

文章编号:1671-6833(2011)06-0050-04

基于曲率变化率的矿区高等级公路圆曲线长度设计

王 刚^{1,2}, 郭广礼^{1,2}, 李 伶³

(1. 中国矿业大学 国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 西南科技大学, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 针对公路路线传统设计方法的不足, 引入了平曲线曲率变化率的概念, 根据平曲线曲率变化率与交通事故的关系, 提出了车辆行驶稳定性公路平曲线曲率变化率的安全评价标准. 根据这一标准, 利用高等级公路缓和曲线的设计规范和采动高等级公路允许的极限附加曲率大小, 探讨了矿区高等级公路平曲线之圆曲线长度的计算公式.

关键词: 曲率变化率; 矿区; 高等级公路; 缓和曲线

中图分类号: U416

文献标志码: A

0 引言

随着我国煤炭工业和公路事业的快速发展, 公路路线穿过压煤区的情况在所难免. 公路下所压煤炭资源开采后必将对其产生破坏^[1], 严重时还将引发安全事故. 根据文献[2]的规定, 高等级公路受采动损害的极限变形值应按 I 级建筑物的保护标准执行, 以保证公路路基具有足够的承载能力和路面结构的完好. 为了提高整个交通系统的交通安全水平, 在矿区公路规划设计阶段就应把影响汽车运行的各种设计要素综合起来考虑. 大量研究表明, 公路平曲线曲率变化率对交通事故率和交通事故损失率的影响都较大, 不少学者也曾基于二者关系对公路圆曲线的合理长度展开研究, 并取得了可喜的成果^[3]. 但他们都未曾考虑采动附加曲率对公路平曲线曲率变化率的影响, 鉴于此, 笔者根据高等级公路各设计速度下圆曲线半径的允许值, 研究了采动影响下高等级公路的极限曲率半径, 探讨了在保证行车安全的条件下, 拟采区高等级公路平曲线之圆曲线合理长度的计算公式, 以期能为同类公路圆曲线长度的取值提供参考.

1 公路路线传统设计方法的不足

传统公路路线设计方法依据的是设计行车速

度或车辆的实际运行速度, 这样只满足了设计车速或实际运行速度所要达到的最低平、纵线形指标, 而对较高的线形指标则没有限制, 导致了线形指标都能满足设计规范要求, 但各线形组合起来后就不一定合理, 容易在线形设计上产生突变, 使驾驶员在行车过程中感到不适应, 导致汽车运行速度与线形指标脱节, 引起一系列交通事故.

此外, 前后缓和曲线和圆曲线的组合不合理也是传统公路路线设计方法的一个缺陷. 所谓组合, 是指前后缓和曲线与圆曲线衔接时, 它们之间的技术指标大小匹配应当均衡, 不能一方大而缓、而另一方小而急.

2 采动高等级公路允许的极限附加曲率

经检索, 目前国内外在这方面的研究还不够成熟和完善, 缺乏对公路下开采引起的极限附加曲率进行深入研究. 目前国内与此有关的规程主要有煤炭部在 2000 年颁发的《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》、交通部颁布的《公路路基设计规范》. 此外, 山西省交通厅于 2005 年也提出了极限附加曲率变形值, 即曲率 $\leq \pm 0.2 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-2}$.

国外学者虽于 20 世纪 80 年代相继对采动影响下公路的危害性问题展开了研究, 但对于采动公路极限附加曲率的研究也是寥寥无几. 文献

收稿日期: 2011-06-23; 修订日期: 2011-07-15

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50834004)

通信作者简介: 郭广礼(1965-), 男, 河北栾城人, 中国矿业大学教授, 博士, 主要研究方向为开采沉陷及其控制, E-mail: guogll@126.com.

[4]认为,将高等级公路列为Ⅰ~Ⅱ级保护物,即路面的附加曲率变形值应控制在 $0.2 \sim 0.4 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{m}^{-2}$. 将普通公路列为Ⅲ级保护物,即路面的附加曲率变形值应控制在 $0.6 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{m}^{-2}$.

结合以上分析,笔者将采用影响下高等级公路的极限曲率变形值拟取为 $\pm 0.2 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-2}$.

3 公路平曲线曲率变化率与交通事故的关系

3.1 公路平曲线曲率变化率的概念

曲率变化率 CCR 是通过曲线的长度、半径、转角来描述曲线特征的一个设计元素,可以反映平曲线曲率变化的连续性,一般指平曲线路段单位长度的角度变化之和. 在实际工程中,最具现实意义的曲率变化率主要指带有缓和曲线的单圆平曲线曲率变化率,根据文献[5]的研究,提出了公路单圆平曲线曲率变化率 CCR_s 的计算公式:

$$CCR_s = \frac{\alpha}{L} = \frac{180}{\pi} \left(\frac{L_{s1}}{2R} + \frac{L_c}{R} + \frac{L_{s2}}{2R} \right) / L \quad (1)$$

式中: CCR_s 为公路平曲线的曲率变化率, $\text{gon} \cdot \text{km}^{-1}$, 其中 $1 \text{ gon} = 0.9^\circ$; α 为曲线转角, $(^\circ)$; L 为曲线总长度, km , 且 $L = L_{s1} + L_c + L_{s2}$; L_{s1} , L_{s2} 分别为前后缓和曲线长度, m ; L_c 为圆曲线长度, m ; R 为圆曲线半径, m .

研究表明,随着公路单圆平曲线曲率变化率 CCR_s 值的增加,交通事故的发生率也会随之频繁,但增大的幅度相对较小. 由于 CCR_s 是反映平曲线半径和其他各要素长度的综合指标,并与交通事故发生频率关系密切,因此, CCR_s 可作为公路平曲线要素设计的依据,图1是 CCR_s 的计算示意图.

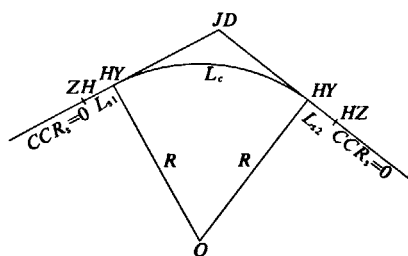


图1 CCR_s 的计算示意图

Fig.1 Calculation diagram of CCR_s

3.2 公路平曲线曲率变化率与交通安全的关系

缓和曲线是设置在公路或铁路的直线与圆曲线路段之间或半径相差较大的两个转向相同的圆曲线之间的一种曲率连续变化的曲线,是公路或

铁路平曲线设计要素之一. 缓和曲线的存在,可减少车辆在正常转弯行驶时对公路或铁轨的摩擦力,从而增强公路或铁路的安全性.

研究表明:影响公路交通安全的因素,除了驾驶员的驾驶技术和行车速度外,当前路段的 CCR_s 值也是一个重要影响因素,不同路段的交通事故率和交通事故严重程度都与 CCR_s 息息相关^[6]. 如 Trapp 和 Krebs 通过研究都发现,公路交通事故率会随着 CCR_s 值的增大而增加;Kassar Hoffmann 和 Zmeck 也通过总结发现,自由流路段的 CCR_s 值是影响速度值的变量之一;Kloeckner 和 Maier-Strassburg 还指出,一方面,曲线的半径值对驾驶行为有影响,另一方面,在不同路段同一半径值的平曲线上车辆的运行速度也不同. 交通事故发生的过程是一个汽车的动能转化为热能及车辆变形机械能的过程,因此,事故发生过程中能量的转化也会随着 CCR_s 值的增大而增多,从而加重了交通事故损失率. 根据 Kloeckner 的实验数据,采用线性拟合,得出了高速公路交通事故损失率与相应路段的 CCR_s 的近似函数关系,如图2所示. 从图上可以看出,高速公路交通事故损失率随着相应路段的 CCR_s 值的增加而成线性增大,但增长速度较慢. 同时,笔者还根据胡圣能等^[7]通过研究得出的高速公路交通事故率与相应路段 CCR_s 值关系的部分离散数据,采用非线性拟合,得出了高速公路交通事故率与相应路段的 CCR_s 的近似函数关系,如图3所示. 从该图上可以看出,高速公路交通事故率随着相应路段 CCR_s 值的增大而迅速增加,且 CCR_s 值高的路段交通事故率约为 CCR_s 值较低的路段的2~3倍.

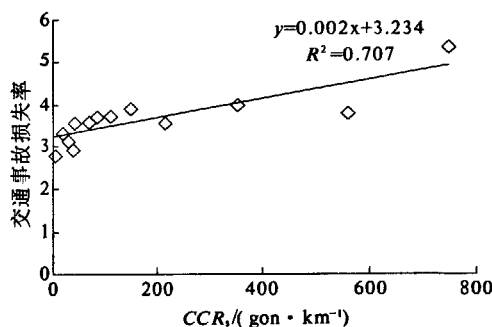


图2 高速公路交通事故损失率与 CCR_s 关系图

Fig.2 Relationship between traffic accident loss factor and CCR_s

3.3 公路平曲线曲率变化率与行驶稳定性的关系

从3.2节的分析可知,无论是交通事故损失率还是交通事故率,其数值都随着 CCR_s 的增大而增加. 研究表明,交通事故损失率和交通事故率

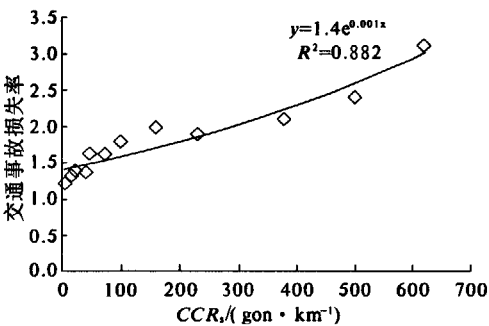


图3 高速公路交通事故率与 CCR_s 关系图
Fig.3 Relationship between transportation accident rate and CCR_s

都与驾驶员的年龄、性别、累计驾驶时间和基本生理状况^[8],道路条件(如交叉口间距、路面宽度、交通饱和度以及缓和曲线曲率变化率等)^[9]有密切关系,其中道路条件的优劣可通过设计的均衡性和连续性来评价,只有合理的均衡性和连续性才能保证行驶的稳定性和道路的安全。行驶的稳定性和道路的横向力系数有关,为了保证行驶的稳定性和道路的安全,必须严格控制车辆的速度、密度以及公路的平曲线曲率变化率,行驶的稳定性和公路平曲线曲率变化率的关系如表1所示。

表1 行驶稳定性与 CCR_s 的关系
Tab.1 Relationship between driving stability and CCR_s

行驶稳定性	评价指标	行驶效果
好	$CCR_{si} \leq 180 \text{ gon} \cdot \text{km}^{-1}$	乘车人员感觉不到弯道的存在,在弯道处汽车可以安全通过
较好	$180 \text{ gon} \cdot \text{km}^{-1} < CCR_{si} < 360 \text{ gon} \cdot \text{km}^{-1}$	乘车人员能感觉到弯道的存在,需通过修改相关设计参数,调整路段曲率变化率
较差	$CCR_{si} \geq 360 \text{ gon} \cdot \text{km}^{-1}$	乘车人员能明显感觉到弯道的存在,车辆经过弯道时受到离心力较大,不能保证车辆安全通过

4 公路圆曲线长度计算

4.1 采动公路的曲率设计

根据《公路工程技术标准》的规定,各种设计速度下高等级公路的一般最小平曲线半径如表2所示。矿区公路受到采动影响后,采动附加曲率将

与公路原来设计曲率叠加,从而改变公路的曲率半径,叠加后的曲率半径可由公式(2)算得。

$$R = R_s R_c / R_s + R_c \tag{2}$$

式中: R 为公路叠加后的曲率半径, m ; R_s 为设计的曲线曲率半径, m ,按表2取值; R_c 为采动引起的附加曲率半径, $R_c = 1/K_c, m$; K_c 为采动引起的附加曲率,依前文, $K_c = 0.2 \text{ mm} \cdot m^{-2}$ 。

表2 圆曲线的一般最小曲线半径
Tab.2 Minimum radius of circular curve

设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	120	100	80	60
一般最小平曲线半径/ m	1000	700	400	200

根据表2中的数据,按公式(2)可计算出将受采动影响的高等级公路各设计速度下的曲率半径最小设计值,如表3所示。

4.2 矿区公路圆曲线长度计算

为了得到行驶效果良好的矿区公路平曲线之圆曲线的长度,将 $L = L_{s1} + L_c + L_{s2}$ 代入(1)式,并对其变形,通过反解推导出平曲线之圆曲线长度的计算公式:

$$L_c = \frac{\pi R L \cdot CCR_s}{180} - \frac{L_{s1} + L_{s2}}{2} \tag{3}$$

式中各参数的含义同上。

表3 矿区公路圆曲线的一般最小曲线半径
Tab.3 Minimum radius of circular curve of highway in mining area

设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	120	100	80	60
采动公路一般最小平曲线半径/ m	833	614	370	192

由表1可知,要获得较好的行驶稳定性,公路平曲线的曲率变化率应控制在 $360 \text{ gon} \cdot \text{km}^{-1}$ 以内,将 $L = L_{s1} + L_c + L_{s2}, CCR_s \leq 360 \text{ gon} \cdot \text{km}^{-1}$ 以及 $1 \text{ gon} = 0.9^\circ$ 代入式(3),可得到公路平曲线之圆曲线长度的应满足的条件式:

$$L_c \geq \frac{(500/\pi R - 1.8) \cdot (L_{s1} + L_{s2})}{1.8 - 1000/\pi R} \tag{4}$$

根据表3,将矿区高等级公路各设计速度下的极限曲率半径代入(4)式,即可得到各设计速度矿区公路平曲线之圆曲线长度与前后缓和曲线长度的关系。

设计速度为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时:

$$L_c \geq \frac{(500/\pi R - 1.8) \cdot (L_{s1} + L_{s2})}{1.8 - 1000/\pi R} \geq \frac{(500/833\pi - 1.8) \cdot (L_{s1} + L_{s2})}{1.8 - 1000/833\pi} \tag{5}$$

设计速度为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时:

$$L_c \geq \frac{(500/\pi R - 1.8) \cdot (L_{s1} + L_{s2})}{1.8 - 1000/\pi R} \geq \frac{(500/614\pi - 1.8) \cdot (L_{s1} + L_{s2})}{1.8 - 1000/614\pi} \quad (6)$$

设计速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时:

$$L_c \geq \frac{(500/\pi R - 1.8) \cdot (L_{s1} + L_{s2})}{1.8 - 1000/\pi R} \geq \frac{(500/370\pi - 1.8) \cdot (L_{s1} + L_{s2})}{1.8 - 1000/370\pi} \quad (7)$$

设计速度为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时:

$$L_c \geq \frac{(500/\pi R - 1.8) \cdot (L_{s1} + L_{s2})}{1.8 - 1000/\pi R} \geq \frac{(500/192\pi - 1.8) \cdot (L_{s1} + L_{s2})}{1.8 - 1000/192\pi} \quad (8)$$

以上各式中, L_{s1}, L_{s2} 可参照《公路工程技术标准》,并结合实际工程要求取值,一旦 L_{s1}, L_{s2} 的值取定,矿区高等级公路各设计速度下的最小缓和曲线圆曲线长度即可确定。

5 结论

(1) 根据《公路工程技术标准》对高等级公路各设计速度下最小圆曲线半径的规定,通过曲率叠加计算公式,计算了采动影响下高等级公路各设计速度下最小圆曲线半径的取值;(2) 引入了公路平曲线曲率变化率的概念,通过分析总结公路平曲线曲率变化率与交通事故率和交通事故损失率的关系,提出了能保证车辆安全行驶的公路平曲线曲率变化率范围;(3) 根据采动影响下高

等级公路各设计速度下最小圆曲线半径的取值和能保证车辆安全行驶的公路平曲线曲率变化率范围,推导了矿区高等级公路各设计速度下平曲线之圆曲线长度的计算公式。

参考文献:

- [1] 王有良,栾元重,邓涛.公路路基采动稳定性计算[J].矿业研究与开发,2001,21(4):49-50.
- [2] 煤炭工业局.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M].北京:煤炭工业出版社,2000.
- [3] 韩丽,吴育琦,程建川,等.关于双车道公路交通安全的新理念和新成果[J].中外公路,2005,25(6):106-164.
- [4] ZAK A. Deformacje profili podłużnych dróg naterenach górnictwa [J]. Drogownictwo, 1994(9):28-32.
- [5] 裴玉龙,程国柱.高速公路车速离散性与交通事故的关系及车速管理研究[J].中国公路学报,2004,17(1):74-78.
- [6] GLENF, KOOREY. Incorporating safety into rural highway design [D]. New Zealand: University of Canterbury, 2009.
- [7] 胡圣能,许金良,杨宏志.曲率变化率在公路线形质量设计的应用研究[J].郑州大学学报:工学版,2010,31(3):101-105.
- [8] 陈雪梅,高利,魏中华,等.驾驶员因素与交通事故率的关联性[J].北京工业大学学报,2007,33(7):698-702.
- [9] 景天然.城市道路条件与交通事故率的关系[J].同济大学学报:自然科学版,1992,20(3):335-340.

Design Length of High-Grade Highway Circular Curve in Mining Area Based on Curvature Changing Rate of Curve

WANG Gang^{1,2}, GUO Guang-li^{1,2}, LI Ling³

(1. Key laboratory for resources environment and disaster monitoring of SBSM, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. The Main Laboratory of Resource Environment Information of Jiang Su, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In view of the shortage of traditional design methods of highway route, the conception of level curve changing rate of curve was introduced, the safety assessment standard of level curve changing rate of curve which can ensure vehicle stability was proposed according to the relationship between level curve changing rate of curve and traffic accident. Based on this safety assessment standard, the formula for the circle curve length of high-grade highway level curve in mining area was investigated by using the design specifications of high-grade highway transition curve and the maximum additional curvature caused by mining.

Key words: curvature changing rate of curve; mining area; high-grade highway; transition curve.