

公路平曲线半径的可靠性设计

陈富坚^{1,2}, 郭忠印¹, 陈富强¹, 柳本民¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 200092 上海; 2. 桂林电子科技大学 建筑与交通工程学院, 541004 广西 桂林)

摘要: 为了解决现行路线设计规范在平曲线半径设计时采用定值型设计车速法存在的问题, 提出了转弯半径的可靠性设计方法. 以现行公路工程结构可靠度设计统一标准为依据, 对平曲线半径的可靠度进行了定义, 以车辆转弯时的横向滑移失稳现象为约束条件, 建立了转弯半径的功能函数, 推导了转弯半径可靠性计算的数学模型. 对于可靠度及可靠指标数学模型的求解, 提出可根据具体条件选用解析法或蒙特卡洛法计算. 结合工程案例, 用自编程示范了平曲线半径的可靠性设计方法, 结合公众心理承受度, 推荐了平曲线半径可靠性设计的目标可靠度及可靠指标, 并计算了现行路线设计规范的隐含可靠度. 算例及对规范隐含可靠度的分析结果表明, 按设计车速法设计弯道半径, 即使能满足现行有关规范和指南的验算要求, 但未必能满足可靠性设计的要求. 在平曲线半径设计中推行可靠度设计方法可提高道路安全性.

关键词: 道路安全; 路线设计; 平曲线半径; 设计车速; 可靠性设计; 运行车速

中图分类号: U491.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)04-0100-05

Reliability design method for horizontal curve radius of highway alignment

CHEN Fu-jian^{1,2}, GUO Zhong-yin¹, CHEN Fu-qiang¹, LIU Ben-min¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, 200092 Shanghai, China;
2. School of Architecture & Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, 541004 Guilin, Guangxi, China)

Abstract: To solve the problems in design speed method for calculation of horizontal curve radius in the current specification, reliability design method is presented. Based on Unified Standard for Reliability Design of Highway Engineering Structures, the reliability of curve radius was defined. With lateral slide of vehicle traveling around horizontal curve as constraints, the performance function of curve radius was established and models for calculation of its reliability and reliable indicator were deduced. For solution of the models, analytical methods and Monte Carlo method were recommended. With self-developed program, a case study was conducted to illustrate the reliability design method in calculating curve radius of an accident-prone highway. Based on psychological investigation, target reliability, reliable indicator, and minimum curve radiuses were recommended for design of curve radius of various grades of two-lane highway. Hidden reliability of the current specification was calculated. The case study and the hidden reliability analysis together shows that even if the design result with design speed method satisfy requirement of the specification, it maybe not reach the standard of reliability design method. Therefore, Reliability design method for horizontal curve radius of highway alignment is helpful for safety improvement.

Key words: highway safety; alignment design; curve radius; design speed; reliability design; operating speed

收稿日期: 2010-10-20.

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2007AA11Z235).

作者简介: 陈富坚(1974—), 男, 博士, 副教授;

郭忠印(1962—), 男, 教授, 博士生导师.

通讯作者: 陈富坚, armstrongcfj@yahoo.com.cn.

在平曲线设计中, 确定转弯半径具有重要的技术经济意义. 半径过小, 车辆在弯道上行驶时容易因离心力过大导致横向失稳型交通事故^[1]; 半径过大, 则线形标准高, 难以展线实施, 造价也高.

通常按车辆以设计车速在弯道作圆周运动时的离心力不大于弯道能提供的最大向心力来确定弯道的最小半径,这个最小半径一般作为弯道半径设计的底线,具体设计值往往大于最小半径.但在山区公路,突破最小半径限制的设计时有出现.我国现行的路线设计规范^[2]在计算弯道半径时把各计算参数均当作定值处理,是一种定值型设计方法.实际上,影响路线转弯半径设计的诸多因素都有较强的随机性,如运行车速.运行车速高于设计车速的情况也是常见现象^[3],这导致以最小半径或接近最小半径的值作为设计半径的山区公路往往成为事故多发路段.设计车速法既无法解释这种现象,亦无法对所设计弯道的安全可靠性给出定量评价.可靠度设计法则考虑了现实世界的不确定性^[4],能解释和预测上述现象.因此,本文引入可靠性方法进行平曲线半径设计.

1 车辆转弯时的动力学分析

车辆在公路弯道行驶时,与转弯半径有关的失稳现象为横向滑移和横向倾覆.现代汽车的设计一般轮距宽、重心低,通常情况下,若出现横向失稳现象,横向滑移总是先于横向倾覆^[5].因此,本文在路线转弯半径的可靠性分析时仅以横向滑移失稳为约束条件,认为只要车辆转弯时出现横向滑移失稳现象,即认为转弯半径不可靠.画出车辆在弯道作圆周运动时的受力图,见图 1,其中 f 、 α 、 m 、 g 、 V 分别为路面横向力系数、横向倾角、汽车质量、重力加速度和速度.

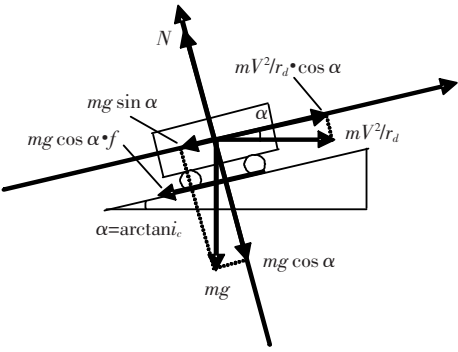


图 1 车辆在弯道作圆周运动时的受力图

根据图 1,车辆在弯道作圆周运动,要保持横向稳定,必须满足的约束条件为

$$mgf \pm mgi_c \geq mV^2/r_d. \tag{1}$$

式中:当横坡方向的重力分力与路面横向摩擦力方向相同时取“+”号,相反时取“-”号,以下相同.

我国现行路线设计规范规定的各级公路的最小半径值正是依据式(1)推导出来的^[6-8].

2 路线转弯半径可靠性模型

本文从横向抗滑移稳定性的角度来研究转弯半径的可靠性,根据文献[9],其可靠度可定义为路线转弯半径在规定的时间内、在规定的条件下、能保证车辆在弯道上稳定行驶而不发生横向滑移的概率.

根据上述定义及文献[9],转弯半径可靠度的定义式可表达为

$$P_s = 1 - P_f = P(Z_0 \geq 0) = P(R_0 - S_0 \geq 0). \tag{2}$$

$$Z_0 = R_0 - S_0 = mgf \pm mgi_c - \frac{mV^2}{r_d}. \tag{3}$$

式中: P_s 、 P_f 分别为路线转弯半径 r_d 的可靠度及失效概率; Z_0 为转弯半径 r_d 的功能函数.

为了简化,将式(3)中的质量参数 m 消除,得

$$Z = R - S = gf \pm gi_c - \frac{V^2}{r_d}. \tag{4}$$

式(4)中, $R = gf \pm gi_c$, $S = V^2/r_d$,则

$$P_s = P(Z_0 \geq 0) = P(Z \geq 0) = P(R - S \geq 0) = P(gf \pm gi_c - \frac{V^2}{r_d} \geq 0). \tag{5}$$

式(5)为路线转弯半径 r_d 的可靠度计算模型.其中 f 为横向力系数,可假定服从正态分布,采用预估模型(新路)或者现场实测确定(既有路)^[10]; V 为运行车速,服从正态分布^[11],采用运行车速预估模型(新路)或者现场实测确定(既有路); g 为重力加速度,常数;转弯半径 r_d 和路面超高横坡 i_c 为设计参数,可认为是常数.

若 f 服从正态分布,即 $f \sim N(\mu_f, \sigma_f^2)$,则 $R = gf \sim N(g\mu_f, g^2\sigma_f^2)$;若 V 为正态分布, $S = V^2/r_d$ 并不服从正态分布,概率密度函数为

$$p_s(s) = \begin{cases} \frac{\sqrt{r_d}}{2\sigma_V} \left[\varphi\left(\frac{\sqrt{r_d}s - \mu_V}{\sigma_V}\right) + \varphi\left(\frac{-\sqrt{r_d}s - \mu_V}{\sigma_V}\right) \right] \cdot s^{-\frac{1}{2}}, & s > 0; \\ 0, & s \leq 0. \end{cases} \tag{6}$$

式中: $\varphi(\cdot)$ 为标准正态分布密度函数; μ_V 、 σ_V 分别为运行车速 V 的均值和标准差.

因此, $Z = R - S$ 的分布函数相对复杂,不能直接应用文献[9]中的公式(基于 R 与 S 同为正态分布推导出来的),需要采用变量变换法^[12]求解.下面推导功能函数 $Z = g(R, S)$ 的概率密度函数.

假定 R 与 S 相互独立,根据概率论的变量变换法,推导结果为

$$p_z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} p_R(r) p_s(s) dr =$$

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{r_d}}{4\sigma_v} [\varphi(\frac{\sqrt{r_d s} - \mu_v}{\sigma_v}) + \varphi(\frac{\sqrt{r_d s} - \mu_v}{\sigma_v})] \cdot \\ s^{-\frac{1}{2}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(\frac{r - g\mu_f}{g\sigma_f}) \cdot gdf, s > 0; \\ 0, s \leq 0. \end{cases} \quad (7)$$

式中： μ_f, σ_f 分别为随机变量 f 的均值和标准差； r, s 分别为随机变量 R 与 S 的小写。

得到了 Z 的概率密度函数,则 Z 的均值为

$$\mu_z = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (gf \pm gi_c - V^2/r_d) \cdot p_z(z) df dV. \quad (8)$$

当然,若知道了 R 与 S 各自的均值时, Z 的均值 μ_z 也可直接由下式计算^[9]。

$$\mu_z = \mu_R - \mu_s. \quad (9)$$

将式(7)代入式(5),得到路线转弯半径的可靠度计算公式为

$$P_s = P(Z \geq 0) = \int_0^{+\infty} p_z(z) dz. \quad (10)$$

当路面摩擦系数 f 和运行车速 V 并不服从正态分布时,式(6)、(7)并不适用,需要重新推导,或采用本文后面介绍的蒙特卡洛法(Monte Carlo 法);但式(8)~(10)总是成立的。

2.3 可靠指标

当随机变量 R 与 S 各自的概率特征数容易得出时,转弯半径的可靠指标也可由下式直接计算得出^[9]。

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_s}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}}. \quad (11)$$

式中： μ_z, σ_z 分别为随机变量 Z 的均值和标准差。

式(11)对于 R 与 S 是连续分布且不相关的情况总是适用的,不论是否正态分布^[12]。得到了可靠指标,可通过查标准正态分布函数表^[12]得到转弯半径的可靠度,即

$$P_s = \Phi(\beta). \quad (12)$$

式中： $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

3 可靠度及可靠指标的其他解法

上述求解可靠度及可靠指标的方法,实际上是中心点法^[13],是建立在随机变量都是正态分布的基础上的。当随机变量不服从正态分布时,需要

采用验算点法,也叫 JC 法^[13]。中心点和 JC 法都属于解析法。实际计算时,解析法很麻烦。因此,第 3 种计算方法,即计算机数值仿真法,如 Monte Carlo 法^[12],便应运而生。

本文在此引入 Monte Carlo 法进行转弯半径的可靠性设计。当已知各随机变量的分布形式(如正态分布)和统计参数(如均值、方差)后,可通过编程产生服从已知分布的各随机变量的大量随机数,然后在这些随机数中进行大量随机抽样,把这些值一组一组地代入功能函数 Z 中,记下抽样总数 N 及 $Z \leq 0$ 的次数 M 。当 $N \rightarrow \infty$ 时,根据 Bernoulli 大数定律及正态随机变量的特性可求得失效概率及可靠指标。

4 计算示例

某省道一事故多路段为山岭重丘区二级公路的急弯路段,设计时速 40 km/h,圆曲线半径小($R = 90$ m),不能满足二级公路一般最小半径 $R = 100$ m 的要求;弯道内侧处为 1 座石山,故无视距平台;弯道处于连续上坡路段,纵坡大($i = 6.286\%$),坡长 455 m;弯道超高横坡 7%。该道路于 2003 年竣工,经过 2 a 多的通车运营,此急弯路段已发生数十起交通事故,直接死亡人数达 23 人。2005 年此路段进行了安全改造。根据交通事故资料,从事故形态和事故过程分析,该急弯路段的交通事故绝大多数为车辆横向失稳型路侧倾覆事故。现场踏勘发现,此急弯路段路面上横向擦痕多且明显,应为车辆下坡转弯时横向滑移所致;此外,弯道内侧的石山严重阻碍上、下坡车辆的通视,致使车辆会车视距、停车视距严重不足。现场检测发现,在急弯路段的坡底处,一般车速达 70 km/h。

设计部门最终确定的改造方案将弯道半径(JD1)从原来的 90 m 增大到 173.362 m,超高从原来的 7%降低至 6%,并对弯道的通视条件进行了改善。经验算,各项设计指标均满足规范^[2]和指南^[7]的要求。表 1 为运行车速差验算,限于篇幅,其余验算内容不再详列。

表 1 某省道事故多发路段安全改造设计方案的验算结果

路段编号	起点桩号	终点桩号	半径/ m	路段长度/ m	运行车速/(km·h ⁻¹)				速度差/(km·h ⁻¹)			
					小客车		大货车		小客车		大货车	
					正向	正向	反向	反向	正向	正向	反向	反向
ZX1	K37 + 824.500	K37 + 904.500	+ ∞	80.000	69.4	52.4	62.0	60.9	0.4	0.4	11.7	7.3
WD1	K37 + 904.500	K38 + 158.703	173.362	254.203	57.2	42.9	73.7	53.6	12.2	9.5	4.1	1.8
WD2	K38 + 158.703	K38 + 312.775	295.300	154.072	51.7	28.1	69.6	51.8	5.5	14.8	2.2	1.4
ZX2	K38 + 312.775	K38 + 384.849	+ ∞	72.074	35.7	31.2	67.4	50.4	16.0	3.1	0.4	0.4

下面,本文先对该路段改造前后弯道半径的可靠性进行计算,然后按可靠性设计进行设计.

4.1 可靠性计算参数的确定

4.1.1 弯道运行车速均值及标准差的确定

要计算路线转弯半径的可靠度,必须知道所在弯道的平均车速及车速标准差.获得平均车速及车速标准差的方法有2种:1)现场检测法,表2为该法的实测结果;2)经验公式法,从文献检索看,目前各国车速预测的经验公式主要是85位运行车速,关于平均车速及车速标准差经验公式的文献报道非常有限.本文对美国联邦公路局研究报告^[14]中的数据进行回归,得到平均车速经验公式为

$$V_m = 16.015\ln(R) - 5.7882. \quad (13)$$

式中: V_m 为平均车速,km/h; R 为弯道的转弯半径,m.

同时也对本文的检测数据进行回归,得到平均车速公式为

$$V_m = 13.023\ln(R) - 6.3682. \quad (14)$$

对比发现,美国公式的预测结果要高.这可能跟中美两国公路的路况、交通量及车型等因素不同有关.考虑实际情况,本文采用式(14)计算弯道的车速均值和标准差.

对于车速标准差,文献^[15]认为单个道路区段的设计指标与速度离散性之间并没有相关性,但当实行限速管理后,则速度离散性与设计速度、交通管理中的速度限制的差异性相关,即有如下的相互关系.

$$S^2 = 57 + 0.05(V_D - V_P - 10)^2. \quad (15)$$

式中: S 、 V_D 、 V_P 分别为运行车速标准差、设计车速和路段限速,单位都是km/h.

但国外研究^[16]均表明,车速标准差与平均车速具有明显的相关性,且最获得承认的成果为^[17]

$$S = 0.14 \times V_m, \quad (16)$$

因此,本文采用式(16)计算各设计方案的车速标准差.

4.1.2 路面横向力系数的确定

路面横向力系数随环境变异性很大^[8],本文采用有关研究的结果^[18-19]综合确定.

4.2 弯道半径可靠性的计算

利用前面推导的计算公式,本文编制了基于MATLAB平台和Monte Carlo法的路线半径可靠度计算程序RRC1.0.将可靠性计算所必须的各参数值代入RRC1.0,即可计算出弯道半径的可靠度,结果见表2.为了寻求满足可靠度要求下的最佳路线转弯半径,本文计算了多个对比方案,据此画出失效概率和转弯半径的关系,如图2所示.

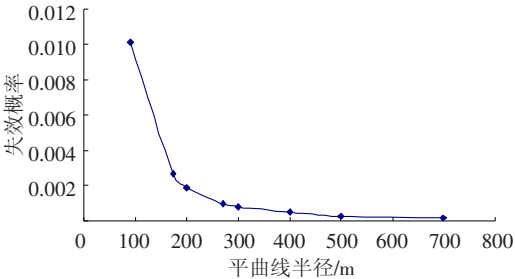


图2 失效概率与转弯半径关系曲线图

公众心理调查表明^[13],胆大的人能接受的危险率为 10^{-3} ,谨慎的人允许的危险率为 10^{-4} ,当危险率为 10^{-5} 或更小,公众一般都不再考虑其危险性.公路交通是各种常用交通方式中最危险的一种,公众对此虽然不满意,但基本尚能接受.综合技术经济方面考虑,可以采用 10^{-3} 作为路线转弯半径可靠性设计的失效概率,则0.999即为目标可靠度.

改造前原设计的道路安全状况是令人无法接受的,其转弯半径的失效概率显然太高(0.0101),而实施方案虽然能满足现行规范的验算要求,但其失效概率(0.0027)依然过高.要满足可靠性设计的要求,转弯半径最小应为270m(超高6%).采用指南^[7]对本文拟定的计算对比方案进行检验,结果表明,该方案能满足指南的要求.

表2 某事故多发路段各设计方案可靠度计算结果

方案比较	转弯半径/m	失效概率 P_f	可靠度 P_s	可靠指标 β	计算误差 ε	抽样总数 N /次
原方案	90	0.0101	0.9899	2.32	0.0008	50000000
设计单位的改造方案	173.362	0.0027	0.9973	2.78	0.0017	50000000
本文拟定的计算对比方案1	200	0.0019	0.9981	2.90	0.0020	50000000
本文拟定的计算对比方案2	270	0.0010	0.9990	3.10	0.0028	50000000
本文拟定的计算对比方案3	300	0.0008	0.9992	3.17	0.0031	50000000
本文拟定的计算对比方案4	400	0.0005	0.9995	3.30	0.0039	50000000
本文拟定的计算对比方案5	500	0.0003	0.9997	3.40	0.0050	50000000
本文拟定的计算对比方案6	700	0.0002	0.9998	3.50	0.0062	50000000

5 现行路线设计规范의 隐含可靠度

采用 RRC1.0 可对现行路线设计规范允许采用的最小半径的隐含可靠度进行计算. 下面仅对双车道公路进行计算, 计算结果见表 3. 表 3 中的隐含可靠度是以现行公路工程技术标准条文说明^[6]和现行路线设计规范^[2]中的规定值为参数代入的.

表 3 表明, 现行路线设计规范中关于双车道

表 3 现行路线设计规范中双车道公路的隐含可靠度

公路等级	设计速度/ (km · h ⁻¹)	一般最小半径/ m	极限最小半径/ m	一般最小半径的 可靠度/可靠指标	极限最小半径的 可靠度/可靠指标	可靠性要求的最小 半径/相应可靠度
二级公路	80	400	250	0.9997/3.40	0.9992/3.17	250/0.9992
二级公路	60	200	125	0.9991/3.13	0.9975/2.81	200/0.9991
二级公路	40	100	60	0.9925/2.43	0.9739/1.94	100*/0.9991
三级公路	40	100	60	0.9925/2.43	0.9739/1.94	100*/0.9991
三级公路	30	65	30	0.9783/2.02	0.9074/1.32	65*/0.9991
四级公路	20	30	15	0.9073/1.32	0.8281/0.95	38*/0.9990

注:1)表中可靠度计算所用超高均为规范容许的最大值,即 8%;2)表中最后 1 列带 * 号的半径值及其可靠度是在弯道实行限速管理措施条件下按式(20)计算得到的,其余的为不实行限速条件下按式(20)计算得到的;半径单位为 m.

6 结 论

1)影响道路平曲线转弯半径设计的诸多因素都表现出较强的随机性,在设计中将它们当作定值处理是不合理的,应视其为随机变量.

2)现行路线设计规范的设计车速法未考虑参数的随机性特征,无法从安全可靠度的角度解释所设计弯道可承担的风险水平,而可靠性设计法弥补了这一不足,应予以推广.

3)算例及对规范隐含可靠度的分析表明,在路线转弯半径设计中,可靠性设计方法的要求更高,更有利于交通安全.

4)失效概率与转弯半径关系分析表明,存在满足安全可靠性和经济造价 2 方面要求的最佳半径.

参考文献:

[1] 郭忠印,方守恩,刘涛,等. 道路安全工程[M]. 北京:人民交通出版社,2002:95-98.

[2] JTG D60—2006. 公路路线设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2006:28-29.

[3] 交通部公路司. 新理念公路设计指南[M]. 北京:人民交通出版社,2007:56-58.

[4] 吴世伟. 结构可靠度分析[M]. 北京:人民交通出版社,1990:1-10.

[5] 杨少伟. 道路勘测设计[M]. 3 版. 北京:人民交通出版社,2009:38-40.

[6] JTG B01—2003. 公路工程技术标准条文说明[S]. 北京:人民交通出版社,2008:23-24.

[7] JTG/TB05—2004. 公路项目安全性评价指南[S]. 北京:人民交通出版社,2005:36-39.

[8] 谢静芳,吕得宝,王宝书. 高速公路路面摩擦气象指数预

公路最小半径值的规定并不都能满足可靠性设计的要求,设计时速 80 km/h 的二级公路都能满足要求,设计时速 60 km/h 的二级公路只有一般最小半径能满足要求,三级公路在弯道实行限速管理条件下只有一般最小半径能满足可靠性要求,而四级公路的两种最小半径值即使在限速条件下也不能满足可靠性要求. 上述计算结果与我国公路交通事故的分布特征是相符的.

报方法[J]. 气象与环境学报,2006,22(6):18-21.

[9] GB/T 50283—1999. 公路工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京:中国计划出版社,1999.

[10] MAYORA-PARDILLO J M. An assessment of the skid resistance effect on traffic safety under wet-pavement conditions [J]. Accident Analysis and Prevention, 2009,41(4):881-886.

[11] 阎莹,王晓飞,张宇辉,等. 高速公路断面运行车速分布特征研究[J]. 中国安全科学学报,2008,17(7),171-176.

[12] 茆诗松,程依明,濮晓龙. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2006:47-49.

[13] 李国强,黄宏伟,吴迅,等. 工程结构荷载与可靠度设计原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008:155-156.

[14] Federal Highway Administration, Department of Transportation of United States. Speed prediction for two-lane rural highways[R]. Washington: USDOT FHWA, 1999.

[15] 刘运通. 道路交通安全指南[M]. 北京:人民交通出版社,2004:200-201.

[16] BENNETT C R. A speed prediction model for rural two-lane highways[D]. Auckland of New Zealand: University of Auckland, 1994.

[17] LINDEMAN H P, RANFT D B. Speed on curves[R]. Zurich of Swiss land: ETHZ Institute for Traffic Planning and Transport Engineering, 1978.

[18] MURAT E. Estimation of friction coefficient of asphalt concrete road surfaces using the fuzzy logic approach [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2007,34(9):1110-1118.

[19] CEREZO V, GOTHIE M. A new approach for pavement performance evaluation [J]. Wear, 2009,267(5):1105-1110.

(编辑 魏希柱)