

# 隧道出入口平面线形一致性

杨 轸, 唐 莹, 唐 磊

(同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 针对现行公路隧道设计规范对隧道进出口处平面线形一致性缺乏明确判别标准, 提出了方向盘冻结 3 s 导致的行车轨迹同原有路线的偏移值作为线形一致性的控制性指标, 控制阈值取 0.2 m. 对 3 种不同设计条件下的隧道线形一致性进行分析, 发现缓和曲线参数是影响平面线形一致性的重要指标. 通过理论推导给出不同设计条件下隧道进出口平面线形一致性的判别标准, 使设计者能在保证线形安全的前提下对隧道进出口平面线形进行灵活设计和评价. 应用该研究成果对龙庆高速公路某隧道洞口的线形一致性进行了分析, 提出了相应的改进建议.

**关键词:** 隧道出入口; 平面线形; 控制指标; 一致性; 缓和曲线参数

中图分类号: U452.2

文献标识码: A

## Consistency of Horizontal Alignment at Tunnel Entrance and Exit Zone

YANG Zhen, TANG Ying, TANG Lei

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Current code of tunnel design lacks specific criterion for judging horizontal alignment at entrance and exit zone of highway tunnel. After 3-second freezing of steer wheel, the deviation of the track from the desired path is proposed to evaluate the consistency of horizontal alignment at tunnel entrance and exit, and the control threshold is 0.2 m. The design conditions are classified into three groups and studied in detail. Spiral curve parameter is found to be a significant design index to guarantee the consistency. Then the equations for derivation calculation in different cases are deduced, and the indexes of the horizontal alignment at the tunnel entrance and exit zone are proposed for more flexible design. Based on the research results, an analysis is made of the consistency of the horizontal alignment of a tunnel of Longquan-Qingyuan expressway, and improvement is proposed.

**Key words:** tunnel entrance and exit zone; horizontal alignment; restraining indexes; consistency; spiral curve parameter

隧道出入口洞口前后亮度的急剧变化, 导致黑洞效应和白洞效应, 极大地增加了驾驶员视觉及心理生理负荷, 使得驾驶员在接近或者离开隧道时不能有效识别道路信息, 极易引起交通事故. 调查结果表明, 隧道出入口处的事故率是隧道内事故率的 2~3 倍<sup>[1-2]</sup>. 合理的隧道出入口线形设计能有效地改善隧道安全状况, 因此, 我国现行《公路隧道设计规范》(JTJ D70—2004)对隧道出入口平面线形提出了 3 s 一致性要求<sup>[3]</sup>, 但在实际使用中存在对一致性的理解和定量把握的问题.

## 1 国内外研究概述

在设计规范方面, 欧洲没有专门的隧道线形设计标准或规范, 公路隧道的线形设计以公路设计规范为基准<sup>[4]</sup>. 美国的公路隧道设计手册限制隧道段曲线的数量、长度, 同时出于隧道光线过渡以及通风的考虑, 规范建议在隧道出入口处设置大半径曲线, 最小曲线半径应不小于 850~1 000 m<sup>[5]</sup>. 欧美规范关于隧道出入口线形一致性方面没有具体规定.

我国历年的《公路工程技术标准》、《公路路线设计规范》、《公路隧道设计规范》对隧道及洞口平面线形有一系列的规定. 1988 年之前规范规定隧道应避免采用平曲线, 1988 年之后允许采用平曲线, 但是对隧道及洞口线形进行一系列规定, 并且洞口线形的规定随规范修订时间逐渐变化. 1988 年版《公路工程技术标准》(JTJ 01—88)规定隧道洞口的连接线应与隧道线形相配合<sup>[6]</sup>. 1990 年版《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90)在原有规范的基础上, 增加一

收稿日期: 2011-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(70801044); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(200802471006)

第一作者: 杨 轸(1974—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为交通安全及驾驶仿真. E-mail: yangzhen2276@263.net

条对隧道连接线的规定,即隧道两端平面线形应与路线线形相一致,其最小长度按设计速度取值<sup>[7]</sup>. 1994年版《公路路线设计规范》(JTJ 011—94)对隧道连接线规定由“相配合”改为“相协调”<sup>[8]</sup>. 2003年版《公路工程技术标准》(JTG B01—2003)规定隧道洞口内外侧不小于3 s设计速度行程长度范围内的平纵线形应一致<sup>[9]</sup>,但是该规定没有明确规定线形一致性的具体含义. 2006年版《公路路线设计规范》(JTJ D20—2006)将2003年版《公路工程技术标准》中的平纵线形应一致修订为平面线形不应有急骤的方向改变<sup>[10]</sup>,但是同样没有给出急骤变化的具体含义和相应的控制指标.

在学术研究方面,国外专门针对公路隧道出入口线形的研究比较少,一般在进行隧道通风、照明、紧急设施等设计时,会考虑线形的影响<sup>[11]</sup>. Sermin Onaygil等提出隧道出入口处线形应尽量满足适当降低行车速度的要求,从而通过增加隧道接近段适应距离的行车时间来缓解隧道入口处的视觉障碍<sup>[12]</sup>. 国内学者对公路隧道出入口线形研究主要集中在在线形安全设计、行车视距理论、安全行车速度等方面<sup>[11,13]</sup>. 隧道出入口平面线形一致性评价方法有运行车速法和驾驶员心理、生理指标评价方法等. 王琰等提出将运行速度作为线形一致性控制指标,通过调研数据进行回归,得到隧道进出口前后5 s范围综合线形过渡技术指标与运行速度间的具体量化关系,并由此提出隧道进出口线形过渡技术指标建议值<sup>[14]</sup>. 潘晓东等在传统的平均注视时间动视点指标、注视时间比率动视点指标基础上,提出基于视点平面分布的动视点指标作为驾驶员视觉信息加工水平评价指标,以该指标作为线形控制指标,根据大量的实验数据,提出隧道进口平曲线半径不宜小于450 m<sup>[15]</sup>.

由以上分析可知:我国对隧道出入口平面线形指标的研究一直在探索和发展,但是目前仍不能给出一个能够广泛认同的定量设计指标. 现行《公路隧道设计规范》(JTJ D70—2004)对隧道进出口线形3 s一致性的含义不明确,且存在歧义,特别是洞口及3 s行程范围落在缓和曲线上存在较大争议,这使得在具体设计工作中隧道线形安全性难以把握,并可能对工程造价、施工要求、隧道出入口前后的线形指标等带来一系列的影响. 因此,有必要对此开展深入研究,提出相关控制线指标,既保证隧道出入口线形的安全性,同时满足设计灵活性的要求.

## 2 研究思路

《公路隧道设计规范》(JTJ D70—2004)关于隧道出入口线形3 s连续的规定主要考虑隧道出入口存在黑洞和白洞效应给驾驶员的视距造成障碍,但是没有给出具体的控制指标来明确是否满足线形一致性. 因此,首先要解决的问题就是选择合理的线形一致性控制指标及控制阈值,然后就根据控制指标和不同设计条件通过定量计算分析给出隧道出入口具体线形指标的建议值.

假如隧道出入口线形是一个缓和曲线参数 $A$ 非常大的曲线,如 $A=1\ 500$ ,缓和曲线在一个较短的长度范围内(驾驶员视距障碍的时间所行驶的距离,可以取3 s行程)可以看作是圆曲线,即驾驶员由于视觉障碍,方向盘在隧道的状态保持不变,按照圆曲线行驶一段后,如果其位置与按缓和曲线行驶的轨迹的偏差小于某个值,即可以认为线形上可不受此约束,故可以采用3 s设计速度行程范围的内移值大小作为隧道进出口平面线形一致性控制性指标. 从行车轨迹角度出发,当省略缓和曲线前后的圆曲线的内移值 $p < 0.2\text{ m}$ 时允许直线直接与圆曲线相连<sup>[16]</sup>,如图1所示. 因此,可以选择0.2 m作为线形一致性控制性指标的阈值.

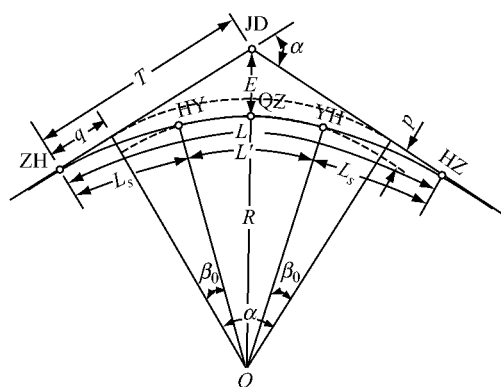


图1 标准型平曲线形示意图

Fig.1 Standard form of horizontal alignment

对公路隧道平面线形而言,假如 $A, B, C$ 3点分别代表洞口位置、按原平曲线进入隧道3 s设计速度行程的终点、按洞口位置曲率半径轨迹3 s行程点(相当方向盘冻结3 s的轨迹).  $A, B$ 点的位置可以分成3种情况:第1种情况为 $A$ 点在直线上,而 $B$ 点在缓和曲线上(或者 $A$ 点在缓和曲线上,而 $B$ 点在直线上);第2种情况为 $A, B$ 点都在缓和曲线上;第

3 种情况为 A 点在缓和曲线上,而 B 点在圆曲线上(或者 A 点在圆曲线上,而 B 点在缓和曲线上).图 2 给出了 A, B 点都落在缓和曲线段的情况,以  $\Delta D$  为控制指标,将  $\Delta D$  与 0.2 m 比较,若  $\Delta D \leq 0.2$  m,则隧道洞口线形一致要求,反之不满足要求.

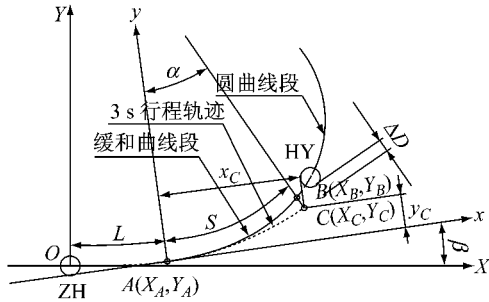


图 2 线形一致性计算图式(第 2 种情况)  
Fig.2 Graphical calculation for consistency study (the second case)

图 2 中,  $OXY$  坐标系为绝对坐标系,  $Axy$  坐标系为相对坐标系;  $ZH$  为直缓点,  $HY$  为缓圆点;  $(X_A, Y_A)$  为 A 点的绝对坐标,  $(X_B, Y_B)$  为 B 点的绝对坐标,  $(X_C, Y_C)$  为 C 点的绝对坐标,  $(x_c, y_c)$  为 C 点的相对坐标;  $\alpha$  为 3 s 行程轨迹转过的角度,  $\beta$  为两坐标系的夹角;  $L$  为 A 点、 $ZH$  点间的距离,  $S$  为 3 s 行程轨迹的长度,  $\Delta D$  为 B 点和 C 点间的距离.

### 3 线形一致性设计控制指标分析

#### 3.1 洞口落在直线上, 3 s 行程点落在缓和曲线上

针对洞口落在直线上, 3 s 行程点落在缓和曲线上情况, 如图 3 所示.

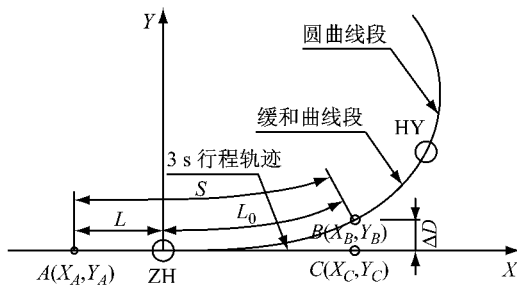


图 3 曲线一致性计算图式(第 1 种情况)  
Fig.3 Graphical calculation for consistency study (the first case)

图 3 中,  $L_0$  为 B 点和  $ZH$  点间的距离.

$$Y_B = \frac{L_0^3}{6A^2} - \frac{L_0^7}{336A^6};$$

$$\Delta D = Y_B = \frac{L_0^3}{6A^2} - \frac{L_0^7}{336A^6} = \frac{(S-L)^3}{6A^2} + U \quad (1)$$

考虑  $L_0$  和  $A$  的取值范围,  $U$  值很小可忽略, 故  $\Delta D \approx (S-L)^3/6A^2$ , 即  $L \approx S - \sqrt[3]{6A^2 \Delta D}$ .

当缓和曲线参数  $A \geq \sqrt{S^3/6\Delta D}$  时, 按照式(1)计算出来的  $L$  值为负, 说明不论洞口距直缓点的距离取多大, 可满足线形连续性要求; 当  $A < \sqrt{S^3/6\Delta D}$ , 如果洞口距直缓点的距离  $L \geq S - \sqrt[3]{6A^2 \Delta D}$ , 可满足线形连续性要求.

#### 3.2 洞口和 3 s 行程点均落在缓和曲线上

对于洞口(点 A)和 3 s 行程点(点 B)均落在缓和曲线上, 如图 2 所示.

$$X_B = (L+S) - (L+S)^5/40A^4 + \dots,$$

$$Y_B = (L+S)^3/6A^2 + \dots,$$

$$X_A = L - L^5/40A^4 + \dots,$$

$$Y_A = L^3/6A^2 + \dots,$$

$$\beta = L^2/2A^2,$$

$$R_0 = A^2/L,$$

$$\alpha = SL/A^2,$$

$$x_c = R_0 \sin \alpha,$$

$$y_c = R_0(1 - \cos \alpha),$$

$$X_C = X_A + x_c \cos \beta - y_c \sin \beta,$$

$$Y_C = Y_A + x_c \sin \beta + y_c \cos \beta.$$

把正弦函数和余弦函数用级数展开, 正弦函数取第 1 项, 余弦函数取前 2 项

$$\begin{aligned} \Delta D^2 &= (X_C - X_B)^2 + (Y_C - Y_B)^2 = \\ &= \frac{S^6}{36A^4} + \frac{S^{10}}{1600A^8} + \frac{LS^9}{160A^8} + \frac{9L^2S^8}{320A^8} + \\ &= \frac{L^3S^7}{16A^8} + \frac{L^4S^6}{16A^8} + \frac{L^5S^5}{48A^8} + \frac{L^{10}S^4}{256A^{12}} = \\ &= \frac{S^6}{36A^4} + U \end{aligned}$$

由  $A, L$  和  $S$  的取值范围, 可知  $U$  非常小, 可以忽略不计, 故  $\Delta D^2 \approx S^6/36A^4$ , 即  $\Delta D \approx S^3/6A^2$ .

可见, 偏移值  $\Delta D$  与缓和曲线参数的平方倒数成正比. 对于洞口和 3 s 行程距离均落在缓和曲线上的隧道出入口, 当缓和曲线参数  $A \geq \sqrt{S^3/6\Delta D}$  时, 可满足线形连续性要求.

#### 3.3 洞口落在缓和曲线上, 3 s 行程点落在圆曲线上

洞口落在缓和曲线上, 3 s 行程点落在圆曲线上, 如图 4 所示. 图中,  $YH$  为圆缓点;  $\gamma$  为 B 点和  $HY$  点间圆曲线的角度;  $L_s$  为缓和曲线长度.

为减少由于三角函数级数展开产生的误差, 建立以  $HY$  点为基点的绝对坐标系. 首先推导从  $HY$  点向  $ZH$  点方向任意点的坐标和方向角的计算公式.

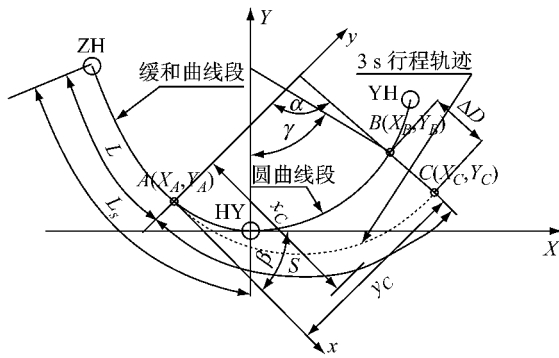


图 4 曲线一致性计算图式(第 3 种情况)

Fig. 4 Graphical calculation for consistency study (the third case)

$$\begin{aligned}
 X &= -\int ds \cdot \cos \int \frac{1}{\rho} ds = -\int ds \cdot \cos \int \frac{L_s - s}{A^2} ds \approx \\
 & -\left(s - \frac{1}{8A^4} \left(\frac{4L_s^2 s^3}{3} + \frac{s^5}{5} - L_s s^4\right)\right), \\
 Y &= \int ds \cdot \sin \int \frac{1}{\rho} ds = \int ds \cdot \sin \int \frac{L_s - s}{A^2} ds \approx \\
 & \frac{L_s s^2}{2A^2} - \frac{s^3}{6A^2}, \\
 \beta_0 &= -\int \frac{1}{\rho} ds = -\left(\frac{L_s s}{A^2} - \frac{s^2}{2A^2}\right) \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中,  $s$  为缓和曲线上点到 HY 的距离。

令  $k = S + L - L_s$ , 将  $s = (L_s - L) = (S - k)$ , 代入式(2)可得

$$\begin{aligned}
 X_A &= -\left((S - k) - \frac{1}{8A^4} \cdot \frac{4L_s^2 (S - k)^3}{3} + \right. \\
 & \left. \frac{(S - k)^5}{5} - L_s (S - k)^4\right) \\
 Y_A &= \frac{L_s (S - k)^2}{2A^2} - \frac{(S - k)^3}{6A^2} \\
 \beta &= -\left(\frac{L_s (S - k)}{A^2} - \frac{(S - k)^2}{2A^2}\right)
 \end{aligned}$$

分别计算 B 点绝对坐标和 C 点的相对坐标

$$\begin{aligned}
 \gamma &= \frac{kL_s}{A^2}, \\
 X_B &= \frac{A^2}{L_s} \sin \gamma, \\
 Y_B &= \frac{A^2}{L_s} (1 - \cos \gamma), \\
 \alpha &= \frac{S(L_s - S + k)}{A^2}, \\
 x_C &= \frac{A^2}{L_s - S + k} \sin \alpha, \\
 y_C &= \frac{A^2}{L_s - S + k} (1 - \cos \alpha).
 \end{aligned}$$

由此获得 C 点的绝对坐标为

$$\begin{aligned}
 X_C &= X_A + x_C \cos \beta - y_C \sin \beta \\
 Y_C &= Y_A + x_C \sin \beta + y_C \cos \beta
 \end{aligned}$$

将三角函数用级数展开, 正弦函数取第 1 项, 余弦函数取前 2 项, 可得

$$\begin{aligned}
 \Delta D^2 &= (X_C - X_B)^2 + (Y_C - Y_B)^2 = \\
 & \frac{k^6 - 2k^3 S^3 + S^6}{36A^4} + \frac{(S - k)^{10}}{1600A^8} - \\
 & \frac{(S - k)^9 S}{160A^8} + \dots = \\
 & \left(\frac{k^3 - S^3}{6A^2}\right)^2 + U
 \end{aligned}$$

由  $A, S, L_s, L$  的取值范围可知,  $U$  值非常小, 可以忽略, 故

$$\Delta D^2 \approx \left(\frac{k^3 - S^3}{6A^2}\right)^2 = \left(\frac{S^3 - (S - (L_s - L))^3}{6A^2}\right)^2$$

即  $L_s - L = S - \sqrt[3]{S^3 - 6A^2 \Delta D}$ .

当缓和曲线参数  $A \geq \sqrt{S^3/6\Delta D}$  时, 不论洞口距缓圆点的距离取多大, 皆可满足线形连续性要求; 当  $A < \sqrt{S^3/6\Delta D}$  时, 如果洞口距缓圆点的距离  $L_s - L \leq S - \sqrt[3]{S^3 - 6A^2 \Delta D}$ , 可满足线形连续性要求。

### 3.4 设计指标确定

由以上分析可知: 当缓和曲线参数  $A \geq \sqrt{S^3/6\Delta D}$  时, 3 种情况均可满足线形连续性要求。当  $A < \sqrt{S^3/6\Delta D}$  时, 第 1 种情况当洞口距直缓点的距离  $L \geq S - \sqrt[3]{6A^2 \Delta D}$  时, 可满足线形连续性要求; 第 2 种情况均不满足线形连续性要求; 第 3 种情况当洞口距缓圆点的距离  $L_s - L \leq S - \sqrt[3]{(S^3 - 1.2A^2)}$  时, 可满足线形连续性要求。

根据《公路工程技术标准》规定不同设计车速下的平曲线极限最小半径、最小缓和曲线长度可确定缓和曲线参数  $A$  的最小值, 80, 100 和 120 km · h<sup>-1</sup> 设计车速下的缓和曲线参数  $A$  的最小值分别为 132.29, 184.39 和 254.95, 3 s 行程  $S$  分别取 70, 85 和 100 m。取  $\Delta D = 0.2$  m 作为线形一致性控制性指标的阈值, 由此可以得到不同设计条件隧道洞口平面线形指标的建议值, 如表 1 所示。

经过理论计算, 上述结果同样可推广下面两种情况: 当洞口位于圆曲线段而 3 s 行程点位于缓和曲线段时, 3 s 行程点距圆缓点的距离应不大于  $S - \sqrt[3]{S^3 - 1.2A^2}$ ; 当洞口位于缓和曲线段而 3 s 行程点位于直线段时, 3 s 行程点距缓直点的距离应不小于  $S - \sqrt[3]{1.2A^2}$ 。

表 1 不同设计条件隧道洞口平面线形设置的建议值

Tab.1 The proposed values of the horizontal alignment at tunnel entrance and exit zone under different design conditions

设计车速/(km·h <sup>-1</sup> )	缓和曲线参数 A	判别标准		
		第 1 种情况	第 2 种情况	第 3 种情况
80	(534.63, +∞)	无限制	无限制	无限制
	(132.29, 534.63)	$L \geq 70 - \sqrt[3]{1.2A^2}$	不满足要求	$L_s - L \leq 70 - \sqrt[3]{70^3 - 1.2A^2}$
100	(715.38, +∞)	无限制	无限制	无限制
	(184.39, 715.38)	$L \geq 85 - \sqrt[3]{1.2A^2}$	不满足要求	$L_s - L \leq 85 - \sqrt[3]{85^3 - 1.2A^2}$
120	(912.87, +∞)	无限制	无限制	无限制
	(254.95, 912.87)	$L \geq 100 - \sqrt[3]{1.2A^2}$	不满足要求	$L_s - L \leq 100 - \sqrt[3]{100^3 - 1.2A^2}$

### 4 应用分析

龙泉至庆元(浙闽界)高速公路起自龙泉市城关

镇大猫亭止于庆元县竹口镇新窑村(浙闽界),全长 54.763 km,设计速度为 100 km·h<sup>-1</sup>(S=85 m)。其中龙泉至庆元(浙闽界)高速公路大泽隧道处平面线形如表 2 所示,平面线位如图 5 所示。

表 2 大泽隧道平面线形

Tab.2 The horizontal alignment of Daze tunnel

第一缓和曲线起点	第一缓和曲线终点	圆曲线半径/m	第二缓和曲线起点	第二缓和曲线终点	A
K153+130.685	K153+280.685	1 230	K153+793.244	K153+943.244	429.53

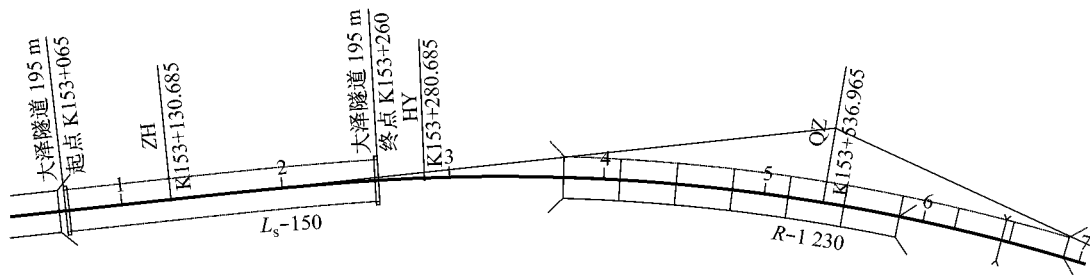


图 5 大泽隧道平面线位图

Fig.5 The horizontal alignment of Daze tunnel

根据前面的判别规则对该隧道不同行车方向的隧道出入口平面线形一致性进行分析,结果如表 3 所示。

分析结果表明,该隧道存在两种情况不满足线形一致性要求。由于地形限制,过多地增加缓和曲线长度或者增大圆曲线半径可能带来较大的工程量。因此,可以对隧道运营速度进行限制,设置 80 km·

h<sup>-1</sup>的限速标志。经过计算,恰好能满足庆元方向隧道出口的线形一致性要求。同时,应适当增大圆曲线半径和(或)缓和曲线长度,使缓和曲线参数 A > 534.63,或者使龙泉方向进口位于圆曲线上,并控制 3 s 行程点距圆缓点的距离,从而满足该处的线形一致性要求。

表 3 平面线形一致性分析

Tab.3 The analysis for consistency of horizontal alignment

行车方向	进出口	洞口位置特征	3 s 行程位置特征	判别标准	设计值/m	线形一致性判断
庆元方向	进口	直线	缓和曲线	洞口距直缓点的距离大于 24.50 m	65.685	满足
	出口	缓和曲线	圆曲线	洞口距缓圆点距离小于 11.77 m	20.685	不满足
龙泉方向	进口	缓和曲线	缓和曲线	缓和曲线参数 A > 715.38	429.53	不满足
	出口	直线	直线	无要求	满足	满足

## 5 结语

通过理论分析和应用分析,将隧道出入口方向盘冻结 3 s 导致的行车轨迹同原有路线的偏移作为判别隧道出入口线形一致性的标准是可行的,据此提出的不同状况下的设计控制指标能够被设计人员接受和采用,这将有助于设计者综合考虑公路线形、等级、隧道工程造价等多方面的因素,对隧道出入口线形进行灵活设计.

### 参考文献:

- [1] Amundsen F H, Ranæs G. Studies on traffic accident in norwegian road tunnels[J]. *Tunneling*, 2000, 15:3.
- [2] 杨轶, 郭忠印. 隧道进出口车速变化研究[J]. *上海公路*, 2006(1): 48.  
YANG Zhen, GUO Zhongyin. Research on speed alteration at entrance and exit of tunnel [J]. *Shanghai Highway*, 2006(1):48.
- [3] 中华人民共和国交通部. JTJ D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTJ D70-2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [4] NRA. Design manual for roads and bridges[S]. Dublin: The UK Highways Agency, 2001.
- [5] FHWA. Technical manual for design and construction of road tunnels[EB/OL]. (2009-10-16) [2010-12-30] <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/nhi09010/02.cfm>.
- [6] 中华人民共和国交通部. JTJ 01—88 公路工程技术标准[S]. 北京:人民交通出版社, 1988.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTJ 01—88 Technical standard of highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 1988.
- [7] 中华人民共和国交通部. JTJ 026—90 公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 1990.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTJ 026-90 Code for design of road tunnel [S]. Beijing: China Communications Press, 1990.
- [8] 中华人民共和国交通部. JTJ 011—94 道路路线设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 1994.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTJ 011-94 Design specification for highway alignment [S]. Beijing: China Communications Press, 1994.
- [9] 中华人民共和国交通部. JTG B01—2003 公路工程技术标准[S]. 北京:人民交通出版社, 2003.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG B01-2003 Technical standard of highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [10] 中华人民共和国交通部. JTGD20—2006 道路路线设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2006.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTGD20-2006 Design specification for highway alignment[S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [11] Mashimo H. State of the road tunnel safety technology in Japan [J]. *Tunneling and Under Ground Space Technology*, 2002, 17:145.
- [12] Onaygil S, Guler O, Erkin E. Determination of the effects of structural properties on tunnel lighting with examples from Turkey [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2003, 18(1):85.
- [13] 林宣财. 公路隧道洞口平面线形设计有关问题的探讨[J]. *公路*, 2007(3):22.  
LIN Xuancai. Discussion on the horizontal alignment of the highway tunnel's entrance and exit [J]. *Highway*, 2007(3):22.
- [14] 王琰, 孔令旗, 郭忠印. 基于运行安全的公路隧道进出口线形设计[J]. *公路交通科技*, 2008, 25(3): 134.  
WANG Yan, KONG Lingqi, GUO Zhongyin, et al. Alignment design at tunnel entrance and exit zone based on operating safety[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2008, 25(3): 134.
- [15] 潘晓东, 杜志刚, 杨轶. 动视点指标与隧道进口平曲线半径[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2008, 36(12):1661.  
PAN Xiaodong, DU Zhigang, YANG Zhen. Relationship between eye movement index and horizontal alignment at entrance of highway tunnel[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2008, 36(12):1661.
- [16] 张金水, 张廷楷. 道路勘测设计[M]. 上海:同济大学出版社, 1998: 91—92.  
ZHANG Jinshui, ZHANG Tingkai. Road alignment survey and design [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1998: 91.