

文章编号:1005-0523(2014)06-0017-07

选线阶段公路三维仿真模型快速构建方法

江良华¹,倪洪亮²,王晓安³,杨鹏²

(1.昆明理工大学交通工程学院,云南 昆明 650224;2.云南省交通规划设计研究院,云南 昆明 650011;

3.云南省交通科学研究院,云南 昆明 650011)

摘要:为使驾驶模拟系统应用于公路选线阶段的备选方案评价与比选,基于公路勘测理论,利用备选方案的平、纵、横初步设计资料构建公路三维模型;利用数字地面模型,判断公路两侧填挖关系,按指定的坡比和台阶宽度,自动生成道路两侧边坡模型;搜索全线填挖高度,自动提取桥梁和隧道信息,并构建桥梁和隧道的仿真模型,最后将上述构建的模型输出为 Open-Flight 格式。实例应用效果表明:该方法可快速构建选线阶段的公路三维模型,所构建的模型与实体模型误差小,模型格式具有较好的通用性和可移植性。该方法能有效缩短利用驾驶模拟系统进行备选方案评价与比选的视景开发周期。

关键词:道路工程;选线评价;公路建模;模型输出

中图分类号:U412.32

文献标志码:A

选线是公路建设的首要工作,关系着公路的运行效率和行车安全。选线阶段备选方案的评价与优化是公路设计部门亟待解决的问题,当前,众多科研单位和高校纷纷引进驾驶模拟系统,为公路选线过程中备选方案的可行性研究等提供了重要平台。驾驶模拟系统通过构建备选方案的虚拟视景,对实验数据的统计与分析,评价备选方案的线形一致性和交通安全性^[1-3],搜索全线潜在的事故黑点,为线形方案舍选或方案改进提供依据。因此,针对驾驶模拟系统应用需求,实现选线阶段公路三维仿真模型的快速构建具有重要的理论研究意义和实用价值。

目前,国内公路三维模型建模系统(如纬地、鸿业)已实现公路三维模型的快速构建和浏览,但未公布其具体建模方法,暂未提供仿真模型数据输出接口。国内已引进驾驶模拟系统的科研单位或院校一般通过以下两种方式构建公路三维仿真模型:一是使用国外引进的驾驶模拟系统自带的建模软件,但因国外公路设计数据的组织型式与国内存在差异,数据整理和转换工作量大,且应用范围有限;二是将建模工作承包给专业建模公司,这种方式建模成本高,建模周期长。总体而言,在选线阶段,目前公路三维模型构建方法存在以下缺点^[4-5]:

1) 传统的公路仿真模型建模软件(如 3DS Max, Maya)需根据线形的详细设计方案通过曲线拟和的方式(如 Bizer 角点,放样操作)近似模拟道路实体,但选线阶段只是对线形方案的初略设计,没有完备的线形设计资料。

2) 传统的模型构建软件构建公路三维仿真模型的建模周期长,无法适应选线阶段线形方案备选多选,更新速度快等特点。

3) 传统建模方法构建的公路模型准确度不高,道路模型为虚拟视景的重要内容,其准确度关系到实验数据的准确性和可靠性,因而无法保证实验结论的可信度。

收稿日期:2014-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(71261012);云南省交通厅重点项目(KKK0201202084)

作者简介:江良华(1984—),男,助理实验师,研究方向为交通系统安全与仿真。

4) 用于驾驶模拟实验的公路仿真模型要求模型的层次分明,数据量少,调用方便,但传统模型数据格式为保证模型编辑的方便性和操控性,存储了大量于仿真无用的信息。

综上所述,针对选线阶段公路三维建模现存问题,以提高建模速度和准确度,提高模型移植性和通用性为目标,探讨选线阶段的公路三维模型快速构建方法,具体流程和方法如下:

- 1) 以平,纵线形交点参数和横断面各部分设计尺寸为输入,构建道路主体模型;
- 2) 根据道路设计高程和实际地面高程,划分道路填挖,桥梁,隧道路段;
- 3) 根据道路主体模型边界和数字地面模型(DTM)构建道路边坡模型;
- 4) 根据提取的公路桥梁和隧道路段,构建桥梁和隧道模型;
- 5) 将以上构建的道路,边坡,桥梁,隧道等模型输出为 OpenFlight 模型数据(*.flt)。

1 道路主线模型构建

文中“道路主线模型”指根据道路平,纵,横数据构建的包含道路中央分隔带,路缘石,行车道,路肩等的模型。选线阶段,需根据选线人员初步拟定的平面和纵断面线形交点计算道路中桩坐标和设计高程,根据道路左右幅各组成部分的设计尺寸构建道路主线模型。

公路平面线形的所有复杂型式可以归结为直线,圆曲线,缓和曲线的组合^[6-7],文献[8]中介绍了直线,圆曲线和缓和曲线的测算原理和方法,本文从程序实现角度出发,归纳公路中桩坐标计算方法,将局部坐标系一至全局坐标系中,将平面线形要素分为直线,第1缓和曲线,圆曲线,第2缓和曲线线形要素,各线形要素计算方法如图1所示。

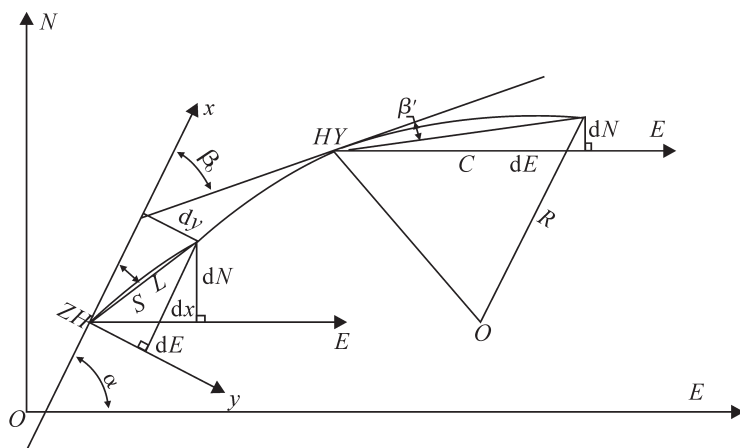


图1 公路中桩坐标计算

Fig.1 Highway pile coordinate calculation

设 $JD_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$, $JD_i(x_i, y_i, z_i)$, $JD_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 为道路主线上相邻的三个交点, JD_i 处转角为 α , JD_{i-1} 到 JD_i 的向量为 $\mathbf{n}_1$, JD_i 至 JD_{i+1} 的向量为 $\mathbf{n}_2$ 。 JD_{i-1} 至 JD_i 直线部分坐标根据 JD_{i-1} 和 JD_i 两点坐标确定(下面未列出详细计算公式)。计算第1缓和曲线各中桩坐标时,以过缓和曲线起点的切线为 x 轴建立相应的局部坐标系,计算第2缓和曲线各中桩点坐标时应以第2缓和曲线的终点为原点,以第2缓和曲线终点的切线为 x 轴建立相应的直角坐标系。具体计算方法如下:

转向: $Z_{\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2} > 0$ 左转, $Z_{\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2} < 0$ 右转。 $Z_{\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2}$ 表示向量 $\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2$ 的 Z 分量。

$$\begin{cases} N_l = N_{ZH} + k_1 s_l \sin(\alpha_1 + k_2 \beta) \\ E_l = E_{ZH} + k_1 s_l \cos(\alpha_1 + k_2 \beta) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} N_l = N_{HY} + k_1 c_l \sin(\alpha_1 + k_2 \beta_0 + k_2 \beta' / 2) \\ E_l = E_{HY} + k_1 c_l \cos(\alpha_1 + k_2 \beta_0 + k_2 \beta' / 2) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} N_l = N_{HZ} + k_1 s_l \sin(\alpha_2 + k_2 \beta) \\ E_l = E_{HZ} + k_1 s_l \cos(\alpha_2 + k_2 \beta) \end{cases} \quad (3)$$

式中: N_l, E_l 分别为第1缓和曲线,圆曲线,第2缓和曲线上距起算点 l 处的中桩点坐标; k_1 为道路前进方向系数,如果 $N_{JD_i} \geq N_{JD_{i-1}}$ $k_1 = 1$, $N_{JD_i} < N_{JD_{i-1}}$ $k_1 = -1$; k_2 为道路转向系数,左转: $k_2 = 1$,右转: $k_2 = -1$; N_{ZH}, E_{ZH} 为直缓点处坐标; N_{HY}, E_{HY} 为缓圆点处坐标; N_{HZ}, E_{HZ} 为圆缓点处坐标; α_1 为 JD_{i-1} 和 JD_i 确定的直线与 E 轴的夹角, $\alpha_1 \in (0, \pi)$; ZH 为直缓点; HY 为缓圆点; S 为弧长; L 为弦长; α_2 为 JD_i 和 JD_{i+1} 确定的直线与 E 轴的夹角, $\alpha_2 \in (0, \pi)$; β 为第1缓和曲线上距起算点 l 处的中桩点相对于起点切线转过的角度, $\beta = \arctan(\frac{dy}{dx})$; β_0 为第1缓和曲线终点相对于起点切线转过的角度, $\beta_0 = \frac{l_s}{2R}$; β' 为圆曲线上距离起点 l 弧长处中桩点割线与起点切线的夹角, $\beta' = \frac{l}{R}$; s_l 为缓和曲线上距起点 l 弧长处中桩点割线长度, $s_l = \sqrt{dx^2 + dy^2}$; c_l 为圆曲线上距起点 l 弧长处中桩点割线长度, $c_l = 2R \sin \frac{\beta'}{2}$ 。

$$\begin{cases} dy = \frac{l^3}{6A} - \frac{l^7}{336A^3} + \frac{l^{11}}{42240A^5} - \cdots \\ dx = l - \frac{l^5}{40A^2} + \frac{l^9}{3456A^4} - \frac{l^{13}}{599040A^6} + \cdots \end{cases} \quad (4)$$

式中: $A = L_s^2 R$ 为缓和曲线长度。

纵断面设计是根据道路等级,沿线自然条件和构造物控制标高等,确定各坡段的纵坡度和坡长的过程,竖曲线线形要素包括直坡段和凸形竖曲线或凹形竖曲线,公路中线的设计高程计算方法如下

$$E_i = h_0 + (x_i - Q)P_{SL} - \frac{(x_i - Q)^2}{2R} \quad (5)$$

式中: E_i 为桩号 x_i 处的标高; x_i 为预计算点的桩号; h_0 为转折点处高程,如公路起点,竖曲线开始点; Q 为转折点处桩号; P_{SL} 为前纵坡坡度值; R 为凸形竖曲线或凹形竖曲线半径,对于凸形竖曲线 R 取正值,对于凹形竖曲线 R 取负值。

计算得到道路中线中桩坐标以后,进一步计算道路中桩处中央分隔带,行车道,路肩的顶点坐标,由若干个四边形首尾相接构建道路主体各组成部分的模型,具体算法读者可参考文献[12]。

2 填挖路段边坡模型构建

道路走向确定后,道路沿线可能遇到高填方、深挖方等复杂的横断面型式,边坡的坡段数、坡度、台阶高度、边沟两侧的坡度和宽度、高度等均可由设计者给定。填挖路段边坡模型构建方法如下。

2.1 横断面地面线提取

横断面提取过程中以道路中线上相邻两点为基点,沿道路法线方向(与道路前进方向垂直)向两侧扩展,设搜索间距为 d ,没道路中线向外延伸 d ,即得第1点,设为 p 点,根据边角关系计算 p 点坐标,同理沿道路中线向外延伸 $n \times d$ 可得第 n 个点,横断面扩展点坐标计算如图2,计算方法如下。

$$\begin{cases} x_p = x_n + \sqrt{L^2 + l^2} \cos(\alpha \pm \beta) \\ y_p = y_n + \sqrt{L^2 + l^2} \sin(\alpha \pm \beta) \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_p, y_p 为扩展点的坐标; α 为中桩上相邻两点与 E 轴正向的夹角; β 为扩展点与中桩相邻两点的夹角;

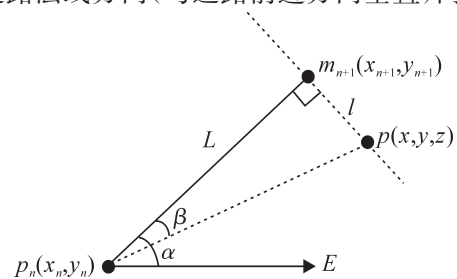


图2 横断面扩展点坐标计算

Fig. 2 Coordinate calculation of section extension point

L 为中桩两相邻点之间的距离; l 为扩展点沿中桩点法线方向的扩展距离; x_n, y_n 为中桩点坐标。

以上计算出扩展点的 x, y 坐标。扩展点 Z 坐标计算方法如下

$$H = \frac{-Na - Eb}{Z} + Z_c \quad (7)$$

式中: (a, b, c) 为地形三角网中包含扩展点的三角形所在平面的法向量; (N, E, Z) 为由三角形任一顶点至扩展点构成的空间向量; Z_c 为由三角形任一顶点至扩展点构成的空间向量的 Z 分量。

2.2 边坡转折点提取

以公路右侧横断面边坡为例,根据道路右侧边界点即路肩边界点处的设计高程和该点的地面高程判断填挖关系,如果边界点的设计高程大于地面高程则设置填方边坡,反之设置挖方边坡。确定填挖方式后,从路肩边界点开始,设置第一级边坡,设坡比系数为 $1:s_1$,由路肩边界点为起点, $1:s_1$ 为仰角构建指定长度的边坡线段,判断线段是否与地面线存在交点,如果存在,则求该交点,边坡构建完毕,如果无交点,则以线段终点为起点构建指定宽度的台阶,以台阶边界点为起点, $1:s_2$ 为仰角构建指定长度的边坡线段,判断该线段与地面线是否存在交点,如果有,则求出该交点,构建边坡完毕,如果无交点,则新建台阶,重复以上步骤,直至找到边坡射线与地面线的交点为止。

计算边坡线段与地面线的交点方法如图3,现以 M 点为起点向右侧方向构建挖方边坡为例, MN 为边坡延伸方向, MN 线段长为最大坡长,求边坡线段 MN 与地面线的交点时,需依次判断 MN 是否与线段 AB, BC, CD, DE, EF, FG 存在交点,直至找到交点或地面线的所有线段判断完毕为止,具体算法如下。

1) 判断 MN 与地面线是否存在交点,以地面线段 CD 为例,判断准则如下

$$Z_{\overline{MN} \times \overline{NC}} * Z_{\overline{MN} \times \overline{ND}} < 0 \text{ 且 } Z_{\overline{CD} \times \overline{DM}} * Z_{\overline{CD} \times \overline{DN}} < 0 \quad (8)$$

式中: $Z_{\overline{MN} \times \overline{NC}}$ 为 $\overline{MN}$ 向量与 $\overline{NC}$ 向量叉乘向量的 Z 分量,其它参数意义依此类推。

2) 如果地面线段和 MN 满足 1), 求地面线段的直线方程 $y = k_1x + b_1$, MN 直线方程 $y = k_2x + b_2$, 解方程组

$$\begin{cases} y = k_1x + b_1 \\ y = k_2x + b_2 \end{cases} \quad (9)$$

得边坡与地面线的交点 H 。

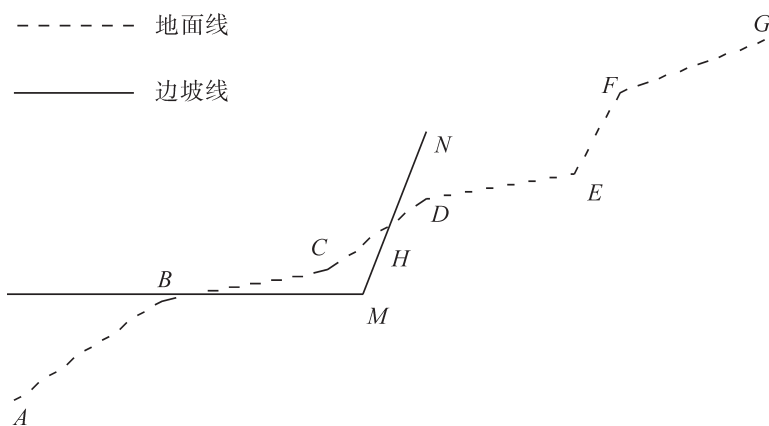


图3 护坡与地面线交点计算

Fig. 3 Intersection point calculation of slope and ground line

3 隧道模型构建

选线阶段,基于数字地面模型,根据公路中线处的地面高程和设计高程判断全线各处的填挖类型,提取隧道路段,具体方法如下:

① 提取中线处地面高程;

② 计算中线处地面高程与设计高程之差;

③ 依次比较中桩处地面高程与设计高程值,如果该中桩处地面高程高于设计高程,且高差大于隧道临界值时,则认为该点为隧道或涵洞起点,并记录该中桩的桩号;

④ 不断向前搜索,检测各中桩点地面高程与设计高程之差,当中桩点地面高程与设计高程之差的关系发生变化(高差小于隧道临界值时),则将该点设为桥涵或隧道的终点,并记录下该中桩的桩号;

⑤ 通过第②步和第③步,可确定某条隧道的起、终点桩号。重复②、③步,可得全线隧道的标号位置。

利用数据地面模型提取中桩处地面高程的方法读者可参考文献[11],提取隧道路段后,需构建隧道的横断面模型,如图4所示。隧道横断面模型构建方法和主线模型的构建方法相近,即根据隧道横断面与道路中线的位置关系计算横断面转折点坐标,然后构建隧道内侧首尾相接的四边形模型。以圆拱形隧道横断面为例,隧道模型的构建方法如下(公式中参数的意义读者可参考横断面线地面线算法中相关参数的说明)。

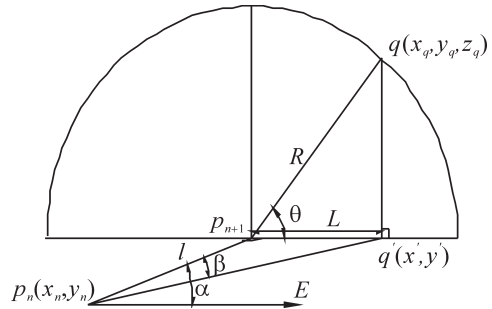


图4 隧道模型构建

Fig. 4 Tunnel model construction

$$\begin{cases} x = x_n + \sqrt{L^2 + l^2} \cos(\alpha \pm \beta) \\ y = y_n + \sqrt{L^2 + l^2} \sin(\alpha \pm \beta) \\ z = z_{n+1} + R \sin(\theta) \end{cases} \quad (10)$$

4 桥梁模型构建

构建桥梁模型时,首先搜索全线的桥梁路段,桥梁路段搜索方法和隧道路段搜索方法相近,当中线处填方高度大于桥梁临界值时,即为桥梁路段。桥梁模型包括桥墩,照明设施等。桥墩和照明设施采用模板参数化建模方法,模板参数化建模指根据道路走向,将构建的桥墩或路灯原型模型,依据模型间隔等参数进行布置的建模方法。设模板模型的中心坐标为坐标原点(坐标值为(0,0,0)),构建的平移,旋转和缩放矩阵为 p_1, p_2, p_3

$$p_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad p_2 = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad p_3 = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

模板模型经平移,旋转,缩放后沿道路前进方向布置后的模型顶点坐标为

$$P = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: x, y, z 为模板模型放置的位置坐标; γ 为模板模型绕 Z 轴的旋转角度,弧度; s_x, s_y, s_z 为模板模型沿 x, y, z 轴的比例系数; x_0, y_0, z_0 为模板模型顶点坐标。

5 模型输出

OpenFlight模型为应用较广泛的模型数据库格式,将构建的道路主线,道路边坡,桥梁和隧道模型输出为OpenFlight数据库格式。公路三维仿真OpenFlight数据库模型由6个组节点构成:中央分隔带组节点,行

车道组节点,路肩组节点,边坡组节点,隧道组节点和桥梁组节点。每个组节点下包括一个体节点,每个体节点下存储着组成上述模型各多边形的面结点。上述构建的公路三维仿真模型可直接导入3DS MAX中,导入后,数据库中的组成点对应于3DS MAX中的多边形对象,可利用3DS MAX对模型做二次编辑。此外,如果需构建包含地形的公路三维仿真虚拟视景,可利用Terrain Vista将公路模型嵌入地形,OpenFlight数据库模型的具体构建方法读者可参考文献[12]。

6 实例

以西南地区某高速公路为例验证计算方法,该高速公路全长74 km,双向4车道,设计速度 $120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,DEM数据高程点200万个,由DEM数据构建的地形三角网三角形数量450万个,测试结果如下:构建道路主线模型耗时约1 s,构建边坡模型耗时约10 s,构建桥梁和隧道模型耗时约1 s,利用本文方法计算的中桩坐标与纬地软件计算的中桩坐标相比,误差小于0.001 m,所构建的道路模型平顺性较好,最终构建的公路模型如图5。

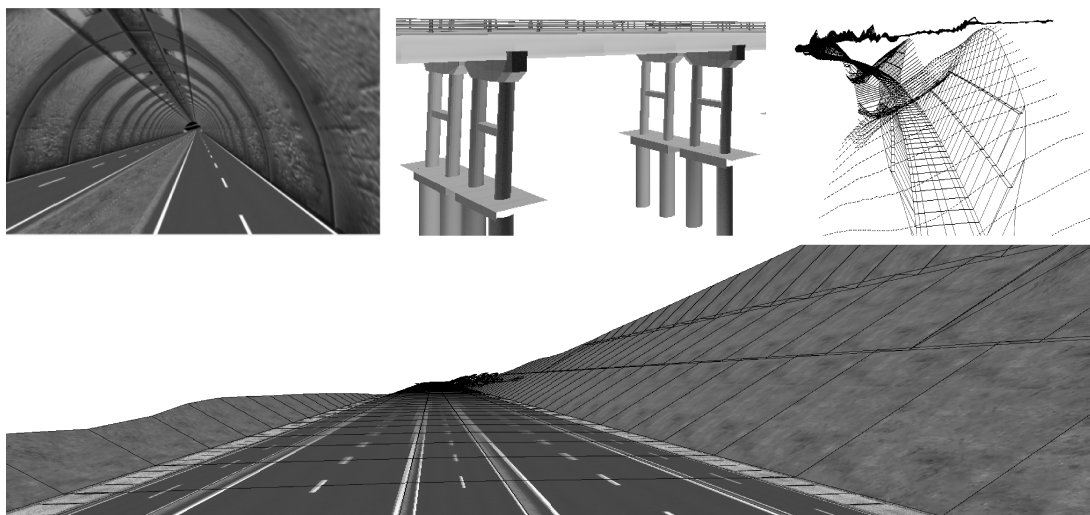


图5 实例公路模型

Fig. 5 Example of highway model

7 结语

以公路勘测理论、数字地面模型和三维建模型技术为基础,运用C++编程语言,实现了选线阶段公路三维仿真模型的快速构建。实例应用效果表明:构建的公路模型具有较好的移植性和通用性,模型的构建速度和精度达到公路仿真实验的需求,为驾驶模拟系统应用于公路选线阶段的备选方案评价奠定了基础。

参考文献:

- [1] 丁立,熊坚.基于模拟器的道路安全评价方法[J].中国公路学报,2003,16(3):90-92.
- [2] 张勇刚,丁立.基于驾驶模拟器的道路安全主观评价[J].中外公路,2009(4):238-240.
- [3] 熊坚.面向道路的汽车驾驶模拟器的研究及应用[J].中国公路学报,2002,15(2):117-119.
- [4] 刘尧,李杰,黄江波,等.从平面图和横断面图建立三维道路模型[J].华中科技大学学报:城市科学版,2005,22(S1):156-158.
- [5] 梁耀龙,王子茹.基于DTM计算并生成三维道路模型[J].水利与建筑工程学报,2007,5(3):72-74.
- [6] 交通部.JTG B01-2003,公路工程技术标准[S].北京:人民交通出版社.2004.

- [7] 交通部. JTGD20-2006,公路路线设计规范[S].北京:人民交通出版社,2006.
- [8] 张金水,张廷楷.道路勘测与设计[M].上海:同济大学出版社,2005:166-167.
- [9] 张靖. DEM技术在道路设计中的应用[J].现代测绘,2012(9):38-40.
- [10] 王春波,鲁纯,符韶华.数字高程模型的建立及其在公路勘测设计中的应用[J].北方交通,2010(9):33-34.
- [11] 胡少林.基于DEM数据的三维地形建方法研究与实现[D].长沙:国防科学技术大学,2002.
- [12] 江良华,熊坚.基于三维地形的道路虚拟视景构建方法[J].交通信息与安全,2011,29(4):88-89.

Highway 3D Simulation Model Construction Method in Line Selection Stage

Jiang Lianghua¹, Ni Hongliang², Wang Xiao'an³, Yang Peng²

(1.Faculty of Transportation Engineering,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650224, China;

2.Traffic Planning and Design Research Institute of Yunnan Province, Kunming 650011, China;

3.Transportation Science Research Institute of Yunnan Province, Kunming 650011, China)

Abstract: In order to apply the driving simulation system to evaluate and compare the alignment in the highway route selection phase, based on the theory of highway map, using horizontal, longitudinal, transverse preliminary design data, this study constructed 3D model of highway. After searching the road cut fill relationship of both sides through digital terrain model, it generated the road slope model automatically on both sides according to the ratio of slope and the step width specified. By searching across the cut and fill height and determining the bridge or tunnel section, bridge or tunnel simulation model was constructed. Then the model was output in OpenFlight format. The application in the examples shows that the method can quickly build up three-dimensional model of highway in line selection stage and simulation model has little error compared to entity mode with good versatility and portability in model format. It also finds out that the method can effectively shorten the development cycle of using driving simulation system in line selection stage for linear scheme evaluation and comparison.

Key words: road engineering; alignment evaluation; highway modeling; output of the model