考虑负载状态的商用车AEB公路测试场景研究*

乔洁[1] 康志刚[1] 赵昱博[1] 王鹏[2]

（1.长安大学，西安 710064；2.中国汽车技术研究中心有限公司，天津 300300）

【摘要】在公路行驶场景中，为准确评估自动紧急制动（AEB）系统在不同负载条件下对于介入时机的决策精准性，基于中国交通事故深度调查（CIDAS）数据库筛选255起商用车公路追尾碰撞案例，采用层次聚类算法提取典型场景。聚类变量涵盖交通环境（天气、道路、光照、附着条件）、本车类型、事故前状态及碰撞特征（负载状态、运动状态、碰撞部位、初始速度经离散化处理为低、中、高、极高4个速度区间）、目标车类型及运动状态。聚类后获得4类高代表性测试场景，创新性地将负载状态作为关键聚类变量纳入事故数据结构分析，并结合车辆动力学原理讨论负载对制动距离与AEB响应阈值的影响，使得提取的典型场景能够同时反映事故数据中的统计规律与商用车制动特性的实际规律，弥补了现有研究对负载因素考量不足的缺陷。所构建场景满足UN R131法规要求，并进一步扩展至超法规车速和偏置重叠工况，显著增强了对中国公路复杂交通环境的适应性，为商用车AEB开发、性能优化及标准制修订提供了科学依据。

主题词：商用车 自动紧急制动 公路追尾场景 事故数据驱动 CIDAS数据

中图分类号：U461.91 **文献标志码：**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20250836

Research on Highway Testing Scenarios for Commercial Vehicle AEB Considering Load Conditions

Qiao Jie[1], Kang Zhigang[1], Zhao Yubo[1], Wang Peng[2]

（1. Chang an University, Xi'an 710064; 2. China Automotive Technology & Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300）

【Abstract】To accurately evaluate the decision precision of Automatic Emergency Braking (AEB) system intervention timing under varying load conditions in highway scenarios, this study screens 255 commercial vehicle rear-end collision cases from the China In-Depth Accident Study (CIDAS) database and extracts typical scenarios using hierarchical clustering. The clustering variables encompass traffic environment (weather, road type, lighting, and adhesion conditions), subject vehicle type, pre-crash status, and collision characteristics (load state, motion state, impact location, and initial speed discretized into 4 intervals: low, medium, high, and extremely high), as well as target vehicle type and motion state. 4 highly representative test scenarios are obtained, in which the load state is innovatively incorporated as a key clustering variable into the accident data structure analysis. Combined with vehicle dynamics principles, the influence of load on braking distance and AEB response threshold is discussed, enabling the extracted scenarios to simultaneously reflect statistical patterns in accident data and practical braking characteristics of commercial vehicles, thereby addressing the deficiency of existing studies in considering load factors. The constructed scenarios satisfy the requirements of UN R131 regulation and are further extended to beyond-regulation speeds and offset-overlap conditions, significantly enhancing adaptability to the complex traffic environment on Chinese highways. This paper provides a scientific basis for commercial vehicle AEB development, performance optimization, and standard formulation and revision.

Key words: Commercial-vehicle, Automatic Emergency Braking (AEB), Highway rear-end scenarios, Accident-data-driven, CIDAS data

【引用格式】乔洁, 康志刚, 赵昱博, 等. 考虑负载状态的商用车AEB公路测试场景研究[J]. 汽车技术, 2026(7): 45-54.

QIAO J, KANG Z G, ZHAO Y B, et al. Research on Highway Testing Scenarios for Commercial Vehicle AEB Considering Load Conditions[J]. Automobile Technology, 2026(7): 45-54.

*基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFB2501202）；咸阳市重大科技创新专项（L2025-ZDKJ-ZDGG-RGZN-003）；咸阳市渭城区科技发展计划项目（2025VCCN-03）。

通信作者：王鹏（1988—），高级工程师，主要研究方向为道路交通事故调查与防控，wangpeng2015@catarc.ac.cn。

1 前言

道路交通事故频发是全球共性的公共安全难题。从国内商用车运行特征来看，公路追尾类碰撞事故占比突出，核心诱因在于商用车整备质量大、有效制动距离更长，公路通行环境下车辆普遍保持较高行驶速度，进一步增加了追尾碰撞风险。自动紧急制动（Automatic Emergency Braking，AEB）系统作为先进驾驶辅助系统的核心技术之一，能够实时感知前方障碍物并自动触发制动，显著降低追尾风险。然而，现有的AEB测试场景主要基于乘用车或一般道路环境构建，未能充分纳入商用车在公路运行的关键特征，在一定程度上制约了测试场景对商用车实际公路运行工况的代表性与覆盖度[1]。因此，构建适应中国公路交通特征的商用车AEB测试场景，已成为提升车辆AEB技术效能的迫切需求。

现有研究多采用聚类分析方法，从事故数据中提取典型场景，例如基于中国交通事故深度调查（China In-Depth Accident Study，CIDAS）数据库的路口碰撞或两轮车事故场景构建[2-3]，但此类工作聚焦乘用车或城市环境，鲜有针对商用车公路追尾碰撞的专项探讨。刘永涛等[4]基于CIDAS数据库中183起高速公路事故案例，采用K均值聚类方法提取5类典型场景，并据此设计了乘用车AEB高速公路测试场景。张恒嘉等[5]围绕ECE R131法规开展了商用车AEB性能试验，重点分析了载荷与路面附着系数对制动效果的影响，但未采用聚类方法提取商用车AEB测试场景。Sander等[6]采用K-medoids聚类方法从德国GIDAS数据库的交叉口事故数据中提取出直线交叉路径碰撞和左转对向路径碰撞工况的测试场景。Cicchino等[7]分析美国事故数据发现，AEB系统可显著减少涉及乘用车与商用车的后端碰撞，尤其对低速追尾工况的风险降低效果最为明显。现有研究在聚类变量时，仅包含交通环境要素（如天气、光照条件、附着条件）和参与方动态要素（如车辆速度、运动状态），未充分考虑商用车的负载状态，易导致制动动力学特性的物理建模失效。

由于动能与质量呈线性正相关，满载工况下的制动距离显著大于空载工况的制动距离。若聚类算法缺乏对此物理约束的考量，提取的典型场景将无法复现高动能条件下的制动热衰退与动力学响应滞后现象，导致AEB系统在实际道路中面临安全冗余不足的风险，严重削弱了测试场景对极端工况下系统鲁棒性的验证能力[8]。

针对负载状态的商用车AEB公路测试场景，本文采用层次聚类算法处理CIDAS数据库中商用车公路追尾碰撞数据，选取交通环境要素（天气、道路环境、光照条件、附着条件）、本车要素（车辆类型、运动状态、初始速度、负载情况）和目标车要素（车辆类型、运动状态），并限定本车碰撞部位为前方。本文首次针对商用车公路场景融入负载变量，构建商用车AEB公路场景体系，并拓展4类典型场景，将本车初始速度离散化为0~30 km/h、30~60 km/h、60~90 km/h、90~120 km/h区间，附着系数分为0.44~0.55、0.55~0.7、0.7~0.8区间，从而减少噪声干扰，使算法能识别不同速度与附着系数组合下的事故模式，进而提升聚类结果的精度与最终场景的代表性。

2 公路商用车追尾典型事故场景提取

2.1 数据集构建

本文基于CIDAS数据库制定系统化的6阶段筛选准则，逐级剔除无关及干扰案例：

a. 道路类型限定为高速公路、省级公路和县级公路。

b. 本车严格限定为N2类或N3类商用车（中型/重型载货汽车、牵引车和挂车列车）。

c. 目标物体限定为N类车辆，剔除行人、两轮/三轮车、动物及固定物等非车辆目标。

d. 碰撞形态限定为本车正前方（钟表法10~2点钟方向）首次纯追尾。

e. 事故链限定为一对一碰撞，排除多车连环相撞及严重衍生后果（如侧翻、起火）。

f. 关键变量完整性要求严格，剔除本车速度、负载状态、附着系数、光照条件、天气等核心字段缺失率>20%的样本。

经过严格筛选后，共获得255起（2011~2023年）有效商用车公路追尾碰撞事故样本，并将其道路类型、速度区间和负载分布特征与全国官方统计趋势进行对比。其中，高速公路样本占比为47.8%，与《2020年度基于大数据的中国公路货运行业运行分析报告》中货车高速公路行驶里程占比47%高度吻合[9]；60~90 km/h区间占比为56.5%，匹配全国干线货车主流运营速度（高速公路平均70.6 km/h）[10]；负载状态覆盖空载、部分装载、满载三类，与行业研究报道的空载追尾事故占比（35%~45%）一致[11]。CIDAS数据库采用全国31个省份分层随机抽样规则，进一步保障了样本的

代表性。

事故数据中部分商用车行驶速度超过国家法规规定的限速值（常为80~100 km/h），这些样本虽存在违法超速行为，但仍被保留在数据集中。原因在于，本研究基于真实事故场景构建测试体系，而真实世界碰撞事件本身即包含驾驶员违法、超速等风险行为。若直接剔除此类“极端但真实”的样本，将导致聚类无法捕捉到高风险高速追尾事故的统计特征，从而削弱场景体系对实际道路的覆盖性和代表性。

本文采用层次聚类方法从事故数据中识别具有内在一致性的场景类别，旨在揭示变量间的结构化关联模式，而非对总体分布进行参数化推断。真实事故数据具有长尾分布特征，部分变量取值（如雨天、雾天）虽频次较低，但在风险演化链条中常会构成关键触发情境。因此，本文以数据内在结构为主要依据，构建典型测试场景，兼顾变量间的物理关联与工程可解释性，确保所提取的场景在反映事故数据的客观模式的同时，具备实际风险评估与测试验证价值。

2.2 场景关键要素遴选与变量定义

AEB系统测试场景变量的选取须严格遵循感知–决策–执行工作原理与实际触发条件，确保所选变量能够充分表征传感器探测效能、碰撞时间（Time to Collision，TTC）计算逻辑、制动介入阈值以及车辆动力学响应特性[12]。

由于商用车公路运行环境具有高速、重载以及行人/两轮车干扰极低等特性，结合文献[12]对商用车AEB测试场景要素体系进行分类，如图1所示。

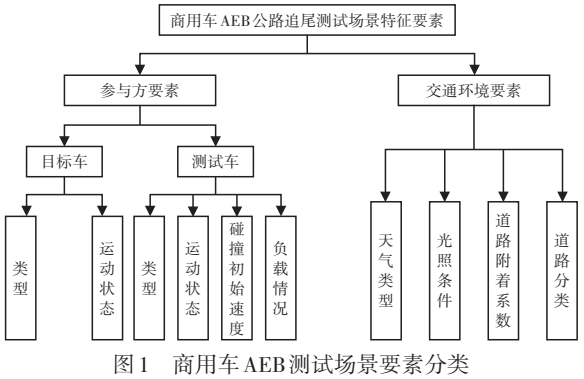


图1 商用车AEB测试场景要素分类

基于CIDAS事故数据库，通过筛选事故描述字段、构建聚类变量，确立一套商用车AEB测试场景的要素体系：在交通环境方面，选取天气、道路分类、光照条件与路面附着系数4个参数，基于道路线形分布特征，剔除非平直路段强化场景典型性；在事故参与方方面，限定本车为商用车，目标类型为车辆，不考虑行人参与，并聚焦于首次碰撞场景；测试车方面重点考察车辆类型、运动状态、碰撞初速度与负载情况，目标车则关注其车辆类型及运动状态，同时，将本车碰撞部位限定为前方区域以界定主要分析场景，碰撞初速度与路面附着系数一同纳入要素体系。

为进一步量化分析，本车速度离散化为0~30 km/h、30~60 km/h、60~90 km/h和90~120 km/h区间，并剔除超过120 km/h的异常数据，将路面附着系数划分为0.44~0.55、0.55~0.7和0.7~0.8区间。鉴于商用车载重影响制动性能，故将本车负载作为关键变量引入测试场景构建。

2.3 事故场景聚类方法

采用层次聚类法对商用车追尾场景进行提取，可有效避免分析人员主观分类的偏差，保证分析过程具有良好的可重复性。层次聚类首先将每个样本视作一个初始类簇，随后迭代计算类间距离，合并距离最近的两个类簇，此过程循环进行至所有样本聚为一类[13]。

2.3.1 变量编码与预处理

聚类分析时需将所有变量转换为数值形式，所涉变量包括名义尺度变量（车辆类型、运动状态、负载状态、光照条件、天气、道路分类）与连续变量（初始速度、附着系数）。若名义尺度变量采用序数编码，可能引入虚假序关系并造成距离计算偏差。为缓解连续变量因量纲差异或分布集中对聚类结果产生过度影响，本文统一采用独热编码，将所有变量转换为二值向量形式。

针对初始速度、附着系数等连续变量，原始值分布集中、区分度有限且易受噪声干扰，直接聚类分析会影响场景提取的稳定性。为此，本文采用监督式等频分箱方法，对聚类结果中的连续变量进行离散化处理。在等频划分基础上，引入事故样本数与伤亡程度作为监督信息，在保留变量物理意义和数据分布特征的同时，实现更具解释性的区间划分[14]。本车初始速度和附着系数离散结果如表1~表2所示。

由表1和表2可知，经该方法处理后的变量不仅增强了聚类的鲁棒性，也提升了最终场景参数的可解释性。

表1 本车初始速度离散化统计

速度区间/km·h^{-1}	频数/个	频率/%	数据分布特征
[0,30)	17	6.7	低速行驶
[30,60)	61	23.9	中低速行驶
[60,90)	144	56.5	核心分布区间
[90,120)	33	12.9	高速行驶

表2　本车附着系数离散化统计

附着系数区间	频数/个	频率/%	路面条件与物理意义
[0.4,0.55)	47	18.4	湿滑/结冰路面，性能差、易侧滑
[0.55,0.7)	64	25.1	潮湿/老旧路面，干湿过渡状态
[0.7,0.8]	144	56.5	干燥良好路面，最常见工况

2.3.2　样本间距计算

由于变量经独热编码转换为二值特征向量，可使用汉明距离表征样本间相似性，相关公式为：

$$d(x,y)=\sum_{i=1}^{p} I(x_i \neq y_i) \tag{1}$$

$$I(x_i \neq y_i)=\begin{cases}1, & x_i \neq y_i\\ 0, & x_i = y_i\end{cases} \tag{2}$$

式中：p为编码后特征总数，x_i、y_i分别为样本x和y第i个特征的取值，$I()$为指示函数。

在层次聚类过程中，类间距离采用类平均法，类别间距离定义为所有样本间距离的平均值：

$$D_{KL}^2=\frac{1}{KL}\sum_{i\in G_K}\sum_{i\in G_L} d_{KL}^2 \tag{3}$$

式中：D_{KL}为类G_K与类G_L间的类距离，K、L分别为G_K和G_L的样本数量，d_{ij}为类G_K中第i个样本与类G_L中第j个样本间的汉明距离。

独热编码后的事故样本采用汉明距离度量单样本差异，聚类时选用类平均法计算类间距离。使用类平均法对各类全部样本对的距离求取均值，弱化因类别间样本数量悬殊产生的计算偏差，该方法在事故样本数量不均衡的场景下具备聚类稳定性。

2.3.3　组内归一化

由于聚类变量均以独热编码表示，不同概念性变量组（天气、负载、光照、速度区间等）在编码后产生的独热列数不一致，各变量组经独热编码后的二进制位数与变量自身类别数量相等，类别划分更细致的变量组会拥有更多特征维度，在距离求和过程中占据主导权重，这会弱化负载这类类别数量少，但具备重要工程意义变量的区分能力，使其对样本差异的贡献被大幅掩盖。

为消除隐式加权偏差，本文对独热编码后的特征按变量组进行归一化处理。假设变量组g由p_g个独热列构成，变量组的归一化权重为$w_g=\frac{1}{p_g}$，若两样本在该变量分组上的属性取值完全不重合，归一化后该分组可产生的最大距离贡献为：

$$d_g^{\max}=\sum_{i=1}^{p_g} w_g = 1 \tag{4}$$

组内归一化能够确保各变量组在总体汉明距离中具有相同的最大贡献度，使不同组的影响保持一致，不会因类别数量不同而产生不合理的放大或削弱效果。

组内归一化使聚类分析能够反映变量的重要性，使负载状态、路面附着系数等关键变量的区分能力得以保留。同时，该处理与汉明距离天然兼容，不改变类别间的原始匹配关系，也不会引入额外噪声。基于归一化后的特征矩阵，本文采用汉明距离结合类平均法进行层次聚类，提高聚类结果的稳定性与工程解释性。组内归一化后部分变量组的转换效果如表3所示。

表3　组内归一化独热编码表

变量组	原始类别	归一化前独热编码	权重	归一化后独热编码
负载状态	空载	[1, 0, 0]	1/3≈0.333	[0.333, 0, 0]
	部分装载	[0, 1, 0]	1/3≈0.333	[0, 0.333, 0]
	满载	[0, 0, 1]	1/3≈0.333	[0, 0, 0.333]
天气	晴	[1, 0, 0, 0]	1/4=0.25	[0.25, 0, 0, 0]
	阴	[0, 1, 0, 0]	1/4=0.25	[0, 0.25, 0, 0]
	雨	[0, 0, 1, 0]	1/4=0.25	[0, 0, 0.25, 0]
	雾	[0, 0, 0, 1]	1/4=0.25	[0, 0, 0, 0.25]

2.3.4　聚类效果评估

基于轮廓系数评估聚类效果如图2所示，当$k=4$时，轮廓系数达到最高值，聚类效果最好，说明在该聚类数量下，簇内样本的相似度最高，簇间样本的相似度最低，从而达到最佳聚类效果。当$k>4$时，轮廓系数开始下降，表明增加聚类数量无法进一步提高聚类效果，可能存在过度分割，导致聚类质量降低。

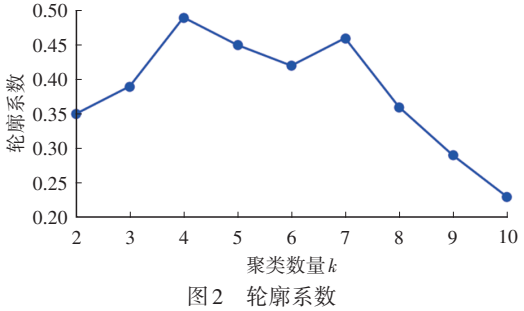


图2　轮廓系数

2.4　聚类结果提取

基于层次聚类算法对255起商用车公路追尾事故样本进行处理，获得4个典型类别，每个类别代表一种独特的风险工况模式。鉴于基于典型危险事故特征构建的测试场景能够有效复现自动驾驶高风险工况[15]，本文考虑从真实事故数据中识别结构化风险模式，并统计各变量在类别内的频数分布，结果如表4所示。

表4　聚类结果统计

类别	参数	样本特征数量/个			
		第1类	第2类	第3类	第4类
本车类型	中型货车	14	0	62	48
	重型货车	40	67	2	22
本车初速度	0~30 km/h	5	12	6	6
	30~60 km/h	46	4	8	7
	60~90 km/h	0	47	34	28
	90~120 km/h	3	4	16	29
本车负载情况	空载	13	32	16	48
	部分装载	8	18	26	11
	满载	33	17	22	11
本车碰撞部位	前部中间	34	40	24	58
	前部右前侧	15	23	32	6
	前部左前侧	5	4	8	6
本车运动状态	直线向前	51	62	60	57
	向左变道	2	2	0	4
	向右变道	1	3	4	9
目标车运动状态	直线向前	14	25	29	33
	减速	11	27	11	24
	静止	29	15	24	12
目标车辆类型	重型货车	38	6	3	64
	中型货车	13	33	45	0
	乘用车	3	28	16	6
道路分类	高速公路	5	24	31	60
	省级公路	20	32	26	5
	县级公路	29	11	7	5
天气	晴	17	56	42	47
	阴	6	9	21	13
	雨	25	1	0	3
	雾	6	1	1	7
道路附着系数	[0.4,0.55)	22	10	5	16
	[0.55,0.7)	13	17	8	8
	[0.7,0.8]	18	40	51	46
光照条件	白天	21	33	38	30
	夜晚	27	28	19	34
	黄昏/黎明	6	6	7	6

由表4可知，在不同聚类类别下，事故变量的组合特征存在显著差异。以第4类事故样本为例，该类别内空载车辆、高速区间、高速公路场景样本占比明显偏高，形成具有区分度的特征组合。但聚类算法仅能挖掘样本特征间的统计共现规律，无法直接推导变量间的因果关系，上述高频共现特征仅代表该工况组合在追尾事故中具备统计学聚集特征，不能直接判定某一变量为事故直接诱因。

2.5　聚类结果数据分析

车辆负载增加会延长制动距离，在低附着系数路面条件下，可能导致AEB系统的响应阈值降低[16]。这一现象在商用车辆中尤为突出，车辆承载大量负载，制动距离将进一步增加。因此，本文创新性地将车辆负载状态纳入聚类维度，包括空载、部分负载和满载，避免传统场景分析的单一性局限。

4种聚类场景涵盖了空载、部分负载以及满载的3种典型工况，负载情况如图3所示。其中，簇2和簇4中占比最高的特征均为空载工况，簇1和簇4占比最高的特征分别为满载和部分装载。

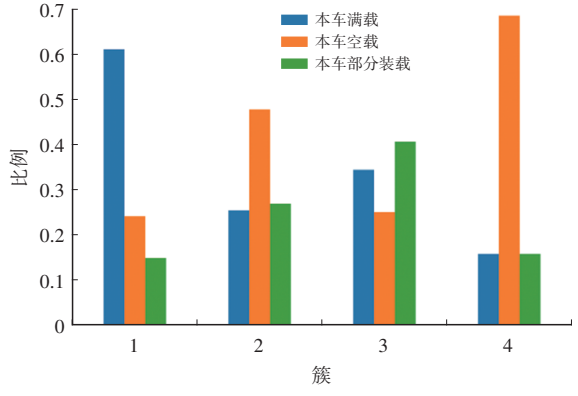


图3　4种聚类场景的负载情况

4种聚类场景的运动碰撞部位情况如图4所示：本车运动状态多为“直线向前”，在所有类别中强度较高（0.7~0.95），体现出直线碰撞的普遍性；本车碰撞部位以“前部中间”为主，尤其在第1类、第2类和第4类场景中强度均超过0.5，说明中心碰撞具有代表性，而“前部右前侧”仅在第3类表现突出（强度0.5），从而捕捉到偏移场景这一创新点[17]。同时，目标车的运动状态呈现多样性，“静止”在第1类强度最高，“减速”在第2类较为明显，“直线向前”在第3类和第4类中特征鲜明，这与事故数据聚类结果一致，有助于推动测试场景从静态向动态的转型。

如图5所示：第1类轮廓在低速（30~60 km/h）和低附着（0.4~0.55）轴上延伸显著，反映雨天满载追尾静止目标场景的典型低附着挑战；第2类均衡分布于中速和高附着轴，体现空载减速情境的过渡稳定性；第3类在中等速度和偏移相关轴上扩展，捕捉部分装载高速公路偏移碰撞的动态异质性；第4类主要聚焦于高速轴，强调空载夜晚恒速追尾的高风险模式。空载货车在夜间以恒速追尾，容易因制动距离长、驾驶员疲劳、视线差等原因导致严重事故[18]。

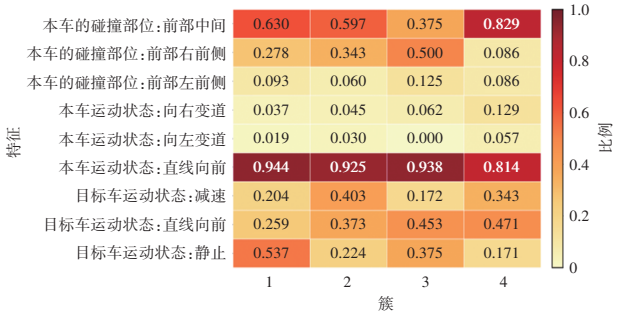


图4　4种聚类场景的运动碰撞部位情况

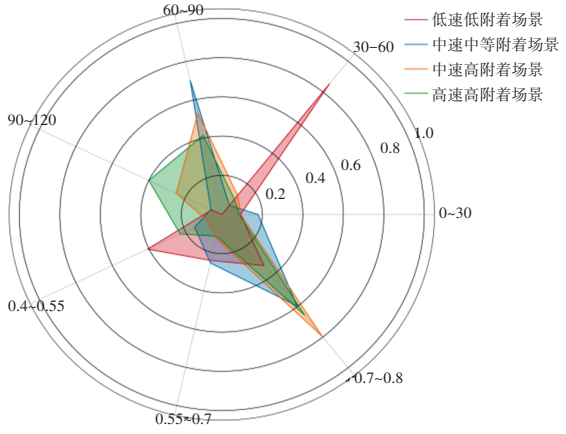


图5　4种聚类场景的附着系数与速度情况

在AEB测试框架中，天气和光照条件直接影响传感器性能和系统鲁棒性[19]。在雨天或雾天中，路面附着系数低至0.4~0.55，这会导致制动距离线性延长，从而引发碰撞。4种聚类场景的天气及光照条件如图6所示，第1类以雨天、夜间工况为核心，集中体现低能见度高风险工况，与NHTSA危险场景测试要求匹配。第1类、第4类场景涵盖更多雨雾低能见度样本，第2类、第3类场景高度集中于晴天、日间。

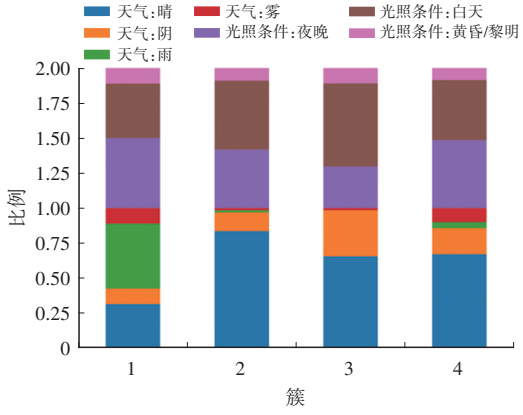


图6　4种聚类场景的天气及光照条件

2.6　事故严重度统计与风险优先级分析

为量化4种典型聚类场景的工程风险优先级，本文基于CIDAS数据库的人员数据中“人员受伤情况”字段（死亡、严重受伤、轻微受伤），开展严重程度关联分析，各聚类场景事故统计结果如表5所示。

表5　各聚类场景事故严重度统计

类别	样本数/个	致死率/%	受伤率/%
第1类	54	24.1	74.1
第2类	67	11.9	53.7
第3类	64	17.2	65.6
第4类	70	26.4	80.0

由表5可知：第4类场景致死率最高（26.4%）、受伤率亦最高（80%），主要因高速公路夜间车辆高速行驶（90~120 km/h），碰撞动能巨大、可见度低且驾驶员疲劳风险叠加；第1类场景致死率次之（24.1%），雨天低附着系数（0.4~0.55）、夜间满载静止目标导致制动距离显著延长与冲击力增大，符合低附着系数路面下重载商用车事故伤亡加剧的全国趋势；第2类（省道晴天高附着减速追尾）和第3类（白天高速公路偏置碰撞）的风险相对较低，分别对应附着条件与良好光照下的动态场景。

通过风险优先级分析，建议商用车AEB公路测试应优先覆盖第4类（高速夜间追尾）和第1类（低附着雨天满载静止）高致死率工况，以强化系统在极端动能、感知劣化及制动不稳定条件下的鲁棒性。

3　测试场景分析

聚类分析能够挖掘事故样本中高频高风险工况组合，为AEB测试场景构建提供数据支撑，但仅能识别特征共现规律，无法解释事故内在物理致因，可结合车辆动力学机理对各聚类场景进行逐类解析。载荷改变轴荷分配影响制动性能，空载易造成制动防抱死系统（Anti-lock Brake System，ABS）频繁介入，部分装载会偏移整车质心，路面附着系数直接约束制动极限与AEB系统触发阈值。本文聚类的风险组合均源自真实事故数据，即使在雨、雾等低频工况下，只要真实事故中存在便具备测试场景搭建价值，该思路与Euro NCAP、NHTSA事故驱动场景开发原则一致。

在此基础上，依据ECE-R131与SAE J3029等相关法规和标准[20-21]，将聚类结果映射为可直接用于商用车AEB系统验证的测试场景，聚类生成的4种场景如表6所示。

由表6可知，第1类场景与UN R131和Euro NCAP中车对静止目标要求测试车在10~80 km/h范围内接近静止目标近似。该场景模拟了低附着系数道路的夜间行驶，满载重型货车以中速接近静止目标车。不同于标准法规（如UN R131）的单一静止目标测试要求，该工况结合满载制动距离延长与低附着系数路面滑移风险，验证了AEB系统的自适应制动控制和抗干扰能力。

表6　聚类生成的4种典型追尾事故场景

场景要素	第1类	第2类	第3类	第4类
本车类型	重型货车	重型货车	中型货车	中型货车
本车初速度/km·h^{-1}	30~60	60~90	60~90	90~120
本车负载情况	满载	空载	部分装载	空载
本车碰撞部位	前部中间	前部中间	前部右前	前部中间
本车运动状态	直线向前	直线向前	直线向前	直线向前
目标车运动状态	静止	减速	直线向前	直线向前
目标车辆类型	重型货车	中型货车	中型货车	重型货车
道路分类	县级公路	省级公路	高速公路	高速公路
天气	雨	晴	晴	晴
道路附着系数	0.4~0.55	0.7~0.8	0.7~0.8	0.7~0.8
光照条件	夜晚	白天	白天	夜晚

第2类场景对应前方中型货车紧急减速导致的追尾工况，空载货车的轴荷分布失衡，制动时后轮易抱死引发车身侧滑，前车急减速也是商用车追尾的典型危险场景。虽然UN R131等商用车AEB法规设置了移动目标减速测试，但未覆盖空载与60~90 km/h的高速组合，该场景可用于验证AEB系统针对不同载荷状态的制动调节能力；同时，由于省级公路整体路面附着系数偏高，高速行驶工况对AEB测距精度与系统响应时间提出了更高要求。

第3类场景描述本车和目标车都在中高速直行，碰撞点在前部右前侧，说明本车可能在变道，或者目标车在侧前方。鉴于部分装载会改变车辆质心分布与制动稳定性，AEB控制算法面临挑战。商用车AEB测试法规重点关注高速公路场景，而本文场景新增部分装载与右前侧偏置碰撞条件，可检验AEB系统对侧向目标的检测与避障能力。目标车直线向前行驶模拟了常见的跟车或并线情况，要求AEB系统准确跟踪相对速度和距离，对高速可靠性提出要求。

第4类场景聚类结果表明：车速为90~120 km/h，接近GB 7258—2017规定的商用车限速阈值，反映了长途运输车辆常在限速附近行驶的实际情况。该场景在标准法规高速测试基础上，引入空载轴荷特性与高车速的耦合效应；空载状态下，后轴垂向载荷显著降低，簧下质量占比增大，导致制动时轮胎-路面附着系数利用率剧烈波动，ABS高频介入引发制动压力波动。

4　场景设计

为了系统性考核AEB传感器在雨滴杂波干扰和低照度下的目标识别能力，以及电子稳定系统在低附着系数路面弯道行驶工况下的协同制动稳定性，设计了商用车AEB系统公路追尾测试场景，如表7所示，通过耦合多重不利因素，实现对法规基础测试条件的极限延伸。

由表7可知，第1类场景参考GB/T 38186—2019中关于低附着系数路面及夜间工况的测试要求和C-NCAP对弱势道路参与者保护的场景构建原则[22]，模拟了实际道路几何条件。其中，本车为满载重型货车，总质量≥12 t，分别以50 km/h和60 km/h的初速度行驶，目标车为静止重型货车且尾灯失效，部分侵占行车道，以复现路边故障停车的高风险场景。

第2类场景直接映射UN R131法规中CCRs测试核心条款，并在GB 7258—2017《机动车运行安全技术条件》对商用车空载制动性能要求的基础上进行深化。测试在双向四车道省级公路直线段展开，本车（空载重型货车，总质量为8~12 t）分别以70 km/h和80 km/h匀速接近目标车辆。目标车以0.45 g恒定减速度制动，且车身覆着50%漫反射材料以模拟真实雷达散射特性。该设计重点验证空载状态下AEB系统对动态减速目标的识别实时性，制动控制策略满足碰撞缓解要求的同时，通过负载自适应算法避免后轴抱死等失稳现象，符合法

表7　商用车AEB系统公路追尾测试场景要素设计

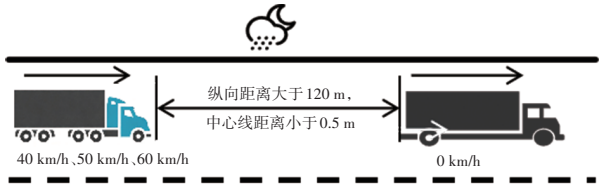
场景要素		第1类	第2类	第3类	第4类
本车	类型	重型载货车	重型载货车	中型载货车	厢式载货车
	总质量/t	>12	8~12	12~16	5
	负载情况	满载	空载	50%负载	空载
	碰撞部位	前部中间	前部中间	前部右前侧	前部中间
	初始速度/km·h^{-1}	40、50、60	70、80	70、80	90
目标车辆		牵引车静止模拟故障	厢式载货车初速度为70 km/h，减速度为0.4~0.5 g	厢式载货车模拟跟车场景，以50 km/h、60 km/h匀速行驶	牵引车模拟跟车场景以70 km/h匀速行驶
道路	类型	县级平直公路	省级平直公路	高速平直公路	高速平直公路
	附着系数	0.4~0.55	0.7~0.8	0.7~0.8	0.7~0.8
环境条件		夜晚无路灯、小雨	日间、晴天	日间、晴天	夜晚无路灯、晴天
相对运动方向		同向	同向	同向	同向

规对商用车特殊工况的测试规范。

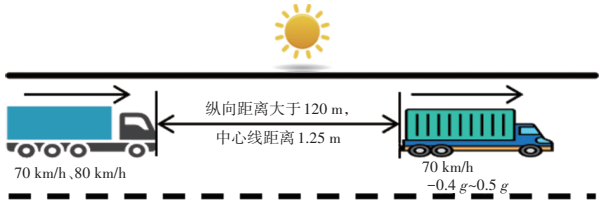
第3类场景引入C-NCAP偏置碰撞测试理念，结合GB/T 38186对车辆协同控制系统的考核要求，构建高速公路偏置追尾工况[23]。部分装载的中型货车（质心偏移车辆纵轴线10%）以80 km/h行驶，与同向60 km/h的低速目标车形成50%重叠度的相对位置。场景严格限定于车道宽度为3.75 m的直线高速公路段，重点考察AEB系统在非完全重叠碰撞风险下，电子稳定系统及转向辅助系统的协同控制逻辑。通过量化部分装载导致的质心变化对制动轨迹的影响，该场景为商用车偏置工况下的安全测试提供了重要补充，有助于完善现有法规测试体系。

第4类场景基于UN R131车速上限（80 km/h）进行扩展，设置本车（空载中型货车）以超法规车速（90 km/h）在无环境光照的高速公路追尾70 km/h匀速重型货车。在限速为100 km/h的高速公路上，中型货车可以90 km/h速度行驶，故此类工况能够评估AEB系统在高风险环境下的极限性能边界。

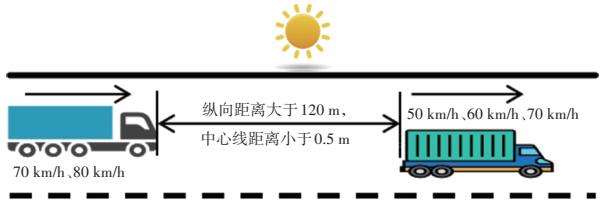
因此，本文基于现行法规GB/T 38186—2019、UN R131及C-NCAP等核心要求，系统构建了4类高风险商用车AEB公路追尾极限测试场景，实现了对典型高危工况的深度覆盖，如图7所示。通过耦合雨雪天气、低照度、负载变化、质心偏移及超限车速等多重不利因素，有效考核AEB系统在目标识别实时性、制动控制策略自适应性以及与ESC/ESA等底盘系统的协同稳定性。该测试方法针对商用车特殊工况设计，对现行法规测试体系形成了重要补充，有助于完善商用车主动安全系统的综合评价维度。



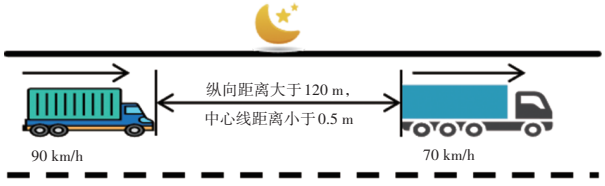
（a）第1类



（b）第2类



（c）第3类



（d）第4类

图7　4类测试场景示意

5　结束语

本文基于CIDAS数据库255起商用车公路追尾碰撞真实案例，采用层次聚类算法提取4类AEB系统测试场景，全面覆盖空载、部分、满载状态、附着系数0.44~0.8、速度区间30~120 km/h以及直路偏置追尾等多种中国公路典型工况。与现有乘用车主导或法规刚性场景相比，本文首次将商用车负载状态纳入核心聚类变量，并结合初始速度离散化处理，实现了场景对中国公路实际运行环境的精准映射，场景代表性与工程适用性大幅提升。

研究成果不仅充分响应UN R131、GB/T 38186、GB 7258等法规对商用车特殊工况的要求，更通过90 km/h超高车速、偏置碰撞等前瞻性扩展场景，为下一代重型车辆AEB系统标准制修订提供了数据支撑。

参　考　文　献

[1] 蔡博, 陈韬, 回春, 等. 商用车AEB系统测试场景构建及仿真研究[J]. 公路与汽运, 2021(1): 9-12.
CAI B, CHEN T, HUI C, et al. Construction and Simulation Research of Test Scenarios for Commercial Vehicle AEB Systems[J]. Highway and Automobile Transportation, 2021(1): 9-12.

[2] 廖静倩, 张道文, 高立, 等. 基于NAIS事故数据聚类的丁字路口危险场景研究[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(3): 336-345.
LIAO J Q, ZHANG D W, GAO L, et al. Research on Dangerous Scenarios at T-Intersections Based on NAIS Accident Data Clustering[J]. Journal of Automotive Safety

and Energy, 2021, 12(3): 336-345.

[3] 胡林, 易平, 黄晶, 等. 基于真实事故案例的自动紧急制动系统两轮车测试场景研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(12): 1435-1446+1453.
HU L, YI P, HUANG J, et al. Research on Test Scenarios of Automatic Emergency Braking System for Two-Wheelers Based on Real Accident Cases[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(12): 1435-1446+1453.

[4] 刘永涛, 刘永杰, 朱屹晨, 等. 基于交通事故数据驱动的乘用车AEB高速公路测试场景构建[J]. 汽车技术, 2025(6): 15-22.
LIU Y T, LIU Y J, ZHU Y C, et al. Construction of Highway Test Scenarios for Passenger Car AEB Based on Traffic Accident Data-Driven Approach[J]. Automobile Technology, 2025(6): 15-22.

[5] 张恒嘉, 王骁, 张明君, 等. 基于ECE R131的商用车AEB系统性能试验研究[J]. 中国测试, 2018, 44(2): 140-146.
ZHANG H J, WANG X, ZHANG M J, et al. Performance Test Research of Commercial Vehicle AEB System Based on ECE R131[J]. China Measurement & Testing Technology, 2018, 44(2): 140-146.

[6] SANDER U, LUBBE N. The Potential of Clustering Methods to Define Intersection Test Scenarios: Assessing Real-Life Performance of AEB[J]. Accident Analysis & Prevention, 2018, 113: 1-11.

[7] CICCHINO J B, ZUBY D S. Characteristics of Rear-End Crashes Involving Passenger Vehicles with Automatic Emergency Braking[J]. Traffic Injury Prevention, 2019, 20(S1): S112-S118.

[8] LIU D Y, HUANG W Y, CHU R X, et al. Study on Performance Testing and Evaluation of Autonomous Emergency Braking System Based on Self-Constructed Comprehensive Performance Evaluation Index Model[J]. Sensors, 2025, 25(7).

[9] 交通运输部公路科学研究院物流研究中心. 基于大数据的中国公路货运行业运行分析报告(2020)[EB/OL]. 北京: 交通运输部公路科学研究院, (2021-08-13) [2026-05-13]. https://www.sinoiov.com/news/official/252.html.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. China Highway Freight Industry Operation Analysis Report Based on Big Data (2020)[EB/OL]. Beijing: Research Institute of Highway Ministry of Transport, (2021-08-13) [2026-05-13]. https://www.sinoiov.com/news/official/252.html.

[10] 中华人民共和国交通运输部. 2020年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, (2021-05-19) [2026-05-13]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202105/t20210517_3593412.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical Bulletin on the Development of the Transport Industry in 2020[EB/OL]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, (2021-05-19) [2026-05-13]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202105/t20210517_3593412.html.

[11] 中华人民共和国交通运输部. 2023年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, (2024-06-14) [2026-05-13]. https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202406/t20240614_4142419.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical Bulletin on the Development of the Transport Industry in 2023[EB/OL]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, (2024-06-14) [2026-05-13]. https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202406/t20240614_4142419.html.

[12] DONG X C, ZHANG Q Y, ZHAGN D W, et al. Research and Deduction of Car-to-TW Vehicle AEB Test Scenarios Based on Improved Clustering Methods[J]. Journal of Advanced Transportation, 2023, 1.

[13] AGARWAL S. Data Mining: Concepts and Techniques[C]// 2013 International Conference on Machine Intelligence and Research Advancement. Katra, India: IEEE, 2013.

[14] 杨文臣, 周燕宁, 田毕江, 等. 基于聚类分析和SVM的二级公路交通事故严重度预测[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(5): 163-169.
YANG W C, ZHOU Y N, TIAN B J, et al. Prediction of Traffic Accident Severity on Secondary Highways Based on Clustering Analysis and SVM[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(5): 163-169.

[15] 陈吉清, 舒孝雄, 兰凤崇, 等. 典型危险事故特征的自动驾驶测试场景构建[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 1-8.
CHEN J Q, SHU X X, LAN F C, et al. Construction of Autonomous Driving Test Scenarios Based on Typical Dangerous Accident Characteristics[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 1-8.

[16] 白杰, 童杰, 黄李波, 等. 负载变化对危险货运车自动紧急制动系统的影响(英文)[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(增刊1): 175-181+186.
BAI J, TONG J, HUANG L B, et al. Effects of Load on Autonomous Emergency Braking System for Tanker Truck[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(S1): 175-181+186.

[17] 夏澜, 朱西产, 马志雄. 切入型危险工况下自动紧急制动系统的测试场景[C]// 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 同济大学汽车学院. 第十四届国际汽车交通安全学术会议论文集. 长沙: 湖南大学, 2017: 142-155
XIA L, ZHU X C, MA Z X. Test Scenarios for Automatic

Emergency Braking System under Cut-in Dangerous Conditions[C]// State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, College of Automotive Studies, Tongji University. Proceedings of the 14th International Forum of Automotive Traffic Safety (INFATS). Changsha: Hunan University, 2017: 142-155.

[18] DONG X C, ZHANG Q Y, ZHANG D W, et al. Research and Deduction of Car-to-TW Vehicle AEB Test Scenarios Based on Improved Clustering Methods[J]. Journal of Advanced Transportation, 2023, 1.

[19] ZHANG J M, ZHANG Q, HU M X, et al. Research on Verification and Evaluation Method of Automatic Emergency Braking Function in Rain and Fog Weather Based on TOPSIS[C]// 2024 10th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). Orchard District, Singapore: IEEE, 2024: 21-27.

[20] United Nations Economic Commission for Europe. Uniform Provisions Concerning the Approval of Motor Vehicles with Regard to Advanced Emergency Braking Systems (AEBS) for Vehicles M2, M3, N2 and N3: UN Regulation No. 131 [S]. Geneva: United Nations Economic Commission for Europe, 2013.

[21] SAE International. Forward Collision Warning and Automatic Emergency Braking Test Procedure and Minimum Performance Requirements-Truck and Bus: SAE J3029—2023[S]. Warrendale: SAE International, 2023.

[22] 全国汽车标准化技术委员会(SAC/TC 114). 商用车辆自动紧急制动系统(AEBS)性能要求及试验方法: GB/T 38186-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
National Technical Committee of Auto Standardization (SAC/TC 114). Performance Requirements and Test Methods for Advanced Emergency Braking System (AEBS) of Commercial Vehicles: GB/T 38186—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[23] 中国汽车技术研究中心有限公司. C-NCAP管理规则(2024年版)[S/OL]. 天津：中国汽车技术研究中心有限公司. (2024-01-01) [2026-05-13]. https://www.c-ncap.org.cn/cncap-guicheng-detail?id=9.
China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd.. C-NCAP Management Regulation (2024 Edition)[S/OL]. Tianjin: China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., (2024-01-01) [2026-05-13]. https://www.c-ncap.org.cn/cncap-guicheng-detail?id=9.

（责任编辑　瑞　秋）

修改稿收到日期为2026年5月13日。

《汽车工艺与材料》投稿须知

《汽车工艺与材料》于1986年创刊，是由中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车材料与制造技术类月刊，目前已入选《中文核心期刊要目总览》(第二版)、RCCSE中国准核心学术期刊(B+)、中国核心期刊(遴选)数据库、中国学术期刊综合评价数据库、欧洲学术出版中心数据库(EuroPub)、哥白尼精选期刊数据库(ICI Journals Master List)、EBSCO International数据库、J-Gate数据库。

《汽车工艺与材料》以“为中国报道汽车制造，为汽车引领工艺材料”为办刊宗旨，致力于报道以汽车轻量化技术和智能制造技术为核心的先进制造技术与材料应用技术，重点关注电动汽车蓄电池、电机、电控关键材料技术，燃料电池材料技术，高强度钢、铝镁合金、非金属材料及其成形技术，连接技术，智能装备与绿色制造等，以期通过高质量学术内容的出版和传播助推行业创新技术的交流与发展。

《汽车工艺与材料》杂志关注领先的整车及零部件企业和材料、装备等供应商，及时报道汽车行业最新的产品设计、制造、材料、加工技术、生产装备、检测技术等方面的成功案例。

主要栏目：

AT&M视界、生产现场、材料应用、生产装备、检测技术、数字化园地、行业动态等。

投稿要求：

(1)来稿须具有独创性并与实践相结合，文章字数最好控制在5 000～8 000字。

(2)来稿不能在国内、外公开杂志上发表过，请勿一稿多投。

(3)来稿的试验方法、试验数据、试验结论必须准确、可靠。

(4)来稿须包括以下项目：题名、作者姓名、作者单位、摘要(200字左右)、参考文献等。来稿采用word文档的格式。

(5)来稿文章格式应符合一般科技论文格式，或参考近期本刊所刊登文章格式。

(6)文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献，且在文中应标注文献引用处。

(7)本刊使用网站投稿，投稿网址：http://qcgyycl.cbpt.cnki.net，咨询电话：0431-82026054。

竭诚欢迎汽车行业及相关各界的专家学者积极向本刊投稿。