

基于三维模型的互通匝道视距分析研究

曹峰杰

湖北省交通规划设计院股份有限公司 湖北 武汉 430051

摘要: 为了保证高等级公路互通立交设计中的行车视距安全性要求。本文针对公路的三维线形, 基于三维视距理论、公路三维空间模型及视距分析, 建立了适用于多种线形单元的三维动态视距计算模型。以某高速公路枢纽互通为实例, 对互通各匝道进行三维动态视距分析, 结合规范规定, 优化互通匝道平面及纵断面, 为高等级公路互通设计的视距安全分析提供参考。

关键词: 高速公路; 互通; 三维视距分析; 平纵面

1 前言

高速公路互通立交设计, 受用地规模限制、路线垂直交叉、匝道线形指标低等制约因素, 极易造成驾驶者行车视线受阻, 影响行车速度及安全, 尤其是驶入驶出匝道的车辆, 很容易因视距受限、研判不及时, 从而引发行车安全等问题, 极大地降低互通匝道出入口的通行效率及安全性。

行车视距主要通过控制路线单元平纵线形指标来实现, 即平面曲线内通过平曲线最小半径、绘制视距曲线及视距三角形以保证视距要求, 纵面线形则通过控制纵断面最大纵坡度、凸型竖曲线半径来保证驾驶员视距^[1]。然而, 公路是由平纵横组成的一种复杂三维空间实体, 仅通过计算平、纵向视距很难完全保证行车安全。尤其是处于急弯、陡坡、互通立交等视线极易受阻路段。在匝道出入口分合流时, 更应确保主线与各匝道间具有充足的通视条件。本文采用三维动态视距计算模型及视距评价指标, 综合考虑公路三维线形、车速等多重因素, 以某高速公路枢纽互通为例, 对互通匝道的行车安全视距进行计算与检验。

2 公路三维线形拟合模型

三维空间视距检验分析, 主要通过求解视点、物点的三维坐标及两者之间距离来判定驾驶员通视条件^[2]。相较于传统视距分析, 三维空间视距分析更加全面、精确及直观, 更有利于匝道线形安全设计。

根据文献^[3]研究成果可知, 三次均匀B样条曲线具有拟合线形光滑、拟合性高等优点, 能够更精确的拟合采样点曲线特性。本文采用拟合性高的三次均匀B样条曲线来建立公路三维线形拟合模型。首先, 通过设计文件获取互通匝道平、纵、横线形相关参数, 利用控制点坐标计算公路线位有序点的三维坐标, 然后, 依次求解连续的四个控制点三维坐标序列, 进而拟合出公路三维线形。按照等距步长t拟合计算公路线位上各有序点的三维坐标(x, y, z), 然后拟合出样条曲线点的三维空间坐标矩阵。

假设n+1个有序控制点的三维坐标依次为 $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 、 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 、... $P_{j-1}(X_{j-1}, Y_{j-1}, Z_{j-1})$ 、 $P_j(X_j, Y_j, Z_j)$ 、 $P_{j+1}(X_{j+1}, Y_{j+1}, Z_{j+1})$ 、... $P_n(X_n, Y_n, Z_n)$ 。其 P_j 和 P_{j+1} 两点之间的三次均匀B样条曲线拟合计算的矩阵表达式为:

$$[X(t), Y(t), Z(t)] = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{j-1} & y_{j-1} & z_{j-1} \\ x_j & y_j & z_j \\ x_{j+1} & y_{j+1} & z_{j+1} \\ x_{j+2} & y_{j+2} & z_{j+2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

由(1)式可计算解得公路线位上任意一有序点m的三维空间坐标 $P_m(X_m, Y_m, Z_m)$ 为

$$\begin{cases} x_m = \frac{(-x_{j-1} + 3x_j - 3x_{j+1} + x_{j+2}) * t^3 + (3x_{j-1} - 6x_j + 3x_{j+1}) * t^2 + (-3x_{j-1} + 3x_{j+1}) * t + (x_{j-1} + 4x_j + x_{j+1})}{6} \\ y_m = \frac{(-y_{j-1} + 3y_j - 3y_{j+1} + y_{j+2}) * t^3 + (3y_{j-1} - 6y_j + 3y_{j+1}) * t^2 + (-3y_{j-1} + 3y_{j+1}) * t + (y_{j-1} + 4y_j + y_{j+1})}{6} \\ z_m = \frac{(-z_{j-1} + 3z_j - 3z_{j+1} + z_{j+2}) * t^3 + (3z_{j-1} - 6z_j + 3z_{j+1}) * t^2 + (-3z_{j-1} + 3z_{j+1}) * t + (z_{j-1} + 4z_j + z_{j+1})}{6} \end{cases} \quad (2)$$

其中, t 为步长变量参数, $t \in [0, 1]$;

结合文献^[4]的研究结果可知, 通过上述方法拟合的公路三维线形误差均不大于0.2m, 符合行车视距计算的基本要求。

3 三维空间视距计算模型

3.1 三维空间视距计算原理

根据公路三维线形拟合模型, 计算出驾驶者视点位置的三维空间坐标, 再利用空间两点间通视无阻原理, 求解得到驾驶者视线所能观察到前方障碍物的最远通视距离, 即为驾驶员三维空间视距^[5]。其具体原理为: 在公路使用者可视范围内, 首先设定视点 P_1 距物点 P 的范围值变量, 最远通视距离处的路面最左侧边角点 P_2 和最右侧边角点 P_3 , 由 P_1 、 P_2 、 P_3 三点构成驾驶员视线三角面。如图1所示。

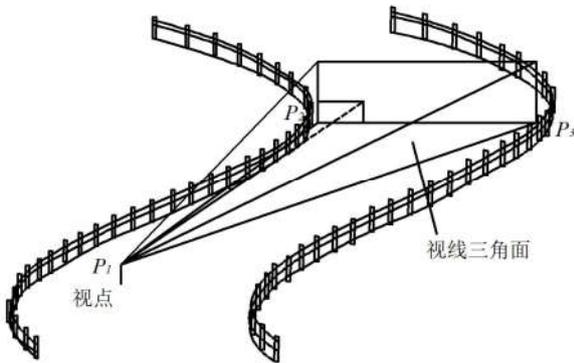


图1 公路空间视距计算示意图

将公路三维线形模型中的任意三维曲面离散分解成由若干个三角网面组成, 并计算得到驾驶员视线三角面与公路模型其他三角网面间的交线, 并对交线进行投影变换, 得到实际的三维空间视距 S 。

3.2 视点和物点的三维坐标计算

$$A = \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} \quad B = \begin{vmatrix} z_2 - z_1 & x_2 - x_1 \\ z_3 - z_1 & x_3 - x_1 \end{vmatrix}$$

对一般式进行转化, 除以 $\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$, 可得其法线式为

$$x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma - p = 0 \quad (6)$$

3.4 求解“视线三角面”与其他面相交

将驾驶员视线三角面旋转并调整为原点高程的水平面, 再类似转换处理其余相关曲面, 最后核验三角面内各点的空间高程坐标。如若区域内有大于0的高程坐标点, 则判定为视线遮挡点。

新坐标系旋转变换公式设定为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据公路三维线形拟合模型求解, 设公路行车道中心线的三维曲线方程为

$$L(x_0 \quad y_0 \quad z_0) = \begin{cases} x_0 = x(t) \\ y_0 = y(t) \\ z_0 = z(t, b) \end{cases} \quad (3)$$

其中, t 为变量参数; b 为中心线与视点间的水平距离, 一般为常数。

由此求得视点 P_1 、障碍物处路面最左侧边角点 P_2 及最右侧边角点 P_3 的三维空间坐标为

$$P_i(x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}) = \begin{cases} x_{pi} = x(t+s) + \frac{b_i y'(t+s)}{\sqrt{x'(t+s)^2 + y'(t+s)^2}} \\ y_{pi} = y(t+s) - \frac{b_i y'(t+s)}{\sqrt{x'(t+s)^2 + y'(t+s)^2}} \\ z_{pi} = z(t+s, b_i) + h_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: h_1 为机动车驾驶者视点目高, 一般小客车取1.2m, 货车取2.0m; h_2 、 h_3 为物高, 一般取值为0.1m。

s 为常数变量增量(当 $i=1$ 时, $s=0$)。

3.3 建立视线平面方程

通过视点 $P_1(x_{p1}, y_{p1}, z_{p1})$, 左侧边缘点 $P_2(x_{p2}, y_{p2}, z_{p2})$, 右侧边缘点 $P_3(x_{p3}, y_{p3}, z_{p3})$ 的三维空间坐标, 利用空间解析几何, 即可确定公路视线平面方程为

$$\begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ x_{p1} & y_{p1} & z_{p1} & 1 \\ x_{p2} & y_{p2} & z_{p2} & 1 \\ x_{p3} & y_{p3} & z_{p3} & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

其一般式为 $Ax+By+Cz+D=0$, 式中

$$C = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix} \quad D = -(Ax_1 + By_1 + Cz_1)$$

新坐标系 OZ 方向设定为视线三角水平面法线方向, 方向余弦 (n_1, n_2, n_3) 值为: $n_1 = \cos \alpha$; $n_2 = \cos \beta$; $n_3 = \cos \gamma$ 。 OX 取 P_2P_3 的方向, OY 取 P_1 指向 P_2P_3 垂点 (x_d, y_d, z_d) 的垂线方向, 保证视线平曲面上的所有点具有同一 Z 坐标值, 记为 Z_0 , 令 $Z - Z_0 \Rightarrow Z$ 。

3.5 三维空间视距计算和遮挡判定

(1) 视距遮挡判定

视线平曲面转换后, 其 $\Delta P_1P_2P_3$ 三角面区域为需核验的有效区域。具体判定方法为: 将公路任意曲面内的某点原坐标 (x_c, y_c, z_c) , 通过坐标转换为新坐标 (X_c, Y_c, Z_c) , 判断 (X_c, Y_c, Z_c) 是否位于 $\Delta P_1P_2P_3$ 内。若不在, 则该点不可能为遮挡点; 若在, 可根据 Z_c 是否大于 Z_0

来判定其遮挡性。

(2) 三维空间视距计算

确定遮挡点三维坐标后，采用迭代法计算视点相距

$$S = \min \left(S_{\max}, \sum_{k=i}^{j-1} \left[\sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2 + (z_{k+1} - z_k)^2} \right] \right) \quad (8)$$

且需要满足条件： $\theta_{i,j} \leq \theta_{\max} < \theta_{i,j+1}, j > m$;

式中： S_{\max} 为理想状态下公路使用者所能辨别障碍物的最远距离； i 为视距计算点编号； j 为视距验算点标号； m 为第一个能看到点编号； $\theta_{i,j}$ 为视线中点与计算点、检验点连线所组成的夹角， θ_{\max} 为驾驶员在检验点方向所需最大视角。

4 三维空间视距评价

4.1 停车视距计算

根据公路工程技术标准，汽车停车视距 S_{cal} 采用运行速度 V_{85} 计算可得

$$S_{cal} = \frac{v_{85}t}{3.6} + \frac{(v_{85}/3.6)^2}{2gf} \quad (10)$$

式中： S_{cal} 为小客车停车视距； V_{85} 为路段运行速度， km/h ； t 为反应时间，取 $2.5s$ ； g 为重力加速度，取 $9.8m/s^2$ ； f 为纵向摩擦系数。

遮挡点的距离，即为三维空间视距 S 。三维空间视距计算模型可表述为

为保证公路行车安全性，停车视距应根据运行速度 V_{85} 对应的视距值和设计速度 V 所对应的视距值，两者取大值。

4.2 三维空间视距评价

设计时速 V 所对应的停车视距值记为 S_{ds} ，其对应的会车视距记为 $S_{dc} = 2S_{ds}$ ；运行速度 V_{85} 对应的视距值记为 S_c ，其对应的会车视距记为 $S_{cc} = 2S_c$ ；公路三维视距计算模型得到的空间视距记为 S_a ；驾驶员的极限视距记为 S_{\max} 。对于高速公路及互通立交匝道，分别以 V 和 V_{85} 所对应的停车视距值作为不同安全水平的阈值，表示为 $S_p = \min(S_{ds}, S_c)$ ， $S_g = \max(S_{ds}, S_c)$ ；对于双向行驶公路，分别以 V 和 V_{85} 对应的会车视距值作为不同安全水平的阈值，表示为 $S_p = \min(S_{dc}, S_{cc})$ ， $S_g = \max(S_{dc}, S_{cc})$ 。并结合公路相关规范规定，采用三维视距计算模型评价互通各匝道平纵横组合设计的视距评价标准见表1所示。

表1 三维空间视距评价标准

评价标准	视觉视距标准评价	安全水平	线形组合描述	改善措施
$S_a \in [S_g, S_{\max}]$	驾驶员视线优、开阔	好	线形组合设计优	线形无需调整
$S_a \in [S_p, S_g)$	驾驶员视线一般	中	线形组合设计良	条件允许时优化路线线形，调高路线指标，增设视距警示标志，增设视距平台
$S_a \in (0, S_p)$	驾驶员视线差、受阻	差	线形组合设计差	优化路线线形，调整路线指标，增设视距平台

5 工程实例分析

5.1 工程概况

某高速公路主线采用双向四车道标准，设计时速为 $100km/h$ ，路基断面宽为 $26m$ 。其枢纽互通是为满足城市主干路与该高速公路的交通转换，服务于周边城区及乡镇上下本项目而设置的八角双环式变形苜蓿叶枢纽互通。由2条环形左转弯匝道（D、G）、2条半直连式左转弯匝道（B、C）和4条右转向匝道（A、E、F、H）组成。匝道设计速度 $40km/h$ （环形匝道）、 $60km/h$ ，单车道路基断面宽 $9m$ ，双车道路基断面宽 $16.5m$ 。见图2所示。

5.2 视距分析

本互通所处位置地势平坦，互通各匝道基本为填方路基。其中4条右转向匝道（A、E、F、H）线形指标高，视线良好。本次重点核验分析半直连匝道（B、C）及环形匝道（D、G）的三维视距。根据规范要求，不同设计速度的互通匝道停车视距分别为 $40m$ （ $40km/h$ ）、

$75m$ （ $60km/h$ ），运行视距则根据各匝道车辆运行速度计算可得。通过本文的三维空间视距计算模型分析计算枢纽互通四条匝道三维空间视距，并将其与匝道设计视距和运行视距进行对比分析，见图3所示。

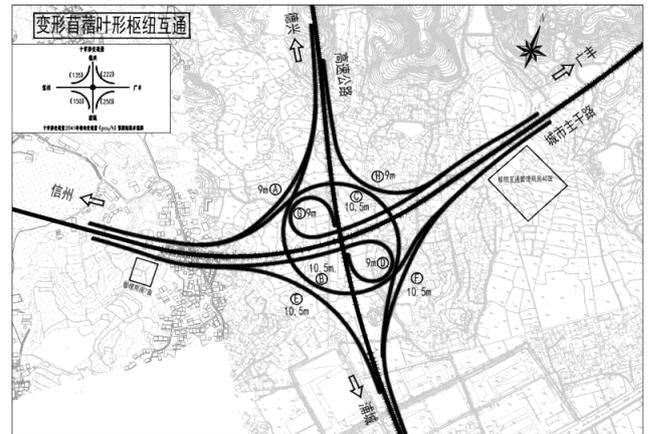


图2 高速公路枢纽互通平面图

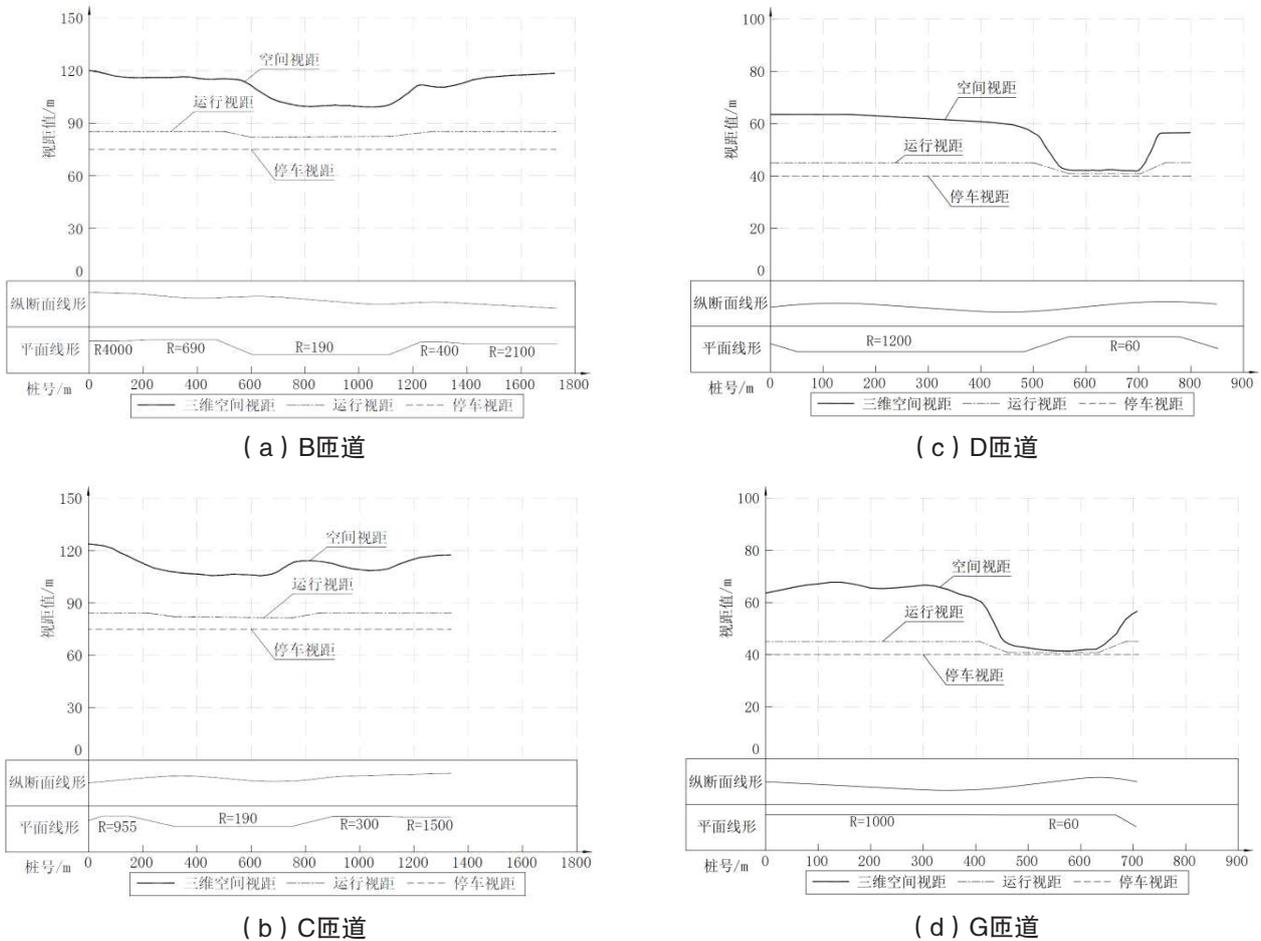


图3 互通环形匝道视距对比分析图

通过对该高速枢纽互通各匝道视距分析检验, B、C匝道计算所得三维空间视距均高于匝道设计视距和运行视距, 其匝道行车视距较优, 安全水平好。D、G左转匝道则由于受匝道线形限制, 圆曲线半径取用60m。经本文方法计算检验发现, 由于D、G匝道圆曲线半径较小, 实际空间视距仅能满足停车视距40m要求, 但环形匝道视距受限因素众多, 若匝道内侧遮挡物过多, 会严重影响匝道上车辆的行车安全及内环匝道汇入主线视距。结合三维空间视距计算模型分析, 建议保证D、G匝道圆曲线半径不小于60m, 同时避免环形匝道内侧5m范围内存在大型遮挡物遮挡驾驶员视线, 确保匝道满足视距要求。

6 结语

本文通过提取互通匝道平、纵、横等设计参数, 运用样条曲线的优势, 高精度拟合高速公路互通匝道的三维空间线形。利用三维视距的几何线形原理, 综合考虑公路三维特征、驾驶员视野、灯光、障碍物等因素, 提出了公路三维视距计算模型, 及三维空间视距的判定、评价。将三维空间视距计算模型应用于某高速公路枢纽

互通各匝道进行视距安全性分析验证, 判断分析互通内环匝道视线受阻情况, 并提出改善优化措施。为高等级道路互通匝道线形设计、行车安全分析评价及改善匝道交通安全提供一定理论基础和技术参考。

参考文献

- [1]JTG/T D21-2014,公路立体交叉设计细则[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [2]王军平,吕纪云,岳占福.高速公路互通立交路线视距的探讨[J].公路交通科技,2019(6):171-172.
- [3]张娟.基于三维动态视距的公路交通安全评价方法研究[D].北京:北京交通大学,2009.
- [4]Liao Jun-hong, Shao Chun-fu, Zhang Gao-qiang, et al. New algorithm for fitting 3D highway alignment from geometric data[C].3rd International Congress on Image and Signal Processing, Shan Dong, China, 2010.
- [5]廖军洪,邵春福,郭洪波.公路三维动态视距计算方法及评价技术[J].吉林大学学报(工学版),2013(5):640-645.