·智能网联汽车安全验证与评估专题·

驾驶员控制辅助系统的工程演进研究:从法规驱动到能力构建*

陈俊涛[1] 陈贞[2] 杨强[3] 武湘成[4]

(1.北京航迹科技有限公司,北京 100080;2.北京镝石数据科技有限公司,北京 100176;3.北京赛目科技股份有限公司,北京 100080;4.工业和信息化部装备工业发展中心,北京 100846)

【欢迎引用】陈俊涛, 陈贞, 杨强, 等. 驾驶员控制辅助系统的工程演进研究:从法规驱动到能力构建[J]. 汽车文摘,2026(8):37-48.

【Cite this paper】CHEN J T, CHEN Z, YANG Q, et al. Engineering Evolution of Driver Control Assistance Systems: from Regulatory-Driven Compliance to Capability Building[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(8): 37-48.

【摘要】为了应对驾驶员控制辅助系统(DCAS)全球加速部署带来的安全挑战,对比了欧盟、中国与美国的监管范式,揭示了UN R171通过工程化方法将安全原则转化为量化约束条件,推动DCAS由离散功能集合向受控系统演进。研究发现,高标准合规促使企业构建系统边界确定性建模、生命周期证据化治理、数据驱动闭环优化三大工程能力,构成向自动驾驶系统(ADS)迁移的能力基础;典型案例显示企业分化为体系化集成与敏捷突破2条路径。研究提出的法规驱动型能力构建模型,阐释了从监管约束到战略资产的传导机制,为合规成本转化为长期竞争优势提供理论框架,并从企业实施能力导向型合规、监管构建动态平衡治理体系两方面提出建议。

关键词:驾驶员控制辅助系统;系统安全;符合性评估;体系能力

中图分类号:U461.91 **文献标志码:**A **DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20260021

Engineering Evolution of Driver Control Assistance Systems: from Regulatory-Driven Compliance to Capability Building

Chen Juntao[1], Chen Zhen[2], Yang Qiang[3], Wu Xiangcheng[4]

(1. Beijing Voyager Technology Co., Ltd., Beijing 100080; 2. Beijing Dishi Data Technology Co., Ltd., Beijing 100176; 3. Beijing Saimo Technology Co., Ltd., Beijing 100080; 4. Ministry of Industry and Information Technology Equipment Industry Development Center, Beijing 100846)

【Abstract】To address the safety challenges posed by the global accelerated deployment of Driver Control Assistance Systems (DCAS), this study compares the regulatory paradigms of the European Union, China, and the United States, and reveals that UN R171 transforms general safety principles into quantifiable engineering constraints, thereby driving the evolution of DCAS from discrete feature sets into systematically controlled systems. The findings indicate that high-standard compliance drives firms to develop three core engineering capabilities: deterministic modeling of system boundaries, evidentiary governance across the lifecycle, and data-driven closed-loop optimization. These capabilities constitute the engineering foundation for migration toward Automated Driving Systems (ADS). Case studies reveal that enterprises differentiate into 2 strategic pathways: systematic integration and agile breakthroughs. The proposed regulation-driven capability-building model elucidates the transmission mechanism from regulatory constraints to strategic assets, providing a theoretical framework for transforming compliance costs into long-term competitive advantages. Accordingly, the study offers policy recommendations focusing on implementing capability-oriented compliance within enterprises and fostering a dynamically balanced regulatory governance system.

Key words: Driver Control Assistance Systems (DCAS), System safety, Compliance assessment, System Capability

*基金项目:新一代人工智能国家科技重大专项(2022ZD0116311)。

0 引言

随着高速及城市领航驾驶辅助功能商业化应用加速，驾驶员控制辅助系统（Driver Control Assistance Systems，DCAS）已成为智能网联汽车产业竞争与安全监管的核心焦点[1]。根据联合国世界车辆法规协调论坛（UNECE WP.29）UN R171系列法规（00/01/02系列），DCAS是高级驾驶辅助系统（Advanced Driver Assistance System，ADAS）的子集，属于SAE L2级驾驶自动化，其核心是驾驶员始终为车辆控制的最终责任主体，系统仅提供辅助而不接管动态驾驶任务（Dynamic Driving Task，DDT），驾驶员需持续监督环境与系统运行[2-4]。这一人机协同驾驶前提，使DCAS在驾驶员状态监测、责任边界划分、安全验证方法等方面，与可独立执行DDT的自动驾驶系统（Automated Driving System, ADS）存在显著的范式差异[5]。当前，DCAS功能应用场景正从高速向类高速、复杂城市环境拓展，系统主动性日益增强，典型表现为系统发起换道等行为。然而，由此产生的驾驶员误用、系统边界模糊等风险对现有工程实践与监管框架构成直接挑战[6]。

为应对上述挑战，欧盟、中国和美国基于各自法律体系与产业生态，形成了特征鲜明的治理范式，积极探索差异化的监管路径[7-8]。其中，以联合国UN R171系列法规为代表的技术规范，正通过不断迭代，将安全原则转化为一套可量化、可验证的工程要求。其演进趋势体现在适用场景从高速公路向结构化城市道路的扩展，以及对系统主动功能规范的深化。如表1所示，UN R171的适用范围从高速公路向结构化城市道路扩展，并对系统主动功能（如变道）给予更明确的规范[4]，标志着监管从功能性要求不断向系统性工程治理深化。

表1 UN R171演进趋势[2-4]

DCAS功能类型		高速公路	非高速公路	
			类高速公路	城市道路等
车道保持、驾驶员发起/确认的操纵（驾驶员发起/确认的非车道巡航控制）	脱手警报+脱眼警报	00/01系	00/01系	00/01系
	抑制脱手警报，保留脱眼警报	01系	02系	不允许
系统发起操纵（系统发起的非车道巡航控制）	脱手警报+脱眼警报	01系	02系	02系
	抑制脱手警报，保留脱眼警报	02系	02系	不允许

鉴于此，本文旨在探究工程化监管（以UN R171为例）如何通过驱动企业进行系统性合规实践，使其构建面向高阶自动驾驶的长期技术能力路径。本文首先通过比较全球监管范式、解构核心法规逻辑，确立研究背景与基准；进而分析法规驱动下的DCAS技术工程范式转变及企业战略响应；在此基础上，构建“合规驱动型能力构建”理论模型，系统阐明从监管到能力的传导机制，并总结相关启示。

1 DCAS监管范式进展

1.1 欧盟：以联合国法规为核心的型式批准体系

欧盟直接采纳UNECE WP.29法规，构建起针对DCAS的强制性型式批准制度，通过先规范L3 ADS、再聚焦DCAS的实施策略（图1），填补高等级驾驶辅助与自动驾驶领域的监管空白。相关法规在欧盟成员国具备直接法律效力。

（1）前置铺垫：率先引入UN R157法规，针对自动车道保持系统（Automated Lane Keeping Systems, ALKS），明确安全要求与验证方法，为L3级ADS的型式批准建立标准化通道[9]，其安全论证逻辑与型式批准框架，为后续构建DCAS监管体系提供了重要参考。

（2）核心落地：在UN R157的监管基础上，引入UN R171系列法规，形成DCAS专属监管体系。其中，UN R171 00系列纳入通用安全法规（自2025年9月1日起实施），为DCAS产品设定了明确且强制性的准入门槛；01、02系列修正案持续细化完善以适应新技术安全监管[7]。

1.2 中国：政策法规与技术标准协同的分层治理

中国在道路机动车辆生产企业及产品准入框架下，构建与驾驶自动化等级匹配的分层治理体系（图2）[10-13]，兼顾技术创新包容性与安全底线管控：

（1）针对L3级及以上ADS：采取准入试点机制，为技术成熟的自动驾驶车型开设专门准入通道。在明确系统功能及ODD的基础上，重点管控L2与L3之间的能力上限风险，通过试点积累实践数据，稳妥推进自动驾驶安全应用[11]。

（2）针对L2级DCAS：通过“政策法规+管理指南+技术标准”三位一体模式筑牢安全底线，明确DCAS系统边界、性能指标及安全责任要求，自2025年2月正式纳入准入管理，坚守“驾驶员持续承担DDT”的核心原则，通过标准化测试验证与合规审查保障产品安全基线[8]。中国的准入管理要求在核心技术参数（如驾驶员



图1　欧盟配备DCAS及ADS的机动车型式批准法规框架



图2　中国L2及以上系统的道路机动车辆生产企业及产品准入管理框架

状态监测的警报时序、系统边界定义等)上,以UN R171为基准进行本土化协调。在国家标准制定中与UN法规的安全要求相协调[12],并以此作为产品准入审查的技术依据,实现国内产品安全基线与国际接轨。

1.3　美国:以事后监管与企业责任为主导的混合治理模式

美国对驾驶自动化系统采取"联邦底线安全+州级使用监管"的混合治理模式[14],L2及以上驾驶自动化系统监管框架如图3所示。

在联邦层面,国家公路交通安全管理局(NHTSA)未设立针对L2系统专门技术法规或事前批准制度。车辆安全遵循强制性的《联邦机动车安全标准》(FMVSS),企业通过"自我认证"方式证明合规。对于已上市系统,NHTSA主要依托强制事故报告(依据NHTSA发布的2021-01常设通用指令)、缺陷调查与召回机制进行事后监管。针对ADS,NHTSA通过非强制性安全指南提供设计建议,并依托个案豁免机制允许企业申请豁免不适用于ADS的传统FMVSS条款。此外,NHTSA已开展多轮FMVSS修订工作以适配自动驾驶;2026年6月推出FMVSS No.135(制动系统)修订提案,探索适配无踏板ADS车辆,拟豁免冗余硬件强制规定,并在维持各项性能指标基础上,推动监管模式向性能导向转型[14-16]。

在州级层面,各州政府独立监管车辆在公共道路上的使用行为:对于ADS的测试与商业运营,监管重点在于颁发许可、设定安全员要求、划定运营区域及强制数据报告等,形成差异化的准入和管理体系;对于L2系统,则主要规范其使用条件并明确驾驶员法律责任[14-15]。

1.4　中美欧DCAS监管逻辑对比

欧盟、中国和美国对DCAS的监管,基于各自独特的法规体系与产业政策,由此形成了3种治理逻辑。表2表明,这种差异体现在监管的合法性来源、介入的时序以及约束的刚性等方面。欧盟选择了"规则先行"的预防性路径,中国力图在"发展与安全"间寻求平衡,而美国则更依赖"事后纠偏"的市场化机制[14]。

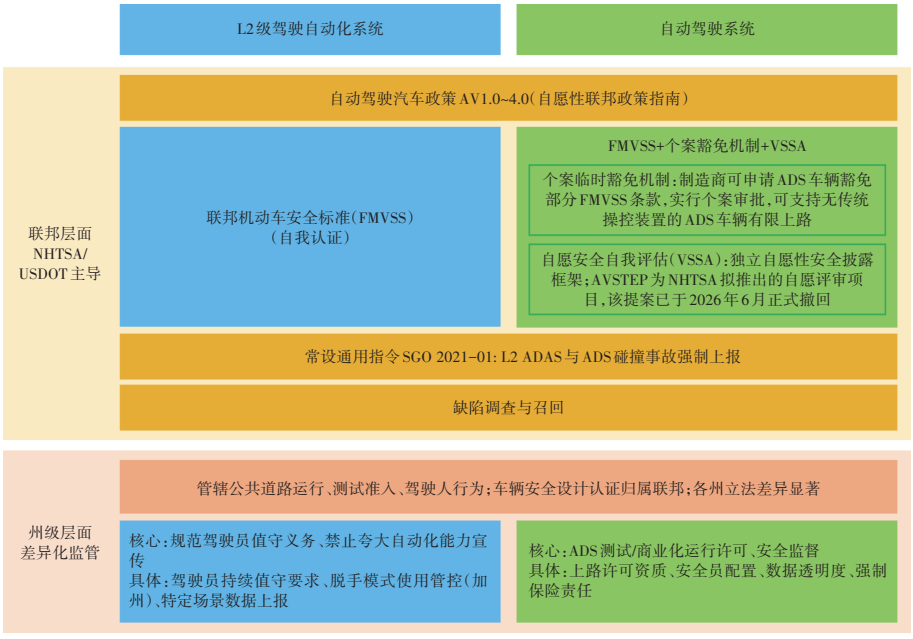


图3　美国L2及以上驾驶自动化系统监管框架

表2　欧盟、中国和美国DCAS监管逻辑对比

维度	欧盟	中国	美国
核心依据	采纳UN R171,建立型式批准制度	实施准入管理,协调UN R171制定强制性国家标准	基于FMVSS的企业自我认证,无DCAS专项法规
监管导向	规则导向:统一法规,生命周期安全治理	安全与发展并重:准入守底线,试点促创新	市场与事后导向:事故报告、缺陷调查、召回
责任划分	驾驶员:最终控制责任;车企:产品缺陷、生产一致性责任	驾驶员:最终控制责任;车企:产品缺陷、生产一致性责任	驾驶员:操作责任人;车企:产品缺陷责任
关键要求	系统边界、量化DMS警报、多支柱验证、在用监测	强制DMS、多支柱验证、事件事故报告、OTA升级管理	强制事故报告、符合FMVSS标准、无DCAS专项量化工程约束

1.5　监管范式差异的影响与协调展望

欧盟、中国和美国在DCAS监管范式上的路径差异,给全球汽车产业的研发验证、市场准入与合规体系带来了严峻挑战。

(1)对企业全球化合规战略的影响。企业需针对不同市场建立相适应的合规体系:在欧盟和中国市场,需满足事前准入、量化工程约束与测试验证要求;在美国市场,则需强化事故数据监测、责任溯源与风险管理能力,以应对事后监管、缺陷调查与司法追责[14]。多重监管体系并行,对企业构建系统完备的全球化合规与安全治理能力,提出了极高要求。

(2)对技术路线与产品定义的指引作用。严格的工程化法规(如UN R171)可能导致系统设计技术方案在合规框架内趋向收敛,以换取市场准入的效率。相比之下,美国事后监管模式在赋予技术迭代更大灵活性的同时,也将更高的产品责任与安全风险转移给企业。不同监管导向直接影响企业在系统边界、人机交互策略、验证方法上的技术选择。

(3)国际监管协调的挑战与未来趋势。尽管当前全球监管路径呈现显著分化,但UN R171作为已被欧盟等主要市场采纳并协调的技术框架,实质上已发挥了全球监管"技术基准"的功能。长远来看,伴随UN WP.29及GTR法规的持续演进、各国监管实践日益丰富,各司法辖区有望在安全底线划定、验证方法统一等核心层面逐步趋近。这种潜在的监管趋同,叠加技术基准的全球化扩散,将深刻重构未来智能网联汽车的产业竞争格局。

2　UN R171核心技术规范:从安全原则到工程体系的构建逻辑

为系统解构并揭示UN R171安全要求的内在逻辑,本文构建"总体安全原则—运行安全目标—系统安全要求—符合性评估—安全治理"5层工程模型(图4),作为本章分析框架。该模型旨在从测试与安全评估视角,阐释法规如何将抽象的安全理念通过工程化转换,构建出一套可量化、可验证的技术约束闭环。

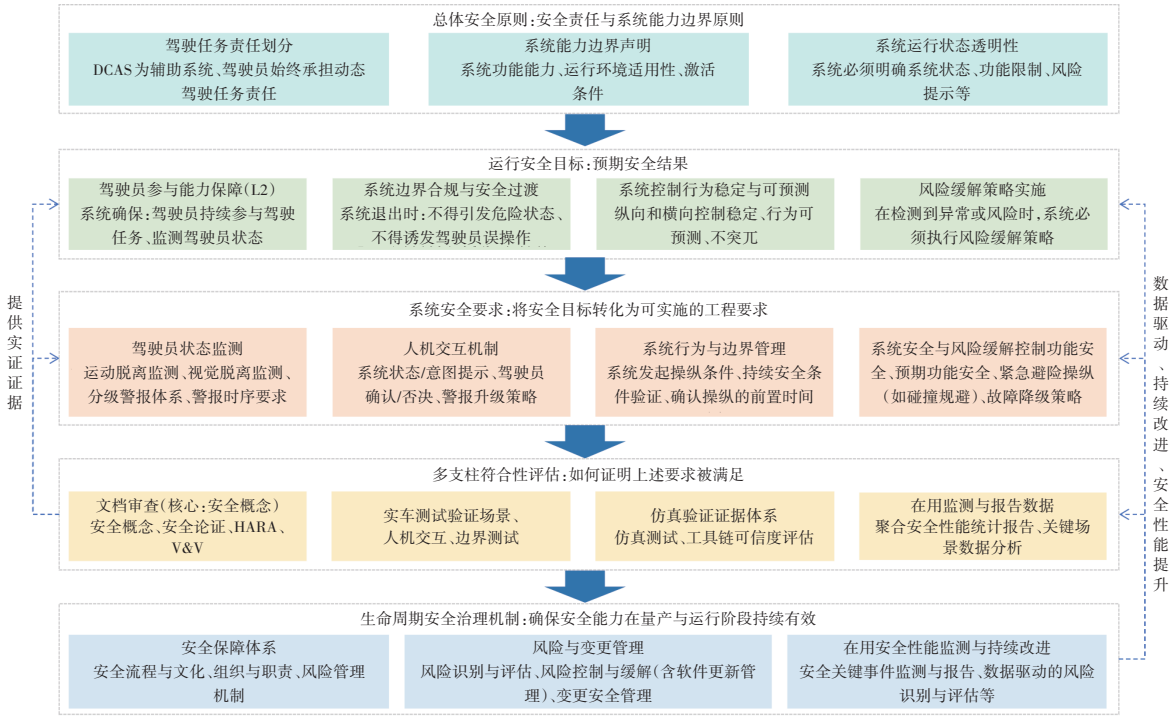


图4　UN R171安全工程5层模型及法规结构映射关系

2.1　从总体安全原则到运行安全目标的工程化转换

UN R171的监管框架基于3项互为支撑的总体安全原则：驾驶员持续担责是根本前提，明确动态驾驶任务的最终归属[4]；系统边界明确为运行基础，要求系统功能必须在声明的范围内受控运行[17]；状态透明交互则为必要保障，确保驾驶员能准确理解系统状态[4]。基于上述原则，法规通过工程化、量化规范，将其转化为4类具体、可验证的运行安全目标：

（1）保障驾驶员具备及时恢复车辆控制的参与能力；

（2）确保系统在声明边界内安全运行与平顺退出；

（3）保证系统纵向与横向控制行为的稳定与可预测性；

（4）在检测到驾驶员失能或紧急风险时，执行有效的风险减缓策略。

上述转换过程，不仅标志着监管重心从理念层面“应该做什么”转向工程层面“如何证明做到了”，更确立了以证据为核心的安全论证新范式。

2.2　系统安全要求细化：边界约束与闭环控制

UN R171进一步将运行安全目标具象化为可执行的技术要求，其难点在于构建“行为可控”与“人员在环”的双重保障机制，集中体现为系统发起操纵的风险约束与驾驶员状态监测量化闭环机制[4]。

2.2.1　系统发起操纵的风险约束机制

系统发起操纵（System-Initiated Manoeuvre，SIM）是指系统发起且无需驾驶员确认的操纵。02系列法规对SIM（如系统发起换道）的监管逻辑进行了优化与扩展，其核心是通过构建一套纵深风险控制体系来管理此类高阶功能的风险[4]。

该体系首先刚性限定了合规场景，从高速公路逐步扩展至部分结构化的非高速道路。其次，它要求系统在发起操纵前实时验证多重安全条件：包括驾驶员的实时参与状态、目标区域的环境安全性，并为驾驶员预留充分的知情与反应时间。图5展示了包含条件判断、安全确认与失效降级策略的完整执行逻辑，体现了法规对系统主动行为“事前预防-事中控制-事后缓释”的全链条监管思路。

此外，法规引入了紧急例外规则，允许系统在发生碰撞风险前执行紧急规避。该机制的本质是在赋予系统有限主动权的同时，通过场景筛选、条件预检、时序控制等多重工程安全锁，将系统行为严格约束在可预期、可解释的安全边界内。

2.2.2　驾驶员状态监测量化闭环

为确保“驾驶员持续担责”原则可被客观衡量与执行，法规构建了一套精细的量化监测干预闭环。

首先，该体系明确了具体监测维度。系统须同步监测运动脱离（手部脱离转向盘）和视觉脱离（视线方向或头部姿态偏离超过阈值），并针对高速场景（车速>60 km/h）强化视觉脱离响应[4]。

其次，建立基于严格时序的分级警报体系。法规

确立了基于严格时序的分级响应机制，包括：手握转向盘请求（Hands On Request，HOR）、视线回归请求（Eyes On Request，EOR）、立即控制警告（Direct Control Alert，DCA）[4]。通过T_1（HOR默认5 s）、T_2（≤3 s）、T_3（≤10 s）等阈值实现对风险的分级管控。

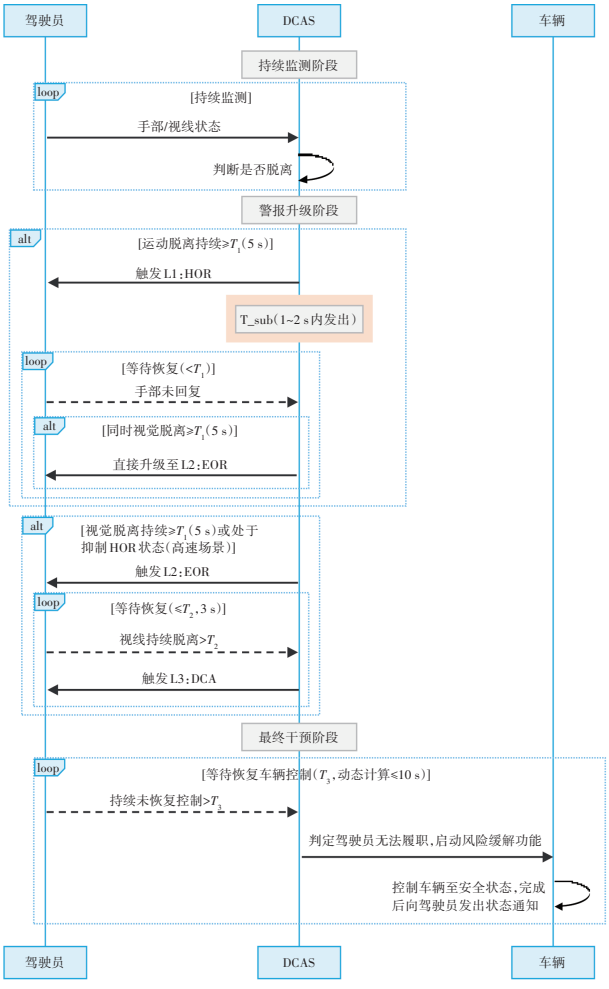


图5　系统发起操纵执行逻辑流程图

最后，实施场景自适应的动态调节。在高速公路、类高速公路等交通环境结构化、风险可预测的场景下，且视觉监测功能持续有效，法规允许有条件地抑制HOR（即暂时不触发手离转向盘警报），但会同步缩短视觉脱离的响应时间，形成更敏捷的响应路径。

该闭环机制的交互逻辑如图6所示。其核心是通过监测可观测的物理表现（手、眼），并依据预设的时间阈值，将“驾驶员应保持参与”这一责任要求，转化为可触发确定性系统响应的工程化控制逻辑。

2.3　多支柱符合性评估：构建互锁的证据链体系

面对DCAS功能场景扩展与系统行为复杂度提升，UN R171确立了由文档审查、测试验证、在用监测与报告（In-Service Monitoring and Reporting，ISMR）构成的多支柱符合性评估体系（图7）。上述三大支柱构成了一个递进且互锁的证据链，实现对DCAS生命周期安全论证[2-4]。

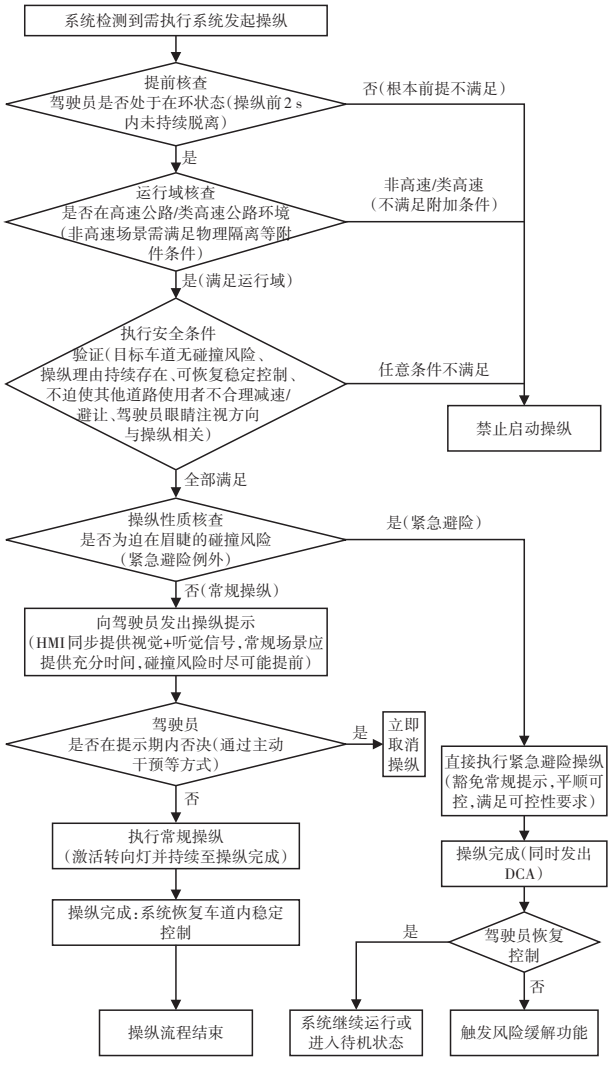


图6　驾驶员状态监测与分级警报交互序列图

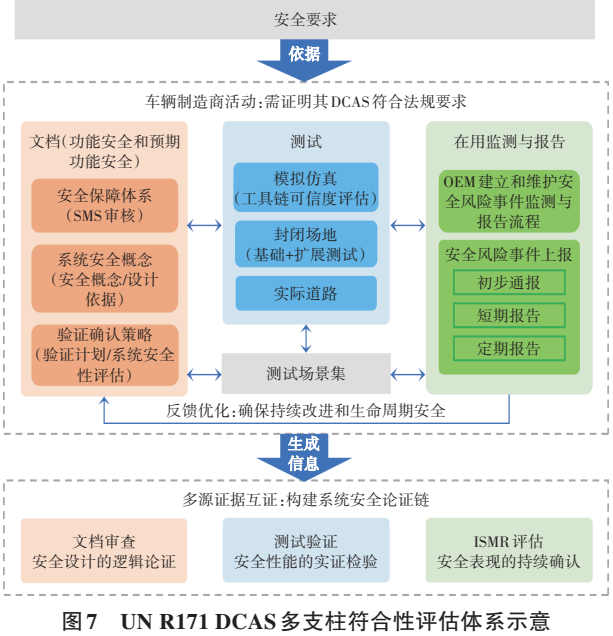


图7　UN R171 DCAS多支柱符合性评估体系示意

其中，文档审查构成该体系的初始与基础环节，旨在确认安全在系统设计层面是否得到充分考虑[18-19]，以形成安全设计基线。测试验证是实证核心，通过仿真（覆盖极端长尾场景）与实车测试（验证典型场景）相结合，对该基线进行量化检验[20]。在用监测与报告则是动态延伸，通过采集与分析全生命周期运行数据，持续追踪安全表现，实现“运行-反馈-优化”的闭环，三者共同构建了“设计可证、运行可溯、安全可演进”的完整证据体系。因此，监管认可的安全合规，已从一个基于单一测试通过的“静态断点”，演进为一个需在全生命周期内、由多重证据链持续确认与维护的动态治理过程[4-5]。

这种以证据链为核心的动态治理框架，同样构成了应对非规则基础算法（如深度学习）安全论证挑战的基础。行业共识和法规的演进方向表明，对于此类算法，符合性评估的重心进一步从对预设规则执行过程的验证，转向对其在充分场景下表现出的可观测安全性能的统计性证实。这要求测试验证与在用监测须能提供覆盖其行为空间与边界场景的量化证据，从而将监管对“确定性”的要求，锚定在算法整体的、可验证的安全表现之上[4]。

2.4 DCAS与ADS安全论证的范式性差异

因驾驶任务责任主体不同（分别为驾驶员负责与系统负责），DCAS与ADS的安全论证存在范式性的分层差异（表3）。DCAS的论证围绕安全概念展开，验证安全设计措施有效性，并提供基于人类驾驶员表现的相对明确的量化基准；ADS则需通过构建完整的安全档案，论证系统整体安全性，其目标“无不合理风险”更为抽象，高度依赖仿真验证的可扩展性[21]。这种根植于责任主体的范式性差异，是深入比较并厘清二者工程能力关联与迁移可能性的根本前提。

3 法规驱动下DCAS的系统化演进：从功能叠加到受约束系统

UN R171等法规实施正驱动DCAS从“功能集合”向“受约束系统”范式转型。这一转型由技术演进与法规约束共同驱动，通过工程化要求，系统性重塑DCAS的开发逻辑、验证方法与治理模式。本章从系统工程视角，分析该转变在人机交互、安全治理、验证体系等维度的具体体现（图8），从而揭示其对构建高阶ADS核心能力的奠定性价值。

表3 ADS与DCAS安全论证范式核心差异[17]

维度	ADS评估	DCAS评估	差异根源
核心文件与目标	安全档案：系统级安全性的整体确认	安全概念：聚焦设计措施的符合性验证	责任主体不同，论证完备性要求不同
不合理风险定义	通用目标：不存在不合理风险，缺乏明确量化基准	量化基准：风险水平不高于可比情况下的人类驾驶员表现	DCAS提供量化基准，ADS依赖逻辑闭环
测试验证侧重	系统级安全验证，其中仿真和实车验证构成关键证据来源	在认可仿真的同时，强调物理测试的核心作用	ADS场景复杂度远超DCAS，验证可扩展性需求更强
监管侧重	通过全面的安全档案确认系统级安全性	证明安全设计措施得到有效实施，聚焦具体设计措施	监管介入点不同：ADS在系统整体；DCAS在具体设计措施

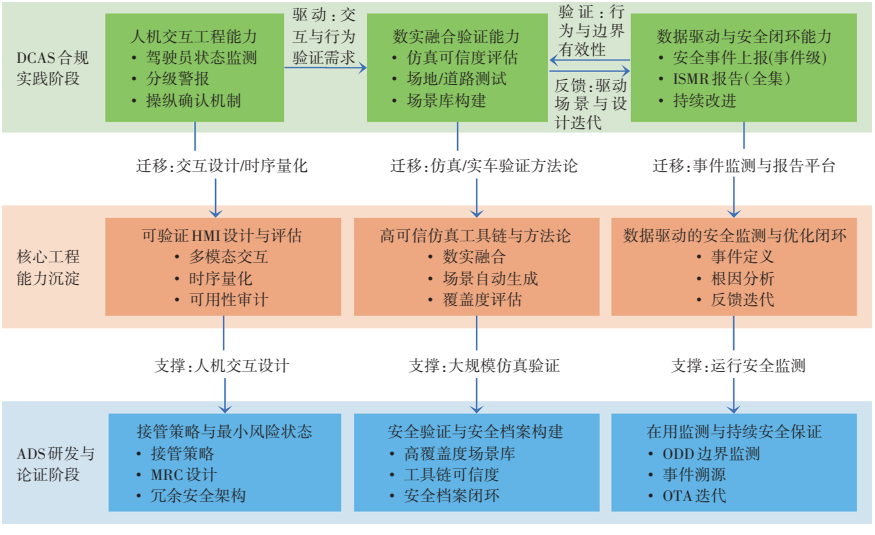


图8 DCAS关键工程能力向高阶自动驾驶迁移的演进路径

3.1 工程逻辑迁移：从实现功能到约束行为

DCAS的工程范式正从“实现功能”向“约束行为”转型。随着系统发起操纵能力增强，传统功能叠加模式难以应对人机交互的系统性风险，以UN R171为代表的工程化法规是驱动这一转型的关键驱动力。

法规将“系统安全运行”的隐含前提，明确转化为必须显式建模、可量化验证、可独立审查的工程对象。系统安全评价维度从单一性能指标，扩展到多状态行为的一致性、可预测性与可解释性。竞争与监管的焦点，随之从“能否实现功能”转向“系统能否始终在声明边界内受控运行”。这表明，DCAS产品的核心属性从“功能性能”转向“行为确定性”，具备向高阶自动驾驶系统演进所必需的、可解释与可验证的工程基础。

3.2 人机交互重构：从交互设计到控制逻辑

法规驱动人机交互从提升体验的交互层，升级为定义运行权限与边界的核心安全控制逻辑。

（1）驾驶员状态：从假设到控制变量。驾驶员在环状态从工程假设[22-23]，被法规强制转化为系统可实时监测、可触发确定性响应的工程控制变量。驾驶员参与状态（如手/眼状态）直接决定系统功能可用性、操纵权限及风险处置策略，成为生成系统边界的前馈信号。

（2）交互机制：从警报到风险分级闭环控制。法规定义的分级警报时序（HOR、EOR、DCA），构建了标准化的风险闭环控制协议。人机交互已深度融入系统安全控制回路，系统在设计时需结合驾驶员脱离时长、车速及环境特征动态判定风险等级，触发对应警报或降级策略，其有效性需通过验证与在用监测持续确认，使人机交互的设计目标，从追求主观友好，转向追求可验证的控制效能。

（3）操纵边界：便捷性演进与刚性约束的统一。法规为系统主动性功能扩展设定了刚性前提：任何系统发起操纵的许可必须基于可验证的人机交互回路。在此框架下，交互方式（如从物理操作向语音、视线确认的演进）正不断向低操作负担、高便捷方向发展，但“驾驶员参与能力确认”这一功能安全核心底线不容妥协，确保在追求体验优化的技术路线中，保障安全确定性逻辑始终成立。

3.3 安全治理演进：从设计冻结到运行中进化

法规要求的在用监测与报告，推动安全属性从一次性的“设计符合性结论”，转变为需在全生命周期持续确认与优化的动态属性。运行数据（如驾驶员响应行为、边界触发事件、安全关键事件等）被纳入核心闭环，用于持续验证设计阶段的安全假设、识别未覆盖的长尾风险，并通过软件升级驱动系统迭代。由此形成的“运行数据采集→风险挖掘→仿真验证→升级优化”的持续安全改进闭环，实现安全治理水平的迭代提升。

3.4 验证范式：从实车主导到数实融合

法规将仿真验证正式纳入合规证据链[24]，标志着验证范式从依赖物理实车的场景复现，转向数实融合、数据驱动的场景遍历。基于真实运行数据构建的、经过可信度评估的仿真环境，可在可控条件下极大扩展场景覆盖规模和复杂度，为验证DCAS的低概率高风险及复杂场景提供高效可行的解决方案。随着AI技术的发展，仿真场景构建正从规则枚举转向数据驱动的智能生成[25-26]。这不仅提升验证效率，更推动验证理念向“证明在可表征的场景分布内安全”的统计性范式演进，为以数据与AI为核心的自动驾驶系统提供必要的方法论准备。

3.5 企业合规实践案例

本节以宝马Motorway Assistant与特斯拉FSD（Supervised）为典型案例，剖析“在监管框架内追求系统卓越”与“以实证数据重塑合规边界”2种合规范式。

3.5.1 宝马：基于“共生驾驶”理念的工程化合规

（1）基于确定性工程响应量化法规的战略：宝马采取精准对标、系统优化的工程战略，并成为德国首家获得UN R171批准的制造商[27]。Motorway Assistant可在高速场景（车速≤130 km/h）实现长期脱手驾驶，支持导航联动的主动变道推荐功能，驾驶员可通过后视镜目光确认完成变道操作[27]；其核心理念“共生驾驶（Symbiotic Drive）”以规则基础算法与人工智能算法的协同融合，保障车辆行驶行为可预测、驾驶员全程可控[28]；以可验证的工程证据（冗余传感器、明确运行边界、多模态人机交互、车内驾驶员监测等）为支撑，高效完成型式批准，实现了“规则内卓越”[28]。

（2）市场部署与价值实现：上述战略直接转化为市场行动。宝马依托UN R171法规缔约方互认与一次认证多国通行的机制，在德、奥、意、法等欧洲国家快速落地脱手驾驶功能。依托较前代算力提升20倍的全新自动驾驶计算平台，宝马可通过OTA迭代推送城区红绿灯启停等驾驶辅助新功能，构建起从L2到自动驾驶持续演进的可持续升级路径[27-28]。

（3）核心能力构建：此过程将合规要求内化为以确定性、可预测性和全生命周期治理为基石的高可靠性工程交付能力。该能力体系融合了集中式电子电气架构、高性能车载计算、软硬件协同开发与“仿真-

实景”验证闭环，结合全球法规适配与工业流程整合能力，构成其面向全球市场交付安全、合规智能驾驶产品的核心支撑。

3.5.2 特斯拉：以数据为矛的合规边界重塑

（1）实证攻坚与规则破局并行的策略：在实证层面，通过大规模欧盟道路实测、用户随车测试与多场景场地测试，结合多项安全性能研究，构建FSD（Supervised）系统安全性能量化实证体系，形成数据驱动的安全论证闭环；在规则层面，探索适配AI原生算法的合规论证方式，依托欧盟准入豁免通道开展合规申报[29-30]。该模式为智能驾驶非规则基础算法、AI原生系统的合规验证提供了新型实践路径[4]。

（2）市场准入与商业模式适配：该策略主要服务于欧洲市场拓展。特斯拉选择荷兰作为突破口，依托荷兰车辆管理局出具的型式批准作为基础，援引欧盟相互承认机制推进跨国准入，FSD（Supervised）随后陆续在多个欧盟成员国完成准入，各国可根据实际情况简化独立技术评估流程。系统投放过程中持续开展道路验证，相关数据反向驱动模型区域适配优化；中长期有助于特斯拉将北美商业模式延伸至欧洲，基于整车硬件预埋基础推行软件付费升级，完善可持续变现商业生态[29-30]。

（3）核心能力构建：通过数据实证结合规则豁免的合规实践，特斯拉构建了以数据飞轮、软件快速迭代和规则适配创新为核心的敏捷进化能力体系。其优势体现在3方面：一是搭建覆盖全球多场景的智能驾驶数据闭环治理体系；二是依托海量真实道路数据，实现AI模型高效定向迭代与系统性能持续优化的工程能力；三是基于量化实证数据与监管机构开展技术性合规论证，突破传统合规范式局限，主动适配并反向推动行业合规规则迭代完善的战略能力。

3.5.3 合规战略分化对产业生态的塑造

宝马与特斯拉的合规实践揭示了2种不同的合规响应模式。宝马依托现有工程与供应链体系，将合规要求整合至产品质量控制与规模化生产流程，以此构建竞争壁垒；特斯拉则基于原生软件与数据优势，利用实证数据重构安全验证范式，旨在通过合规实践为技术法规和标准制修订提供实证基础。上述分化预示着产业竞争格局的结构性演变。企业合规实践案例对比如表4所示。

表4 企业合规实践案例比较分析

维度	模式一：框架内卓越	模式二：边界重塑	产业启示
与法规关系	适应性遵循：优化流程，实现高效准入	构建性挑战：数据论证驱动规则调整，参与规则构建	法规成为战略博弈场域，合规论证能力成为核心竞争力
安全范式	基于过程的确定性安全：通过安全设计与验证，确保系统行为可预测、可验证	基于结果的统计性安全：通过大规模实证，证明系统整体风险低于基准	安全评估从预设场景的过程可控转向开放环境的整体性能证明
核心能力构建	体系化集成与治理：全生命周期系统工程、全球法规协同、高可靠量产体系	数据驱动与敏捷进化：全球数据闭环治理、AI模型迭代、规则塑造	产业竞争升维为定义技术合规方式的生态位之争
向高阶演进	能力渐进迁移：以现有高可靠工程与安全体系为基础	范式自然延伸：数据、端到端AI架构与整车OTA能力为高阶系统原生设计	2条路径：升级传统汽车工业体系或构建软件数据生态

3.6 UN R171实施的多维产业挑战

UN R171在提升安全基准的同时，其工程化范式也产生了多重结构性挑战。

（1）法规原则性与合规一致性的矛盾。现行法规部分条款仍具原则性，缺乏细化的技术评估细则。这导致在不同企业与监管机构的合规实践中，可能产生技术解读与验收尺度上的差异。这种执行层面的不确定性，不仅提高了企业全流程合规的显性成本，更引入因验证方法接受度、监管尺度差异而带来的额外时间与风险管理成本，长期可能重塑产业生态的竞争格局，影响其多样性与创新节奏[31]。

（2）静态规则与AI技术演进的不适配。法规“规则导向、预设行为”的逻辑，与数据驱动、持续进化的AI技术路径之间存在冲突[32]。尽管02系列修正案引入了“非规则基础算法”条款，但其评估标准仍处于探索阶段[24]，使创新企业在算法性能与合规性之间面临权衡，或依赖个案豁免。

（3）关键技术指标缺失与验证瓶颈。法规在关键性能量化要求上存在不足。例如，驾驶员状态监测系统仅规定了监测逻辑与响应时序，但未对系统的检测率、误报率等核心性能指标提出可验证的量化要求[4,33]。此外，作为核心证据来源的大规模仿真验证，其模型可信度与结果互认在执行时仍面临操作性难题[4-5]，削弱了安全验证的可信度。

（4）全球监管协同滞后导致的效率挑战。当前，中国、欧盟、美国在DCAS监管路径上仍存在差异。推动以UN R171等技术规范为共同基准的深度协同，是降低企业全球合规复杂性与成本、促进创新技术同步

部署的关键。

综上所述，化解上述挑战需企业构建适应强监管环境的技术体系，也需要监管机构完善“安全底线-技术创新”的动态治理机制。

4 DCAS至ADS的能力迁移逻辑与构建路径

智能网联汽车产业正经历从合规性准入向系统性工程能力构建的战略转型。本章基于行业实践，解析高标准DCAS合规对核心工程能力的塑造机制，阐明其向ADS迁移的路径分化，并构建“合规驱动型能力构建”理论模型。

4.1 能力同源的工程基础

UN R171、UN R185（ADS）等法规确立了强制性的系统安全框架。通过分析企业为满足合规要求而进行的合规实践，梳理出以下ADS所需的共性核心能力：

（1）ODD的形式化定义能力。法规对系统边界、人机交互、安全降级与退出机制等安全要求，指引企业对其系统的能力边界与行为逻辑进行前置和准确的工程化定义，为ADS所需的可解释ODD管理及其安全论证提供了形式化基础。

（2）全生命周期的证据化治理能力。多支柱符合性评估，要求企业建立覆盖概念设计、验证确认及部署后监测的完整证据链。该流程化、可追溯的治理体系及其配套工具链，可直接复用于ADS复杂的安全论证过程。

（3）数据驱动的闭环迭代能力。事件监测与报告制度将安全治理从单点验证延伸为“数据采集-风险识别-OTA更新”的持续闭环。该机制构建了企业利用真实世界数据优化系统安全性能的核心能力，构成了ADS安全演进的基础运行逻辑。

4.2 能力构建的演进路径

基于前述共性的工程基础，受技术与资源禀赋影响，企业在合规实践中演化出两类差异化能力构建路径：

（1）路径1：体系化集成。该路径多见于具备深厚工程积淀的企业。此类企业将法规视为高阶工程规范，通过解码与内化，将合规要求融入现有研发流程、质量控制及全球认证体系。其产出为标准化、可复制的高可靠性工程体系，竞争优势源于质量稳定性与规模化效益。

（2）路径2：敏捷性突破。该路径多见于以软件和数据为核心竞争力的科技企业。此类企业将合规视为技术模式的极限验证与规则适配训练。其策略侧重于利用大规模实证数据整体论证系统安全性，并主动介入规则制定。其产出为基于数据闭环与快速迭代的自适应技术体系。

4.3 合规驱动型能力构建的启示

综合上述分析，本文构建“合规驱动型能力构建”模型（图9）。

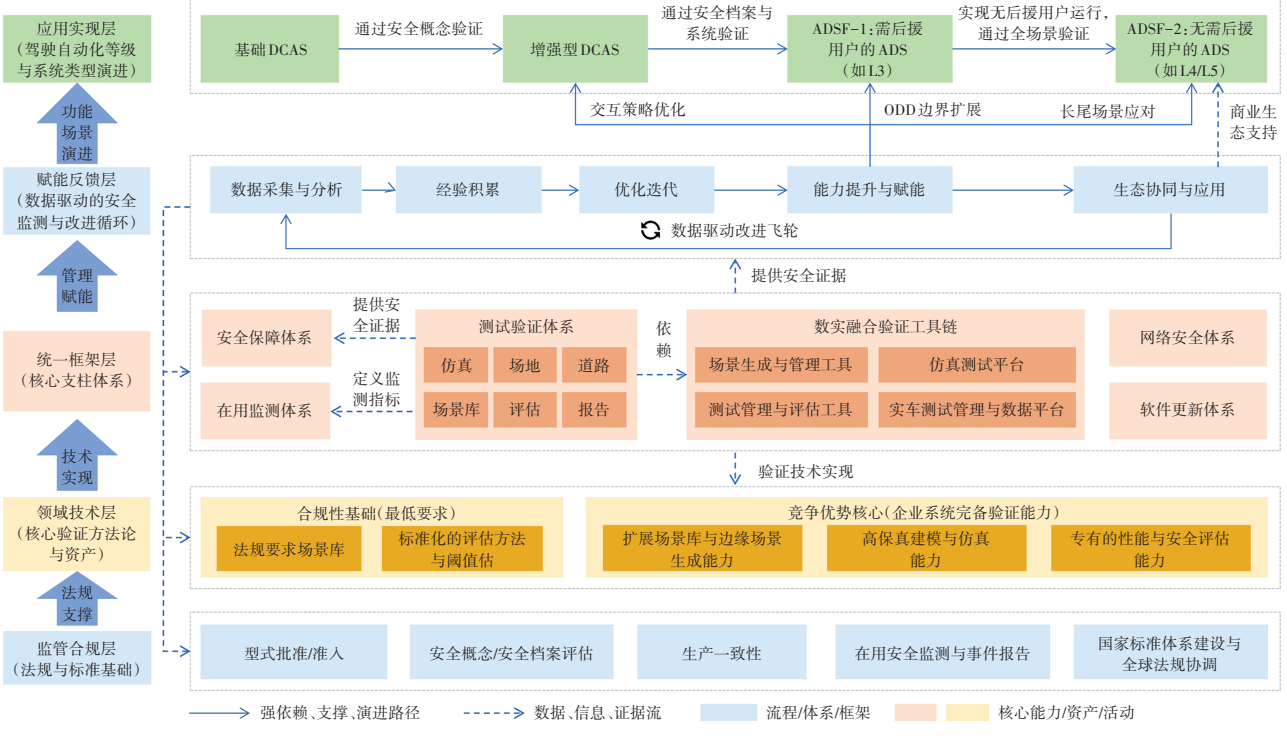


图9 合规驱动型能力构建模型

该模型揭示了从监管约束向企业能力资产的传导逻辑：以工程化法规为强制性输入，驱动企业合规实践。该过程系统性地锻造了系统边界的精确建模与定义、全生命周期的证据化治理，以及数据驱动的闭环进化等核心工程能力。企业基于自身特点选择演进路径，将上述能力分别转化为体系化集成资产或敏捷性突破资产，前者构筑短期竞争壁垒，后者支撑长期技术优势。

因此，DCAS的高标准合规并非被动成本，而是企业在自动驾驶技术演进中关键的战略性能力预投资，其深层价值在于引导企业超越有限、静态的符合性评估，主动选择与自身禀赋相符的路径，从而将合规的刚性约束，内化为构筑自身独特长期优势（体系化集成或敏捷性突破）的战略框架。

5 结论与展望

本研究通过对UN R171法规体系的解构与实践分析，论证了高标准DCAS合规已超越被动的准入任务，演变为驱动企业构建面向ADS系统性工程能力的战略过程。这一过程的核心逻辑体现在以下2个方面。

一方面，合规实践确立了确定性建模、证据化治理与数据驱动闭环3项核心工程能力，这不仅满足了当前DCAS的安全要求，其工程方法论、工具链与治理体系可直接适配并实现迭代升级。除此之外，以上能力还有助于应对ADS更为复杂的安全论证、运行监测与持续进化挑战，奠定其向更高驾驶自动化等级迁移的工程基础。另一方面，企业基于自身技术特点与资源优势，在此过程中分化为“体系化集成”与“敏捷性突破”2条战略路径。前者通过内化合规要求强化高可靠性工程体系，确立质量与规模效应优势；后者则将合规博弈视为技术验证与规则塑造过程，旨在获取未来技术生态的主导权。

基于此，本文构建的“合规驱动型能力构建”模型，展现了从“监管输入”到“战略资产”的传导机制，揭示了企业战略路径分化的内在逻辑。除此之外，本研究提出双对策。对企业而言，关键在于实施“能力导向型合规”战略，即在满足准入要求之初，便以构建面向未来的ADS能力基座为愿景，主动将合规要求系统性转化为可复用、可审计、可迁移的核心工程资产。对监管体系而言，则需在筑牢安全底线与激发创新活力之间寻求更高阶的动态平衡，其核心在于完善对“非规则基础算法”等创新范式的评估方法，并积极推动核心安全要求的国际协调，为产业技术创新提供稳定、可预期的制度环境。

展望未来，相关研究可沿以下方向深化：一是构建DCAS至ADS能力迁移的标准化工具链与量化评估体系；二是深入探究全球监管范式差异对技术路线收敛与产业竞争格局的长期塑造机制；三是前瞻性地探索面向端到端自动驾驶、大模型驱动决策等颠覆性技术范式的安全监管方法论。

参 考 文 献

[1] 中国汽车工业协会，中国汽车工业经济技术信息研究所有限公司．2025城市NOA汽车辅助驾驶研究报告[R]．北京：中国汽车工业协会，2026.

[2] UNECE. UN Regulation No. 171-Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to Driver Control Assistance Systems (DCAS) [S]. Geneva: UNECE, 2024.

[3] UNECE. UN Regulation No. 171 (01 series)-Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to Driver Control Assistance Systems (DCAS) [S]. Geneva: UNECE, 2025.

[4] UNECE. UN Regulation No. 171 (02 series of amendments)-Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to Driver Control Assistance Systems (DCAS)[S]. Geneva: UNECE, 2025.

[5] UNECE. Proposal for a New United Nations Regulation on Uniform Provisions Concerning the Approval of Motor Vehicles with Regard to Their Automated Driving Systems[S]. Geneva: UNECE, 2026.

[6] 公安部道路交通安全研究中心．智慧领航，安全护航——智能网联汽车辅助驾驶功能使用须谨慎[EB/OL]. (2025-04-17) [2026-02-04]. https://mp. weixin. qq. com/s/CevY6cISi7Lk0VioiSu8gQ.

[7] European Commission. Commission Delegated Regulation (EU) 2025/1122 of 5 June 2025 amending Regulation (EU) 2019/2144 of the European Parliament and of the Council to Take into Account Regulatory Developments Concerning Amendments to UN Regulations Nos 25, 34, 79, 100, 117, 127 and 152, and the new UN Regulations Nos 167, 169 and 171 Adopted by the World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations of the United Nations Economic Commission for Europe [EB/OL]. (2025-08-12) [2026-02-15]. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2025/1122/oj.

[8] 工业和信息化部，市场监管总局．工业和信息化部 市场监管总局关于进一步加强智能网联汽车产品准入、召回及软件在线升级管理的通知[EB/OL]. 工信部联通装

〔2025〕45号. (2025-02-28) [2026-02-04]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2025-02/28/content_7000000.htm

[9] UNECE. UN Regulation No.157 (01 series of amendments)-Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to Automated Lane Keeping Systems[S]. Geneva: UNECE, 2025.

[10] 工业和信息化部. 关于加强智能网联汽车生产企业及产品准入管理的意见[EB/OL]. (2021-07-30)[2026-02-10]. https://www. miit. gov. cn/jgsj/zbys/wjfb/art/2021/art_7cb8a0949a8e45c5979c0f73788d1184.html.

[11] 工业和信息化部, 公安部, 住房和城乡建设部, 等. 关于开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作的通知[EB/OL]. (2023-11-17) [2026-02-10]. https://www. miit. gov.cn/jgsj/zbys/wjfb/art/2023/art_4a67648dc58e483bab554f97045a8579.html.

[12] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 智能网联汽车 组合驾驶辅助系统安全要求: GB 47955—2026 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2026.

[13] 工业和信息化部. 中华人民共和国工业和信息化部公告(2026年第1号):关于修订《道路机动车辆生产企业准入审查要求》和《道路机动车辆产品准入审查要求》的公告[EB/OL]. (2026-01-12) [2026-02-04]. http://www.gov.cn/zhengce/2026-01/21/content_7000001.htm.

[14] 冯莉, 朱云尧, 吴胜男, 等. 智能网联汽车L2部分驾驶自动化监管体系研究[J]. 汽车文摘, 2024(7): 32-36.

[15] National Highway Traffic Safety Administration. Federal Motor Vehicle Safety Standards; Modernization of FMVSS No. 135 to Accommodate ADS-Equipped Vehicles [NPRM]. Federal Register, 2026, 91(124): 38593-38612. FR Doc. 2026-12981.

[16] NHTSA. Standing General Order 2021-01: Automated Driving Systems and Level 2 Driver Assistance Systems Incident Reporting[EB/OL]. (2021-06-29) [2026-04-6]. https://www. nhtsa. gov/laws-regulations/standing-general-order-crash-reporting.

[17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 汽车驾驶自动化分级: GB/T 40429—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

[18] ISO. Road Vehicles — Functional Safety: ISO 26262: 2018[S]. Geneva: ISO, 2018.

[19] ISO. Road Vehicles — Safety of the Intended Functionality: ISO 21448:2022[S]. Geneva: ISO, 2022.

[20] 陈贞, 杨强, 李国俊, 等. 2级驾驶自动化系统安全测试与评估方法[J]. 汽车技术, 2024(11): 22-30.

[21] UNECE. ADAS-40-04 (EC) Audit DCAS vs ADS[R/OL]. (2025-07-28) [2026-02-04]. https://wiki. unece. org/display/trans/ADAS+-+40th+session.

[22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 智能网联汽车 组合驾驶辅助系统技术要求及试验方法 第1部分: 单车道行驶控制: GB/T 44461.1—2024 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.

[23] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 智能网联汽车 组合驾驶辅助系统技术要求及试验方法 第2部分: 多车道行驶控制: GB/T 44461.2—2024 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.

[24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 智能网联汽车 自动驾驶功能仿真试验方法及要求: GB/T 47025—2026 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2026.

[25] LIAO L W, YAN W H, XU W, et al. Learning-Based 3D Reconstruction in Autonomous Driving: A Comprehensive Survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2025: 1-19.

[26] 周时莹, 陈霞, 张东波, 等. 基于大语言模型的智能驾驶测试用例自动生成系统[J]. 汽车文摘, 2025(10): 6-18.

[27] BMW Group. Neue Klasse: SMART, SAFE, SYMBIOTIC: BMW is First to Receive DCAS Approval in Germany[EB/OL]. (2025-11-14) [2026-04-05]. https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2025/dcas-approval.html.

[28] BMW Group. Automated Driving[EB/OL]. [2026-04-05]. https://www.bmwgroup.com/en/innovation/automated-driving.html#foundation-of-modern-driving.

[29] Tesla, Inc. Full Self-Driving (Supervised) Vehicle Safety Report[EB/OL]. (2025-10-22) [2026-04-05]. https://www.tesla.com/fsd/safety.

[30] SINGH K. Netherlands Authority Confirms Tesla FSD is in Final Approval Stage[EB/OL]. (2026-03-23) [2026-04-05]. https://www.notateslaapp.com/news/3833/netherlands-authority-confirms-tesla-fsd-is-in-final-approval-stage.

[31] 燕翔江, 林强, 党利冈. 自动驾驶产业政策发展研究[J]. 汽车文摘, 2025(2): 44-51.

[32] 翟强, 程洪, 黄瑞, 等. 智能汽车中人工智能算法应用及其安全综述[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(4): 481-488.

[33] 季昕, 李艳, 翟芹, 等. 眼动技术在评估汽车驾驶安全中的应用[J]. 人类功效学, 2025(4): 80-86.

（责任编辑　**明慧**）