DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250915

面向自动驾驶的公路圆曲线半径研究

杨　晨
(重庆交通大学,重庆市 400074)

摘　要: 随着自动驾驶技术的发展和相关国家政策的扶持,我国交通系统逐渐趋向智能化,公路上自动驾驶汽车占比将不断增大。为适应自动驾驶车辆的行驶特点,首先通过分析国内外有关不限速高速公路的设计经验,确定了面向自动驾驶技术的公路最高设计速度并进行了等级划分,然后分别从通视性、横向稳定性和ACC系统可探测范围3个角度研究了圆曲线最小半径取值。结果表明,对于低等级公路,ACC系统可探测范围是圆曲线最小半径的主要控制量;对于高等级公路,横向稳定性是圆曲线最小半径的主要控制量。最后通过对3种控制因素所得结果进行比较,提出了不同设计速度下圆曲线最小半径的建议值。

关键词: 圆曲线半径;道路几何设计;自动驾驶;设计速度
中图分类号: U412.34;TU997　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0075-05

Research on Radius of Highway Circular Curves for Autonomous Driving

YANG Chen
(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: With the development of autonomous driving technology and the support from relevant national policies, the transportation system is gradually becoming intelligent in China, and the proportion of autonomous vehicles on highways will continue to increase. To adapt the driving characteristics of autonomous vehicles, firstly, by analyzing the design experience of unspeed-limited expressways at home and abroad, the maximum design speed of highways for autonomous driving technology is determined and classified into different grades. And then, the minimum radius of circular curves is studied from three perspectives of visibility, lateral stability and detectable range of the adaptive cruise control (ACC) system. The results show that for low-grade highways, the detectable range of the ACC system is the main control variable for the minimum radius of circular curves, and for high-grade highways, the lateral stability is the primary control variable. Finally, by comparing the results derived from the three control factors, the recommended values of the minimum circular curve radius under different design speeds are proposed.

Keywords: circular curve radius; road geometric design; autonomous driving; design speed

0　引　言

近年来,我国自动驾驶行业受到国家产业政策的重点支持,相继出台了《关于促进道路交通自动驾驶技术发展和应用的指导意见》、《国家车联网产业标准体系建设指南》以及《智能汽车智能地图标准体系建设指南》等一系列文件,可以预见,人工驾驶和自动驾驶混合行驶的交通流模式将是道路交通系统发展的必然趋势。然而,现行《公路工程技术标准》[1](JTG B01—2014)和《公路线形设计规范》[2](JTG D20—2017)(以下简称为"《标准》"和"《规范》")是以人工驾驶为服务对象,其中关于圆曲线半径的取值规定可能并不完全适用于面向自动驾驶的公路建设,因此,有必要对面向自动驾驶的公路圆曲线半径展开研究。

王雪松[3]从道路几何设计、路侧设施和道路类型等方面研究了现有道路对于自动驾驶车辆的适驾性,发现平曲线半径、弦长和曲线偏角等属性对自动驾驶失效率有显著影响。Wang[4]研究了自动化系统功能特征对道路几何设计的影响,发现横净距会影响不同等级的自动驾驶车辆在道路平曲线行驶的安全性。黄晓明[5]基于路表摩擦对无人驾驶汽车制动性能展开了研究,结果表明,圆曲线半径会通过影响速度变化间接导致摩擦系数减小,并建议圆曲线半径宜控制在100 m以上。Zhang等[6]在研究基于ACC系统感知能力的弯道车辆识别的算法中发现,弯道半径过小会引起ACC系统探测失效。Garcia[7]对自

收稿日期:2025-09-19
作者简介:杨晨(2001—),男,硕士研究生,从事道路路线设计工作。

动驾驶卡车车队的停车视距展开了研究，发现圆曲线半径会影响车队整体的可获得性视距。周建等[8]认为服务于自动驾驶的道路设计速度应当提高至180 km/h，在该速度下包括圆曲线半径在内的道路几何设计指标取值应重新计算。以上研究均在120 km/h的速度下展开研究，在120 km/h以上的超高速场景下考虑不足，因此，本研究将首先确定面向自动驾驶道路的最高设计速度并划分道路等级划，并基于此展开各个设计速度下圆曲线半径取值的研究。

1　设计速度

随着自动驾驶车辆技术和道路智慧化程度的提高，道路的运行条件将越来越好，自动驾驶车辆可达到的行驶速度远大于120 km/h。近年市场的普通自动驾驶汽车最高设计车速大多在180 km/h及以上，120 km/h的最高限速将影响自动驾驶汽车性能的发挥，降低道路的通行效率。为更好适应自动驾驶对高速公路的建设需求，提高公路通行能力，面向自动驾驶的公路的设计速度宜适当提高。

何永明等[9]首次提出了超高速公路的概念并划分了对应等级，其中将超三级高速公路规定为自动驾驶自动汽车专用公路，该等级下设计速度最高可取到240 km/h。德国《高速公路设计指南》[10]（以下简称“RAA”）对高等级高速公路不作速度限制，但出于安全考虑，提供了理论推荐速度，其最大值为130 km/h。法国公路路线规范《ICTAAL》[11]采用运行速度指导道路几何设计，其速度最大可取至150 km/h。美国加州部分公路设计速度达到了130 km/h，《美国公路和街道几何设计规范》[12]（以下简称“绿皮书”）中将高等级道路的设计速度级差定为10 km/h。我国《道路交通安全违法行为记分管理办法（第163号）》取消了超速在20%以内的小客车的交通处罚，允许小客车在120 km/h的道路上以144 km/h的速度行驶。因此，借鉴国内外经验和我国交通法律法规，决定将面向自动驾驶的道路的最高设计速度提高至150 km/h，最低设计速度取110 km/h，各级级差取10 km/h，普通高速和其余等级道路仍沿用《规范》所规定的等级划分方式，见表1。

表1　基于自动驾驶技术的道路等级划分

公路类型	超高速公路					普通高速			一级公路			二级公路		三级公路		四级公路	
设计速度/(km·h^{-1})	150	140	130	120	110	120	100	80	100	80	60	80	60	40	30	30	20

2　满足不同需求的圆曲线最小半径计算

2.1　满足横净距要求的圆曲线最小半径

自动驾驶汽车依靠传感器感知环境，受传播介质影响，传感器的雷达信号将随探测距离逐渐衰减，当障碍物透射率过大时，雷达信号难以穿透介质，形成盲区，进而造成决策失误。因此，圆曲线的设计必须具备足够的横净距宽度，为自动驾驶汽车提供良好的通视条件，见图1。

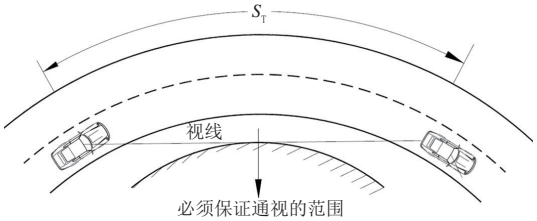

图1　横净距需求示意图

横净距、圆曲线半径和停车视距满足式（1）关系：

$$m = R[1 - \cos(\frac{28.65S_t}{R})] \tag{1}$$

式中：m为横净距宽度，m；R为圆曲线半径，m；S_t为停车视距，m。

为计算满足横净距要求的圆曲线半径，必须首先确定停车视距取值。停车视距依然由反应距离s_1和制动距离s_2组成，参考“绿皮书”中停车视距计算模型，其计算方法见式（2）：

$$S_t = s_1 + s_2 = 0.278 \times V_d \times t_{\mathrm{PRT}} + \frac{V_d^2}{254(\frac{A_{xd}}{9.81} \pm i_G)} \tag{2}$$

式中：V_d为设计速度，km/h；t_{PRT}为感知-制动反应时间，s；A_{xd}为最大制动减速度，m/s^2；i_G为公路纵坡，上坡时取“+”，下坡时取“-”。

L5级自动驾驶系统的感知-反应时间通常取0.5 s，考虑到乘客舒适性，最大制动减速度A_{xd}的取值和人工驾驶没有差别，仍采用“绿皮书”中规定的经验值3.4 m/s^2。由于本研究不涉及纵坡，因此i_G取0。综上，根据式（2）可计算出各个设计速度下停车视距值，见表2。

自动驾驶汽车的视点位置可认为在车道宽度中心处，则横净距可按照内侧行车道中线到路侧障碍物的距离来计算，结合《标准》中公路横断面相关规定，各等级公路的所需横净距的保守计算值为：四级公路，3.25 m（车道宽度）/2+0.5 m（路肩）=2.125 m；三

表 2　基于自动驾驶技术的停车视距

设计速度/(km·h^{-1})	20	30	40	60	80	100	110	120	130	140	150
计算值/m	7.32	14.39	23.74	49.23	83.82	127.49	152.74	180.26	210.04	242.10	276.44
建议值/m	10	20	30	55	90	130	160	185	215	250	280

级公路，3.5 m（车道宽度）/2+0.75 m（硬路肩）+0.5 m（土路肩）=3 m；二级公路，3.5 m（车道宽度）/2+1.5 m（硬路肩）+0.75 m（土路肩）=4 m；一级公路，3.75 m（车道宽度）/2+1.5 m（硬路肩）+0.75 m（土路肩）+0.6 m（边沟）+1 m（碎落台）=5.725 m；普通高速公路：同一级公路；超高速公路，4 m（车道宽度）/2+3 m（硬路肩）+0.75 m（土路肩）+0.6 m（边沟）+1 m（碎落台）=7.35 m。

综上，根据式（1）可计算出不同设计速度下满足横净距要求的圆曲线最小半径，见表 3。

表 3　满足横净距需求的圆曲线最小半径

设计速度/(km·h^{-1})	20	30	40	60	80	100	110	120	130	140	150
所需横净距/m	2.125	3	4	4	5.725	5.725	7.35	7.35	7.35	7.35	7.35
计算值/m	22.02	31.13	66.55	127.95	399.60	579.79	713.25	861.48	999.66	1 160.75	1 298.74
建议值/m	20	30	65	130	400	580	710	860	1 000	1 160	1 300

2.2　满足横向稳定性的圆曲线最小半径

车辆在弯道上行驶需保证横向行车稳定，其产生的离心力不得超过路面摩擦力所允许的界限，《规范》采用式（3）计算圆曲线的最小半径的极限值和一般值：

$$R = \frac{V^2}{127(\mu \pm i_h)} \tag{3}$$

式中：R 为半径，m；V 为速度，km/h；μ 为横向力系数；i_h 为路拱横坡。

在德国不限速高速公路设计中，德国规范 RAA 规定 EKA1 级高速公路的最大超高一般为 6%，本研究借鉴德国的设计经验，取超高值为 6%。《规范》中有关横向力系数的取值借鉴了国内外使用经验，当 $\mu<0.10$ 时，转弯平稳，感觉不到曲线存在；当 $0.2<\mu<0.35$ 时，转弯不平稳；当 $\mu>4.0$ 时，有倾覆风险[2]。《规范》中对于圆曲线最小半径的“一般值”的计算选用 0.05 到 0.06 的横向力系数，为保证自动驾驶车辆的行车安全，选取横向力系数为 0.05，则根据式（3）计算得满足横向稳定性的圆曲线一般最小半径见表 4。

表 4　满足横向稳定性的圆曲线一般最小半径

设计速度/(km·h^{-1})	20	30	40	60	80	100	110	120	130	140	150
计算值/m	28.63	64.42	114.53	257.70	458.12	715.82	866.14	1 030.78	1 209.74	1 403.01	1 610.59
建议值/m	30	70	115	260	460	700	870	1 030	1 200	1 400	1 600

2.3　自动驾驶 ACC 系统可探测最小半径

自动驾驶汽车可依靠自适应巡航控制系统（adaptive cruise control，ACC）实现车速调节和纵向安全距离控制，并依靠传感器感知环境，其中毫米波雷达是组成 ACC 系统的主要传感器。通常，ACC 系统包括一个短程毫米波雷达（SRR）和一个长毫米波雷达（LRR），ACC 系统中常见毫米波雷达配置参数见表 5。虽然毫米波雷达可以探测 4 m 以内的范围，但《ACC 国际标准》（ISO 15622—2018）[13]（以下简称“《ACC 标准》”）规定，4 m 以内不需要激活 ACC 系统，因此 ACC 系统中实际可探测距离在 4 到 150 m 的范围内。

表 5　毫米波雷达配置参数

雷达类型	探测距离/m	水平视场角/(°)	垂直视场角/(°)
SRR	30	80	9
LRR	150	9	9

由于弯道曲率的存在和受到传感器水平视场角影响，ACC 系统在曲线上的可探测范围要小于直线上的可探测范围，见图 2。

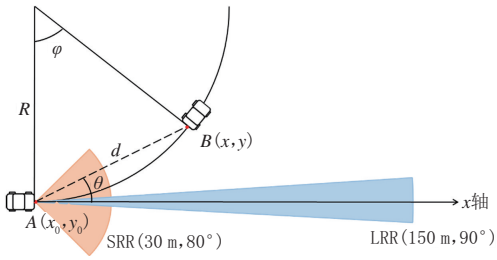

图 2　曲线上 ACC 系统可探测范围图示

图 2 中车辆瞬时行驶方向为 x 轴的正向，点 $A(x_0,y_0)$ 为传感器所在位置，点 $B(x,y)$ 为道路前方目标车辆车尾中心，设曲线半径为 R，弧度为 φ，后车相对于前车的方向角为 θ，两车直线距离为 d，假定两车严格按照道路中线行驶，则有：

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2=d^2$$

当φ很小时，弧长与弦长近似相等，则此时有：

$$R\varphi = d$$

根据弦切角定理有：

$$\varphi = 2\theta$$

联立两式有：

$$\tan\theta = \tan\frac{d}{2R}$$

当B点位于SRR的探测范围内时有：

$$\tan\theta \in [-\tan 40^\circ, \tan 40^\circ] = [-0.84, 0.84]$$

当B点位于LRR的探测范围内时有：

$$\tan\theta \in [-\tan 4.5^\circ, \tan 4.5^\circ] = [-0.08, 0.08]$$

则半径R的取值范围为：

$$R \geqslant \begin{cases} \dfrac{d}{2\tan^{-1}(\pm 0.84)} = \dfrac{d}{1.40}, d \in [4\ \text{m}, 30\ \text{m}] \\ \dfrac{d}{2\tan^{-1}(\pm 0.08)} = \dfrac{d}{0.16}, d \in (30\ \text{m}, 150\ \text{m}] \end{cases} \tag{4}$$

式中：R为半径，m；φ为弧度，°；θ为相对于前车的方向角，°；d为两车直线距离，m。

由于《ACC标准》用车头时距限制跟车距离，因此采用车头时距计算车间距d，因车间距和车头间距相差一个车身长度，车头时距和车头间距可以相互转换，则车头时距和车间距的换算关系见式(5)：

$$d = \text{HWT} \times v - L_v \tag{5}$$

式中：HWT为车头时距，s；v为行车速度，m/s；L_v为车身长度，m。

《ACC标准》规定，跟车过程中，当跟车速度在8 m/s及其以上时，最小跟车时距应在1.5到2.2 s以内；当处于稳态跟车时，最小跟车时距应不小于0.8 s。基于对冗余安全设计的考虑，跟车头时距取2 s。参考我国《标准》，小客车的车身长度取6 m。根据式(4)、式(5)可计算出ACC系统可探测最小半径，见表6。

表6　ACC系统理论可探测最小半径

设计速度/(km·h^{-1})	20	30	40	60	80	100	110	120	130	140	150
车间距d/m	5.11	10.67	16.22	27.33	38.44	49.56	55.11	60.67	66.22	71.78	77.33
计算值R/m	3.65	7.62	11.59	19.52	240.28	309.72	344.44	379.17	413.89	448.61	483.33
建议值R/m	10	15	20	30	250	315	350	385	420	450	490

3　圆曲线最小半径的极限值和一般值

我国《智能运输系统自适应巡航控制系统性能要求与检测方法》[14]（GB/T 20608—2006）中规定，ACC系统对弯道半径的适应能力不得小于125 m，该规定是为了控制车辆在转弯过程中最大横向加速度不超过2.3 m/s^{2}且最大横向偏移不超过0.5 m，然而，当地形条件受限时，该要求对于公路设计指标的取值过于严苛，可能导致公路展线困难、建设成本较高。因此，建议圆曲线最小半径的极限值保证满足ACC系统的理论可探测范围以及横净距需求即可，而圆曲线最小半径的一般值宜满足上述所有需求，对于设计速度为20 km/h和30 km/h的公路，经线性协调性论证后，一般最小半径可分别下调至50 m和80 m。则将上述三种圆曲线最小半径进行比较并取较大值作为面向自动驾驶的公路的圆曲线最小半径的极限值或一般值，结果见表7。

表7　面向自动驾驶的公路圆曲线半径

设计速度/(km·h^{-1})	20	30	40	60	80	100	110	120	130	140	150
极限值/m	20	30	65	130	400	580	710	860	1 000	1 160	1 300
一般值/m	125	125	125	260	460	700	870	1 030	1 200	1 400	1 600

4　结　语

（1）通过分析德国、法国和美国关于不限速高速公路的设计经验，结合我国交通法律法规，确定了面向自动驾驶的公路最高设计速度为150 km/h，并对公路进行了道路等级划分。

（2）分别从满足道路通视条件、车辆横向稳定性和搭载ACC自动驾驶系统的可探测范围共3个需求方面确定了对应的圆曲线最小半径，结果表明，对于低等级公路，ACC系统可探测范围是圆曲线最小半径的主要控制量；对于高等级公路，横向稳定性是圆曲线最小半径的主要控制量。最后通过对比3种最小半径取值，最终确定了各个设计速度下面向自动驾驶的公路的圆曲线最小半径的极限值和一般值的建议性取值。

（3）本研究考虑了传感器视场角对圆曲线最小半径的影响，但缺少自动驾驶纵向控制和横向控制算法的考虑，未来研究可以从传感器检测失效率和纵横向控制算法上进一步讨论自动驾驶对圆曲线半径的影响，本研究的结论可以为未来面向自动驾驶

技术的公路设计提供理论指导。

参考文献：

[1] JTG B01—2014，公路工程技术标准[S].

[2] JTG D20—2017，公路路线设计规范[S].

[3] 王雪松，覃定明，叶欣辰，等．面向自动驾驶的道路适驾性研究进展[J]. 中国公路学报，2024，37（1）：175-193.

[4] WANG S, YU B, MA Y, *et al*. Impacts of different driving automation levels on highway geometric design from the perspective of trucks[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 55（4）: 18-38.

[5] 黄晓明，蒋永茂，郑彬双，等．基于路表摩擦特性的无人驾驶车辆安全制动原理与方法[J]. 科学通报，2020，65（30）：3328-3340.

[6] Zhang D, Wang J. A curving ACC system with coordination control of longitudinal car-following and lateral stability[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50（7）: 1085-1102.

[7] García A, Camacho-Torregrosa F J, Baez PVP. Examining the effect of road horizontal alignment on the speed of semi-automated vehicles[J]. Accident Analysis and Prevention, 2020, 14（6）: 105-122.

[8] 周建，李雨璇，李欣，等．超高速公路设计标准研究综述与展望[J]. 公路交通科技，2024，41（7）：172-184.

[9] 何永明，裴玉龙．超高速公路发展可行性论证与必要性研究[J]. 公路，2016，61（1）：158-162.

[10] FGSV202—2008, Richtlinien für die Anlage von Autobahnen[S].

[11] ICTAAL: Instruction Sur Les Conditions Techniques d'Aménagement Des Autoroutes De Liaison[Z]. Paris: SETRA, 2000.

[12] ISO 15622—2018, Intelligent transport systems - Adaptive cruise control systems - Performance requirements and test procedures（Third Edition）[S].

[13] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). A policy on geometric design of highways and streets (7th edition)[M]. Washington DC: AASHTO, 2018.

[14] GB/T 20608—2006，智能运输系统自适应巡航控制系统性能要求与检测方法[S].

（上接第 68 页）

[28] 侯靖宇．基于熵权法的地铁运营安全模糊综合评价方法研究[J]. 隧道建设，2016，36（12）：1465-1470.

[29] 曾伟良，何兆成．交叉口信号控制模型指标权重的确定方法[J]. 公路交通科技（应用技术版），2012，8（9）：321-323.

[30] 乔根．基于熵权物元理论的山区公路路侧安全性评价研究[J]. 公路交通技术，2017，33（2）：116-119.

[31] 黄仁东，赵志飞，李盼，等．基于熵权法和可拓学理论的隧道围岩质量评价[J]. 公路工程，2012，37（1）：139-143.

[32] 戴学臻，龙怡昕，周亚男，等．基于综合权重和物元可拓模型的城市道路运行状态评价[J]. 公路交通科技，2021，38（4）：112-120.