

## 路面水流线模型及水文计算参数选择

秦建平

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**根据几何学中空间平面对水平投影面最大坡度线原理以及解析几何中二次抛物线在凸凹型竖曲线的最高、最低点几何构成方法,应用软件 CAD 绘图功能进行二次开发,分析了高速公路曲线路段的路面排水规律,建立了公路路面水流线合成坡度大小和水流线方向的模型。该模型可以定量计算路面汇水区大小,并确定排水设施的设置。同时针对公路几何线形划分,提出不同线形组合排水设计的参数选择模式,并对《公路排水设计规范》(JTJ18-97)中水力计算公式的参数选择提出了修正。

**关键词:**道路工程;路面排水;合成坡度;最大坡度线;参数

**中图分类号:**U412.23

**文献标志码:**A

### Pavement surface streams line model and hydrologic calculation parameter choose

QIN Jian-ping

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,  
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the secondary development of CAD functions, the highway pavement drainage law is analyzed. According to the law of space plane geometry of the largest horizontal projection slope and Analytic Geometry II Parabola Principle, the geometric forms of convex, concave of the highest, lowest point are studied. The model of calculating the size of the slope and the drainage line is developed. By this model the size of catchment's areas of the pavement can be quantitatively calculated, and the drainage facility design can be determined. According to the geometric line shapes, the parameter choose methods for drainage design are given, so the parameter choice mode of the formula in *Chinese Highway Drainage Design Standard* is developed. 9 figs, 8 refs.

**Key words:** road engineering; pavement surface drainage; composed slope; maximum gradient line; parameter

## 0 引 言

纵观中国各种高等级路面的早期破坏情况,均与水的破坏有着密切关系,无论是从行车安全性还是从路面的耐久性来看,都与公路排水系统的完善

性有关<sup>[1-4]</sup>。因此,公路排水的设计在整个项目设计中具有十分重要的意义,路面排水设计是高速公路设计的重要组成部分。一方面,由降雨形成的路面水膜影响车轮与路表面的接触,车辆高速行驶时,易使车轮产生液面滑移(即“水漂”),且高速行驶的车

收稿日期:2006-10-15

作者简介:秦建平(1962-),男,陕西西安人,副教授, E-mail: qjpced\_g1163.com。

辆尾部易形成水雾,影响驾驶人的视线,易发生交通事故,影响高速行驶安全;另一方面,路面水若不能及时排出,还会透过路面渗透到基层,这样易使基层软化、冲刷和唧浆,影响路面的整体强度,最终导致路面过早破坏<sup>[7]</sup>。从理论上讲,雨水口(泄水口)的间距应该从路面标高的最高点处向最低点处布设<sup>[6]</sup>。

汽车在没有超高的坡道上行驶时,不仅受坡度阻力的影响,而且还要受离心力影响,使汽车重心发生偏移,给汽车行驶带来危险<sup>[7-8]</sup>。

本文通过空间立体几何中空间平面对水平投影面最大坡度线,建立了公路路面水流线合成坡度大小和水流线方向的模型,可以定量计算路面汇水区的大小,并对水力计算公式中的参数选择提出修正。该模型内容包括:路线曲线最低点和最高点桩号的确定;雨水口计算模型的简化;设计流量的确定;雨水口间距的计算及验算;路线全线雨水口和泄水口的具体布设等。

## 1 几何原理

从物理意义上讲,在坡面上,小球或雨滴必沿着水平面上的最大坡度线方向滚动。最大坡度线的几何意义是空间一平面对水平投影面倾斜角最大的直线,它对水平面的倾斜角代表了空间平面对水平投影面的倾斜角,也称该角为二面角。最大坡度线在水平投影面上的投影线垂直于面内水平线的水平投影,最大坡度线也垂直于面内水平线的水平投影。

公路路线设计中把设有超高的平曲线上路线纵坡与超高横坡所组成的坡度称为合成坡度,其方向即为水流线方向。在有平曲线的坡道上,最大坡度既不是纵坡方向也不是横坡方向,而是两者组成的合成线的水流线方向。

在曲面上,通过一点  $P$  且在  $P$  处具有切线的任何曲线,它们在切点  $P$  处的切线都在同一平面上,这个平面称为曲面在  $P$  点的切平面。

当路线平面为直线线形,纵坡为直坡段时,路面为平面。路面的水流线为路面对水平面投影面(即路线平面)的最大坡度线。

### 1.1 水文计算原理

在高速公路排水设计中将地表水迅速排出路基外,最大限度地减少雨水、融雪水对路基路面质量的影响,减少因路表水排水不畅或路表水下渗对路基、路面结构和使用性能产生损害。在公路建设和运营过程中,植被破坏、土石开挖、边坡冲刷与坍塌等常会引起和加剧水土流失,是影响公路安全和环境评

价的重要因素。在文献[6]<sup>[9]</sup>中,水文计算确定设计流量采用两个公式,一个是“路界内各项排水设施所需的设计流量”,另一个是“坡面历时”。

路界内各项排水设施所需的设计流量计算式为

$$Q = 16.67 \Psi q F \quad (1)$$

式中: $Q$  为设计径流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $F$  为汇水面积 ( $\text{km}^2$ ); $q$  为设计重现期和降雨历时内的平均降雨强度 ( $\text{mm}/\text{min}$ ); $\Psi$  为径流系数。

在算例中<sup>[7]</sup>,未考虑公路路线水流线实际路线,面积计算出现偏差。

坡面历时  $t$  计算式为

克毕(Kerby) ( $L_s \leq 370 \text{ m}$ )

$$t = 1.445 \left[ \frac{m_1 I_s}{\sqrt{i_s}} \right]^{0.467} \quad (2)$$

柯皮奇(Kerpich) ( $0.03 < i_s < 0.10$ )

$$t = 0.0195 \frac{L_s^{0.77}}{i_s^{0.385}} \quad (3)$$

式中: $i_s$  为坡面流的坡度(%); $L_s$  为坡面流的长度(m); $m_1$  为地面粗糙系数。

由汇水区最远点(按水流时间计)流达进水口处所需的时间包括两部分:路面表面汇流历时  $t_1$ ;拦水带(路缘石或护栏)与路缘带路面形成的沟汇流历时  $t_2$ 。在算例中<sup>[7]</sup>,未考虑公路路线纵横断面合成坡度  $I$  及合成坡度对应坡面流的长度  $L$ , 计算出现偏差。

### 1.2 水流线几何原理

#### 1.2.1 坡面汇流水流线和水流线长度

如图1所示,设行车道路面宽度为  $b$ ,路面横坡度为  $i_s$ ,路线纵坡度为  $i_l$ ,可从设计资料获得  $b$ 、 $i_s$ 、 $i_l$ ;取路线中线上一点  $A$ ,  $C$  为  $A$  横断面路面边缘一点,  $B$  为路线中线上另一点,距离  $A$  点长度为  $l$ ;  $B$ 、 $C$  为同一高程点,  $A'B'CF$  组成一水平面,  $ABCE$  组成路面所在平面;  $ADE$ 、 $A'DF$  线垂直于  $BC$  线,则  $ADE$  线为水流线方向,即合成坡度  $I$ 。

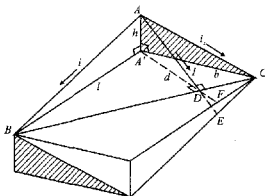


图1 水流线和水流线长度立体模型

$$d = [A'D] = \frac{lb}{\sqrt{l^2 + b^2}}, I = \frac{h}{d}, \text{代入化简}$$

$$I = \sqrt{i_x^2 + i_z^2} \quad (4)$$

式中:  $l = b \frac{i_x}{i_z}$ ;  $h = bi_z$ 。

### 1.2.2 水流线 $I$ 和水流线长度 $L_s$

如图2所示,图中符号意义同前。合成坡度  $I$  对应坡面流在  $A'BCF$  平面内的水平投影长度  $L_{A'}$ , 图式为  $A'F$

$$L_{A'} = [A'F] = \frac{b}{i_z} \sqrt{i_x^2 + i_z^2} \quad (5)$$

合成坡度  $I$  与路线前进方向夹角  $\alpha$  为

$$\alpha = \arccos \frac{i}{\sqrt{i_x^2 + i_z^2}} \quad (6)$$

由式(4)、式(5)可得坡面汇流水流长度  $L_s$  为

$$L_s = \sqrt{(I[A'F])^2 + [A'F]^2} =$$

$$[A'F] \sqrt{I^2 + 1} = L_{A'} \sqrt{I^2 + 1} \quad (7)$$

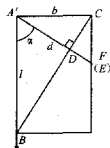


图2 水流线和水流线长度平面模型

## 1.3 竖曲线几何原理

### 1.3.1 竖曲线

如图3所示,中国公路竖曲线是采用二次抛物线,在纵断面设计中,变坡点桩号  $K$  处设置竖曲线。取一般二次抛物线半径  $R$ , 顶点桩号里程  $K_0$  的坐标为  $(0, 0)$ , 即抛物线顶点为平面坐标系  $XOY$  坐标原点, 竖曲线方程为

$$y = \pm \frac{1}{2R} x^2 \quad (8)$$

容易证明, 式(8)在  $(0, 0)$  点处取得最大值和最小值。

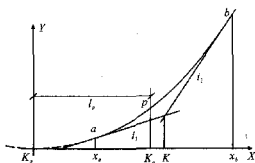


图3 竖曲线几何关系

坡段  $i_1$  与竖曲线在  $a$  点相切, 桩号里程为  $x_a$ , 坡段  $i_2$  与竖曲线在  $b$  点相切, 桩号里程为  $x_b$ , 则对应于

竖曲线起始切点  $a$  的曲率半径为

$$R_a = \frac{1}{k} = \frac{(R^2 + x_a^2)^{3/2}}{R^2} \quad (9)$$

对应于竖曲线终止切点  $b$  的曲率半径为

$$R_b = \frac{1}{k} = \frac{(R^2 + x_b^2)^{3/2}}{R^2} \quad (10)$$

即在竖曲线范围内, 曲率半径的变化范围为

$$\frac{(R^2 + x_a^2)^{3/2}}{R^2} \leq R_1 \leq \frac{(R^2 + x_b^2)^{3/2}}{R^2}$$

特殊情况下, 当  $x = 0$  时,  $R_1 = R = R_{\min}$ , 此半径在公路设计中常称为竖曲线半径。

当  $i_1 i_2 > 0$  时,  $i_1, i_2$  同号, 在竖曲线范围内  $R_{\min}$  不存在;

当  $i_1 i_2 < 0$  时,  $i_1, i_2$  异号, 在竖曲线范围内  $R_{\min}$  存在;

当  $i_1 i_2 = 0$  时, 设  $i_1 = 0, i_2 \neq 0$ , 则  $R_{\min}$  在竖曲线起点  $a$ ;  $i_2 = 0, i_1 \neq 0$ , 则  $R_{\min}$  在竖曲线终点  $b$ , 该点是竖曲线最高(低)点。

### 1.3.2 竖曲线内桩号 $K_p$ 断面上纵坡度 $i_p$

在图3中, 竖曲线半径  $R$ , 坡度  $i_1, i_2$  和变坡点桩号  $K$  等已知, 则

$$i_p = \frac{l_p}{R} \quad (11)$$

式中:  $l_p = K_p - K_0 = K_p - K + \frac{R}{2} i_1 + \frac{R}{2} i_2$

### 1.3.3 竖曲线最高(最低)点

竖曲线最高(最低)点不是变坡点的桩号  $K$ , 在进行路面排水设计时, 需要在凸形竖曲线和凹形竖曲线内插得最高(最低)点的桩号  $K_p$ 。

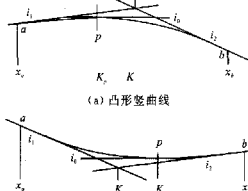
如图4(a)所示, 图中符号同前。假设从凸形竖曲线最高点  $P$  引一条平坡  $i_0 = 0$ , 则  $P$  点距  $a$  点长度  $l$  为

$$l = Ri_1 \quad (12)$$

则桩号  $K_p = x_a + l = K - R(i_2 - i_1) + l$

在图4(b)中, 同理可得凹形竖曲线最低点桩号

$$K_p = x_a + l = K - R(i_2 - i_1) + l$$



(a) 凸形竖曲线

(b) 凹形竖曲线

图4 竖曲线内插得最高(最低)点的桩号  $K_p$

## 2 路面水流线模型及水文计算参数

### 2.1 平面线形为直线,纵断面线形为 0 坡段

如图 5 所示,路面水沿路拱坡度汇集至路面边缘,集中排水时在路面边缘应设锯齿形雨水口。行车道路面宽度为  $b$ ,进水口的间距为  $l$ ,则式(1)中参数汇水面积  $F$  为

$$F = lb \quad (13)$$

式(2)、式(3)中参数坡面流的坡度  $i_s$ (%) 取为路拱坡度  $i_s$ ;坡面流的长度  $L_s$ (m) 取路面宽度  $b$ (m)。

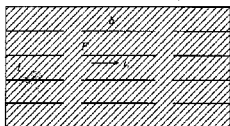


图 5 平面直线、纵断面 0 坡段水流线模型

### 2.2 平面线形为直线,纵断面线形为坡段 $i$

如图 6 所示,路面水沿路拱坡度  $i_s$  与纵坡  $i$  合成  $I$ ,水流汇集至路面边缘,集中排水时在路面边缘应设雨水口。行车道路面宽度为  $b$ ,进水口的间距为  $l$ ,则式(1)中参数汇水面积  $F$  按式(13)确定;式(2)、式(3)中参数坡面流的坡度  $i_s$  按式(5)确定,坡面流的长度  $L_s$  按式(7)确定。

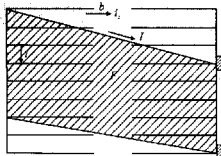


图 6 平面直线、纵断面坡段  $i$  的水流线模型

### 2.3 平面线形为直线,纵断面线形为竖曲线 $R$

进水口的布置间距:对路线纵断面要进行分段,以确定先从坡段上方开始的第一个进水口位置和竖曲线底部的进水口位置。分段时,要确定凸形竖曲线最高点,该点为凸形竖曲线函数导数等于 0;要确定凹形竖曲线最低点,该点为凹形竖曲线函数导数等于 0。凸(凹)形竖曲线最高(低)点桩号按图 4 确定。

#### 2.3.1 路面水流线确定

该类型路面空间曲面为一柱面,是由直母线(路拱横断面坡度线)沿曲线(曲线线的二次抛物线)运动,且始终平行于直导线(竖曲线与直坡段切点所在路拱横断面坡度线)。柱面上所有素线(母线任一位置)均互相平行。柱面上任一点  $P$  处可做两条切线,一条是路拱坡度线,由设计资料获得;另一条是

抛物线上纵坡度线,根据设计资料,按式(11)计算。

如图 7 所示,  $A$  为竖曲线内桩号  $K_{PA}$  断面上一点,纵坡度  $i_{PA}$  按式(11)计算;式(5)中取  $i = i_{PA}$  计算  $I$  值;式(6)中  $i = i_{PA}$  计算  $\alpha$  值。同理取竖曲线内桩号  $K_{PB}$  断面上一点  $B$ , 计算  $I_s, \alpha$  值。

过  $A, B$  两点的切面的交线过  $O$  点,则从  $A$  点开始的水流沿  $I$  方向经过  $O$  点到达  $B$  点。当过  $A, B$  点的两个断面无限接近时,上述路径为水流路径。实际工程设计时,可在两个进水口断面之间按 1 m 划分间距,过  $A, B, \dots$  各点用样条曲线拟合。

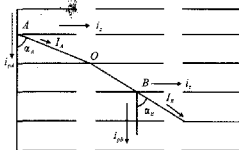


图 7 竖曲线水流线模型

注:  $A$  点处,  $\alpha$  为  $\alpha_A$ ,  $I$  为  $I_A$ ;  $B$  点、 $C$  点、 $D$  点、 $E$  点、 $F$  点以此类推。

#### 2.3.2 凸形竖曲线 $R$ 线

如图 8 所示,  $i_s$  为凸形竖曲线最高点路拱横坡度,图中其余符号意义同图 7。

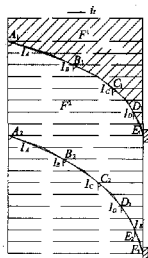


图 8 凸形竖曲线水流线模型

(1) 式(1)中参数汇水面积  $F$ : ① 从凸形竖曲线最高点开始的第一个进水口的面积为  $F^1$  区域, 为凸形竖曲线最高点路拱线、两侧边缘线和过  $A, B, \dots$  各点用样条曲线拟合线所包围部分, 在 CAD 图形中, 用面积计算查寻功能得到; ② 从凸形竖曲线最高点开始的第一个与第二个进水口的面积为  $F^2$  区域, 为两侧边缘线和过  $A_1, B_1, \dots, A_2, B_2, \dots$  各点用样条曲线拟合线所包围部分, 在 CAD 图形中, 用面积计算查寻功能得到。

(2) 式(2)、式(3)中参数坡面流的坡度  $i_s$  和坡面流的长度  $L_s$ : ① 从凸形竖曲线最高点开始的第一个进水口, 坡面流的坡度  $i_s$  取为路拱坡度  $i_s$ ; 坡面流

的长度  $L$ , 取路面宽度  $b$ ; ②从凸形竖曲线最高点开始的第一个与第二个进水口, 各点  $I_A, I_B, \dots, I_n$  等  $n$  个断面的加权平均数,  $i_i = \sum_{j=1}^n I_j / n$ , 两个进水口, 坡面流的坡度  $i_i (\%)$  取  $A_1, B_1, \dots$ 。

坡面流的长度  $L$ , 取过  $A_1, B_1, \dots$  点用样条曲线拟合的曲线长度, 在 CAD 图形中, 用长度计算查寻功能得到。

### 2.3.3 凹形竖曲线 $R$ 段

如图 9 所示,  $i_i$  为凹形竖曲线最高点路拱横向坡度, 图中其余符号意义同图 7。

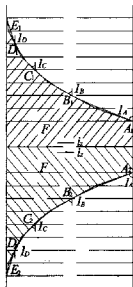


图 9 凹形竖曲线水流域模型

(1) 式(1)中参数汇水面积  $F$ : 凹形竖曲线最低点进水口的面积为  $F$  区域, 为两侧边缘线和过  $A_1, B_1, \dots, A_2, B_2, \dots$  各点用样条曲线拟合的两条线包围部分, 求解方法同上。

(2) 式(2)、式(3)中参数坡面流的坡度  $i_i$  和坡面流的长度  $L$ , 求解方法同上。

## 3 结 语

(1) 根据空间立体几何中空间平面对水平投影面最大坡度线, 建立竖曲线上公路路面水流域模型, 定量分析合成坡度大小及水流域方向, 为确定路面汇水区的范围及桥梁、中央分隔带和路肩排水设施的设置提供依据。

(2) 在进水口间距设计时, 要对路线纵断面进行分段, 以确定先从坡段上方开始的第一个进水口位置和竖曲线底部的进水口位置, 通过式(8)确定在(0,0)点取得最大值和最小值。

(3) 通过路面水流域模型图 5~图 9 及确定水文计算参数, 为路面排水设计提供了可靠依据。

## 参考文献:

## References:

- [1] 汪益敏, 王秉纲. 公路土质路基边坡坡面冲刷稳定性的模糊综合评价[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 24-29. WANG Yi-min, WANG Bing-gang. Fuzzy evaluation method of scouring stability on soil subgrade slope [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 24-29.
- [2] 谈至明. 公路排水系统设计参数研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 7-11. TAN Zhi-ming. Research on design parameters of highway drainage system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 7-11.
- [3] 郑继帅. 中江高速公路路基路面排水设计浅析[J]. 公路, 2006, (8): 283-285. ZHENG Ji-shuai. Analysis of drainage design for subgrade and pavement of Zhongjiang expressway [J]. Highway, 2006, (8): 283-285.
- [4] 黄高花, 王 飞, 杨勤科. 陕西西北部山丘区公路开挖边坡侵蚀调查与评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(2): 31-33. HUANG Gao-hua, WANG Fei, YANG Qin-ke. Evaluation of cutting-slope erosion of highway in north Shaanxi [J]. Journal of Chang'an University, Natural Science Edition, 2006, 26(2): 31-33.
- [5] 陈云鹏. 路表排水口设计合理性的验证方法[J]. 公路交通科技, 2002, (10): 50-53. CHEN Yun-peng. Method for verifying the reasonableness of pavement surface drainage design [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, (10): 50-53.
- [6] JTJ 018-97, 公路排水设计规范[S].
- [7] 姚祖康. 公路排水设计手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [8] 卢新兵, 刘佐义, 薛宝德. 关于渗水处理质量控制监理的探讨[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006, 23(3): 36-37. LU Xin-bing, LIU Zuo-yi, XUE Bao-de. Discussion of quality control of water seepage treatment [J]. Road Machinery Construction & Mechanization, 2006, 23(3): 36-37.