

铁路是现代文明的一项巨大工业成就，它随着科学技术的发展而不断发展。1825年9月27日英国斯托克顿至达林顿的32km标准轨铁路正式运营，标志着世界上第一条铁路的诞生。至今，世界铁路已有190年的历史。铁路时代的到来是人类文明史上的重要进步，新不列颠百科全书（1973~1974年版）这样高度称赞铁路：“铁路的发展是文明进步中最伟大的里程碑之一。”美国百科全书1978年国际版，称赞“铁路是人类运送客货最重要的手段之一”。

铁路属于国家战略性基础设施，也是国民经济的命脉，在经济社会发展中具有特殊重要的地位和作用。我国幅员辽阔，人口众多，铁路是连接各大经济区域之间、城乡之间的大动脉。加快铁路基础设施建设，有利于促进区域、城乡协调发展。铁路具有安全、经济、便民、实惠、全天候运输，速度快、运能大、安全舒适、节能省地、减排高效等特点，在各种交通运输方式中，铁路在节约资源和保护环境方面具有明显的优势，加快发展铁路，对于建设资源节约型、环境友好型社会，促进我国国民经济可持续发展具有重要的意义。在国际上，我国作为亚洲最大的陆权国家，铁路一方面是我国与其他国家资源和物资运输的通道，同时也是强化控制和保护领土的有效工具，加快发展铁路，具有重要的经济、政治和军事意义。

截至2015年底，我国铁路运营里程超过12万公里，列世界第二，亚洲第一，其中高速铁路运营里程1.9万公里，居世界第一。但由于我国国土面积大，人口众多，我国铁路路网密度仍然较低，路网整体能力长期处于紧张状态。按国土面积计算，我国每万平方公里仅有铁路125km，远低于德、英、日等发达国家，甚至低于经济发展程度低于我国的印度。这与我国商品贸易持续增长、购买力增强以及公民私人出行增加之间的矛盾变得更加突出。

同时，我国经济发展的需要以及人们日益增长的物质文化需求对交通提出了更高的要求，发展高速铁路已成为我国铁路建设的必然需求。一方面，在如今全球化的浪潮下，我国的产业发展面临着转型阶段。在过去的半个世纪以来，我国经济增长主要来源于第一和第二产业，尤其来源于劳动密集型产业而不是服务业等第三产业。高速铁路作为一种可以带动第三产业如旅游业发展的工具，有利于



我国经济结构转型，更给我国的经济发展注入了一大支强心剂。另一方面，随着生活水平的日益提高，人们对出行的要求也逐渐提高，人们希望走得更远、更快、更舒适，而交通工具和公共交通系统的滞后与此形成的矛盾也越来越尖锐。高速铁路作为能够贯穿整个中国大陆经济高效的交通工具，既满足了人们物质和精神生活的需要，又促进了各地区各民族的交往，有利于民族团结。

随着我国铁路技术的高速发展，我国铁路已经走出国门，走向世界。近年来，国家高度重视中国铁路的国际化发展，李克强总理在外交活动中积极推介中国铁路。2013年10月，中泰签署了“大米换高铁”的合作备忘录。2013年11月，中国与罗马尼亚宣布在修建高铁领域进行合作，中国将参与连接匈牙利和塞尔维亚两国首都的高铁项目。2014年5月，李克强在访问埃塞俄比亚时，推介中国高铁，并称要在非洲建立高铁研发中心。2014年6月，李克强在出访英国期间指出，中英要大力推进核电、高铁等领域合作。双方还讨论了中国参与英国连接伦敦与英格兰北部的2号高铁项目投资的可能性。2014年8月，李克强在会见美国议员代表团时表示，将推动高铁等先进技术装备走出去。李克强指出，中方愿积极参与美国交通基础设施升级换代。2015年6月，中国中铁二院工程集团有限责任公司参与投标的俄罗斯首条高铁规划设计合同在俄罗斯第二大城市圣彼得堡正式签署，成为中国高铁走出国门的第一单。2015年10月，中国铁路总公司与印度尼西亚四家国有企业签署协议，成立合资企业，赢得雅加达一万隆高铁项目。

由此可见，无论是在国内还是国外，我国铁路发展都迎来了一个黄金的发展期。在国内，急需提高我国铁路路网的运输能力及运输速度，建立一个高效运转的铁路体系，以满足我国国民经济的持续发展以及人民日益增长的物资文化需求；在国外，随着中国高铁“走出去”发展战略的实施，将有大量的铁路项目即将开工建设。在此背景下，我国铁路发展既面临重要战略机遇，又面对新挑战和新要求，必须抓住机遇，迎接挑战，提高发展质量，努力开创铁路科学发展新局面。

## 1.2 铁路选线设计发展回顾

铁路设计是一项庞大的系统工程，通常涉及测绘、地质、线路、站场、桥梁、隧道等站前专业和通信、信号、电气化、车辆等二十多个站后专业，需要这些专业的分工协作，其中，线路专业是各专业的“龙头”。铁路选线设计是铁路建设总览全局的核心工作，其基本任务是根据设计项目的功能需求，结合所经地区社会环境、自然环境和生态环境，确定线路技术标准和空间位置，多目标协调统一布设各种结构物。

针对铁路选线设计的研究历史悠久，在铁路建设的实践中，负责铁路线路定位的工程师不断探索，在成功和失败的经验教训中逐渐形成了铁路选线设计的理论和方法。

### 1.2.1 世界铁路选线设计理论的发展

1877年，美国工程师惠灵顿（Arthur M. Wellington）根据他在美国和墨西哥积累的铁路设计经验，出版了他的《铁路选线经济理论》（*The Economic Theory of the Location of Railways*）的第一版<sup>[1]</sup>，创建了美国铁路选线设计的理论体系，该书直到20世纪初还多次修订与增订。

1884年，法国桥梁与道路（PONTS ET CHAUSSEES）部颁布了由桥梁与道路总监帕蒂奥特（L. Partiot）撰写的 *Instruction pour la préparation des projets et la surveillance des travaux de construction de la plate-forme des chemins de fer suivi de tables*<sup>[2]</sup>。这个指南详述了选线和车站的调查、研究和设计的方法，以及工程量的计算方法，为法国早期优秀的铁路工程指南作品。在该指南发表13年后（1897年），法国公共工程局又发表了由西罗特（A. Sirot）撰写的 *Chemins de Fer-Construction et Voie*。这是一项铁路选线、轨道、结构和站场设施并包括财务预算在内的有关铁路设计、施工和维修的综合指南。由此可见，在20世纪以前，法国铁路工程的技术标准已非常高。

1900年，在德国，由弗美兰茨·克罗伊特（Franz Kreuter）撰写的 *Linienführung der Eisenbahnen und Sonstigen Verkehrswege*<sup>[3]</sup>是一本有代表性的关于铁路、道路和运河选线原理的综合性著作，书中主要叙述了铁路定线。早在那个年代以前，德国工程师对机车车辆阻力和牵引力已有相当深入的研究，并且，在山区铁路定线中已有若干经验。数年后，于1903年，布卢姆（Blum）、巴里斯（Börries）和巴克豪森（Barkhausen）出版了他们合著的 *Die Eisenbahn-technik der Gegenwart*<sup>[4]</sup>，以更为实用的成就为基础，论述了定线技术。

1911年和1913年，俄罗斯工程师李比兹（Lipetz）和德国人翁赖恩（Unrein）等，在机车性能和列车阻力原有研究工作的基础上，推导出绘制列车运行速度-距离（ $v-s$ ）曲线和时间-距离（ $t-s$ ）曲线的图解方法。这些图解曲线在机车牵引性能与线路坡度、线路曲线之间建立力学关系，通过这些图解可以无需数字计算就能够确定线路每一点上列车的理论速度和时间。随后，图解法又用来获得列车的燃料（能量）消耗和时间消耗。李比兹、翁赖恩和其他工程师在这方面的进一步发展，奠定了欧洲和苏联铁路选线设计的新基础。苏联的奥潘格姆在1924年撰写的《铁路设计》中关于列车工作性能力学和消耗的计算、牵引计算就是以工程师李比兹发明的图解法为基础，该书是莫斯科高等技术学院铁路工程专业大学生

的教科书，对苏联铁路的实践进行了详尽的叙述<sup>[5]</sup>。

1917年，美国的威廉姆（Williams）教授撰写了一本大学教科书《铁路选线设计》（*The Design of Railway Location*）<sup>[6]</sup>，并于7年后推出了修订版。该书介绍了在考虑自然条件和经济状况的条件下，以保障安全、提高铁路收益为目的的铁路线路设计方法，建立了当时铁路选线设计完整的理论，并首次提出了线路方案优化的理念，其中大部分理论成果一直沿用至今。

1940年，德国的威廉黑姆·密勒（Wilhelm Müller）教授出版了 *Die Fahrdynamik der Verkehrsmittel*<sup>[7]</sup>。该著作中，铁路、公路、水运和航空线上的交通工具运动力学，全部用图解法来处理。从不同交通工具运动的图解，可以估算出全部能量消耗、时间消耗和费用。在当时，密勒的成就大大促进了运输线的设计和评价。

1953年，威廉黑姆·密勒根据长期的研究工作，完成了 *Eisenbahnanlagen und Fahrdynamik: Zweiter Band, Bahnlinie und Fahrdynamik der Zugförderung*<sup>[8]</sup>，书中在列车阻力的分析、牵引特性图、列车的力学性能、能量消耗与时间消耗等，都相当深入。使得机车车辆投资和运营支出的估算更为精准。由此，技术决策和选线设计就有了一个经济合理的基础。

20世纪60年代后，信息技术的发展带来了又一次工业革命的高潮。电子计算机的迅速发展，以及计算方法、优化理论、模糊数学、灰色系统和神经网络理论等许多新理论新方法的推陈出新，多种新兴学科的交叉渗透，给铁路选线设计这一传统学科注入了新的活力。选线设计工作者开始探索智能化、自动优化的选线设计技术，形成了利用航空摄影测量、GIS、GPS、RS等测绘新技术手段采集数据、建立数字地理信息模型，虚拟现实环境，计算机辅助线路方案自动生成并比选择优的数字化、智能化、可视化选线设计。

## 1.2.2 我国铁路选线设计理论的发展

我国铁道工程的知识是伴随帝国主义列强对我国的侵略自19世纪中叶由西方传教士逐渐介绍过来的。我国铁路兴建之初，管理权由外人把持，设计工作也由外人包办。但是，中国人民是勤劳智慧的人民，在铁路修建的实践中，涌现出很多有成就的中国铁路工程师。

在中国人修筑铁路的历史中，首先应提到中国的第一位铁路选线设计工程师詹天佑先生。1905年清政府要修建京张铁路，英、俄两国争修此铁路相持不下，清政府为了两不得罪，决定自修铁路并委派詹天佑负责。詹天佑，字眷诚，广东南海县人，幼年就学于美国，毕业于美国耶鲁大学土木工程系铁路工程科。他临危受命，在当时既无技术人员，又缺乏技术工人、机具的条件下毅然承担重任，

当时英国报纸讥讽“中国修建京张铁路之工程师尚未诞生”，而詹天佑认为：“窃谓我国地大物博，而于一路之工必须借重外人，引以为耻，更不得不力任其难，勉副众望。”詹天佑率两个助手，全队十二人以三个月时间完成了京张线的勘测任务，在设计中，他坚持采用标准轨距，采用 33‰ 的陡坡和 2-8-8-2 活节大马力机车跨越关沟段的八达岭，在青龙桥车站采用人字形展线，将八达岭隧道缩短为 1090m，并开凿竖井，增加工作面以缩短工期，在修建中分段施工，并尽早分段运营，以通车运营收入弥补施工款项的不足，在当时的历史条件下，这些决策是难能可贵的创举，至今仍值得借鉴。1909 年 11 月京张铁路比计划提前两年建成通车，节余工款白银近 29 万两，节省工程费的 4%，这一辉煌业绩，维护了民族尊严，振奋了民族精神，增强了中国人自己修建铁路和发展近代科学技术的信心，为以后自建铁路开辟了道路<sup>[9]</sup>。

旧中国的铁路建设多数为外人把持，少数为国人自建，其中也产生了若干优秀的选线设计范例，如粤汉线跨南岭地段，纠正了由外人选定的越岭垭口，使越岭高程降低了 40 余米，提高了选线质量。但在战乱频繁民不聊生的旧中国，中国选线设计人员的聪明才智终难充分发挥。至 1949 年新中国成立前夕，如将通过车的铁路都计算在内全国铁路营业里程为 21810km（不包括台湾省铁路在内），实际当时能勉强维持通车的铁路仅 11000km<sup>[9]</sup>。

新中国成立后，百废俱兴，也带来了铁路建设事业的发展。我国铁路勘察设计事业逐渐走向了蓬勃发展、规范化、标准化的道路。

## 1. 成立了专业的勘察设计队伍

先后组建了中铁第一勘察设计院集团有限公司、中铁二院工程集团有限责任公司、铁道第三勘察设计院集团有限公司、中铁第四勘察设计院集团有限公司、中铁工程设计咨询集团公司、中铁上海设计院集团有限公司、中铁第五勘察设计院集团有限公司、中铁第六勘察设计院集团有限公司八家拥有铁路勘察设计甲级资质的综合型设计院，为铁路的勘察设计建立了一支稳定的专业配套齐全、技术装备精良的队伍。

## 2. 建立了选线设计研究室

在铁道科学研究院内建立了选线设计研究室，专门从事铁路选线设计理论的研究，在若干铁路院校设立了相应的专业，为铁路勘测设计队伍输送了大批合格人才。

### 3. 统一了全国的铁路勘测设计标准

统一了全国的铁路勘测设计标准，制定了属于国家标准的《铁路线路设计规范》，并制定了《铁路基本建设项目预可行性研究、可行性研究和设计文件编制办法》，规定了铁路勘测设计的阶段和各阶段勘测设计工作应达到的深度与广度。此外，还编制了大量的标准图，通用图和参考图，为加快设计进度、提高设计质量创造了条件。

这些组织上、人才上、技术上的有力保证，使我国铁路勘察设计工作的面貌发生了根本的转变。至 2015 年年底全国铁路运营里程已超 12 万公里；牵引动力和运载工具迈上了新台阶；客运提速全面推进，高速铁路得到了飞速发展，已建成通车京沪、武广等一大批高铁线路，高速铁路运营里程已达 1.9 万公里，居世界第一；重载运输取得了长足的进展，1992 年建成通车的大秦铁路经过持续的扩能技术改造，目前已可大量开行一万吨和两万吨重载组合列车，年运量已突破 4 亿吨，成为世界上年运量最大的铁路线，在货物重载运输领域我国已经居于世界先进行列。所有这些进步都凝聚广大铁路勘察设计人员的心血和汗水。

我国是一个多山的国家，国土面积的 70% 为山区和丘陵，在修路过程中面临大量地质复杂的艰险山区，遭遇崩塌、滑坡、泥石流、软土、膨胀土、高地应力，高瓦斯等一系列复杂的地质问题，这些问题都在实践中逐渐解决，并积累了许多宝贵的经验，同时也开发、研究、引进了一大批行之有效的铁路勘测设计的新技术、新工艺和新设备，航空勘测、遥感技术和计算机辅助设计技术已在勘察设计中广泛采用，已实现基于计算机及其辅助设备的铁路勘测设计一体化，铁路勘测设计数字化、智能化技术正在逐步实现。

## 1.3 铁路数字化选线设计的发展

### 1.3.1 铁路数字化选线设计的意义

数字化是指将许多复杂多变的信息转变为可以度量的数字、数据、再以这些数字、数据建立起适当的数字化模型，把它们转变为一系列二进制代码，引入计算机内部，进行统一处理。

铁路数字化选线设计是计算机技术在线路设计领域的应用。通过将铁路选线过程中需要的地形、地质、线路线形以及各种规范、约束、经验等信息数字化，综合应用计算机图形学、虚拟现实、计算机网络、建模仿真和多媒体等技术建立

起数字化模型,引入计算机内部,由计算机对大量的数据信息进行检索、提取,根据设计要求进行计算、分析及优化,并将设计结果以三维视图及图表的方式显示,供设计人员进行决策,或采用人机交互手段反复加以修改,最终完成工程设计。

由于铁路选线设计是一个涉及面很广、政策性很强的综合性工作,是一项关系到铁路工程全局的总体性工作,研究铁路数字化选线设计技术具有极其重要的意义:

(1) 极大地提高经济效益和社会效益,使人的智慧、经验与计算机的高速、准确得到充分发挥。

(2) 显著提高铁路设计的质量和效率,加快设计进度,使铁路建设项目达到方案优、投资省、工期短、效益好的要求。

(3) 使得传统的铁路设计手段、设计方法产生重大变革,极大地促进铁路行业的技术进步。

目前,铁路数字化选线设计已成为铁路设计中必不可少的重要手段。在铁路数字化选线设计工作中,设计者的聪明才智、经验、创造性思维与计算机的高速、准确得到了完美结合。

### 1.3.2 铁路数字化选线技术的发展历程

#### 1. 国外铁路数字化选线技术发展历程

20世纪60年代初期,电子计算机运用到铁路和公路的设计中,首先针对繁冗重复的大量计算工作,如平面和纵面几何线形的计算、横断面和土石方的计算以及输出数表等,编写成单独分开的程序。随着计算时间的节省,创造了可以进行多个方案比较的条件。为获得经济效益,英、美、法、德和丹麦等国家首先把注意力集中在线路纵断面优化技术方面,经过一段时间的探索,各国都研制成功了比较成熟的纵断面优化程序系统。例如,英国运输与道路研究所的HOPS程序;法国的Appolon程序;德国的EPOS程序等。1971~1972年就“计算机进行路线最优化设计”召开了几次专门性的国际会议,并由联合国经济合作与开发组织编写了专题总结报告。且英、法等国的经验表明:纵断面优化程序的应用可以节省15%的土石方量并增加5%的经济效益。

20世纪70年代,铁路与公路路线设计优化技术拓宽到平面和空间(三维)选线;数字地形模型(DTM)开始应用;计算机绘图技术可直接提供设计和施工图纸。例如,在平面选线优化方面,有英国的NOAN程序,美国普渡大学的GCARS程序,德国的EPOS-1程序。美国麻省理工学院把铁(公)路线按三维空间优化开发OPTLOG程序。由于平面线形或空间线形的优化涉及更多复杂因素,需要

大量的计算数据,给研究工作带来较大困难,同时也削弱了程序的实用性。

20世纪80年代,很多国家已建立由航测设备、计算机(包括绘图机、数字化仪等外部设备)和专用软件包形成的组合系统。软件包往往包含从数据采集、建立数字地形模型、优化技术以至进行全套计算机计算、绘图和报表的完整系统。例如,美国路易斯·百杰公司的CANDID系统,德国西门子公司SICAD土地信息和图形处理系统,芬兰的ROADCAD程序系统等。

到了20世纪90年代,铁路与公路路线CAD技术已发展成集数据采集与处理、设计、分析、优化于一体的集成化、系统化技术。其软件的适应性大大增强,并开始应用人工智能解决设计中的一些问题。比较典型的铁(公)路CAD系统有:突出公路几何设计与排水设计的CARD/1系统,该系统实用性强,对硬件要求低,界面友好,操作简易;以数据采集、处理和图像输出为一体的芬兰ROADCAD道路系统;具有先进图像处理、交互设计技术,体现了计算机硬件与铁(公)路设计软件的完美结合的美国Intergraph公司的INROADS系统;英国的MXRoad系统更是国际商品化软件系统的典范,能用于铁路、公路、矿山、排水、机场、港口及其他土木工程设计,它采用了不同于以往的基于横断面进行设计的方法,即用一种全新的“串”的概念来表达构筑物以及地形表面,对几何形体的表述具有充分的灵活性,适用于各种复杂的土木工程设计。

国外这些软件的共同特点是:建立在功能强大的三维数字地面模型及结构物模型基础上,基础牢固,此外都注重可视化技术、用户界面技术(交互技术),并寻求一定的智能化功能以及系统的集成和设计的一体化。

进入21世纪,铁路数字化选线技术取得了进一步的进展,其中最具有代表性的是澳大利亚旷达公司研发的旷达系统和美国Autodesk公司研发的Civil3D系统。

旷达系统是由澳大利亚政府主导,联邦科学院组织道路交通、数学、地理信息、计算机方面的科学家历经十年时间研发成功的数字化选线系统。该系统是一个将线路设计原理和计算机信息技术相结合的帮助线路设计者确定最佳线路方案的智能化软件系统。它可以在设计者定义的工程、经济、社会、环境等各种控制条件下自动寻找出多条经济合理的线路方案以供设计者选择决策。旷达系统由两套软件组成,一套是Quantm Integrator,该套软件安装在客户端计算机上,用于定义设计项目的多个设计方案和各种控制条件以及计算和评估优化后的线路方案;另一套是Quantm Pathfinder,该套软件安装在旷达公司的服务器上,用于路线方案的优化计算工作,该套软件在规划设计者定义的约束条件下进行千百万次的优化迭代运算,并最终确定10~50条经济合理的线路方案返还给设计者以供决策,解决了设计者在传统人工选线中比选方案过少和遗漏有价值的路线方案的问题。旷达系统已经成功应用在多个铁路和公路的规划设计之中。但由于商业机密和知识产权保护等缘故,在国际学术期刊和交通工程出版物中见不到有关算法和

数学模型的研究成果，其方法难以借鉴，且使用该系统必须将地理数据上传到旷达服务器，涉及国家安全。

2004年，美国 Autodesk 公司推出的 Civil 3D 系统是一款面向土木工程设计与文档编制的建筑信息模型（BIM）软件，可以由测量数据自动成图，可构建曲面地形，可生成道路与铁路项目的动态模型，用赏心悦目的方式展示设计成果。Civil 3D 系统中的曲面、横断面、纵断面、标注等均以动态方式链接及更新，具高效评估设计方案、更加完善设计方案的优势。目前 Civil 3D 系统已广泛应用于土木工程、交通运输等设计中。

## 2. 国内数字化选线技术发展历程

我国铁路和公路 CAD 的研究始于 20 世纪 70 年代后期，虽然起步较晚但发展迅速。

自 1979 年起，原铁道部和交通部组织有关科研院所和设计单位先后对铁（公）路的数字地面模型、纵断面优化技术、平面及空间线形优化技术等进行了研究，取得了一批实用的研究成果，较为突出的是：中南大学（原长沙铁道学院）联合原铁道部专业设计院及铁道第三勘察设计院集团有限公司开发完成的“铁路线路纵断面优化设计系统”，及在此基础上由中南大学（原长沙铁道学院）联合中铁二院工程集团有限责任公司、铁道第三勘察设计院集团有限公司开发完成的“铁路线路平纵面整体优化设计系统”，这两项成果经工程实践检验，证明优化效果是令人满意的，并已在国内众多的铁路勘测设计部门应用，产生了显著的经济效益和社会效益<sup>[10]</sup>。

20 世纪 80 年代中期，国内各高等院校和生产单位自主开发或引进一些铁路和公路路线 CAD 系统，其中有些投入到实际的工程设计中，取得了良好的经济效益，例如，同济大学早期制作的微机道路初步设计程序和长安大学（原西安公路学院）开发的公路微机辅助设计系统都在一定范围内推广应用。1984 年底，交通部公路规划设计院以中美合营的方式成立“华杰工程咨询公司”，引进了美国伯杰公司的 CANDID 软件，配备了 Apollo 超级微机，从事铁（公）路 CAD 软件的二次开发工作，取得了良好的效果。铁道第三勘察设计院集团有限公司也引进了各种先进的辅助设计用硬件设备，包括小型机、大型高级绘图机、数字化仪、高分辨率的图形显示终端等，同时开发了相应的铁路辅助设计软件，并应用于实际的工程设计中，但是此时国内的研究成果仍以数值分析和计算为主。

20 世纪 80 年代末期至 90 年代中期，随着计算机图形学和 AutoCAD 等图形支撑软件的发展，数字化选线设计技术也从单纯的数值计算分析发展为图形交互式自动设计，开发出了集地形资料处理、工程费计算、图形交互设计、纵断面自



动设计以及绘制线路平、纵断面图为一体的一套完整的数字化选线设计系统。通过在用户界面下简单的菜单操作，就可以实现线路纵断面优化、平、纵、横断面设计、工程费计算、图形显示、数据修改和图形自动绘制。在此时期，随着现代勘测设计技术的迅速发展和测量仪器的现代化，地形信息数字化的困难也基本得以解决；空间地形学的理论和应用研究也产生了实用型成果。

到 20 世纪 90 年代中期，国内已经能方便地获得数字化选线设计所需的数字地形信息，现场设计部门在航测技术的研究与应用方面、计算机辅助勘测与设计方面、以及计算机辅助成图方面均做了大量的研究与开发工作，已研制了一批实用软件。如中南大学（院长沙铁道学院）开发的“新建单、双线铁路线路机助设计系统”不仅适应了新建单线机辅助设计的要求，而且在国内首次解决了新建双线或预留二线的计算机辅助设计问题，已用于西安—南京、包头—西安等多条铁路干线的设计，累计超过 2000km；1996 年在哈尔滨市召开的公路工程计算机应用年会上，交通部公路规划设计院推出的“道路集成 CAD 系统”及交通部第二公路勘察设计院推出的“微机互通式立交 IN-CAD 系统”均达到了新的高度。可见，推广数字化选线设计技术的条件已经具备。

20 世纪 90 年代中期至 20 世纪末，我国铁路数字化选线技术进入蓬勃发展和广泛使用时期。原铁道部科技司按照工程项目管理模式组织国内各大设计院和高等院校联合攻关，开展铁路勘测设计计算机辅助设计技术的应用研究。按照“铁路勘测设计一体化和智能化系统”要实现网络化、数字化、数据库化、集成化、智能化的基本要求，对各专业现有的设计软件进行修改和功能扩充；同时按照甩掉图板的目标，完成勘察设计技术手段从传统的手工方法向现代化 CAD 技术转变的要求，大力开发新的软件，全面地向工程化、综合化、系统化推进，形成专业覆盖面大、可适用于不同设计阶段和设计要求的功能强大的专业集成化 CAD 系统。经过 5 年多的努力，铁路勘测设计一体化项目的研究目标已基本实现，在各大勘察设计院和高等院校的共同努力下，取得了十分有价值的研究成果并已进入实用阶段，如中铁第一勘察设计院集团有限公司开发的“铁路勘测设计工程数据库”，中铁二院工程集团有限责任公司开发的“工程地质数据自动采集系统”及铁道第三勘察设计院集团有限公司开发的“计算机档案管理系统”。在数字化铁路选线设计的研究方面解决了大量理论难点和关键技术。

进入 21 世纪以来，我国铁路进入了飞速发展阶段，为满足设计单位的迫切需求，实现铁路各阶段各设计内容的全数字化选线设计，推动数字化选线理论与方法向纵深发展，大量的专家和学者对铁路数字选线关键技术开展了系统、深入的研究。其中，中南大学（原长沙铁道学院）开发了“铁路数字地球选线系统”“新建铁路数字选线系统”“既有铁路改建与增建二线数字选线系统”“铁路枢纽数字选线系统”“地铁数字选线系统”等数字化选线系列软件系统。软件的使用可以提