

# “逢山开路”优化设计问题\*

周转玲<sup>(1)</sup>、朱长斌<sup>(2)</sup>、潘旭辉<sup>(3)</sup>

指导教师：舒辉四<sup>(4)</sup>、孙四海<sup>(5)</sup>、王福龙<sup>(6)</sup>

## 提 要

“逢山开路”问题是一个道路优化设计问题，依据桥梁设计和公路设计的基本原理，本文给出了该问题的桥梁造址优化模型A和一般路段优化模型B。然后，从公路总体优化的角度出发，采用Dijkstra算法思想、网络细分及插值方法，同时考虑到车辆行驶方便的因素，给出了公路总体优化设计的方案。

关键词：Dijkstra算法；网络插值方法；优化设计

中图法分类号：O 157.9

## 0 问题的提出

要在一山区修建公路，首先测得一些地点的高程，数据显示：在 $y=3200$ 处有一东西走向的山峰（见附图）；从坐标 $(2400, 2400)$ 到 $(4800, 0)$ 有一西北——东南走向的山谷；在 $(2000, 2800)$ 附近有一山口湖，其最高水位略高于1350米，雨季在山谷中形成一溪流，经调查知，雨量最大时溪流水面宽度 $W$ 与（溪流最深处的） $x$ 坐标的关系可近似表示为

$$W(x) = \left(\frac{x - 2400}{2}\right)^{3/4} + 5$$

其中  $2400 \leq x \leq 4000$

公路从山脚 $(0, 800)$ 处开始，经居民点 $(4000, 2000)$ 至矿区 $(2000, 4000)$ 。已知路段工程成本及对路段坡度 $w$ （上升高程与水平距离之比）的限制如下：

工程种类	一般路段	桥梁	隧 道
工程成本（元/米）	300	2000	1500（长度 $\leq 300\text{m}$ ）；3000（长度 $> 300\text{m}$ ）
对坡度 $\alpha$ 的限制	$\alpha < 0.125$	$\alpha = 0$	$\alpha < 0.100$

1) 试给出一种线路设计方案，包括原理、方法及比较精确的线路位置（含桥梁、隧

\* 本文获全国大学生数学模型竞赛二等奖

(1) 91级管理系 (2) 91级自动化系 (3) 92级计算机系 (4)、(5)、(6) 院基础课部数学教研室

道),并估算该方案的总成本。

2) 如果居民点改为  $3600 \leq x \leq 4000, 2000 \leq y \leq 2400$  的居民区,公路只须经过居民区即可,那么你的方案有什么改变。

## 1 桥梁造址优化模型 A

本题中,没有给出该地区的地质情况,本模型的设计只考虑造价和水流冲刷的因素。

### 1.1 模型的一般假设

(1) 河流横断面为近似矩形;单位时间内流经河流任一断面的水量相等;河流的基本流向不变,是以  $(2400, 2400)$  到  $(4800, 0)$  的一条“直线” $l$ ;河流的平均深度  $h$  一定;河床没有任何阻碍水流运动的物体存在。

#### (2) 符号说明

$h$ : 河流平均深度(单位:m);

$W_A$ : 湖口河流的宽,  $W_A = 5$  m;

$V_A$ : 山口湖湖口年均水流线流速(单位:m/s);

$S_A$ : 湖口河流横断面面积(单位:m<sup>2</sup>);

$Z_A$ : 湖口横断面单位时间内的水流量,(单位:m<sup>3</sup>)。

### 1.2 模型的建立

设在“直线” $l$  上任一点  $x$  处,河流横断面面积为  $S(x)$ ;  $S(x) = h \cdot w(x)$ , 单位时间内流经该断面的水量  $Z(x) = S(x) \cdot V(x) \cdot 1$ , 其中  $V(x)$  是流经该断面的线速度。

假设在湖口处的  $V_A$  已实测出,且  $W_A = 5$  米,则  $S_A = W_A \cdot h$ , 因此  $Z_A = W_A \cdot h \cdot V_A \cdot 1$ , 由假设(1)得  $Z(x) = Z_A$ , 即  $S(x) \cdot V(x) = W_A \cdot V_A \cdot h$ ,  $h \cdot W(x) \cdot V(x) = W_A \cdot V_A \cdot h$  所以

$$V(x) = W_A \cdot V_A / w(x)$$

将  $W_A = 5$  代入上式得  $V(x) = 5V_A / w(x)$ 。

下面讨论  $W(x)$  与  $V(x)$  的恰当处理,使得桥梁造址为最优。

构造一个权衡  $W(x)$  与  $V(x)$  的决策函数  $\rho(v, w)$ , 且  $\rho(v, w) = A \cdot V(x) + B \cdot w(x)$ , 即  $\rho(x) = A \cdot V(x) + B \cdot W(x)$ , 其中  $A, B > 0$ ,  $A, B$  为加权系数。

因为  $\rho'(x) = [A \cdot V(x) + B \cdot W(x)]' = [A \cdot \frac{W_A \cdot V_A}{W(x)} + B \cdot W(x)]'$

$$= [B - \frac{5A \cdot V_A}{W^2(x)}] W'(x)$$

令  $\rho'(x) = 0$ , 得到  $B - \frac{5A \cdot V_A}{W^2(x)} = 0$  式  $W'(x) = 0$ 。根据实际情况,  $W'(x) \neq 0$ 。因为若  $W'(x) = 0$ , 则  $x = 2400$ , 没有考虑  $V(x)$  在  $\rho(x)$  中所起的作用。

由  $B - \frac{5A \cdot V_A}{W^2(x)} = 0$ , 得到  $B \cdot W^2(x) - 5A \cdot V_A = 0$ 。将  $W(x) = (\frac{x-2400}{2})^{3/4} + 5$  代入, 解得

$$x = 2(\sqrt[4]{5 \cdot V_A \cdot A/B} - 5)^{4/3} + 2400, \quad A/B > 5/V_A$$

即为所期望的数学模型。

### 1.3 关于系数 $A$ 、 $B$ 的说明

#### (1) $A/B$ 的取值范围

当  $A/B > 5/V_A$  时,  $\hat{x}$  为  $A/B$  的单调函数; 当  $A/B \rightarrow \infty$  时,  $\hat{x} \rightarrow \infty$ ; 当  $A/B \rightarrow 5/V_A$  时,  $\hat{x} \rightarrow 2400$ 。

#### (2) 系数 $A$ 、 $B$ 的实际意义

系数  $A$ 、 $B$  是用来调整  $V(x)$ 、 $W(x)$  在决策函数  $\rho(x)$  中所占的比重, 以方便用户针对实际情况的使用。

### 1.4 模型的使用

使用模型  $A$  时, 首先通过实测(或根据该地区的水文资料)得到  $V_A$ , 然后根据河流的实际情况确定水流冲刷与桥梁长度在  $\rho(V, W)$  的所占比重, 即确定  $A/B$ , 代入模型, 算出对应的桥梁位置  $\hat{x}$ , 即求得最佳桥址的位置。

最后, 根据桥梁走向与河流流向尽可能成最大夹角的原则, 确定桥梁走向, 并使桥长大于  $W(\hat{x})$ , 即可找到桥址的近似最优位置。

## 2 一般路段选线优化模型 $B$

根据公路设计的基本原理, 采用“依山势走线”、“以牺牲有限道路长度为代价换取道路坡度的减小”的方法, 并充分考虑车辆行驶难度与修路费用。给出了该优化模型。

### 2.1 问题的提出

已知路段起点  $P$ , 位于  $A$  等高线上, 现要使道路经  $P$  点跨越  $A+h$  等高线, 则要求在  $A+h$  等高线上增加一个控制点 ( $Q$ ), 使  $PQ$  段上任一小段路线的坡度在  $[0, \cos(\arctg 0.125)]$  范围内, 使车辆爬坡难度  $f(\theta)$  与道路近似长度  $l(\theta)$  综合优化 (见图 1)。

### 2.2 符号说明

$l(\theta)$ : 近似路长, 其值为  $|PQ|$  (单位: m)

$R(\theta)$ :  $l(\theta)$  在水平面上的投影 (单位: m)

$h$ : 爬升高度 (单位: m)

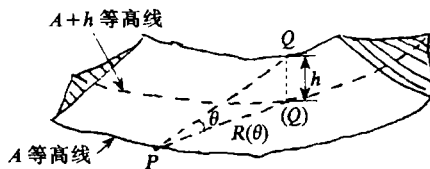


图 1

### 2.3 模型的建立

如图 1 所示,  $l(\theta) = h/\sin\theta$ 。当  $\theta \in (0, \arctg 0.125)$  时,  $l(\theta)$  是  $\theta$  的单调减函数。与此同时, 可构造车辆爬坡难度函数  $f(\theta)$  如下:

$$f(\theta) = \theta, \theta \in (0, \arctg 0.125)$$

并由此构造一个决策函数:

$$g(\theta) = kf(\theta) + l(\theta)$$

$k$  为加权系数,  $k > 0$ , 对于  $k$  值而言, 其大小只有相对意义而无绝对意义。对  $g(\theta)$  求导:

$$g'(\theta) = kf'(\theta) + l'(\theta) = (k\theta)' + \left(\frac{h}{\sin\theta}\right)' = \frac{-k\sin^2\theta - h\cos\theta}{\sin^2\theta}$$

$$\text{令 } g'(\theta) = 0, \text{ 解得 } \cos\theta = \frac{-h \pm \sqrt{h^2 + 4k^2}}{2k}, \text{ 取 } \cos\theta = \frac{-h + \sqrt{h^2 + 4k^2}}{2k}$$

由  $\cos(\arctg 0.125) < \cos \theta \leq 1$ , 即  $\cos(\arctg 0.125) < \frac{-h + \sqrt{h^2 + 4k^2}}{2K} \leq 1$

解得  $k > \frac{h \cdot \cos(\arctg 0.125)}{1 - \cos^2(\arctg 0.125)}$  (1)

至此,我们得到了一般路段选线优化模型:

$$\hat{\theta} = \arccos\left(\frac{-h + \sqrt{h^2 + 4k^2}}{2k}\right), \quad k > h \cdot \cos(\arctg 0.125) / (1 - \cos^2(\arctg 0.125)) \quad (2)$$

权值  $k$  用来调整车辆行驶难度在  $g(\theta)$  中所占的比重。

$$\begin{aligned} \text{因此,近似路长} \quad \hat{l} &= l(\hat{\theta}) = h / \sin(\hat{\theta}) \\ &= h / \sin\left(\arccos\left(\frac{-h + \sqrt{h^2 + 4k^2}}{2k}\right)\right) \end{aligned} \quad (3)$$

实际路长  $\bar{l} = \hat{l} \cdot r = l(\hat{\theta}) \cdot r$

其中  $r$  为偏差调整系数。当  $P, Q$  处于同一斜平面时(如图 2):

$$\bar{l} = l \quad \hat{\theta} = \hat{l}$$

故  $r = 1$

再考虑另一种极端的可能(如图 3)。由于角度  $\theta$  较小,即  $\theta \in (0, \arctg 0.125)$ , 故  $PNQ$  弧线可近似看作一个圆。所以

$$r = \bar{l} / \hat{l} = \frac{\pi \times (\hat{l} / 2)}{\hat{l}} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$

故可以确定调整偏差系数  $r \in (1, 1.57)$ , 因此,实际路长  $\bar{l} = r \cdot \hat{l} = r \cdot l(\hat{\theta})$ ,  $r \in (1, 1.57)$ 。

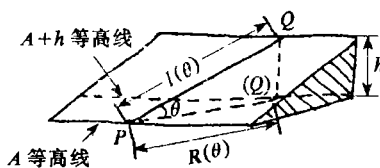


图 2

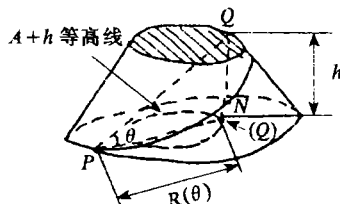


图 3

## 2.4 加权系数 $k$ 的意义

当用户要尽量减小道路坡度,即要在  $g(\theta)$  中使  $f(\theta)$  所占比重较大,使车辆爬坡难度降低时,将  $k$  值调整较大,反之亦然。

## 2.5 模型的使用

假定用户给定需要爬升(或下降)高度  $h$ , 首先将  $h$  代入式(1), 得到  $k$  的取值范围:  $(k', +\infty)$ , 其中  $k' = h \cdot \cos(\arctg 0.125) / [1 - \cos^2(\arctg 0.125)]$ , 其次, 由用户根据实际情况决定  $k$  值大小(注: 这里  $k$  值大小是相对  $k'$  而言的)。

由附表 1—1, 可看出当  $h$  给定时,  $\hat{\theta}$  随  $k$  值的变化而变化的情形。为了方便用户使用, 我们利用表 1—1 改进为表 1—2 的形式。

当  $k$  值取定, 将  $k, h$  代入式(2)解得  $\hat{\theta}$ , 再将  $\hat{\theta}$  代入式(3) 得近似路长

$$\hat{l} = l(\hat{\theta}) = \frac{h}{\sin\left[\arccos\left(\frac{-h + \sqrt{h^2 + 4k^2}}{2k}\right)\right]}$$

近似路长投影

$$R(\hat{\theta}) = \frac{h}{\operatorname{tg}[(\arccos(\frac{-h + \sqrt{h^2 + 4k^2}}{2k}))]}, \text{实际路长 } \hat{l} = r \hat{l}, r \text{ 由}$$

用户根据地形因素决定,  $r \in (1, 1.57)$ 。

最后,在图上等高线  $A+h$  上确定  $Q$  点位置( $Q$ ),作法:(见图 4)

(i) 量出距离  $R(\hat{\theta})$ 。

(ii) 以  $P$  点为圆心,  $R(\hat{\theta})$  为半径作圆,与  $A+h$  等高线交于一点  $\hat{\theta}$ 。

(iii) 在等高线图上以  $P$  点为起点, ( $Q$ ) 为终点,用圆滑的曲线相连,即得到  $PQ$  路段在等高线图上较为精确的长线。

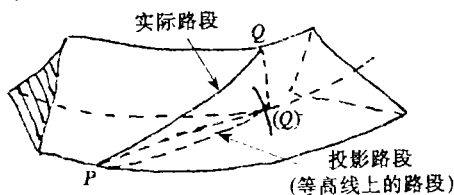


图 4

### 3 公路总体设计方案

通过对该地区等高线图进行分析及估算,考虑到以下因素:

(i) 桥的造价较高,路段造价较低(桥梁为 2000 元/米,一般路段 300 元/米)。

(ii) 给定的地区山势平缓,用自然展线的方法,沿等高线进行展线,一般路段走向也趋向目标区域,故一般路段走线的矛盾不突出。

(iii) 山岭溪流湍急,桥址倘若造择不当,则增加选桥难度,费用,甚至影响其可靠性。我们决定先选桥址。

#### 3.1 公路总体优化计设计方案如下(参看附图)

(1) 按照模型 A 选桥址建桥。

(2) 以  $AA'$  为一般路段的走向控制点,采用 Dijkstra 算法思想及网络细分与插值方法,按模型 B 每升高  $h$  高度,增加一个控制点,得到  $A$  到  $A'$  的近似最佳路线。

(3) 以  $B'$ 、 $B$  为一般路段的走向控制点,采用 Dijkstra 算法思想及网络细分与插值方法,按模型 B 每升高  $h$  高度,增加一个控制点,得到  $B'$  到  $B$  的近似最佳路线。

(4) 依照越岭道路设计中,明堑与隧道的取舍原则,以打隧道方式跨越山峰是最优的。

在  $y=3200$  处东西走向的山峰附近寻找等高线密集(即坡度大)的地点作为隧道方位,利用居民点西北方向较平缓的山坡,反复运用模型 B 增加控制点进行迂回展线,尽可能使道路接近山脊的地点作隧道的入口  $D'$ 。从  $D'$  处在隧道建造坡度允许范围内选择适当的角度沿北向开凿隧道从  $D$  处穿出。

(5) 类似于步骤(2)、(3)得到  $DC$  段近似最佳位置。

#### 3.2 实例

应用给出的公路总体优化设计方案,对本题给出的地区设计了一条实际线路,同时,给出了一条不服从方案中第(4)条原则穿隧道越岭的线路,并把两者加以比较,最后,给出了居民点变为居民区时公路总体优化设计的路线。

假设:用户根据该地区的水文资料或实测得到  $V_A = 10\text{m/s}$ 。

(1) 运用公路总体优化设计方案,我们找出一条最优线路 I (经居民点), (见附图), 此线路中各段参数及计算的中间结果列于附表 2, 成本约 436 万元。

(2) 如果从居民点到隧道不经迂回展线, 运用模型 B 走线, 得到线路 II, 见附图。线路中各参数及计算的中间结果列于附表 3, 成本约为 516 万元。

(3) 当居民点改为居民区时的最优线路见附图中线路 III, 线路中各段参数及计算结果见附表 4, 其总成本约为 404 万元。

#### 4 模型 A、B 的优缺点

模型 A、B 可以独立使用。模型 A 可独立适用于优选桥址的问题; 模型 B 可适用于道路最佳控制点的问题; 其实用性突出, 具有较好的推广价值。

鉴于模型构造过程中的假设条件, 使其精确度有一定的偏差。

#### 参 考 文 献

- 1 钱颂迪主编. 运筹学. 清华大学出版社
- 2 黄梦平编. 桥梁建筑. 科技普及出版社
- 3 张雨化主编. 公路勘测设计. 人民交通出版社
- 4 华东水利学院编. 水力学. 科学出版社
- 5 “路线设计手册”编写组. 路线. 人民交通出版社

附表:

附表 1-1

$K$	3225	3250	3275	3300	3325	3350	3375	3400
最优 $\hat{\theta}$	7.125	7.098	7.070	7.044	7.017	8.991	6.965	6.940
近似路长	403.12	404.67	406.21	407.74	409.27	401.80	412.32	413.83
投影路长	400.01	401.57	403.12	404.67	406.21	407.74	409.27	410.80
设计坡度 $\text{tg} \hat{\theta}$	0.1249	0.1245	0.1240	0.1236	0.1231	0.1226	0.1222	0.1217

$K$	3450	3500	3550	3600	3700	3800	3900	4000
最优 $\hat{\theta}$	6.899	6.840	6.792	6.745	6.653	6.565	6.481	6.399
近似路长	416.84	419.83	422.79	425.74	431.57	437.33	443.01	448.61
投影路长	413.83	416.84	419.83	422.79	428.67	434.46	440.17	445.82
设计坡度 $\text{tg} \hat{\theta}$	0.1208	0.1200	0.1191	0.1183	0.1166	0.1151	0.1136	0.1122

$K$	4200	4400	4600	5000	5500	6000	6500	7000
最优 $\hat{\theta}$	6.245	6.102	5.968	5.725	5.459	5.228	5.022	4.839
近似路长	459.62	470.38	480.89	501.25	525.60	548.86	571.19	592.67
投影路长	456.90	467.71	478.28	498.75	523.21	546.58	568.99	590.55
设计坡度 $\text{tg} \hat{\theta}$	0.1094	0.1069	0.1045	0.1003	0.0956	0.0915	0.0879	0.0847

$K$	8000	9000	10000	12000	15000	20000	30000	40000
最优 $\hat{\theta}$	4.527	4.269	4.050	3.697	3.307	2.864	2.339	2.026
近似路长	623.44	671.75	707.99	775.40	866.75	1000.63	1225.26	1414.66
投影路长	613.47	669.89	706.22	773.79	865.30	999.38	1224.23	1413.77
设计坡度 $\text{tg} \hat{\theta}$	0.0792	0.0746	0.0708	0.0646	0.0578	0.0500	0.0408	0.0354

注： $h=50\text{m}$  时， $K>3224.9$ ；等高线每升高  $50\text{m}$  ( $h=50\text{m}$ ) 加一个控制点。

附表 1-2

$K$ 的取值范围	[3225,4400]	[4600,10000]	[12000,40000]
对行车难度的考虑	较 少	较 多	最 大

通过附表 1-1 中的  $\hat{\theta}$  分析,对  $K$  进行分类得到上表,由表可看出,在  $h$  一定的情况下,对加权系数值  $K$  进行分类后,更加方便于用户使用。

同理,模型 I 中  $A/B$  也可以进行类似的分类。

附表 2

路段控制点	$K$	最优 $\hat{\theta}$ (度)	近似路 长 $L$ (m)	投影路 长(m)	设计坡 度 $\text{tg } \hat{\theta}$
$AA_1$	3900	6.481	443.01	440.17	0.1136
$A_1A_2$	3500	6.840	419.83	416.84	0.1200
$A_2A_3$	3800	6.565	437.33	434.46	0.1157
$A_3A_4$	10000	4.050	707.99	706.22	0.0708
$A_4A_5$	30000	2.339	1225.76	1224.32	0.0418
$A_5A'$	$\infty$	0	680	680	0
修正系数	1.2	$\Sigma L$	3912.92m	成本	1409011.2 元
桥 梁	$A/B=150$	长度	90m	成本	180000 元
路段控制点	$K$	最优 $\hat{\theta}$ (度)	近似路 长 $L$ (m)	投影路 长(m)	设计坡 度 $\text{tg } \hat{\theta}$
$B'B_1$	17000	3.107	922.63	921.28	0.0543
$B_1B_2$	7000	4.839	592.67	590.55	0.0847
$B_2B_3$	1200	3.697	775.40	773.79	0.0646
$B_3B_4$	4600	5.986	480.89	478.28	0.1045
$B_4B_5$	6500	5.022	571.19	568.99	0.0879
$B_5B_6$	6500	5.022	571.19	568.99	0.0879
$B_6D'$	4600	5.968	480.89	478.28	0.1045
	4600	5.968	480.89	478.28	0.1045
修正系数	1.2	$\Sigma L$	4875.75m	成本	1755270 元
隧 道	长度	260m	/	成本	39000 元
$DC$	长度	2080m	/	成本	624000 元
总 成 本	4358281.2 元				

$h=50\text{m}$ .  $K>3224.9$ , 桥中心坐标(3108,1692), 隧道南面入口坐标(4400,3067)。



附表 3

路段控制点	$K$	最优 $\hat{\theta}$ (度)	近似路 长 $L(m)$	投影路 长 $(m)$	设计坡 度 $\text{tg } \hat{\theta}$
$AA_1$	3900	6.481	443.01	440.17	0.1136
$A_1A_2$	3500	6.840	419.83	416.84	0.1200
$A_2A_3$	3800	6.565	437.33	434.45	0.1157
$A_3A_4$	10000	4.050	707.99	706.22	0.0708
$A_4A_5$	30000	2.339	1225.76	1224.32	0.0418
$A_5A'$	$\infty$	0	680	680	0
修正系数	1.2	$\Sigma L$	3912.92m	成本	1409011.2 元
桥 梁	$A/B=150$	长度	90m	成本	180000 元
路段控制点	$K$	最优 $\hat{\theta}$ (度)	近似路 长 $L(m)$	投影路 长 $(m)$	设计坡 度 $\text{tg } \hat{\theta}$
$B'B$	15000	3.307	866.75	865.30	0.0578
$BE_1''$	3250	7.098	404.67	401.57	0.1245
$B_1'B_2''$	3250	7.098	404.67	401.57	0.1245
$B_2'D'$	4200	6.245	459.62	456.90	0.1094
修正系数	1.2	$\Sigma L$	2135.71m	成本	768855.6 元
隧 道	长度	650m	/	成本	1950000 元
路段控制点	$K$	最优 $\hat{\theta}$ (度)	近似路 长 $L(m)$	投影路 长 $(m)$	设计坡 度 $\text{tg } \hat{\theta}$
$DC_1''$	3250	7.098	404.67	401.57	0.01245
$C_1'C_2''$	3350	6.991	410.80	407.74	0.1226
$C_2'C_3''$	7000	4.839	592.67	590.55	0.0847
$C_3'C_4''$	7000	4.839	592.67	590.55	0.0847
$C_4'C$	$\infty$	0	600	600	0
修正系数	1.1	$\Sigma L$	2600.81m	成本	858267.3 元
总成本	5166134.1 元				

注释同附表 2

附表 4

路段控制点	$K$	最优 $\overset{\wedge}{\theta}$ (度)	近似路 长 $L(m)$	投影路 长 $(m)$	设计坡 度 $\text{tg}\overset{\wedge}{\theta}$
$AA_1$	3900	6.481	443.01	440.17	0.1136
$A_1A_2$	3500	6.840	419.83	416.84	0.1200
$A_2A_3$	3800	6.565	437.33	434.46	0.1157
$A_3A_4$	10000	4.050	707.99	706.22	0.0708
$A_4A_5$	30000	2.339	1225.76	1224.32	0.0418
$A_5A'$	$\infty$	0	680	680	0
修正系数	1.2	$\Sigma L$	3912.92m	成本	1409011.2 元
桥 梁	$A/B=150$	长度	90m	成本	180000 元
路段控制点	$K$	最优 $\overset{\wedge}{\theta}$ (度)	近似路 长 $L(m)$	投影路 长 $(m)$	设计坡 度 $\text{tg}\overset{\wedge}{\theta}$
$B'B_1$	3400	6.940	413.83	410.80	0.1217
$B_1B'_2$	33500	6.991	410.80	407.74	0.1226
$B_2B'_3$	4200	6.245	459.62	450.90	0.1094
$B_3B'_4$	10000	4.050	707.99	706.22	0.0708
$B_4B'_5$	4200	6.245	459.62	456.90	0.1094
$B'_5B'_6$	4000	6.339	448.61	445.82	0.1122
$B'_6B'_7$	4000	6.399	448.61	445.82	0.1122
$B'_7B'_8$	4000	6.399	448.61	445.82	0.1122
$B'_8D'$	4400	6.102	470.71	467.71	0.1069
修正系数	1.2	$\Sigma L$	4268.07m	成本	1536505.2 元
隧 道 $D'D$		长度	260m	成本	292500 元
$DC$		长度	2080m	成本	624000 元
总 成 本			4042016.4 元		

注释同附表 2.

附图

