

山区公路 平面线形设计新理论与实现技术

Shanqu Gonglu

Pingmian Xianxing Sheji Xinlilun yu Shixian Jishu

徐进罗庆著
朱颖高建平审



人民交通出版社
China Communications Press



山区公路 平面线形设计新理论与实现技术

Shanqu Gonglu

Pingmian Xianxing Sheji Xinlilun yu Shixian Jishu

徐 进 罗 庆 著
朱 颖 高建平 审



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书介绍了现有公路路线设计方法(设计速度方法和运行速度方法)产生和演变过程,根据公路汽车行驶速度实测结果分析了两种设计方法的适用条件;研究了六车道/四车道/双车道等三种类型公路的汽车横向加速度分布特征,建立了横向加速度—轨迹半径以及横向加速度—速度关系模型;揭示了公路线形、车辆性能以及行车干扰等因素对轨迹决策行为的影响机理和约束机制,构建了典型方向控制模式的复杂道路/赛道行驶轨迹决策模型以及滚动时域求解算法;分析了“行驶轨迹—行驶速度”之间的耦合机理,建立了复杂道路的行驶速度决策模型以及动态求解算法;最后提出了“行驶轨迹—行驶速度”协同控制的山区公路平面线形设计新方法,给出了新方法的适用条件、设计流程和工程应用范例。

本书可供道路工程、安全工程、交通工程、汽车工程等专业领域相关师生的教学与研究参考,同时本书更适合作为道路和交通工程的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

山区公路平面线形设计新理论与实现技术 / 徐进,
罗庆著. — 北京:人民交通出版社, 2014. 1
ISBN 978-7-114-11010-8

I. ①山… II. ①徐… ②罗… III. ①山区道路—公
路线形—线形设计—平面设计 IV. ①U412.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 271326 号

书 名: 山区公路平面线形设计新理论与实现技术

著 作 者: 徐 进 罗 庆

责任编辑: 温鹏飞

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 720×960 1/16

印 张: 9.5

字 数: 170 千

版 次: 2014 年 1 月 第 1 版

印 次: 2014 年 1 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11010-8

定 价: 38.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

将公路上真实的车辆运行特性和驾驶行为反映在路线设计阶段并用其控制几何要素取值,一直是公路设计的基本思想。几十年来,设计速度自身的不断改进,以及从设计速度方法至运行速度方法的演变,正是这一思想的体现和作用结果。但我们正在使用的设计速度方法只有在平缓地形的高等级公路设计上才具有较好的适应性,而在面对山岭区公路特别是曲率变化极大且复杂线形组合的公路时则很难取得预期的应用效果。虽然近年来我国在设计山区高速公路时增加了基于运行速度曲线的设计一致性评价环节(类似于使用运行速度方法),但目前以 V_{85} 统计模型为核心手段的运行速度方法与公路上正在发生的实际情况仍有很大的差距,且不能反映出多样化的方向控制行为(轨迹决策行为)的重要影响,导致路线设计难以实现设计者的预期,人一车一路三者的不协调以及由此引发的大量行车事故期待着设计方法的改进和变革。

设计速度方法的设计思想是假定“驾驶人操纵车辆以恒定速度(即设计速度)沿道路中线行驶,然后用设计速度来决定道路几何要素的取值”。此种假定比较贴近平缓地形较高技术标准(设计速度 $\geq 60\text{km/h}$)的公路行驶特性,设计人员通过曲线半径与路幅幅宽的合理搭配,可以使曲线路段行驶速度与直道行驶速度非常接近,因此行驶速度沿行驶方向是基本恒定的。但山岭地区公路上的行驶特性显然迥异于这种理想化的假定,只有在少数困难位置比如急弯或是弯坡组合段,行驶速度才接近事先假定的设计速度,而在大多数的非受限路段实际行驶速度都远高于这个值,那么按设计速度计算得到的超高率、视距和竖曲线半径等指标的取值显然不能满足实际的行驶需求。

运行速度方法由于采用了“驾驶人操纵车辆沿道路中线行驶,根据前方道路线形的几何条件来调整行驶速度(V_{85}),然后用 V_{85} 决定道路几何要素的取值”的设计思想,由于体现了道路平面曲度对驾驶人速度选择行为的影响,在很大程度上提高了公路平面线形设计的一致性,尤其是相邻曲线半径 R 的协调性得到

了明显改善。但由于 V_{85} 统计模型的限制,目前使用运行速度方法在设计公路平面线形时,只能调整平曲线半径 R 一个指标,而其他几何变量比如转角、回旋线、偏转方向、弯间直线长度和路宽等得不到调整和控制。因此,此种方法与山区公路上的实际行驶特性之间依然存在着非常大的差别,在真实公路上驾驶人对预期行驶速度的选择主要依赖于车辆预期行驶轨迹的曲率特性,而对轨迹曲率起控制作用的是前方道路的整个几何特性而非仅仅是半径 R ,并且轨迹形态及其曲率还受到驾驶习惯和车辆特性的影响。

基于此,我们提出了一种新的路线(平面线形)设计方法,并给出了实现技术,新方法的设计思想是“考虑车辆性能的影响,在可使用路幅边界之内决策出与典型方向控制习惯对应的行驶轨迹,根据轨迹曲率在车辆动力性和行驶安全性/舒适性的约束下,决策出与典型速度控制习惯对应的行驶速度,用行驶轨迹和行驶速度控制道路几何要素的取值”。由于半径、转角、回旋线、弯间距、偏转方向和路幅宽度等要素能够改变道路几何边界,因此这些要素变化时,行驶轨迹和行驶速度也必然发生变化,因此以轨迹和速度作为设计参量,能够实现对上述全部几何要素的设计控制。

本书的研究工作是围绕“基于‘行驶轨迹—行驶速度’协同控制的路线(平面线形)设计新理论及其实现技术”这一主题展开。全书共分 7 章,第 1 章介绍了设计速度方法和运行速度方法的提出、演变过程、缺陷,以及两种方法的优劣性比较;第 2 章研究了公路上汽车行驶速度特性及其影响因素,根据不同类型、不同等级公路上连续行驶速度的测量成果,分析了地形条件、车道数量、驾驶员类型、车型与连续行驶速度之间的关联和影响,探讨了行驶速度的波动特性及其与设计车速之间的偏差,讨论了设计速度和运行速度方法的适用条件;第 3 章主要研究了公路上行驶车辆的横向加速度特性,根据汽车行驶特性测试结果,分别阐述了六车道/四车道/双车道等三种类型公路的汽车横向加速度的分布特征,分析了横向加速度与轨迹半径以及与速度之间的负相关关系;第 4 章主要阐述了复杂道路汽车轨迹的决策方法,通过研究公路线形、车辆性能以及行车干扰等因素对轨迹决策行为的影响机理和约束机制,建立了典型方向控制模式下复杂道路以及赛道的行驶轨迹决策模型,以及前视轨迹点的滚动时域求解算法;第 5 章阐述了复杂道路汽车行驶速度的决策方法,通过分析道路环境、车辆性能对速度选择行为的约束机制以及“行驶轨迹—行驶速度”之间的耦合机理,建立了复杂山区公路/赛道的车辆行驶速度决策模型以及动态求解算法;第 6 章在前面几章的研究基础

上提出了“行驶轨迹—行驶速度”协同控制的平面线形设计新方法,分析了新方法的适用条件,研究了应用新方法时的设计流程,并以两条山区公路改建为依托介绍了工程应用,提供了可参考的实际范例;第7章是对全书研究工作的总结。

使用本书提出的新方法进行路线设计,由于在轨迹/速度决策时可以设置多种驾驶模式,并引入了道路几何条件、车辆性能、行驶稳定性、舒适性的限制,较之以往更贴近山区公路的实际行驶情况,因此也更贴近“用真实的驾驶行为和车辆特性来控制道路几何设计”的设计思想。

本书的新方法尤其适用于穿越起伏地形的高速公路和双车道公路设计。这些公路由于要顺适地形、减小环境扰动,线形复杂且曲率变化大,车辆行驶处于不利状态,经常发生车辆驶离路面的恶性事故,因此亟须进行安全性检验,而我们所提出的模型和设计方法则可以完全适应此种需求,并且公路线形越复杂,计算效果越好,优势越明显。

全书由重庆交通大学的徐进和中铁二院工程集团有限责任公司的罗庆撰写,中铁二院的朱颖和重庆交通大学的高建平审定了全部书稿,西南交通大学交通运输学院的赵军参与了第4章第5节和第5章第5节的算法设计及其撰写工作,西南交通大学的杨奎设计了第3章中的实测数据特征值提取和配对算法。重庆交通大学的邵毅明和吴国雄为本书研究工作的开展以及本书的撰写提供了支持和宝贵的修改建议,感谢他们为本书的出版所做出的努力。

本书研究工作的开展获得了中铁二院工程集团有限责任公司博士后科研工作站经费资助,同时也得到了国家自然科学基金(51278514)、同济大学道路与交通工程教育部重点实验室开放基金(K201201)以及交通运输工程重庆市重点实验室开放基金(2011CQJY002)的经费资助,重庆交通大学交通运输工程重点学科也对本课题给予了大力支持,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,本书难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

著 者
2013年6月

目 录

第 1 章 公路路线设计方法的演变过程以及新方法的提出	1
1.1 研究背景和科学意义	1
1.2 目前的公路路线(道路几何)设计方法	3
1.3 本书的路线设计新方法	13
第 2 章 各种类型公路的汽车连续行驶速度工况分析	17
2.1 连续行驶速度测量试验设计	18
2.2 六车道公路的速度特性	21
2.3 四车道公路的速度特性	23
2.4 双车道公路的速度特性	26
2.5 本章小结	36
第 3 章 汽车在公路上行驶时的横向加速度分布特征及其变化规律	38
3.1 横向加速度采集试验设计	39
3.2 横向加速度分布特性	43
3.3 轨迹半径对横向加速度的影响规律	48
3.4 行驶速度对横向加速度的影响规律	54
3.5 本章小结	57
第 4 章 基于“人—车—路”协同的复杂公路/赛道汽车行驶轨迹决策	59
4.1 研究概述	59
4.2 “前视断面选点”的轨迹生成策略	63
4.3 行驶轨迹决策目标	65
4.4 行驶轨迹约束条件	71
4.5 轨迹点求解算法以及轨迹样条生成	74
4.6 复杂公路/赛道的轨迹仿真算例	79

4.7 本章小结·····	86
第5章 基于“轨迹—速度”耦合策略的复杂公路/赛道汽车	
行驶速度决策 ·····	88
5.1 研究概述·····	88
5.2 计算策略·····	90
5.3 决策目标·····	92
5.4 约束条件·····	95
5.5 算法实现·····	98
5.6 计算实例以及驾驶人行为分析 ·····	100
5.7 本章小结 ·····	110
第6章 “轨迹—速度”协同控制的平面线形设计方法以及工程实例 ·····	112
6.1 新方法的设计思想 ·····	112
6.2 新方法的使用性能 ·····	113
6.3 新方法的适用环境 ·····	116
6.4 新方法的设计流程 ·····	118
6.5 公路路线设计实例 ·····	119
6.6 本章小结 ·····	132
第7章 全书研究工作总结 ·····	134
7.1 主要成果和创新点 ·····	134
7.2 研究成果的应用前景 ·····	135
7.3 下一阶段的研究工作计划 ·····	137
参考文献 ·····	138

第 1 章 公路路线设计方法的演变过程 以及新方法的提出

1.1 研究背景和科学意义

近百年来,设计者和科研人员为了提高公路运输的安全性、快捷性、舒适性和经济性,在载运工具、道路设施、交通管理、驾驶人行为等方面作了大量努力和尝试。在公路几何设计方面,设计者根据车辆的动力性能和行驶稳定性来确定平竖曲线半径、超高、视距、纵面坡度和路幅宽度等几何参数。在汽车设计方面,设计者坚持不懈地致力于车辆操纵性能的改进,特别是高速行驶和紧急制动情况下的路线保持能力与曲线跟踪能力的提高,增加了驾驶人对行驶车辆的可控性;与此同时,自动巡航控制、防碰撞预警控制以及各种人体防护系统的开发与应用提高了车辆主动与被动安全性。在驾驶行为方面,研究人员分析了驾驶人特性(年龄、性别、文化程度、血型、气质、饮酒以及通信工具使用等)对交通环境信息判断和操作反应能力的影响,驾驶疲劳的形成原因、影响因素以及疲劳的识别与监测,以及公路行驶环境对驾驶人心理、生理指标的关联性。

可以看出,公路设计、车辆设计和驾驶行为是车辆安全行驶所依赖的要素,整个公路运输系统运行的安全性、快速性和舒适性水平取决于这些要素之间的有效协调与相互融合程度。但事实上,尽管道路修筑技术、车辆设计水平与制造工艺、交通安全设施设计在过去几十年里分别取得了重大的进展,但我国每年发生的交通事故数量以及由此带来的人员及财产损失仍居高不下,尤其是近年来常发生山区公路营运大客车和校车的重大安全事故,表明山区道路行车安全水平令人堪忧,而我国山地面积占国土面积的 $2/3$ 左右,因此,亟须研究山区复杂公路上的车辆行驶状态和驾驶行为特征,研究人一车一路协同的安全运行机理,提高山区公路的设计质量以及运营后的安全水平。

公路是支持车辆行驶的基础,公路几何线形是驾驶人对车辆行进采取控制操作的重要依据,因此,山区公路设计应该做到与车辆行驶特性、驾驶人行为特性之间的合理匹配。而导致我国山区公路安全性不高的主要原因也正是在道路

设计时没有达到对其他要素(车辆、驾驶人、交通等特性)的充分考虑和有机融合,比如在设计过程中对驾驶行为的定义太过简单,即假定车辆沿道路中线等速行驶。而实际的山区公路行驶情况是,由于车流一般比较稀少,除了行车道之外驾驶人还可以使用同侧的路肩宽度或是占用一部分对向车道,因此驾驶人可以在明显盈余的路幅宽度内自由地选择行驶轨迹,自身的驾驶习惯会得到明显的体现,轨迹形态呈现出多样化特点,轨迹的曲率半径与弯道设计半径差别很大,实际的行车视距因此明显偏离了按弯道中线算得的计算值。而轨迹曲率、视距对驾驶人的速度选择行为有直接的、决定性的影响,所以,不同的轨迹特性会导致不同的速度特性。

并且,驾驶人的速度选择行为本身也呈多样化特征。与严格按照运行计划来驾驶列车的火车司机以及严格遵守航空班次驾驶飞机的飞机机长不同,汽车驾驶人在速度选择上有很大的自由,其驾驶行为更多的体现了自身性格经验以及操作习惯的烙印。对于由于商务或个人事物出行的道路用户,他们希望尽快到达目的地,因此缩短行驶时间是首要的目标,车辆行驶速度普遍偏高。而那些对旅行时间并没有要求的汽车行驶活动,不同类型驾驶人所表现出来的速度特性则有很大差别,其中一些会选择中低速行驶,但还是有很多驾驶人喜欢高速行驶,无它,只是这类驾驶人非常享受高速行车带给他们/她们的强烈快感而已。相比之下,有些驾驶人又倾向于把车速维持在一个恒定值或是很窄的范围内,即类似于定速巡航的模式。所以,真实世界中公路上的驾驶行为具有多样性和差异性特点,或如表现为追求时间最省,追求行驶舒适,倾向于安全或是维持恒速。

基于以上分析,汽车驾驶行为可以看成是不同“轨迹选择模式”与不同“速度选择模式”的组合配对。因此,按“驾驶人操纵车辆沿道路中线等速行驶”假定设计得到的道路几何显然与实际的驾驶行为不匹配,不符合驾驶人行车时的心理预期,以至于恶性交通事故频繁发生,尤其是近年来屡见不鲜的死亡人数动辄数十以上的大型营运客车重特大安全事故,在造成极为严重的后果的同时也产生了广泛的非常恶劣社会影响。并且,已经开始引发了公众对道路设计质量和安全性的严重质疑,甚至已经有设计部门被起诉至法院要求承担相应的责任。

为了在设计中能够反映出真实世界公路行车的种种特点,世界各国在过去几十年里对本国的路线设计政策进行了多次修订,其中我国最近的两次修订分别是在 1994 和 2006 年,下一版的修订工作正在进行中。尽管如此,这与“用真实的驾驶行为和车辆特性来控制道路几何设计”的原则还距离尚远。设计速度在各国的设计方法中依然是确定平纵线形和横断面要素值的控制量,各国之间的差别主要在于是否使用运行速度 V_{85} 对相邻曲线单元的半径分布进行一致性检

验,或是是否用 V_{85} 代替预先假定的计算行车速度来进行超高设置和视距计算。这表明一些国家的公路工作者已经认识到过去假定“驾驶人在公路上以预设的设计速度恒速行驶”的不合理性,开始承认半径和曲度对行驶速度的影响。但回旋线使用、路宽、弯间直线长度、弯道偏转方向等对行驶速度同样有重要影响的公路设计变量却一直没有出现在各国的 V_{85} 模型中。同时,在各次修订中,一直没有体现出驾驶人方向控制行为(表现为轨迹特性)的重要影响,而实际上轨迹特性与速度特性存在紧密联系,不同的轨迹控制习惯比如车道内行驶、压中线行驶、侵占路肩、切弯行驶、贴近里侧行驶等,必然对应着不同的速度选择行为;另一方面,轨迹的形态、曲率、横向位置以及拓扑特性对于平面线形设计和横断面设计可以起到直接的控制作用,同时也可以根据轨迹特性对设计的合理性进行评判。由于缺乏这些考虑,所设计的公路必然经常出现与驾驶人行为习惯相冲突、不符合驾驶人预期的情况,以至于驶离路面和平曲线事故频繁发生,设计理论/方法的固有缺陷显然要为这些事故的发生负一定责任。

因此,需要对目前我们正在使用的路线设计方法做出改进或是进行变革。在此背景下,本书提出了一种新的路线设计思想并给出了实现技术,其核心是:根据初步的线位方案计算出道路几何边界,预测出与选定方向控制模式对应的行驶轨迹,再以轨迹曲率为基础预测出与选定速度控制模式对应的行驶速度,最后同时用行驶轨迹和行驶速度对几何要素进行控制。其特点是半径、转角、回旋线、弯间距、偏转方向和路宽等几何要素的改变都能体现在行驶轨迹和行驶速度上,因此这些几何设计要素都能够被设计者所控制,解决了先前设计者只能调整弯道半径 R 一个要素的窘境。同时,由于设置了多种驾驶模式,并在轨迹/速度决策时引入了车辆性能、行驶稳定性和舒适性限制,新方法较之以往更贴近公路的设计思想,即“用真实的驾驶行为和车辆特性来控制道路几何设计”,并尤其适用于穿越起伏地形的公路平面线形设计。考虑到我国公路设计界一直以来的工作习惯,新方法可以作为几个步骤增加至现有的设计流程,同时,也可以将其决策算法补充进已现有的路线优化程序。

1.2 目前的公路路线(道路几何)设计方法

一种新设计理念的提出大都是由于现有设计方法存在不足,不能满足用户(道路用户)的要求,无法较好实现设计者的预期所致。因此,在给出本书的方法之前,显然需要对世界主要国家的路线设计思想和设计方法进行比较、分析和评述。

1.2.1 世界主要国家路线设计方法的演变

由于汽车驾驶最早是在美国得以普及,所以世界各国的路线设计方法都是基于美国联邦道路运输协会(AASHTO)在1938年提出的计算行车速度方法。由于那时汽车的动力性能不高,人们对汽车的特性还缺乏了解且大都缺乏足够的驾驶经验,加之路面条件较差,行驶速度普遍偏低。因此AASHTO把设计速度定义为“那些喜欢高速行驶的,并且开起车来不计后果的驾驶人操纵车辆时所能达到的最大速度”,从当时情况来看,绝大多数车辆的行驶速度的确是低于道路设计速度。这一定义一直维持到了1954年的第4次修订,由于汽车设计和制造技术在其间的十几年里得到了迅速的提升,路面设计理论和施工工艺也同时得到了明显的改善,行驶速度大幅度增加,道路几何设计对车速的限制作用开始迅速显现。因此在此次修订中,设计速度的概念发生了明显的变化——“设计速度是用来决定公路的几何属性——反过来又影响到车辆运行,它是行驶条件良好时在公路几何条件限制下,驾驶人操纵车辆安全通过路段所能达到的最大速度”,即实质上设计速度是困难路段的临界安全速度。这一次的定義持续到了1977年的第7次修订。在这中间的20余年里,美国的机动车保有量持续增加,原来只是在城市街道出现的交通拥挤开始蔓延至干线公路。因此,为了避免交通拥挤所带来的干扰,在上一次的定义中补充了“在低交通量(自由流)的条件下,……”这一限制条件。包括我国在内很多国家的设计规范,都是采用此版本的定义。在时间稍早的70年代初,出于交通安全或是交通特性的研究目的,欧美的一些学者对公路上的行驶速度进行了大量的观测,发现此种说法并不严谨,特别是“安全通过路段所能达到的最大速度”这一描述,在很多时候实际情况并非如此。因此在2001年的修订中,设计速度变成了“用来决定公路几何设计变量的速度值”。

在使用这种经典的设计方法时,设计者要接受“驾驶人以设计速度操纵车辆沿道路中线行驶”这一假定,然后用选定的设计速度 V_d 确定最小极限半径、超高率、视距需求以及最大坡度值,其中视距又可以作为凸形竖曲线半径的控制参数。至于横断面参数比如车道宽和路肩宽,通常是取若干个离散的值或是范围来对应不同的设计速度。虽然美国和欧洲在行车道宽度是否对速度有明显影响这一问题上的看法存在差异,但在具体处理时都是设计速度越高,车道宽度值越大。目前世界上采用设计速度方法的国家主要有美国、加拿大、比利时、南非、中国和日本等。

设计速度方法最主要的缺陷是把复杂多变的公路行驶过程作为一个确定性

问题来处理,即以设计速度沿道路中线行驶,实际上这种处理方式是借鉴于铁路设计(铁路的出现要早于公路一百年左右),对于铁路而言此种处理是完全没有问题的:机车行驶时轮对与铁轨紧密咬合在一起,不存在轨迹的选择与控制问题(方向控制),因此列车的轨迹与线路形态(两根铁轨的中心线)几乎完全一致;与此同时,火车司机是严格按照图定的限制速度来控制机车速度。所以,铁路建成运营之后列车行驶时的运动和受力状态与设计阶段的预想状态完全一致,是一个典型的确定性问题。相比之下,在公路上汽车行驶中,汽车驾驶人是根据车辆前方的道路条件(几何条件和路面条件)、交通状况、所驾驶车辆的运行状态以及自身的心理和生理感受来控制车辆的行进,包括对行驶轨迹的控制和对行驶速度的控制。而当行驶环境沿行进方向变化较大时,比如山区公路行驶场合,道路几何线形以及路侧环境极为多变,驾驶人的驾驶行为呈现出明显的多样性特征,即不确定性。这种不确定性表现在两个方面,比如以弯道行驶为例:其一,对于同一个驾驶人而言,其不同弯道上的轨迹和速度选择行为是有差别的,即弯道的几何特性会影响他/她对行驶轨迹和行驶速度的选择,进一步拓展我们可以认为行驶环境会影响驾驶人的驾驶行为;其二,就同一个弯道而言,不同的驾驶人驶经此弯道时的轨迹选择和速度选择也是有明显差别的,即驾驶人自身行为特性/习惯的差异会表现出不同的驾驶行为,进一步延伸我们认为驾驶行为本身具有多样性和不确定性。基于此,这种确定性的设计方法显然不适用于行驶过程具有明显不确定性特征的公路路线(几何)设计。

实际上,对于穿越山岭地形的公路特别是技术等级较低的双车道公路,只有在极少数的困难位置比如急弯或是弯坡组合段,行驶速度才接近事先假定的设计速度,而在大多数的非受限路段,实际的行驶速度不管是小客车、大客车还是货车通常都是远高于这个值,那么,在设计时按设计速度 V_d 计算得到的超高率、视距和竖曲线半径显然不能满足实际的行驶需求,以至于时常发生恶性的驶离路面事故以及平曲线事故。此外,设计速度方法只是对几何要素的极限值进行控制,而位于极限值之下/之上的要素取值则存在很大随意性,以至于时常出现相邻路段单元要素值突变的情况,同样会导致路线设计不符合驾驶人的心理预期的情况,引发驾驶人在控制操作上的慌乱和紧张,行车负荷增加,各种安全问题由此伴随而来。

因此,自20世纪70~80年代起,一些欧洲国家,比如德国、英国、法国和瑞士等开始认识到设计速度方法的这些缺陷,对其逐步改进,直至建立了与实际公路行驶情况较贴近的运行速度设计方法。

运行速度是用某种观测手段得到的自由流条件下的车辆行驶速度,通常以

观测位置的第 85 分位速度表示(在行车安全性和工程建设费用这两个矛盾之间寻求平衡的结果),即 V_{85} 。通过对速度数据和观测位置所在单元几何变量值的回归分析,可以得到以几何要素为变量的 V_{85} 统计模型。设计者将初步拟定路线的几何要素值沿行驶方向依次代入 V_{85} 模型,可以得到运行速度曲线,用该曲线可以控制相邻线元指标值的平滑过渡,保证几何设计的一致性和连续性,还可以用其确定超高率和视距,或是对事先用设计速度算得的超高率和视距进行检验。但在设计实践中,一般仍需要设置一个名义的设计速度 V_d 来控制平竖曲线最小半径、最大纵坡和极限超高率。

1.2.2 目前两种设计方法的适用环境

尽管在运行速度方法倡导者的眼中,设计速度方法存在种种的缺陷和不足,但作为美国、加拿大、俄罗斯等国至今仍在使用的方法,其必然有存在的理由。为了得到两种设计方法的适用条件,笔者在四川省、重庆市、云南省多条公路上测量了小客车、大客车和货车的行驶速度,这些公路所穿越的地形分别有龙门山系、龙泉山系、邛崃山系、大巴山系和成都平原,设计速度 20~120km/h 不等,有混合行驶的双车道二级/三级/四级公路,也有分向行驶的 4 车道或是 6 车道的高速/一级公路。通过观察速度变化点所在位置的公路几何特性,得到了地形条件、技术等级、几何线形与行驶速度之间的相互作用关系,具体的分析和论述详见本书第 2 章,在此只做简要的概述。

我国目前使用的设计速度方法最早起源于美国,美国至今仍使用设计速度方法设计公路和城市道路,而这是与美国的地形地貌分不开的,除了东部阿巴拉契亚山脉和西岸科迪勒拉山系之外,构成美国国土的主体是广袤无垠的冲积平原、高地平原和内陆盆地,地势极为平坦。由于国土面积不存在稀缺性,城镇和村庄几乎都是建立在平原上,因此美国绝大部分的公路所穿越的都是平缓地形,这样的地形条件允许设计者使用较高的几何线形指标,因此该国大多数州的公路设计速度范围为 35~70mile/h,即 56~112km/h,其中 80~112km/h 又是最常使用的设计速度范围。这种情况下,只要行车道宽度、路面宽度以及路侧净空搭配合理,直道上的行驶速度可以被控制在与曲线行驶速度很接近的范围内,因为驾驶人在直道上的速度选择行为主要是由路宽和路侧环境所决定。并且,在路面幅宽不是很充裕的条件下,80km/h 以上的设计速度已经能够达到驾驶人在双车道公路的期望速度需求。因此,驾驶人的速度选择沿路线行驶方向是基本维持不变的,并且与设计速度基本一致。显然,这已经为设计速度方法提供了比较适合的使用环境。基于以上的分析,我们也就不难理解为什么加拿大、俄罗

斯等国家同样也是采用设计速度方法了,因为他们的国土也是主要由平缓地形构成。

再来看使用运行速度设计方法的国家,比如英国、瑞士和意大利。在英国的三个组成部分中,只有英格兰有一定面积的平原和盆地,而苏格兰和威尔士都是以山岭和丘陵为主;意大利有 4/5 的国土都是由山地组成,其中包括著名的亚平宁山脉、勃朗峰、维苏威火山和埃特纳火山;瑞士更是以山地之国著称,高山和湖泊遍布全境,其中包括世界闻名的阿尔卑斯山和汝拉山,因此,起伏地形是这几个国家共同的地貌特征。在这些国家,对自然环境的仔细呵护和精心维持已经形成深入人心的全民意识,在设计公路时这种环境意识必然的体现为公路路线对地形条件的顺适,因此,小半径曲线(急弯)自然不可避免。众所周知,为了保证曲线行驶的稳定性,驾驶人在进入急弯时要将车速降低至弯道的临界安全速度以下,比如 40km/h、30km/h 甚至是 20km/h,而在半径较大的缓和弯道或是直道上又可以达到很高的行驶速度,比如 70km/h、80km/h 甚至是 90km/h 以上,汽车的行驶速度完全是由驾驶员根据公路的几何特性自行调节,沿路线的行驶方向变化极大,因此,“以设计速度维持车辆恒速行驶”这种假定的驾驶模式根本不存在,设计速度方法完全失去了应用环境。而以增加相邻线元协调性为目的的运行速度的方法则比较能够适应这种情况,该方法通过速差来控制相邻曲线单元的曲度差的均衡过渡,在一定程度上保证了驾驶行为的一致性,即驾驶人在驾驶过程中不会出现预料不及的线形变化。

我国国土面积辽阔、地形地貌构成极为丰富,既有一望无际的冲积平原、连绵起伏的丘陵,也有挺拔险峻的崇山峻岭,还有沟壑纵横的高原,地形地貌的多样化决定了单一的设计速度方法必然出现适应性差异的问题,在山岭区使用此种方法进行路线设计,既会对水文、植被和地质环境造成很大的冲击和破坏,同时也很难与现代车辆的行驶特性以及驾驶人的行为习惯相匹配。因此,需要深入分析不同类型公路上不同车型的行驶特性以及多样化的驾驶行为,构建一种能够适应复杂地形特点的公路路线设计理论,并提供相应的设计手段。

1.2.3 目前运行速度方法的缺陷

设计方法的种种缺陷促使了运行速度方法的提出和运用。对于公路平面设计而言,运行速度方法的最大改进是反映了弯道曲率对驾驶人速度选择行为的影响,通过控制相邻曲线半径值的平滑过渡提高了平面线形的设计一致性,并且用运行速度来计算超高率和视距,增加了行车安全性,因此与设计速度方法相比具有明显的优势。但笔者根据大量的山区公路车辆行驶特性测量数据、自身的

设计经验以及与设计同行之间的交流,认为目前的运行速度方法存在以下几个明显的缺陷。

(1)能够调整的几何变量非常有限

由于是用 V_{85} 模型来计算运行速度曲线,进而实施基于速差的设计一致性评价、线形要素调整以及调整的再评价,那么只有 V_{85} 模型中包含的道路变量才能够被调整。而目前针对平曲线的 V_{85} 模型大都只含半径 R (或是 R 的变异如曲度) 一个自变量,因此,通过速度曲线只能对 R 进行控制。此种情况下,设计一致性仅仅是半径 R 沿行驶方向的一致性,而非平面线形的设计一致性,更非整个道路几何设计的一致性。实际上,公路平曲线转角、路宽、回旋线、平曲线偏转方向等要素都能明显影响到驾驶人的速度选择行为,如图 1-1 所示。而使用目前的 V_{85} 模型,不同弯道只要半径 R 相同,算得的 V_{85} 值都一样,显然不符合实际行驶情况。

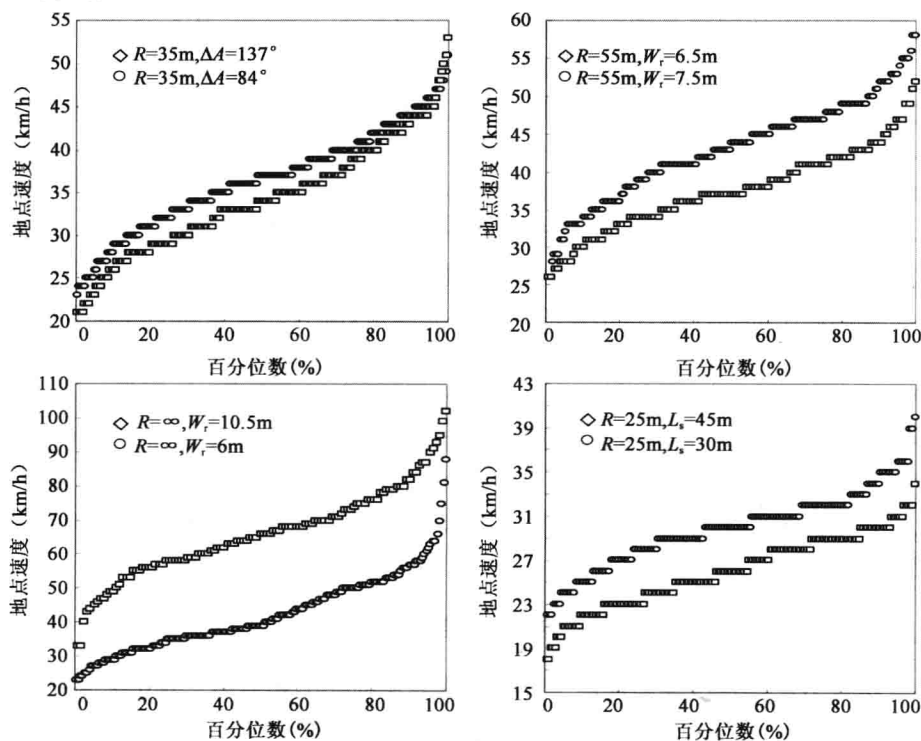


图 1-1 道路因素对行驶速度的影响

美国德克萨斯州运输研究所的 Voigt 教授虽然在其提出的 V_{85} 模型中增加了平曲线转角 ΔA ,认为 ΔA 与 V_{85} 线性负相关,如图 1-2 所示。而笔者在多条双

车道公路上的速度观测结果表明,二者之间虽然是负相关但并不是线性的,并且存在一个临界转角 ΔA_c ,只有在 $\Delta A \leq \Delta A_c$ 时, ΔA 的变化才会引起 V_{85} 的改变。

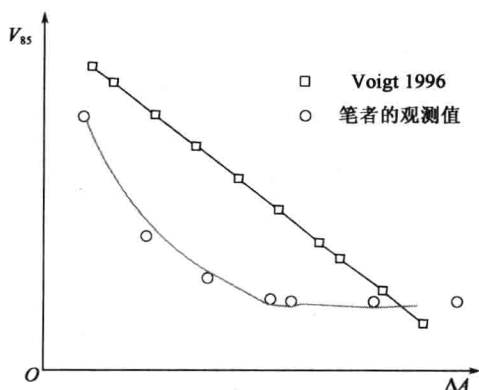


图 1-2 V_{85} 与 ΔA 之间的关系

(2) 没有考虑相邻弯道之间的影响

目前的平曲线 V_{85} 模型都是针对单个弯道,这对平缓地形公路是适用的,因为这些公路的弯道之间通常有较长的直线,隔离了相邻弯道对驾驶行为的影响。对于高速行驶场合($V_d \geq 100 \text{ km/h}$ 的公路)可能也是适用的,因为这类公路的平曲线半径值较大,弯道通常很长,因此弯道之间也可以看作是相互独立的。但设计速度不高的山岭区公路($V_d \leq 80 \text{ km/h}$),连续弯道占很大的比例,由于中间的直线很短或是为零(即两弯道直接相连),相邻弯道之间不管是在驾驶行为上还是在车辆运动学行为上都存在非常明显的耦合影响,其中前者是广为人知的,比如车辆在弯道 C_i 上行驶,前方弯道 C_{i+1} 的几何特性必然要影响到 C_i 上的速度变化。而在车辆动力学行为方面,由于 C_{i+1} 上的行驶轨迹是 C_i 上的延续,因此弯道 C_i 对 C_{i+1} 也会产生作用,在图 1-3 中可以观察到这些影响。

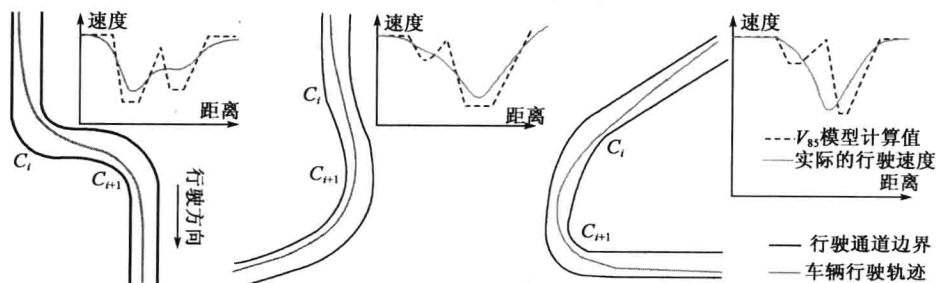


图 1-3 相邻弯道对车辆运动轨迹的影响