

互通设计中匝道几何布置优化研究

许苑

湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051

[摘要] 互通立交是公路网络的重要环节, 匝道空间布置直接影响到了交通安全系数、服务水平以及造价等几个方面的问题, 在文中对匝道空间布置的影响因素进行了深入的研究, 建立了一个以安全、效率、经济、环境为基础的目标函数的多目标最优模型, 从平曲、纵坡、横断面以及线性协调四个方面提出了参数优化的方法, 最后建立了由安全性、效率性、经济性以及环境用地这四个指标组成的综合评估体系。

[关键词] 互通立交; 匝道; 几何设计; 多目标优化

DOI: 10.33142/ec.v9i4.19463

中图分类号: U412

文献标识码: A

Research on Geometric Layout Optimization of Ramp in Interchange Design

XU Yuan

Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430051, China

Abstract: Interchange is an important part of the highway network, and the layout of ramp space directly affects several aspects such as traffic safety coefficient, service level, and cost. In this paper, the influencing factors of ramp space layout are deeply studied, and a multi-objective optimal model based on safety, efficiency, economy, and environment is established. Parameter optimization methods are proposed from four aspects: flat curvature, longitudinal slope, cross-section, and linear coordination. Finally, a comprehensive evaluation system composed of four indicators: safety, efficiency, economy, and environmental land use is established.

Keywords: interchange; ramp; geometric design; multi-objective optimization

引言

随着我国交通基础设施的发展迅速, 互通式立交的数量迅速增长, 匝道是互通式立交内部用于连接两条道路的关键部分, 匝道的设计是否合理直接关系到整个立交的运行效果、行车的安全程度以及工程成本费用等。在传统的立交匝道设计中, 通常以设计师经验或设计规范为导向, 往往只侧重单一目标, 较少对安全、效率、经济与环境等多个目标进行综合考量。这种局限性导致部分互通立交出现线形不连续、视距不良、速度衔接不当等问题, 进而形成事故多发点和交通堵点。因此, 寻找一种综合性的立交匝道几何布设方案十分必要, 这对于提升立交整体性能具有重要的现实指导意义。

1 匝道几何布置要素分析

匝道几何设计是一项庞大的系统工程, 其间各组成部分相互影响、相互限制, 互相影响着匝道的质量好坏。其中最主要的要件就是平面线形、竖向线形、横断面以及相配套的相关视距状况。平面线形主要由圆曲线半径、缓和曲线以及曲线加宽来组成。圆曲线半径是决定车辆可以

在匝道内进行安全驾驶的速度值, 而圆曲线半径的设计不仅要达到规范中的最小半径标准, 还要考虑到匝道与其相连主干道之间以及相邻匝道之间的行驶速度是否匹配, 以免由于速度差异大造成交通事故, 缓和曲线是为了使曲线过渡到直线的过程和超高变化过程平滑, 从而提高驾驶者的舒适度与安全性。纵断面线形要素包含纵坡坡度、坡长、竖曲线半径等。匝道纵坡要兼顾汽车的动力性能和排水需要, 在变速车道段, 一旦纵坡出现变化将会造成驾驶员判断失当的问题。横断面要素则有车道宽度、路肩宽度、加宽方法以及横坡等, 它的设置应该适合不同的车型转向轨迹和行驶的速度需求。另外视距是衔接平、纵、横要素的一个重要约束条件, 它包括停车视距、决策视距以及分流、合流点识别视距, 它是保证匝道行车基本安全的重要标准。以上这些要素都是匝道几何设计的基本条件, 对它们进行详细的探讨也是做好优化工作的基础。

2 匝道几何布置优化方法

2.1 设计目标与约束条件

匝道几何设计布局优化的第一步是要确定设计的目

标及设计限制。设计目标应当是一个多重目标的系统,包括但不限于以下四个方面:①安全目标,也就是要尽可能地降低交通事故发生概率,在此基础上,通过合理设计弯道曲线半径、超高等指标使行车中实际行驶速度接近最高限速,保证了良好的视野效果;②效率目标,也就是追求最大的通过能力和服务水平,在此过程中通过科学设置变速车道长度,避免车辆拥堵等待现象发生,节省出行时间成本;③经济目标,也就是尽量减少整个工程项目的生命周期总费用支出,其中包括征地赔偿、基础设施建设、维护保养等方面的开销以及由于交通事故带来的财产损失;④环保及用地目标,也就是尽量减少对自然环境的切断和破坏,节约使用土地资源,与周围环境相契合等。

而限制条件则是决定了设计方案的可行区域,主要有以下几点:①技术规范约束包括最小平曲线半径、最大纵坡及竖曲线最小半径的要求、视距要求等,应当符合现行《公路路线设计规范》等强制性条文的要求;②几何连接约束指匝道线状要素同主线、被交道路及相邻匝道之间需具有良好的几何过渡形式;③结构物约束是匝道设置受到桥梁、隧道、现有构造物的影响;④用地红线约束为设计不能超过已划出的控制范围。以上各目标及各项约束存在着互相制约的关系,比如想获得更为柔和的线型,就需要占用更多土地,也就导致工程建设费用增加所以有必要采用多准则优化的方法来进行统筹考虑。

2.2 多目标优化模型构建

对于上述多目标、多约束的问题,建立多目标优化模型至关重要。模型可以概括成在诸多约束下找到一组设计方案即设计变量,比如平曲线半径、纵坡、变速车道长度等,使多个目标函数(例如事故预测模型输出值、通行能力、工程造价等)尽最大可能最优的集合体。而各个目标常常会互相矛盾,很少存在一个绝对最优解,所以通常会有几个帕累托最优解,在此基础上设计者可以根据具体工程情况和个人喜好选取最终的设计方案。

模型建立的重点是对目标函数的量化。比如对安全性目标可以利用建立以线型一致性指标为基础的事故预测模型对其进行量化,即其中是行车速度差,是曲线半径。对于有效性目标可以运用微观交通仿真得到匝道区通行能力和平均延误作为替代模型。经济性的目标则可以通过工程量清单估价法来进行测算。对于环境目标可以量化成土方平衡数量、植被破坏面积乃至噪音影响距离等。从求解方法来说,如果是变量少、模型简单的问题就可采取加权求和法化简为单目标问题;对于复杂非线性的、多峰的问题,则普遍使用了例如遗传算法(GA)、粒子群优化算

法(PSO)等一系列智能优化方法,由于它们具有非常好的全局搜索的能力;用几何设计参数作染色体,用综合评价函数做适应度函数,可迅速得到大规模解空间中的一整套帕累托最优方案,从而给设计选择提供可靠的数据基础。

3 优化参数分析与策略

3.1 平曲线参数优化

平曲线参数是影响匝道行车速度及安全的重要因素之一,在规划方案中,应该从线路平顺和速度匹配的角度去考虑问题。一方面要克服单纯地满足最小半径要求的理念,转变成追求行车速度的顺畅转换。即建立匝道整体的速度估算方程,调节圆曲线半径以及缓和曲线长度来使前后两个路段之间最大速度差保持在10km左右;另一方面对于小半径曲线而言,则需要注重对超高和平曲线加宽部分精确化的设计。超高方面既要保证其能够提供足够的离心力支撑作用以防止车辆失稳甩出道路外侧,又要求其有良好的排水性能并能在低车速时保证车辆具有较好的舒适度,为此可以采取设置超高渐变率和横坡联合调控的方式加以改善。加宽设计必须模拟计算车辆行驶轨迹,使车道宽度符合车辆扫掠宽度标准。同时对复合型匝道来说其平曲线往往是由许多反向或者同向的曲线构成的,需要着重处理曲线之间衔接的形式,在适当的位置增加足够长度的过渡直线或者是大半径回旋线,避免出现“断背曲线”,保证视觉上以及驾驶心理上的连贯性。

3.2 纵断面参数优化

纵断面的设计关系到匝道爬坡能力、排水设施及视线距离的问题,优化方案的关键就是平纵结合的合理性问题。首先要做到的是不应在圆曲线范围内布置变坡点,尤其在小半径的圆曲线范围内布置,防止引起驾驶员的视差以及操作难度增大,纵坡设计要根据车的动力性能来进行,尤其是大货车所占的比例较高的匝道,最大纵坡的使用要慎重,在不得已的情况下可以进行论证后选取较小的坡度并配备爬坡车道等,竖曲线半径的选择也要注意与平曲线半径相匹配,一般来说平曲线半径应该大于竖曲线半径,且两者的长度应该相对均衡。另一项需要优化的地方就是匝道起终点处与主线之间高程的过渡问题。对匝道路面纵断面进行改进,使变速车道部分和平行的主线之间的纵坡差异保持在标准要求内,防止较大的坡度变化引起车辆汇流困难或者急刹车的情况发生;因限高问题而不能设置变速车道段的部分,则可以通过纵断面的设计改变,既满足桥梁下的净空高度要求,也满足匝道本身的纵坡连续的要求。

3.3 横断面参数优化

横向断面设计虽然没有纵向线性设计那样耀眼夺目,

但是进行合理的横向断面设计也是非常重要的,合理的横向断面设计主要是针对车道宽度、路缘带宽度,以及横向坡度的合理分配。传统的匝道多用固定的横断面形式,而现代的设计更侧重于根据行驶车型组成以及行车轨迹的“动态”变化。对于单向单车道路段,在小半径的弯道路段并且有较多的大车通行的情况下应该使用轨迹仿真方法,适当的提高弯道内侧或者外侧的加宽量,同时也可以设置一定宽度的硬路缘带作为“余宽”。对于双车道匝道则需要对车道分配以及变分流地段的横断面过渡进行改善。横坡布置要与超高过渡保持一致,在超高的过渡区,必须保证横坡的过渡坡度满足驾驶员的感觉要求,不得形成不利于排水的不良横坡;同时还需要兼顾交通标志标线等各种附属设施安装位置是否会对行车净空造成遮挡。

3.4 视距与线形协调性优化

视距是对平纵面、横设计结果进行校验并连接起来的最直观标准,在此之后应当跳出单纯的停车视距检验,转向更为完整的三维视距检验体系,一方面要进行三维视距检验,使用 DEM、设计模型进行模拟车辆在匝道各处的实际视程是否会有因为路堑边坡挡墙、桥梁护栏、广告牌而产生的盲区,特别是针对凸型竖曲线加平曲线路段来说最为不利,需要通过调整平曲线或者竖曲线的半径来进行保证;另一方面要加强分流区和合流区的鉴别视距,在研究中发现分流区事故的发生率跟驾驶员能否清楚识别出口有着很大的联系。优化时要从线型上加设合理的视距台来保证司机能在驶入到分流鼻端之前有足够的行车空间辨认出入口并实施好降速与变道的操作。线形协调性的优化不仅仅反映在线型的视距当中,还包括平、纵、横三者之间的和谐与统一,“平包竖”的优良配比方式,不得出现大直线小弯道的情况等都是线形协调性的优化途径。

4 优化效果评价体系

4.1 安全性评价指标

安全性是一条匝道设计方案中最主要的一个方面,指标选取应该包括事故发生的可能性及其危害大小两个方面。可以选取如下几种:

①运行速度匹配指标,相邻路段的最大运行速度差的绝对值、设计速度与运行速度的速度差,差值越小则安全性越好。

②设计一致性指标,可用基于曲率变化率的评价模型,来判断线路在几何上是否平顺顺畅。

③视距符合指标,就是实际三维视距与规定的停车视距、决策视距之比,比值大于1就符合。

④潜在事故预测指标,用已经建立起来的事故预测模

型,输入优化后的几何参数,得到预测出的事故率或者事故数量,做为不同设计方案之间的横向对比参考。

4.2 效率性评价指标

效率性的主要评判标准是匝道对于改变行车状态的接纳能力和顺畅度,主要评价指标为:

①通行能力,指在设定的服务水平内,最大可能的每小时可以通行的最大车流量,一般由仿真模型确定。

②平均延误,尤其是车辆驶入匝道合流段进行等候主线间隔而造成的延误时间,延迟越短,效率越高。

③变道车道占有率,检测车辆行驶在加速车道上加速情况是否合适,有没有出现由于长度不够而在鼻头附近强行并入的情况。

④服务等级,由速度、平均延误等参数综合评分的服务等级,A为最优,F为最低。

4.3 经济性评价指标

经济性指标应当包含全生命周期的成本观点。具体是:

①建设初期投资,包括土地征收补偿费、路基路面、桥涵隧、防护等直接支出。

②运营维护支出,日常的小规模保养、中大规模维修、冬季防雪、绿化管护等。

③用户成本:车辆在匝道上行驶造成的额外油耗和轮胎损耗还有时间的耗费所付出的成本。

④事故成本:由于存在潜在事故隐患所导致的潜在经济损失。考虑用户费用和事故成本之后会使几何设计更有说服力地体现整体上的经济可行性。

4.4 环境与用地评价指标

在可持续发展思想指导下,环境保护以及用地评估越来越受到重视。指标如下:

①占用土地面积,匝道及其附属设施用地总面积,在耕地较少的地方是最重要的限制因素。

②土石方数量,大量填土或开挖都会提高工程费用,破坏原有的地形地貌,在进行方案设计时应尽量做到土石方平衡,少占借土场地和弃渣场。

③生态损害指数,可以量化的指标,来衡量匝道对沿线植被、水域、动物栖息地造成的切割与阻碍情况。

④景观匹配性指标,用目测判断法,可以衡量匝道路线和周围的自然地形、周边建筑物匹配的程度,避免出现不和谐的建筑物给人带来的视觉污染。

5 结束语

互通设计中的匝道几何设置优化是一个多目标均衡以及多个变量联合的复杂任务,在此过程中需要对匝道几何设置的主要影响因素进行系统考察并建立相应的多目

标最优化模型,提出平面、纵断面、横断面及线形协调性的参数优化方案,构建出四个维度的综合评价指标。目前的匝道几何设置已经由过去的“符合规范”的设计转变为以“性能为目标”的设计理念,在未来应该开发更加准确的行驶速度预估模型以及事故概率模型,尝试应用人工智能和 BIM 平台结合的方式进行智能化的设计优化,在匝道与主线衔接处开展更多的微观模拟及驾驶模拟的研究工作,在人因工程方面寻求更多的优化可能。

[参考文献]

[1]许文刚,黎军.互通匝道合流连接部设计分析[J].公路,2024,69(7):61-67.

路,2024,69(7):61-67.

[2]张永春,赵怡荷.高速公路互通立交出口匝道安全设计与评价[J].运输经理世界,2025(20):55-57.

[3]苏冠宇.高速公路互通立交出口匝道安全设计与评价[J].工程技术研究,2024,9(12):152-154.

[4]逢文玉.互通立交出口匝道的安全设计和评价研究[J].交通世界,2025(2):19-21.

作者简介:许苑(1993.9—),男,汉族,湖北省仙桃人,工程师,2018年6月毕业于武汉理工大学道路与铁道工程,硕士研究生,现从事高速公路路线及互通交叉设计。