

编号: AN006

等级: 公开

版本: 2020.4

自动驾驶&组合导航系统 定位可用性研究报告

Research Report

简介

本报告针对目前国内在自动驾驶领域对组合导航系统的定位性能要求不明确、评判方法不清楚等问题,结合相关标准和要求,给出具有实际应用价值的定位可用性指标,并提供相关计算方法,致力于促进国内自动驾驶领域的快速发展。

目 录

目 录 I

摘要 1

1 概述 2

 1.1 自动驾驶汽车 2

 1.2 组合导航系统 3

 1.3 风险评估与可用性 4

2 可用性分析 5

 2.1 基本概念 5

 2.2 道路模型和车辆模型 6

 2.3 可用性计算 8

3 总结与展望 12

 3.1 成果总结 12

 3.2 工作展望 14

4 仿真程序 15

5 参考文献 19

摘要

本文针对如何评估自动驾驶汽车所处的风险状态的问题,结合当前国内在道路、车辆方面相关的技术标准,提出了一种将组合导航系统定位结果的可用性作为指标之一的评估方法。利用本文给出的可用性指标,可以实现对自动驾驶汽车有效的车道控制;同时,也可将此可用性指标用于评价组合导航系统的综合性能,综合考量组合导航系统应用于自动驾驶汽车时,其数据的可靠程度。在文章最后总结了组合导航系统应用于自动驾驶汽车的可用性指标,提出了对后续工作的展望,并给出了 matlab 仿真源程序。

1 概述

1.1 自动驾驶汽车

自动驾驶汽车（Autonomous vehicles; Self-driving automobile）又称无人驾驶汽车、电脑驾驶汽车、或轮式移动机器人，通常依靠雷达、光学雷达、前置摄像头、轮速传感器、全球定位系统等设备完成对外界的感知，然后通过电脑将感知结果转换成适当的决策和行为，以实现持续地执行部分或全部动态驾驶任务的目的。

工信部发布的《汽车驾驶自动化分级》推荐性国家标准已于 2020 年 3 月份报批公示，拟定于 2021 年 1 月 1 日正式实施，这是我国智能网联汽车标准体系的基础类标准之一，意味着中国将正式拥有自己的自动驾驶汽车分级标准。文件基于驾驶自动化系统能够执行动态驾驶任务的程度，根据在执行动态驾驶任务中的角色分配以及有无设计运行条件限制，将驾驶自动化分成 0 至 5 级^[1]：

- ① 0 级为安全辅助，可感知环境，并提供报警、辅助或短暂介入以辅助驾驶员（如车道偏离预警、前碰撞预警、自动紧急制动等安全辅助功能）。
- ② 1 级为部分驾驶辅助，驾驶自动化系统在其设计运行条件内能够持续地执行车辆横向或纵向运动控制。
- ③ 2 级为驾驶辅助，驾驶自动化系统在其设计运行条件内能够持续地执行车辆横向和纵向运动控制。
- ④ 3 级为有条件自动驾驶，驾驶自动化系统在其设计运行条件内持续地执行全部动态驾驶任务，动态驾驶任务接管用户应以适当的方式执行动态驾驶任务接管。
- ⑤ 4 级为高度自动驾驶，驾驶自动化系统在其设计运行范围内持续地执行全部动态

驾驶任务和执行动态驾驶任务接管。

- ⑥ 5 级为完全自动驾驶，驾驶自动化系统在任何可行驶条件下持续地执行全部动态驾驶任务和执行动态驾驶任务接管。

当前，新一轮科技革命和产业变革蓬勃兴起，自动驾驶汽车已成为汽车产业发展的战略方向。发展自动驾驶汽车不仅是解决汽车社会面临的交通安全、道路拥堵、能源消耗、环境污染等问题的重要手段，更是深化供给侧结构性改革、实施创新驱动发展战略、建成现代化强国的重要支撑，对不断满足人民日益增长的美好生活需要具有十分重要的意义^[2]。建立健全自动驾驶汽车测试评价体系架构，完善测试评价技术，满足我国复杂道路环境和驾驶行为的测试需要，也随之成为当务之急。

1.2 组合导航系统

导航定位技术通常基于两类基本技术：直接定位与航位推算。

直接定位采用可识别的外部信息直接确定位置。比如采用了无线电信号的卫星定位，可以提供长时间误差只有几米（单点定位）或几厘米（RTK 定位）的高精度位置输出。还有采用了红外信号的激光测距，以及可以探测水声信号的声纳探测等，都属于直接定位方法的具体体现。

航位推算通常能够测量行程、速度（加速度）、方向（角速率）等信息，在初始的位置、速度、姿态等状态参数已知时，即可通过推算得出当前的状态参数。在现代导航设备中常见的惯性导航系统（Inertial Navigation System, INS），就是典型的航位推算导航系统，能够提供有效的角速率和加速度测量。

组合导航系统通常由两个或更多的基于不同导航技术的子系统构成，利用不同导航技术迥异的误差特性并结合其优势，通过连续工作的组合导航系统来提供连续、完整的导

航参数。常见的组合导航系统包括 GNSS/INS 组合导航系统、视觉惯性里程计 (visual inertial odometry, VIO) 等。

在自动驾驶汽车等高新技术领域, 单一的直接定位或航位推算技术, 由于其各自的缺点——直接定位的信号易被遮挡或干扰, 很难提供连续的导航结果; 航位推算使用时需要进行初始化、并且误差在推算的过程中会不断累积——已经愈发难以满足自动驾驶汽车对安全性和可靠性的需求。因此, 自动驾驶汽车通常会使用视频摄像头、雷达传感器, 以及激光测距器等设备来了解周围的交通状况, 并利用高精度的定位技术和详尽的地图 (通过有人驾驶汽车采集的地图), 对路线进行规划和导航。

1.3 风险评估与可用性

在 0 级至 2 级自动驾驶中, 监测路况并做出反应的任务都由驾驶员和系统共同完成, 并需要驾驶员接管动态驾驶任务。而在 3 级及以上的自动驾驶中, 驾驶员的角色逐渐向乘客转变, 驾驶系统则越来越多地接管驾驶任务, 并且具备自动达到最小风险状态的能力^[1]。

其中, 自动驾驶汽车所处的风险状态, 与道路、交通、天气、以及汽车自身的位置、速度、各传感器的数据质量等都存在一定关系。为了能够科学有效地评估风险状态, 我们提出以组合导航系统的定位结果可用性为评价指标之一, 以实现对自动驾驶汽车进行有效的车道控制, 也可将此可用性指标用于评价组合导航系统的综合性能, 用于综合考量组合导航系统是否可以应用于自动驾驶。

2 可用性分析

2.1 基本概念

自动驾驶系统需要时刻保持车辆行驶在车道内。以简单的直线行驶为例：

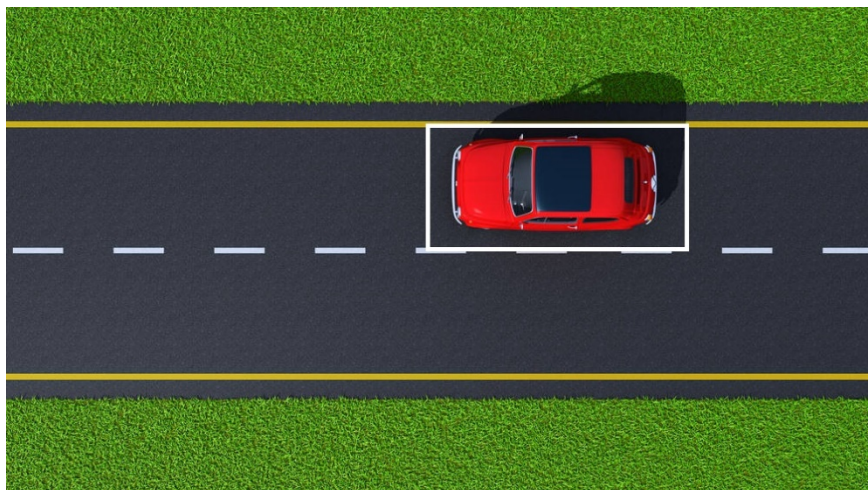


图 1 直行车辆

可以看出，为了让车辆在直行过程中能够始终保持在车道内，假设车道宽度为 W_r ，车辆宽度为 W_v ，则组合导航系统在车辆横向上的定位偏差应不大于

$$\frac{1}{2}(W_r - W_v)$$

由此，我们将组合导航系统在任意时刻，对车辆横向上的定位偏差估计值称为横向保护水平，类似地，也分别定义车辆纵向和垂向上的定位偏差估计为纵向保护水平和垂向保护水平，而在每个方向上，为了保证安全所允许的最大保护水平称为警戒限度^[3]。

定义可用性为保护水平未超过警戒限度的频率。在评估风险时，可以利用预先确定的警戒限度，对组合导航系统的定位结果进行度量。如果保护水平高于警戒限度的，则不能保证车辆行驶在车道内。如果在任何时间，每个轴向上的保护水平都小于对应的警戒限度，则称此组合导航系统的可用性为 100%。

2.2 道路模型和车辆模型

如果车辆行驶在完全平坦的、笔直的、无其他障碍物的道路上，我们甚至不需要考虑组合导航系统在纵向和垂向的警戒限度。而在实际应用中，通常会对道路的最大和最小直线长度进行限制，使得这种场景几乎不存在。同时，道路环境、交通状况、车辆大小等因素，都可以影响警戒限度的选取。如图 2 所示，道路的曲率导致了横向和纵向警戒限度的耦合，使得横向警戒限度小于 $\frac{1}{2}(W_r - W_v)$ ，而纵向警戒限度也因道路的弯曲而受限。

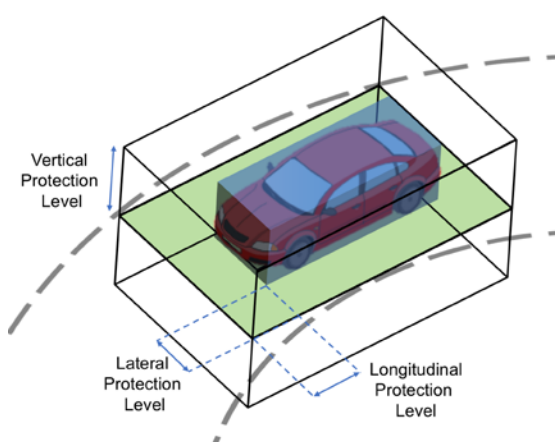


图 2 转弯行驶的车辆

因此，如果要科学地设计警戒限度，则必须要先确定道路和车辆模型。

依照《公路工程技术标准》^[4]，将道路模型分类如下：

表 1 道路模型分类

分类	车道宽度(m)	净高(m)	设计速度(km/h)	最小曲率半径*(m)
高速公路	3.75	5.00	120	650
	3.75	5.00	100	400
	3.75	5.00	80	250
一级公路	3.75	5.00	100	400

	3.75	5.00	80	250
	3.50	5.00	60	125
二级公路	3.75	5.00	80	250
	3.50	5.00	60	125
三级公路	3.50	4.50	40	60
	3.25	4.50	30	30
四级公路	3.25	4.50	30	30
	3.00	4.50	20	15

*采用最大超高 8%的道路标准（一般地区）

采用普通汽车设计车型外廓尺寸，将汽车模型分类如下：

表 2 汽车模型分类

分类	车身宽度(m)	车身长度(m)	车身高度(m)
微型车	1.6	3.5	1.8
小型车	1.8	4.8	2.0
轻型车	2.1	7.0	2.6
中型车	2.5	9.0	3.2
大型客车	2.5	12.0	3.2
铰接客车	2.5	18.0	3.2
大型货车	2.5	10.0	4.0
铰接货车	2.5	16.5	4.0

2.3 可用性计算

道路曲率导致了横向和纵向警戒限度之间的耦合，因此，如何选取横向和纵向警戒限度主要取决于道路类型与汽车模型，如图 3 所示。

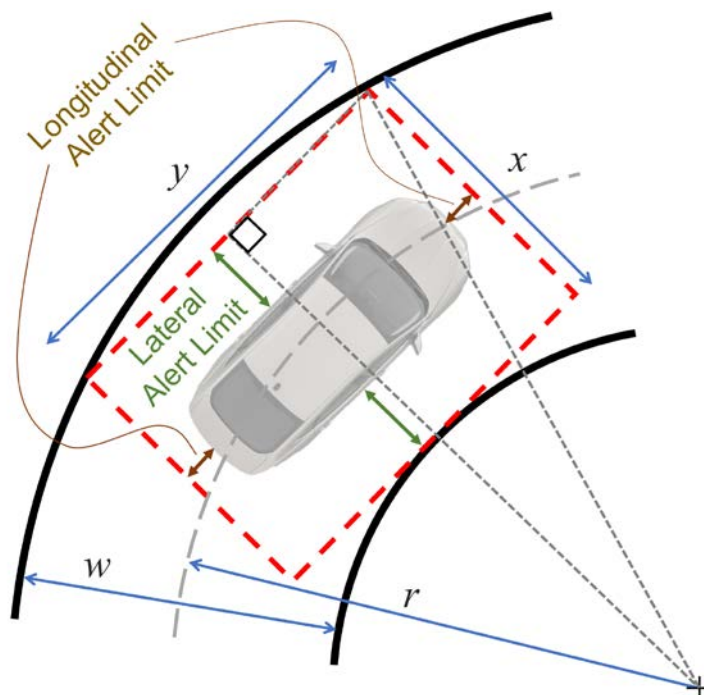


图 3 道路曲率对警戒限度的影响

设车辆宽度 W_v 、车辆长度 L_v 、道路宽度 W_r 、道路曲率半径为 r ，纵向警戒限度为 y 、横向警戒限度为 x 。利用勾股定理可得：

$$\left(y + \frac{L_v}{2}\right)^2 + \left(2x + W_v + r - \frac{W_r}{2}\right)^2 = \left(r + \frac{W_r}{2}\right)^2$$

整理得：

$$x = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\left(r + \frac{W_r}{2}\right)^2 - \left(y + \frac{L_v}{2}\right)^2} - W_v - r + \frac{W_r}{2} \right)$$

选取各车型估计的平均车身宽度、车身长度、道路宽度及每种道路宽度对应的曲率半径为参数，代入上式，并排除车辆过长无法转弯的情况，得到横向警戒限度和纵向警戒限度关系的仿真结果如图 4 所示。

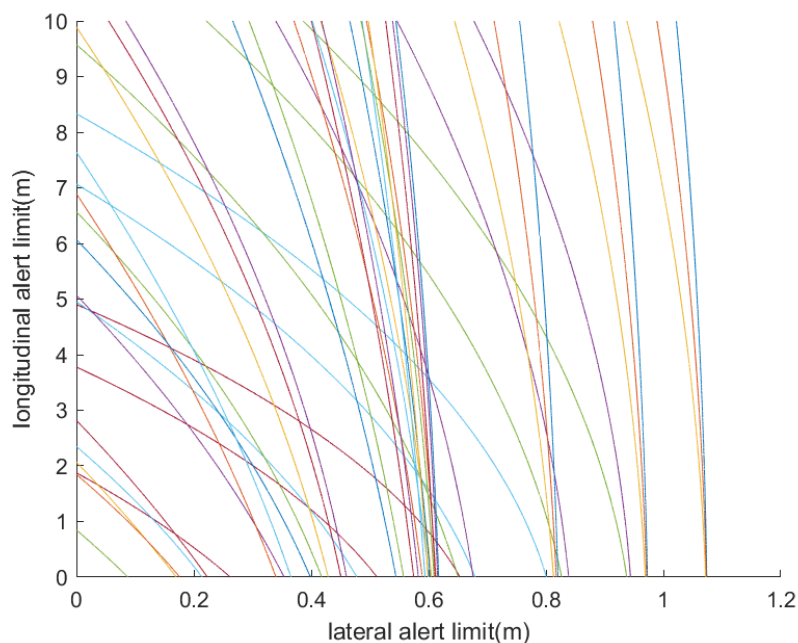


图 4 横向警戒限度和纵向警戒限度的关系

可以看出当纵向警戒限度 y 增大时，横向警戒限度 x 随之减小。实际上，当警戒限度 y 超过一定限度之后，对可用性的判断已经失去了意义，因此我们限制最大纵向警戒限度为 1m。当曲率半径不大于 30m 时，考虑到车辆在 90 度转弯时的极限情况，此时纵向警戒限度应近似等于横向警戒限度^[3]，得到横向警戒限度和纵向警戒限度关系的仿真结果如图 5 所示，并在图中标记了选取的横向警戒限度和纵向警戒限度。

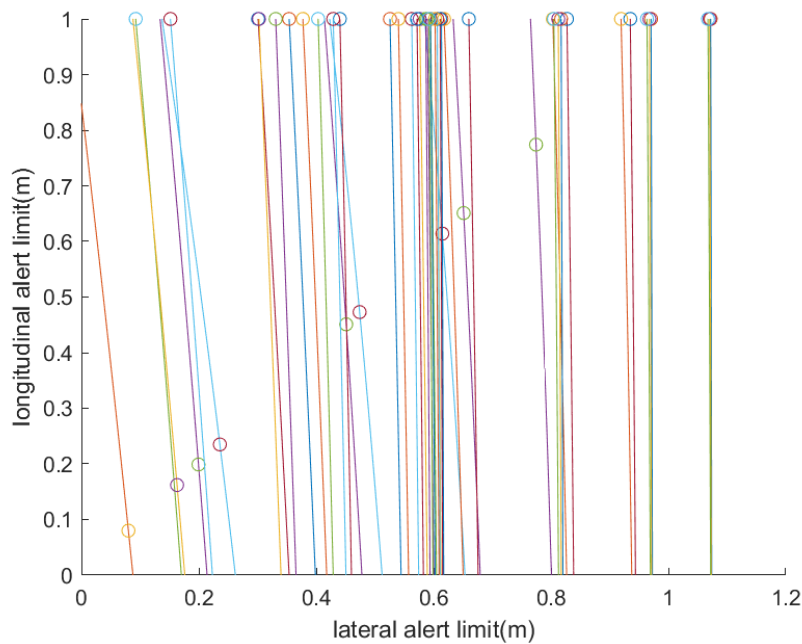


图 5 横向警戒限度和纵向警戒限度的关系 (y<1)

垂直警戒限度与车辆高度无关(即不依赖于车辆尺寸), 因为它仅用于确定车辆处于多层路面中的哪一层 (这里假设车辆拥有用于辅助计算位置的地图), 如果车辆不会行驶在上下多层的道路环境中, 如立交桥、高架桥等, 那么纵向警戒限度的意义也就不明显。在这里, 我们将垂直警戒限度设计为道路净高的三分之一^[3]。因为三分之一的道路净高足以解决车辆所处道路平面的不确定性。

表 3 各道路模型下的垂向警戒限度

道路宽度 / 曲率半径 道路净高	3.75/ 650	3.75/ 400	3.75/ 250	3.5/ 125	3.5/ 60	3.25/ 30	3 / 15
	5	1.67	1.67	1.67	1.67	\	\
4.5	\	\	\	\	1.50	1.50	1.50

* 数据单位：米

由于组合导航系统给出的车辆姿态也存在误差，因此在设计警戒限度的同时，还需要考虑姿态误差的影响。

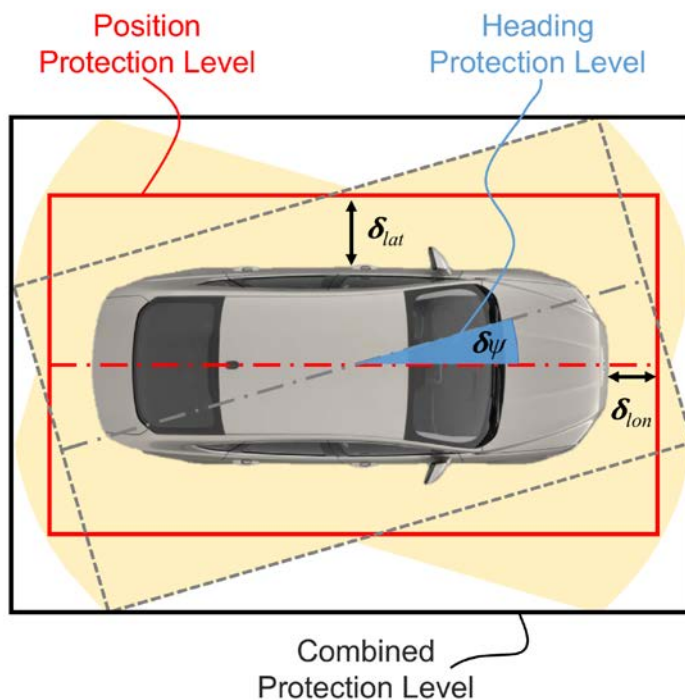


图 6 姿态误差对警戒限度的影响

设偏航角误差为 $\delta\psi$ ，俯仰角误差为 $\delta\theta$ ，滚动角误差为 $\delta\phi$ 。利用小角度近似，可得^[3]：

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left(\begin{pmatrix} 1 & \delta\psi & \delta\theta \\ \delta\psi & 1 & \delta\phi \\ \delta\theta & \delta\phi & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} W_v + 2x \\ L_v + 2y \\ 2z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} W_v \\ L_v \\ 0 \end{pmatrix} \right)$$

其中 x ， y ， z 分别为不考虑姿态误差时的横向、纵向、垂向警戒限度， x' ， y' ， z' 分别为考虑姿态误差时的横向、纵向、垂向警戒限度。由于姿态误差的存在，也导致了三个轴向上警戒限度的耦合。假设道路最小曲率半径大于 30 米时，允许的最大姿态误差为 1.5°，道路最小曲率半径小于 30 米时，允许的最大姿态误差为 0.5°^[3]，最终得到横向警戒限度和纵向警戒限度关系的仿真结果如图 7 所示，并在图中标记了选取的横向

警戒限度和纵向警戒限度。

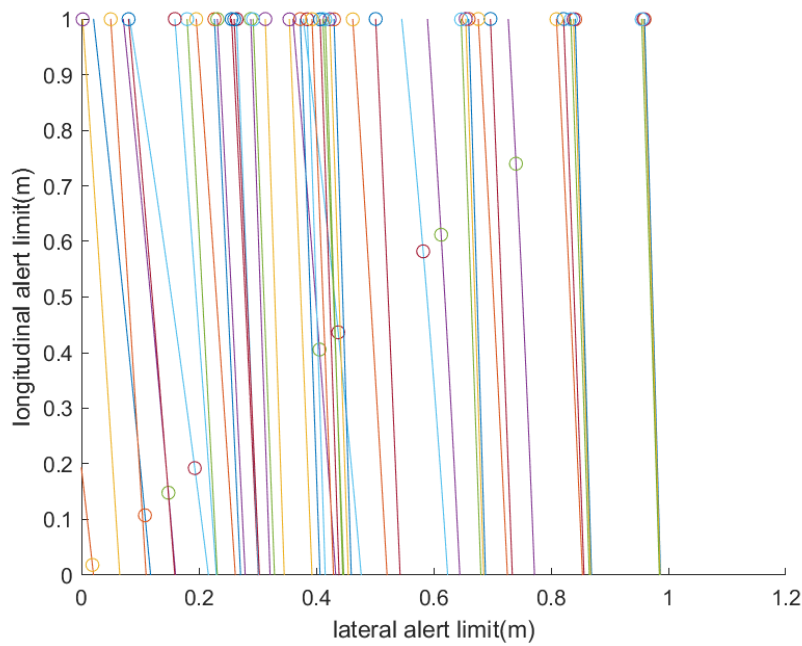


图 7 横向警戒限度和纵向警戒限度的关系（考虑姿态误差）

3 总结与展望

3.1 成果总结

本文根据国内相关技术标准，对自动驾驶领域中组合导航系统的定位可用性进行了分析和仿真，得出组合导航系统的定位结果可用性指标。在评价组合导航系统可用性时，可采用如下指标：

表 4 各汽车模型在各道路模型下的横向警戒限度

道路宽度/ 曲率半径 车型	3.75/ 650	3.75/ 400	3.75/ 250	3.5/ 125	3.5/ 60	3.25/ 30	3 / 15

微型车	0.959	0.958	0.955	0.822	0.809	0.740	0.582
小型车	0.814	0.838	0.834	0.697	0.676	0.613	0.438
轻型车	0.660	0.655	0.647	0.501	0.462	0.406	0.193
中型车	0.430	0.422	0.411	0.256	0.196	0.148	\
大型客车	0.385	0.373	0.354	0.180	0.080	0.018	\
铰接客车	0.289	0.264	0.227	0.002	\	\	\
大型货车	0.415	0.407	0.393	0.232	0.159	0.108	\
铰接货车	0.313	0.293	0.260	0.050	\	\	\

* 数据单位：米

表 5 各汽车模型在各道路模型下的纵向警戒限度

道路宽度/ 曲率半径 车型	3.75/ 650	3.75/ 400	3.75/ 250	3.5/ 125	3.5/ 60	3.25/ 30	3 / 15
微型车	1	1	1	1	1	0.740	0.582
小型车	1	1	1	1	1	0.613	0.438
轻型车	1	1	1	1	1	0.406	0.193
中型车	1	1	1	1	1	0.148	\
大型客车	1	1	1	1	1	0.018	\
铰接客车	1	1	1	1	\	\	\
大型货车	1	1	1	1	1	0.108	\

铰接货车	1	1	1	1	\	\	\
------	---	---	---	---	---	---	---

* 数据单位：米

表 6 各道路模型下的垂向警戒限度

道路宽度 / 曲率半径 道路净高	3.75/ 650	3.75/ 400	3.75/ 250	3.5/ 125	3.5/ 60	3.25/ 30	3 / 15
5	1.67	1.67	1.67	1.67	\	\	\
4.5	\	\	\	\	1.50	1.50	1.50

3.2 工作展望

本文对道路模型、汽车模型进行了较为一般化的概括，没有进一步考虑其他因素造成的道路模型和汽车模型的特殊性，因此，至少存在以下问题值得开展进一步研究：

- 1) 雨雪天气对最小曲率半径、路面宽度的影响；
- 2) 道路合并、交叉等对可用性指标的影响；
- 3) 复杂交通环境对可用性指标的影响；
- 4) 其他道路（如非机动车道、应急车道等）的可用性指标要求；
- 5) 特殊车辆（大型卡车、加长汽车等）的可用性指标要求

4 仿真程序

```
%-----  
  
%   Script for availability calculating v1.0  
  
%  
  
%   Copyright (C) bynav  
  
%-----  
  
%% Road model  
  
%           Road width  Radius of curvature  Clear height  
  
road = [ 3.75,          650,          5;  
         3.75,          400,          5;  
         3.75,          250,          5;  
         3.5,           125,          5;  
         3.5,           60,           4.5;  
         3.25,          30,           4.5;  
         3,             15,           4.5];  
  
%% Vehicle model  
  
%           Width  Length  
  
vehicle = [ 1.6,    3.5;  
           1.8,    4.8;
```

```
2.1, 7;

2.5, 9;

2.5, 12;

2.5, 18;

2.5, 10;

2.5, 16.5];

%% Calculate

result = [];

fig = figure;

hold on

for i = 1:size(vehicle,1)

    W_v = vehicle(i,1);

    L_v = vehicle(i,2);

    for j = 1:size(road,1)

        W_r = road(j,1);

        radius = road(j,2);

        vert_alert_limit = road(j,3)/3;

        % Original alert limit

        lon_alert_limit = 0:0.001:10;

        lat_alert_limit = 0.5*(sqrt((radius+W_r/2)^2-...

            (lon_alert_limit+L_v/2).^2)-W_v-radius+W_r/2);
```

```
vert_alert_limit = ones(1,size(lon_alert_limit,2))*vert_alert_limit;

% Add attitude error

if radius<=30

    att_err = deg2rad(0.5);

else

    att_err = deg2rad(1.5);

end

att_matrix = [ 1,att_err,att_err;

               att_err,1,att_err;

               att_err,att_err,1];

% New alert limit with attitude error

alert_limit_att = (att_matrix\[W_v+2*lat_alert_limit;...

    L_v+2*lon_alert_limit;2*vert_alert_limit]-[W_v;L_v;0])/2;

lat_alert_limit = alert_limit_att(1,:);

lon_alert_limit = alert_limit_att(2,:);

vert_alert_limit = alert_limit_att(3,:);

% Exclude unable to make a turn

if all(lat_alert_limit<0)

    continue

end

% Plot variation curve
```

```
plot(lat_alert_limit,lon_alert_limit);

% Plot selected dot

if radius<=30

    index = find(abs(lon_alert_limit-lat_alert_limit)<0.001,1);

else

    index = find(abs(lon_alert_limit-1)<0.001,1);

end

x_sel = lat_alert_limit(index);

y_sel = lon_alert_limit(index);

z_sel = vert_alert_limit(index);

plot(x_sel,y_sel,'o');

% Record result

result = [result;i,L_v,W_v,j,W_r,radius,x_sel,y_sel,z_sel];

end

end

axis([0 1.2 0 1])

xlabel('lateral alert limit(m)')

ylabel('longitudinal alert limit(m)')

hold off

saveas(fig, 'result.png');
```

5 参考文献

- [1] GB/T 汽车驾驶自动化分级（征求意见稿）[S].
- [2] 智能汽车创新发展战略（征求意见稿）[S].
- [3] T. G. Reid, S. E. Houts, R. Cammarata, G. Mills, S. Agarwal, A. Vora, G. Pandey. Localization requirements for autonomous vehicles[J]. SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles, 2019.9(2).
- [4] JTG B01-2014 公路工程技术标准[S].

免责声明

本手册提供有关北云科技（湖南）股份有限公司（以下简称北云科技）产品的信息。手册并未以暗示、默许等任何形式转让本公司或任何第三方的专利、版权、商标、所有权等其下的任何权利或许可。除在产品的销售条款和协议中声明的责任之外，本公司概不承担其它任何责任。同时，北云科技对其产品的销售和使用不作任何明示或暗示的担保，包括但不限于对产品特定用途的适用性、适销性或对版权、著作权、专利权等知识产权的侵权责任等，均不作担保。对于不按手册要求连接或操作而产生的问题，本公司免责。必要时北云科技可能会对产品规格及产品描述进行修改，恕不另行通知。

对于本公司产品可能存在的某些设计缺陷或不妥之处，一经发现将改进而发生产品版本迭代，并因此可能导致产品与已出版的规格有所差异。如客户需要，可提供最新的产品规格。

版权所有 © 2013-2020，北云科技（湖南）股份有限公司，保留所有权利。

**bynav北云**

北云科技（湖南）股份有限公司

BYNAV TECHNOLOGY (HUNAN) CO.,LTD.

www.bynav.com

长沙市高新区中电软件园 12 栋

Tel: +86-731-85058117

mail: sales@bynav.com