

# 智能网联汽车 测试与评价技术

ZHINENG WANGLIAN  
QICHE  
CESHI YU PINGJIA JISHU

白帅伟 李玉吉 陈标



◆「十四五」汽车类精品课程规划教材

◆汽车类高素质技术技能人才“理实一体化”系列教材



ZHINENG WANGLIAN  
QICHE  
CESHI YU PINGJIA JISHU



中南大学出版社  
www.csupress.com.cn

智能网联汽车 测试与评价技术

白帅伟 李玉吉 陈标

中南大学出版社  
www.csupress.com.cn

# 目 录

## 项目一 智能网联汽车概述

任务一	智能网联汽车相关定义及概念 .....	1
任务二	智能网联汽车技术的现状 .....	5
任务三	智能网联汽车的测试与评价概述 .....	11

## 项目二 智能网联汽车的测试与评价方法

任务一	测评目的 .....	18
任务二	通用测试原理 .....	19
任务三	常见测试方法 .....	26
任务四	常见评价方法 .....	35

## 项目三 智能网联汽车软件的测试与评价

任务一	智能网联汽车软件测评技术框架 .....	45
任务二	智能网联汽车终端测评技术 .....	46
任务三	智能网联汽车网络测评技术 .....	66
任务四	智能网联汽车服务系统测评技术 .....	84

## 项目四 智能网联汽车硬件的测试与评价

任务一	智能网联汽车传感器测试与评价 .....	106
任务二	智能网联汽车控制器测试与评价 .....	123

## 项目五 智能网联汽车安全性能的测试与评价

任务一	智能网联汽车信息安全测试与评价 .....	134
-----	-----------------------	-----



任务二 智能网联汽车 CAN 总线信息安全测试方法 ..... 137

任务三 车载以太网防护技术 ..... 142

## 项目六 试验场地的测试与评价

任务一 试验场地的测试与评价现状 ..... 149

任务二 封闭试验场地的测试 ..... 152

任务三 开放道路的测试 ..... 204

参考文献 ..... 215

# 项目一 智能网联汽车概述

## 知识目标 >>>

1. 掌握智能网联汽车的定义；
2. 了解智能网联汽车技术发展现状；
3. 掌握智能网联汽车评价内容。

## 能力目标 >>>

1. 能够对智能网联汽车进行分级；
2. 能够区分传统汽车与智能网联汽车评价的不同点。

## 素质目标 >>>

1. 养成自主学习的意识；
2. 树立正确的理想信念。

## 案例引入 >>>

2018年3月9日晚，美国亚利桑那州一条普通的公路。一起并不寻常的车祸就这么发生了：一名女性在过马路时被一辆SUV撞倒并最终死亡。它不寻常的一点在于，这辆撞人的SUV事发时是处于无人驾驶状态，而该无人驾驶系统由Uber开发。尽管车内当时有一名安全驾驶员，但车祸还是发生了。这起事故，被认为是世界上第一起自动驾驶汽车撞人死亡案件。事故的发生让人们质疑智能网联汽车，随后亚利桑那州警方要求Uber停止其无人驾驶项目。受其影响，Uber在坦佩、旧金山、匹兹堡及多伦多都停止了它的无人驾驶项目。那么无人驾驶汽车属于智能网联汽车吗？怎样才能保障智能网联汽车的安全性呢？

## 任务一 智能网联汽车相关定义及概念

智能网联汽车作为一种新生事物，概念尚无定论。国内外企业和研究机构已从不同侧重点提出了智能汽车、无人驾驶汽车、车联网、车路协同系统、智能交通系统等与智能网联汽车相关的范畴。智能网联汽车的界定需要与这些概念加以区分。

### 一、智能汽车

按照《智能汽车手册》的定义，智能汽车是指“能够自主完成部分驾驶任务或辅助驾驶员更有效地



完成驾驶任务，实现更安全、更高效和更环保行驶的车辆”。国内采用欧美对车辆自动化的分类体系来定义智能汽车，通常不将“智能”与“自动化”两个概念加以区分。目前流行的分类方法包括国际自动机工程师协会（SAE，原译为“美国汽车工程师协会”）定义的6级分类方法和美国高速公路安全管理局（NHTSA）的5级分类方法，这两类方法本质上差异不大。根据NHTSA的定义，汽车的智能化水平从低到高分为5个层次：纵向控制（加减速）和横向控制（转向）均由驾驶员完成的车辆无智能化，定义为第0级；纵向或横向控制中有一个能由车辆完成的车辆定义为第1级；纵向和横向控制都能由车辆完成，但驾驶员需要时刻监督驾驶任务的车辆定义为第2级；驾驶员不需要时刻监督驾驶任务，但在特定的工况下需要驾驶员接管车辆控制权的车辆定义为第3级；全工况下都不需要驾驶员介入的车辆定义为第4级。在第4级中，汽车可对交通环境进行全程实时检测，实现完全无人操作下的车辆行驶与控制，这是智能汽车发展的最高形态。

具有智能功能的汽车增加雷达、摄像头等先进传感器、控制器、执行器等装置，通过车载环境感知系统和信息终端实现与车、路、人等的信息交换，使车辆具备智能环境感知能力，能够自动分析车辆行驶的安全及危险状态，实现替代人来操作的目的。智能汽车结构如图1-1所示。

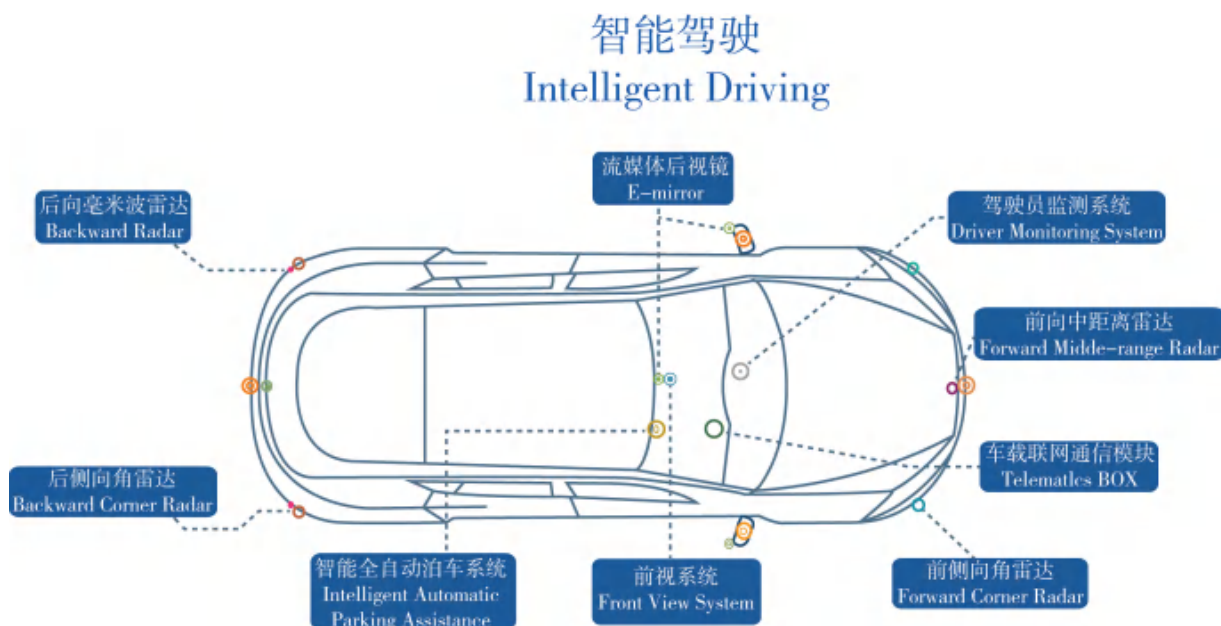


图 1-1 智能汽车结构

## 二、无人驾驶汽车

国内认为无人驾驶汽车为“通过车载传感系统感知道路环境，自动规划行车路线并控制车辆到达预定目标的智能汽车”。但是无人驾驶汽车本身并不是一个严谨的概念，可以将它简单地理解为具备高度智能化水平（NHTSA 定义的第4级）的智能汽车（表1-1），即通过车载环境感知系统感知道路环境，自动规划和识别行车路线并控制车辆到达预定目标的智能汽车。它利用环境感知系统来感知车辆周围环境，并根据感知所获得的道路状况、车辆位置和障碍物信息等，控制车辆的行驶方向和速度，从而使车辆能够安全、可靠地在道路上行驶。无人驾驶汽车是传感器、计算机、人工智能、无线通信、导航定位、模式识别、机器视觉、智能控制等多种先进技术融合的综合体（图1-2）。

表 1-1 智能汽车定义分级

自动驾驶分级		名称 (SAE)	SAE定义	主体			
NHTSA	SAE			驾驶操作	周边监控	支援	系统作用域
0	0	无自动化	由人类驾驶者全权操作汽车, 在行驶过程中可以得到警告和保护系统的辅助	人类驾驶者	人类驾驶者	人类驾驶者	无
1	1	驾驶支援	通过驾驶环境对方向盘和加减速中的一项操作提供驾驶支援, 其他的驾驶动作都由人类驾驶员进行操作	人类驾驶者、系统			部分
2	2	部分自动化	通过驾驶环境对方向盘和加减速中的多项操作提供驾驶支援, 其他的驾驶动作都由人类驾驶员进行操作	系统	系统	系统	
3	3	有条件自动化	由无人驾驶者完成所有的驾驶操作。根据系统请求, 人类驾驶者作出适当的应答				
4	4	高度自动化	由无人驾驶者完成所有的驾驶操作。根据系统请求, 人类驾驶者不一定需要对所有的系统请求作出应答, 限定道路和环境条件等				
	5	完全自动化	由无人驾驶者完成所有的驾驶操作。人类驾驶者在可能的情况下接管。可在所有的道路和环境条件下驾驶	全域			

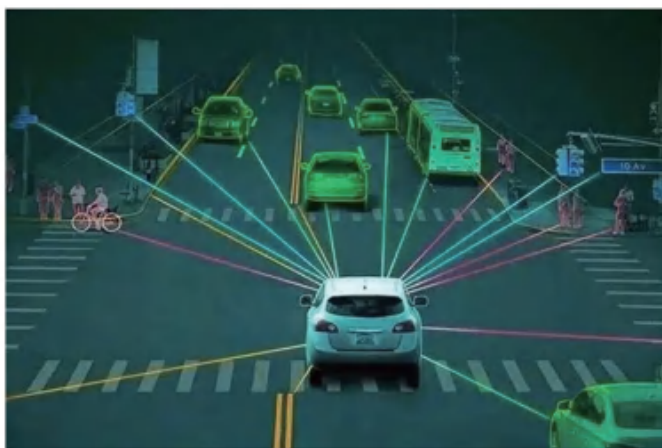


图 1-2 无人驾驶汽车

### 三、车联网技术

传统意义的车联网是指装载在车辆上的电子标签通过无线射频等识别技术, 在信息网络平台上实现对所有车辆的属性信息和静、动态信息的提取和有效利用, 并根据不同的功能需求对所有车辆的运行状态进行有效监督和提供综合服务的系统。

现在的车联网是以车内网、车际网和车载移动互联网为基础, 按照约定的体系架构及通信协议和数据交互标准, 实现 V2X (V 代表汽车, X 代表车、路、行人及应用平台等) 无线通信和信息交换, 以实现智能化交通管理、智能动态信息服务和车辆智能化控制的一体化网络。车联网架构如图 1-3 所示。车内网是指通过应用成熟的总线技术建立一个标准化的整车网络; 车际网是指基于特定无线局域网的动态网络; 车载移动互联网是指车载单元通过 4G/5G 等通信技术与互联网进行无线连接。三网融合是车联网的发展趋势。

这个由车辆和网络构成的系统通过 GPS、RFID、传感器和摄像头等装置, 完成自身环境和状态信息的采集; 再通过物联网技术, 将所有车辆的各种信息传输汇聚到中央处理器; 通过计算机技术, 处理大量的车辆信息, 从而计算出不同车辆的最佳路线、及时汇报路况并安排信号灯周期。它为交通管理者提供决策支持, 为车辆与车辆、车辆与道路提供协同控制, 为交通参与者提供信息服务。



图 1-3 车联网架构

#### 四、智能交通系统

智能交通系统是未来交通系统的发展方向，它是将先进的信息技术、计算机处理技术、数据通信技术、传感器技术、电子控制技术、运筹学、人工智能等有效地集成运用于整个地面交通管理系统而建立的一种在大范围内全方位发挥作用的实时、准确、高效的综合交通运输管理系统。智能交通系统如图 1-4 所示。



图 1-4 智能交通系统

智能交通系统范围包含道路上的车辆和各种交通设施，强调系统平台通过智能化方式对交通环境下的车辆及交通设施进行智能化管理和控制，并提高交通效率。

智能交通系统是随着车联网技术的发展而不断发展的，车联网的终极目标就是智能交通系统。

#### 五、智能网联汽车

智能网联汽车是一种跨技术、跨产业领域的新兴汽车体系，从不同角度、不同背景来理解它都是有差异的。各国对智能网联汽车的定义不同，叫法也不尽相同，但终极目标是一样的，即可上路安全行驶的无人驾驶汽车。

智能网联汽车是搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等装置，并融合现代通信与网络技术，实现 V2X 智能信息交换共享，具备复杂环境感知、智能决策、协同控制和执行等功能，可实现安全、舒适、节能、高效行驶，并最终可替代人来操作的新一代汽车。同时智能网联汽车是以车辆为主体和主要节点，

融合现代通信和网络技术，使车辆与外部节点实现信息共享和协同控制，如图 1-5 所示。



图 1-5 智能网联汽车

智能汽车、智能网联汽车、无人驾驶汽车、智能交通系统、车联网之间有密切相关性，但没有明显分界线，它们的关系可用图 1-6 表示。

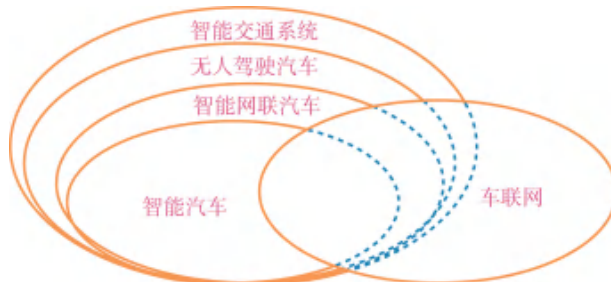


图 1-6 智能网联汽车相关概念的关系

智能网联汽车是智能交通系统中的智能汽车与车联网交集的产品。智能网联汽车是车联网的重要组成部分。智能网联汽车的技术进步和产业发展有利于支撑车联网的发展。车联网系统是智能网联汽车、智能汽车的最重要载体，只有充分利用互联技术才能保障智能网联汽车真正拥有充分的智能和互联。智能网联汽车更侧重于解决安全、节能、环保等制约产业发展的核心问题。

智能网联汽车与车联网应该并行推进，协同发展。智能网联汽车依托车联网，不仅要通过技术创新连接互联网，还能使 V2X 之间实现多种信息交互与共享，提高智能网联汽车的行驶安全性。

从更为广义的角度来看，智能网联汽车已不是特指某类或单个车辆，而是以车辆为主体和主要节点，由车辆、道路基础设施、通信设备、交通控制系统以及数据存储与处理系统等共同构成的综合协调系统，是未来智能交通系统下车联网环境中发挥着重要作用的智能终端，最终实现车辆“安全、高效、舒适、节能”行驶的新一代多车辆系统。

## 任务二 智能网联汽车技术的现状

### 一、智能网联汽车技术国外发展现状

#### 1. 国外智能网联汽车发展的相关政策

随着智能网联技术的发展，各国纷纷加速布局，智能网联汽车战略地位凸显。目前，以美国、日本及欧盟等为代表的全球主要发达国家和地区，都将智能网联汽车作为汽车产业发展的重要方向，纷纷加





快产业布局、制定发展战略，通过政策支持、技术研发、标准法规出台、示范运行等综合措施，加快推动产业化进程。

美国方面，2015年，美国交通运输部发布《美国智能交通系统（ITS）战略计划（2015—2019年）》（以下简称“ITS战略”），明确了美国ITS战略升级为网联化与智能化双重发展的战略。2016年，美国交通运输部发布《联邦自动驾驶汽车政策指南》，将自动驾驶的安全监管首次纳入联邦法律框架。2017年，美国交通运输部发布《自动驾驶系统2.0：安全愿景》，鼓励各州重新评估现有的交通法律法规，为自动驾驶技术的测试和部署扫除法律障碍。2018年10月，美国交通运输部发布《自动驾驶汽车3.0：准备迎接未来交通》，继续致力于推动自动驾驶技术与地面交通系统多种运输模式的安全融合。2020年3月，美国交通运输部发布《智能交通系统（ITS）战略规划（2020—2025年）》，明确了“加速应用ITS，转变社会运行方式”的愿景，以及“领导智能交通系统的合作和创新研究、开发和实施，以提供人员通勤和货物运输的安全性和流动性”的使命，描述了美国未来五年智能交通发展的重点任务和保障措施。

日本方面，2013年，日本内阁发布日本复兴计划《世界领先IT国家创造宣言》，其中智能网联汽车成为核心之一。以此为蓝本，日本内阁制定国家级科技创新项目《SIP战略性创新创造项目计划》，其中自动驾驶系统的研发也上升为国家战略高度，并提出自动驾驶商用化时间表和《ITS 2014—2030技术发展路线图》，计划在2020年建成世界最安全道路，在2030年建成世界最安全和最畅通道路。2014年，日本内阁制定《SIP（战略性创新创造项目）自动驾驶系统研究开发计划》，制定四个方向共计32个研究课题，推进基础技术以及协同式系统相关领域的开发与实用化。2017年，日本内阁发布的《2017官民ITS构想及路线图》中的自动驾驶推进时间表公布，2020年左右在高速公路上实现自动驾驶3级，2级以上卡车编队自动走行，以及特定区域内用于配送服务的自动驾驶4级。2018年3月，日本政府发布《自动驾驶相关制度整備大纲》，明确自动驾驶汽车的责任划分，原则上由车辆所有者承担赔偿责任，将自动驾驶汽车与普通汽车同样对待，而外部黑客入侵汽车系统导致事故的损害由政府赔偿。2018年9月，日本国土交通省发布《自动驾驶汽车安全技术指南》，明确规定了L3、L4级自动驾驶汽车所必须满足的10大安全条件。

欧盟方面，2010年，欧盟委员会制定《ITS发展行动计划》，该计划是欧盟范围内第一个协调部署ITS的法律基础性文件。2014年，欧盟委员会启动Horizon 2020项目，推进智能网联汽车研发。2015年，欧盟委员会发布《GEAR 2030战略》，重点关注高度自动化和网联化驾驶领域等推进及合作。2016年，欧盟委员会通过“合作式智能交通系统战略”，旨在推进2019年在欧盟成员国范围内部署协同式智能交通系统（C-ITS）服务，实现V2V、V2I等网联式信息服务。2018年5月，欧盟委员会发布《通往自动化出行之路：欧盟未来出行战略》，明确到2020年在高速公路上实现自动驾驶，2030年进入完全自动驾驶社会。

## 2. 国外智能网联汽车技术的发展

随着智能网联汽车对上游产业需求量的不断增加，国外各大企业纷纷技术革新，这也成为智能网联汽车发展的强大驱动力。首先计算技术的变革推动硬件成本快速下降、运算时间大幅缩短，另外人工智能算法的集成创新也提高了准确性及运算效率，为智能网联汽车的发展提供了基础。美国、日本及欧盟等汽车发达国家和地区在智能网联汽车关键技术上具有一定的领先优势。英伟达凭借在深度学习训练平台领域的优势，推出自动驾驶处理器Xavier，运算性能可达到30 TOPS（万亿次/秒），而功耗仅为30 W。英特尔通过一系列并购与投资打造了由CPU、FPGA、EyeQ、5G构成的通信和计算平台。奥迪于2017年发布了全球首款L3级自动驾驶量产车A8（图1-7）。通用汽车也加大了在新兴技术方面的投入，2018年旗下凯迪拉克CT6搭载了Super Cruise（超级巡航）辅助驾驶技术，并宣布于2019年上线自动驾驶服务，甚至直接取消方向盘和刹车踏板。谷歌一直深耕自动驾驶技术，2018年9月Patent Result发布的全球自动驾驶技术专利竞争力排名中，谷歌以2815分居首。与此同时，整个产业链的合作日益加强，汽车与电子、通信等技术深度融合成为重要发展趋势。博世联合英伟达开发出基于人工智能技术、可大规模量产的车载计算平台，每秒可进行30万亿

次的深度学习运算，并可实现 L4 级的自动驾驶。德尔福联合 Mobileye 力图推出市场上首个 L4/L5 级自动驾驶系统，在 2019 年实现量产。国外典型车企智能网联汽车发展状况见表 1-2。



图 1-7 奥迪发布 L3 级自动驾驶量产车 A8

表 1-2 国外典型车企智能网联汽车发展状况

车企	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2025 年以后
宝马		部分自动驾驶				有条件 自动驾驶	完全自动驾驶
沃尔沃	部分自动驾驶					高度/完全 自动驾驶	
奥迪		部分自动驾驶	有条件 自动驾驶			高度/完全 自动驾驶	
奔驰	部分自动驾驶				高度/完全 自动驾驶		
通用			部分自动驾驶	有条件 自动驾驶			
福特		部分自动驾驶				高度/完全 自动驾驶	
丰田		部分自动驾驶			有条件 自动驾驶		
日产	部分自动驾驶		有条件 自动驾驶				

## 二、智能网联汽车技术国内发展现状

### 1. 国内智能网联汽车发展的相关政策

我国高度重视智能网联汽车发展，智能网联汽车成为关联众多重点领域协同创新、构建新型交通运输体系的重要载体，并在塑造产业生态、推动国家创新、提高交通安全、实现节能减排等方面具有重大战略意义，已经上升到国家战略高度。工业和信息化部、交通运输部、科学技术部、国家发展改革委、公安部等部委出台的一系列规划、政策及标准等推动了我国智能网联汽车



的发展（表 1-3）。

表 1-3 国内智能网联汽车发展的相关规划、政策及标准等

时间	发布机构	规划、政策及标准等	主要内容或作用
2016 年	中国汽车工程学会、中国智能交通联盟	启动 ADAS 相关标准研究与制定工作	主要包括 AEB、LKA、DSB、自动泊车等标准，并发布了 C-NCAP 的详细试验及评分方案
2016 年	交通运输部	《营运客车安全技术条件》(JT/T 1094—2016)	要求 9 m 以上的营运客车加装车道偏离预警系统 (LDWS) 及符合标准的自动紧急制动系统 (AEBS)
2017 年	中国智能网联汽车产业创新联盟	《合作式智能交通系统 车用通信系统应用层及应用数据交互标准》(T/CSAE 53—2017)	填补了国内 V2X 应用层标准的空白
2017 年	工信部、国家标准委	《国家车联网产业标准体系建设指南 (智能网联汽车)》	明确智能网联汽车标准体系建设的指导思想、基本原则、建设目标和标准体系框架
2018 年 1 月	国家发展改革委	《智能汽车创新发展战略》(征求意见稿)	从智能网联汽车顶层设计、战略规划、标准法规等多方面深入推进产业发展
2018 年 4 月	工信部、交通运输部、公安部	《智能网联汽车道路测试管理规范 (试行)》	明确道路测试的管理要求和职责分工，规范和统一各地方基础性检测项目和测试规程
2018 年 6 月	工信部、国家标准委	《国家车联网产业标准体系建设指南 (总体要求)》	全面推动车联网产业技术研发和标准制定，促进自动驾驶等新技术新业务加快发展
2018 年 10 月	工信部	《车联网 (智能网联汽车) 直连通信使用 5905-5925 MHz 频段管理规定 (暂行)》	规划 5905-5925 MHz 频段作为 LTE-V2X 技术的车联网 (智能网联汽车) 直连通信的工作频段
2018 年 7 月	交通运输部	《自动驾驶封闭场地建设技术指南 (暂行)》	国家出台的第一部关于自动驾驶封闭测试场地建设的规范性文件
2019 年	赛迪研究院政策法规研究所	《2019 智能网联汽车政策法律研究报告》	梳理国外的政策法律修订进程，分析国外的智能网联汽车规则，从交通规则、经营规则、法律责任分析了智能网联汽车对我国既有规则的冲击，给出了我国智能网联汽车政策法律修改的六点建议
2021 年 7 月	工信部、公安部、交通运输部	《智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范 (试行)》	推动汽车智能化、网联化技术应用和产业发展，规范智能网联汽车道路测试与示范应用

2020 年《智能网联汽车技术路线图 2.0》显示，智能网联汽车在顶层设计方面的发展目标：一是中国方案智能网联汽车发展战略形成，并逐渐成为国际汽车发展体系重要组成部分；二是政策法规体系、技

术标准体系、产品安全体系、运行监管体系建成并不断完善；三是汽车与交通、信息通信等产业相互赋能、协同发展，新型产业生态体系形成，智能网联汽车、智能交通、智慧城市深度融合。

可见智能网联汽车现已成为支撑国家自动驾驶产业规划、推动行业技术创新、引导社会资源集聚的重要行业，它为中国汽车产业紧抓历史机遇、加速转型升级、支撑制造强国建设指明发展方向，提供决策参考。

预计 2025 年中国标准智能汽车体系全面形成，2035 年中国标准智能汽车享誉全球，率先建成智能汽车强国，全民共享“安全、高效、绿色、文明”的智能汽车社会。

## 2. 国内智能网联汽车技术的发展

近年来，在国家相关政策的支持下，国内整车企业在智能网联领域也均有各自的发展规划。例如，一汽集团目前已布局手机交车、自主泊车、拥堵跟车和自动驾驶四项功能（图 1-8），在 2020 年发布高速公路代驾产品以及深度感知和城市智能技术，计划在 2025 年实现智能商业服务平台运营，高度自动驾驶技术整车产品渗透率在 50% 以上；上汽集团初步实现了 120 km/h 速度下的自动巡航、车道保持、换道辅助、自主超车及远程遥控泊车等功能，在 2020 年实现高速公路上的自动驾驶；广汽集团目前开发的自动驾驶汽车初步实现了城市环境下的部分自动驾驶功能，2025 年拟实现综合环境下全自动驾驶，并实现产业化应用。



图 1-8 一汽智能汽车

国内零部件企业和信息通信企业也在智能网联汽车领域取得了长足进步。在毫米波雷达、激光雷达等传感器领域，涌现出如安智汽车、行易道、隼眼科技、智波科技、速腾聚创、禾赛科技、北科天绘和巨星科技等企业；在自动驾驶算法开发领域，驭势科技、易航智能、主线科技、图森未来和智行者等科技公司已开展实车测试；在车联网领域，以华为和大唐为代表的中国通信设备供应商已能提供实施方案，并且联合整车企业开展了实际道路测试；此外，以百度和阿里巴巴为代表的互联网巨头也已经进入智能网联汽车领域，并分别发布了“阿波罗”和“阿里云”车载系统；同时百度、高德和四维图新等地图企业开始了高精地图的采集和研发工作。

中国汽车技术研究中心有限公司等科研机构开发了 ADAS 性能样车和自动驾驶汽车，并在国内相关赛事中表现出色，军事交通学院、清华大学等高校也屡获佳绩。目前，以 AEB/LKA 系统控制器、车载 T-BOX 终端为代表的车规级零部件已经逐渐实现了量产。

满足多种自动驾驶等级测试需求的智能网联性能测试封闭场地在全国多地建成并投入使用。2018 年 4 月，工信部、公安部和交通运输部联合发布了《智能网联汽车道路测试管理规范（试行）》，明确了测试主体、测试驾驶人及测试车辆应符合的条件，为国内智能网联汽车道路测试提供了重要的指导建议。北京、上海、重庆和深圳等多个城市相继公布了各自的智能网联汽车道路测试管理规定。尽管中国在智能网联汽车的发展方面取得了显著进步，但是总体仍然面临核心技术缺失和创新氛围不够的问题。



### 三、智能网联汽车技术的发展前景

智能网联汽车技术的发展或将引领全球汽车产业进行深刻的变革。通用、奔驰等知名车企以及谷歌、苹果等互联网巨头纷纷布局智能网联汽车。与此同时，从知名咨询公司高德纳咨询公司的技术生命周期预测情况以及近期异常活跃的资本市场投融资大事件来看，智能网联汽车技术正处于产业期望值的巅峰，有着良好的发展前景。

目前全球范围内自动驾驶技术还没有达到 5 级完全智能的水平。谷歌自动驾驶技术（图 1-9）正在更多的道路环境中测试，但仍未达到商用化的 4 级水平，也仅是在有人监控的前提下进行无人驾驶实测，还未能适应所有路况。当前大部分厂商的自动驾驶技术仅能达到 2 级水平阶段，即实现部分自动化水平。根据高德纳咨询公司的预测，无人驾驶汽车成长为具有高影响力商用技术至少需要 10 年。全环境下自动驾驶 5 级预计将在 2030 年左右才能实现。强劲的发展势头将使车载硬件行业最先受益，传统车企仍然掌握汽车生产资质和整车控制集成的核心竞争力，科技公司则凭借在人工智能、人机交互方面的优势抢占部分市场份额。辅助驾驶阶段带动先进驾驶辅助系统（ADAS）快速发展，在当前 2 级水平阶段，ADAS 系统有望先行普及，2020 年渗透率超过 30%，市场规模接近 2000 亿美元。车联网将在应用端催生巨大价值，应用端价值将成为车联网价值的重要部分。根据普华永道的数据，车联网应用在移动管理、车辆管理、娱乐系统、个人健康与安全、自动驾驶安全、家庭互联等领域的价值，从 2015 年的 31.87 亿欧元增长至 2020 年的 115.20 亿欧元。未来智能网联汽车会有强劲的势头带动相关领域的技术发展。



图 1-9 谷歌自动驾驶技术

### 四、我国智能网联汽车示范内容与国外的主要差距

我国一汽、上汽、通用等一批车企已布局无人驾驶汽车产业，百度、乐视等互联网巨头也加入了无人驾驶研发队伍，同时出现驭势科技、图森未来这样的智能驾驶初创公司。在国内无人驾驶示范项目中，目前仍以乘用车应用为主，商用车领域做了少量尝试。作为一项破坏性的技术创新，无人驾驶汽车必须通过长时间、各种复杂路况条件下的实际道路测试才能有望成熟，进而进入商用化阶段。而在这方面，我国显然与国外相比存在较大差距，主要体现在三大方面：示范项目的实际路测里程、各种复杂路况和向公众开放程度。

#### 1. 实际路测里程

以百度为首的国内企业虽然目标激进，但实测里程数对比特斯拉、谷歌等国外企业存在很大差距，导致技术成熟度和稳定性有待检验。特斯拉、谷歌无人驾驶汽车分别用数十亿公里及数百万公里实测里程证明它们的技术是安全的（2016 年 9 月，装配有自动驾驶系统 Auto-pilot 的特斯拉汽车在全球多地多种路况及天气状况下的行驶里程超过 20.9 亿 km；2016 年 5 月，谷歌无人驾驶车队在自动驾驶模式下行

驶了 265 万 km)。反观同时期国内无人驾驶领头羊百度，其公开了在北京城市、环路及高速道路混合路况下路测，以及在桐乡市开放城市道路路测这两次有代表性的示范项目，但并没有公开其无人驾驶汽车的累计测试里程。而乐视、图森未来、驭势科技等后起新秀的实测里程数也没公布。

## 2. 各种复杂路况

在各种复杂路况、天气及极端条件下进行测试往往是国外示范项目考虑的重要因素，而国内尚缺乏这样的示范项目。特斯拉 20.9 亿 km 实测里程中包括了城市繁华路段、建筑工地等各种具有挑战性的路况。谷歌与菲亚特克莱斯勒合作的插电混动小货车一直在密歇根州切尔西试验场（图 1-10）和亚利桑那州尤卡测试场（图 1-11）进行测试，其中包括了 200 小时的极端环境测试。而在国内，现有示范项目中能代表最复杂路测环境的当属百度 2016 年开展的 18 辆无人驾驶车辆在乌镇开放城市道路的测试项目，此项目被认为推进了无人驾驶从封闭研发测试环境走向公开城市道路运营环境的进程。



图 1-10 切尔西试验场

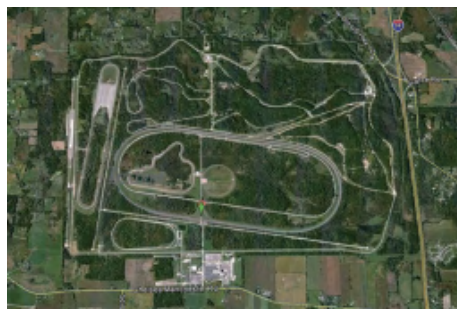


图 1-11 尤卡测试场

## 3. 向公众开放程度

无人驾驶汽车要想真正走向市场，示范项目的测试范围必须是向公众开放的，体验是提高公众接受度最好的办法，然而，国内的示范项目恰恰缺乏公众体验环节。全球首次对公众开放的无人驾驶车是美国 NuTonomy 公司（一家从麻省理工学院分离出来的、专门开发无人驾驶出租车的创业公司）于 2016 年 8 月在新加坡正式上路的出租车，公众可以使用 NuTonomy App 申请无人驾驶出租车的打车体验。同月，Uber（美国科技公司，打车应用 Uber 开发商）在无人驾驶领域又迈出重要一步，正式在美国匹兹堡市向公众开放无人驾驶汽车出行服务，在主要道路上接送真实乘客。

# 任务三 智能网联汽车的测试与评价概述

为了保证车辆安全性和良好的行驶性能，车辆在研发阶段都要测试，测试被核准的车辆才能上路。本任务介绍传统汽车和智能网联汽车的测试与评价，主要包括汽车的整车性能测试、发动机测试、底盘测试、电控系统测试等。其中，汽车的整车性能测试包括动力性能、燃料经济性、制动性能、操纵稳定性、车轮侧滑量、前照灯及尾气等内容的测试。

## 一、传统汽车的测试与评价

### 1. 汽车动力性能测评

该项目是测试汽车在良好的路面上直线行驶时，在纵向外力的操纵下所能达到的平均行驶速度。通过最高车速、加速时间和爬坡能力（图 1-12）三个指标评定汽车动力性能。汽车动力性能可在道路或台



架上进行试验，道路试验主要是测定最高车速、加速时间和爬坡能力等评价参数，台架试验可测量汽车的驱动力和各种阻力。在室内检测汽车动力性能时，因为要用驱动车轮输出功率或驱动力，所以必须在底盘测功试验台上进行。

汽车动力性能试验使用的设备主要是底盘测功机，如图 1-13。底盘测功机具有以下几项功能：底盘输出功率测试；最高车速测试；加速、滑行测试；车速、里程表校验；油耗测试；高速下制动性能检测；后桥差速锁试验；在用汽车多工况排放污染物测试；汽车技术状况检测；故障诊断等。其能够检测反映汽车动力性能的一些指标，如驱动轮输出功率、驱动力、滑行距离、最高车速、加速能力、爬坡能力、传动系传动效率等。底盘测功机采用滚筒替代路面，用加载的方法模拟道路阻力，用飞轮模拟汽车的惯性，以使用室内试验方法代替道路试验。



图 1-12 爬坡能力测试



图 1-13 底盘测功机示意图

## 2. 汽车燃料经济性测评

燃料经济性评价指标用单位行驶里程（比如行驶 100 km）的燃料消耗量来表示。按照试验方法的不同，燃料经济性试验可分为等速行驶燃料消耗量试验、加速行驶燃料消耗量试验、多工况燃料消耗量试验、限定条件下的平均使用燃料消耗量和不限定条件下的平均使用燃料消耗量试验等。按照试验时对各种因素的控制程度进行分类，又可分为不控制的道路试验、控制的道路试验、道路上的循环试验和底盘测功机上的循环试验。燃料消耗量可以通过道路试验和室内模拟道路试验来测定。

在燃料消耗量测定试验中主要测量车速、距离、时间及燃料消耗量等参数。道路试验测量燃油消耗量时，车速、距离和时间的测量采用第五轮仪或非接触式车速仪（图 1-14）；而室内模拟道路试验测量燃油消耗量时，则采用底盘测功机来模拟汽车行驶时的道路。燃料消耗量的检测仪器均使用油耗仪，它可以测量某一段时间间隔或某一里程内流体通过管道的总体积或总质量。



图 1-14 第五轮仪和非接触式车速仪

### 3. 汽车制动性能测评

在汽车行驶时，能在短距离内停车且维持行驶方向的稳定，下长坡时维持一定车速，以及保证汽车长时间停驻坡道的能力即为制动能力。评价参数主要包括汽车制动力、制动距离、制动减速度、制动协调时间及制动时的方向稳定性。汽车制动性能测试分为台架测试和路试。现行汽车制动性能的测试标准按国家标准《机动车运行安全技术条件》中的相关规定执行。只要测试指标符合测试标准，则认为汽车制动性能合格。

### 4. 汽车操纵稳定性测评

汽车操纵稳定性分为两个方面：一是操纵性，指的是汽车能够确切地响应驾驶员转向指令的能力；二是稳定性，指的是汽车受到外界扰动后恢复原来运动状态的能力。我国《汽车操纵稳定性试验方法》和《汽车操纵稳定性指标限值与评价方法》中规定汽车操纵稳定性试验包括：稳态回转试验、转向瞬态响应试验、转向瞬态转向试验、转向回正性试验、转向轻便性试验、蛇形试验等。常用的汽车操纵稳定性试验仪器有陀螺仪、光束水准四轮定位仪（图 1-15）、车辆动态测试仪、力矩及转角仪、五轮仪、磁带机等。另外，前轮侧滑对汽车的操纵稳定性影响较大。侧滑量太大会引起很多不良后果，包括汽车行驶方向不稳、转向沉重、增加轮胎磨损、加大燃油消耗，甚至会导致交通事故。所以侧滑检测也是必不可少的检测项目之一，可以通过滑板试验台进行检测，如图 1-16。国家标准规定，机动车转向轮的横向侧滑量，使用滑板试验台检测时，应在 $-5\sim 5$  m/km 之间。



图 1-15 光束水准四轮定位仪



图 1-16 滑板试验台

### 5. 汽车发动机测评

汽车发动机综合性能测试包括发动机功率检测、气缸密封性检测、点火系统检测、燃料供给系统检测、润滑系统检测、冷却系统检测和异响检测。测试时采用专用的连接装置将发动机固定到专用试验台架上并接上所需的电、气、水、油以及一些设备，常用设备有测功器、油耗仪、控制发动机油门的执行机构，以及各种转速、温度、压力测量传感器和二次仪表等。现代先进的试验台架如图 1-17，一般都将常用的设备和测量仪器、仪表集成在一个控制台上，利用计算机和控制软件对发动机的工况进行控制和处理。

### 6. 底盘测评

汽车底盘的技术状况直接关系到汽车行驶的操纵稳定性和安全性，同时还影响发动机的动力传递和燃油消耗。汽车底盘包括传动系、行驶系、转向系和制动系四个系统，所以应进行传动系游动角度检测、车轮定位检测、转向盘自由行程和转向阻力检测、车轮平衡度检测和悬架装置检测等。常用的检测设备有底盘测功试验台、传动系游动角度检测仪、四轮定位仪、滑板试验台、制动试验台、车轮动平衡仪、





图 1-17 发动机试验台架

悬架和转向系检测仪、悬架装置检测台等。

### 7. ABS 系统测评

现在汽车上的电子控制系统越来越多，所以对车辆电控系统的检测也提出了新的要求。车辆的电控系统包括发动机、底盘、车身的电子控制，例如电子燃油喷射系统、制动防抱死控制（ABS）、防滑控制、牵引力控制、电子控制悬架及电子动力转向等。

ABS 系统是车辆制动时防止车轮抱死的一种装置，可以提高汽车制动过程中的操纵稳定性，缩短制动距离。对 ABS 的评价主要依据其性能评价，目前对 ABS 性能的评价在国内外尚无统一的标准。国外汽车 ABS 的评价方法主要为道路试验法，较权威的是欧洲的 ECE R13 法规。我国标准《机动车和挂车防抱制动性能和试验方法》（GB/T 13594—2003）也是参照欧洲 ECE R13 制定的，是目前我国对汽车 ABS 性能检测的主要技术依据。

对 ABS 系统测评时，应注意：不能导致制动失效或损害它的功能、性能、用途和强度；必须满足安装在汽车上的环境要求；ABS 要满足前后轮对称制动或前后轮对角制动系统；ABS 接收传感器信号后，能独立控制 4 个车轮（或后轮低选控制）的制动轮缸的液压；ABS 正常工作，受控车轮不抱死，其性能要求符合 GB/T 13594—2003。

### 8. CAN 总线测评

对 CAN 总线测评时，既要检查 CAN 总线节点设备是否符合设计规范，又要检查集成后的 CAN 总线系统是否满足初始需求。单个节点设备测试能确定节点工作正常并且不会干扰总线的正常通信。总线系统集成测试则是将各个节点都连接起来以形成完整的 CAN 网络；对集成后的系统进行测试以验证整个系统运行的完整性和正确性，系统的通信鲁棒性、电气鲁棒性，以及系统的容错自恢复功能等。

不论是单个节点测试还是系统集成测试，测试的内容按照通信层次的不同可分为：

#### (1) 物理层测试

验证 CAN 节点及 CAN 总线网络在电路设计、物理电平特性等方面的性能，保证节点能够正确接入总线。

#### (2) 数据链路层测试

测试单个节点的数据链路层参数，确保 CAN 网络集成后总线通信性能的一致性。

#### (3) 应用层测试

包括应用层协议的测试、网络管理功能测试和故障诊断测试等方面的内容。通过此测试检测每个 CAN 节点是否按照系统的 CAN 总线通信规范实现了应用层协议，是否实现了相应的诊断功能，以及

CAN 网络集成后的网络管理功能是否达到了要求。

### 9. 纯电动汽车整车性能测试项目

根据国家标准（GB）以及 ISO、SAE、EAT、JEVS 等国际标准进行电动汽车整车运行检测试验的基本项目归纳起来可以分为动力性能、经济性、制动性能、操纵稳定性及整车运行可靠性等几大类。整理出来的细项有：①试验样车登记及外观检查；②磨合行驶；③主要技术参数测量；④技术状况行驶检查及里程表校正；⑤安全及环保项目；⑥动力性试验；⑦能量消耗率和续驶里程试验；⑧汽车操纵稳定性试验；⑨密封性试验；⑩噪声测量；⑪平顺性试验；⑫电动汽车电场和磁场的测量试验；⑬可靠性行驶试验。

## 二、智能网联汽车的测试与评价

### 1. 智能网联汽车测试与评价的必要性

汽车成为人们生活不可或缺的工具，从蒸汽汽车到智能网联汽车，汽车工业已经发生了很大变化。随着智能网联汽车技术的不断发展，它在给人们带来便捷的同时，也带来了交通安全等一系列的社会问题。智能网联汽车从独立的机械单元向智能化、网联化发展，特别是随着车载辅助系统、车内网、车际网和车云网的迅速发展，形成了一个复杂的系统，传动、线控、导航、人机工程学、信息等技术的进步要求嵌入式系统有严格的质量保证措施。另外，高等级自动驾驶和无人驾驶以自动驾驶系统替代驾驶员，这些车辆必须能够证明其具备不低于人类驾驶员的驾驶水平和驾驶安全性，所以智能网联汽车的测试与评价是高等级自动驾驶和无人驾驶车辆进入实际应用的前提和基础。图 1-18 为测试中的智能网联汽车。



图 1-18 测试中的智能网联汽车

### 2. 智能网联汽车主要测评内容

#### (1) 功能和性能要求

功能测试是根据产品业务需求和产品行业特征，模拟用户操作方式来测试某个产品的特性以确定它是否满足用户需求。

智能网联汽车是由多项子系统组合而成。各项子系统具备怎样的功能，在特定的环境下能否实现，系统集成后具备怎样的功能，能否实现，都需要进行测评。智能网联汽车按照智能化和网联化的程度不同，对车辆进行了等级划分。所以智能网联汽车功能测试，不仅要确定车辆的功能是否达标，还要根据车辆的分级，确定不同等级的车辆自动化程度和网联化程度是否达标。驾驶辅助系统的功能测试是针对一个驾驶场景或驾驶片段，测试系统功能是否符合设计要求，对于高等级自动驾驶和无人驾驶车辆来说，测试是针对其目标运行环境下的整个驾驶过程，除了测试系统功能是否符合设计要求外，功能完备性是一个更为重要的考核指标。



性能测试则是通过某种特定的方式对被测试系统按照一定的测试策略进行测试，以获取该系统的响应时间、运行效率、资源利用情况等各项性能指标，从而评价系统是否满足用户性能需求的过程。对于高等级自动驾驶和无人驾驶车辆来说，需要评价系统的驾驶性能和安全性是否高于人类驾驶员。

### (2) 智能网联汽车信息安全

信息安全是指信息系统（包括硬件、软件、数据、人、物理环境及其基础设施）受到保护，不受偶然的或者恶意的原因而遭到破坏、更改、泄露，系统能连续、可靠、正常地运行，信息服务不中断，最终实现业务连续性。当前，外部环境安全隐患突出。智能网联汽车产业已进入技术快速演进、产业加速布局的新阶段，新产品、新业态、新模式不断涌现，以智能网联汽车为载体的产业多样化服务伴随着大量信息资产产生。随着汽车与外部的互联互通程度不断增强，一旦攻击者利用高危漏洞，除了对本车及车主造成安全威胁，还有可能蔓延至其他车辆，甚至可能威胁公共安全乃至国家安全，攻击者还能获取大量利益。近年来智能网联汽车信息安全事件频发，外部环境安全隐患日益突出，根据业界领先的研究咨询公司高德纳预计，网联车的数量在 2020 年前达到 2.5 亿辆。与此同时，重载卡车所搭载的网联技术也在日渐增多，包括车队监控车联网、实时导航、电子记录设备等。但目前人们对这些新技术的安全性依然充满担忧，担心新技术会让车辆容易受到网络攻击。为迅速解决卡车的安全性问题，Upstream Security 公司研发出了一个基于云的网络安全平台。该公司的《2020 年全球汽车网络安全报告》指出，汽车制造行业的互联网攻击快速增长，全行业遭遇的威胁愈来愈广泛。数据显示自 2016 年到 2020 年 1 月，汽车网络安全事件的年安全事故总数提升了 605%，仅在 2019 年就提升了 1 倍左右。按照目前发展趋势，随着汽车联网率不断提升，安全问题会更加突出。

2020 年底，中国软件评测中心参考 ISO/SAE 21434《道路车辆——信息安全工程》、20191065-T-339《汽车信息安全通用技术要求》、20191069-T-339《车载信息交互系统信息安全技术要求》、GB/T 34975—2017《信息安全技术 移动智能终端应用软件安全技术要求和测试评价方法》等，结合攻击场景进行威胁分析，基于现有的渗透技术和汽车信息安全测试工具，寻找攻击路径。智能网联汽车的信息安全问题主要来源于汽车可以连接网络、与外界通信，成为网络中的节点。所以，目前重点关注的攻击路径均围绕与汽车网联化相关的点展开。在不损坏车辆、不拆解车辆、黑盒测试的前提下，给出用户侧渗透测试指标，主要包括车载信息交互安全、车内外通信安全、接口安全、App 安全等方面。

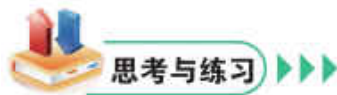
### (3) 智能网联汽车功能安全

功能安全是指避免由系统功能性故障导致的不可接受的风险。功能安全关注系统故障后的行为，而不是系统的原有功能或性能。智能网联汽车从基础的安全气囊、安全带系统到基于雷达、摄像头和底盘控制的紧急制动辅助、自适应巡航等主动安全系统，再到驾驶员状态监控系统以及最终的自动驾驶，无不包含了大量的电子器件和控制软件。智能网联汽车系统的复杂性和高集成度，使系统失效和随机硬件失效存在可能，导致汽车安全事故发生的风险加大。

为规避汽车系统的安全风险，车辆在系统投入使用前必须经过严格的测评。ISO 26262 功能安全标准是测评智能汽车功能安全的标准，也是目前非常前沿的标准，它从工业功能安全标准 IEC 61508 转化而来。该标准对产品的整个生命周期进行评估，即从需求开始到概念设计、软件设计、硬件设计，再到最终的生产、操作，整个生命周期都提出了严格的要求，以保证与安全相关的电子产品的功能性失效不会造成危险的发生。其严苛主要体现在两方面：一方面，工程师需要根据新的标准改变设计思路；另一方面，其颁发认证证书的流程也非常严格。

ISO 26262 标准的要求和以往不同，它不是在最终阶段才开始测试，而是从产品的需求阶段就介入，这时候工程师就要考虑需要是否正确；接着是概念设计阶段以及软硬件架构、生产、操作阶段，这都需要层层确认是否符合要求。在这个过程中每个环节的人员都要参与，因此过程非常复杂，要求相当严格。

当在驾驶过程中发生内部故障时，无人驾驶车辆的汽车运算系统应能够安全地停车或继续安全驾驶。因此尽管汽车运算系统 SoC 比早先的 SoC 更大规模且功能更复杂，能够在短时间内高速处理大量来自摄像头和其他传感器的数据，但依然需要具备一定的安全机制。检测硬件故障的方法包括重复逻辑和自测试等。对于这些大型 SoC 而言，复杂的功能和频繁的运行很难对所有功能进行重复逻辑运算。而如果要对大型 SoC 进行可靠性高的自测试，就必须长时间关闭自动驾驶及其他操作所需的相关功能。



### 一、填空题

1. 国内认为无人驾驶汽车为“通过\_\_\_\_\_感知道路环境，\_\_\_\_\_并控制车辆到达预定目标的智能汽车”。
2. 汽车动力性能测试与评价是指用\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_三个指标评定汽车动力性能。
3. 功能安全是指避免由\_\_\_\_\_的不可接受的风险。
4. 信息安全是指信息系统（包括硬件、软件、数据、人、物理环境及其基础设施）受到保护，不受偶然的或者恶意的原因而遭到\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_，系统能连续、可靠、正常地运行，信息服务不中断，最终实现业务连续性。
5. 功能测试是根据产品业务需求和产品行业特征，模拟用户操作方式来测试\_\_\_\_\_以确定它是否满足用户需求。

### 二、简答题

1. 纯电动汽车整车性能测试项目有哪些？
2. 智能汽车的定义是什么？
3. 《2019 智能网联汽车政策法律研究报告》的主要内容是什么？
4. 简述智能网联汽车测试的必要性。

# 项目二 智能网联汽车的测试与评价方法

## 知识目标

1. 了解智能网联汽车测评目的；
2. 掌握智能网联汽车常见的测试方法；
3. 掌握智能网联汽车常见的评价方法。

## 能力目标

1. 能够对智能网联汽车测试方法分类；
2. 能够对智能网联汽车评价方法分类。

## 素质目标

1. 通过智能网联汽车测评培养学生大国崛起自信、民族自信；
2. 培养科学严谨的工作作风与精益化生产的工匠精神。

## 案例引入

2022年，新能源智能网联汽车如雨后春笋般大量涌现，如何对智能网联汽车进行有效测试与量化评价成为如今摆在所有购车者面前的严峻问题。如何对即将上市智能网联汽车进行测试？如何对即将上市智能网联汽车进行评价？

## 任务一 测评目的

对于汽车，测评目的有各种各样的分类方法，例如有按照测评对象分类（整车测评、零部件测评、总成测评等）的方法和按照测评设备分类（台架测评、实车测评等）的方法等。这里仅仅举例说明常见的测评目的及其关注点。

### 一、符合性测评

对于符合性的定义，在不同的标准中表述有所不同，如在 GB/T 17694—2009《地理信息 术语》中，符合性是指全部指定的要求均得到满足，而在 GB/T 17548—2008《信息技术 POSIX 标准符合性的测试方法规范和测试方法实现的要求和指南》中，符合性被定义为产品、过程或服务所实现的所有规定的符合性要求。这里涉及的符合性指的是产品、过程或服务等活动及有关结果是否符合指定的规范要求。

本书涉及的符合性测评多指的是标准符合性测评。标准符合性测评是依据一个标准的描述对标准的某个实现进行测试，判别一个标准的实现与所对应的标准描述是否相一致。GB/T 20000.1—2014《标准化工作指南第1部分：标准化和相关活动的通用术语》中，标准的定义是“通过标准化活动，按照规定的程序经协商一致制定，为各种活动或其结果提供规则、指南或特性，供共同使用和重复使用的文件”。根据符合性测试的结果可以评价该实现是否符合既定的目标。若由结果认定目标没有实现，则须对进行标准符合性测试的对象进行修正改进。标准符合性测评是用于测量产品的功能、性能指标与相关国家标准或行业标准所规定的功能和性能指标之间符合程度的活动。它有别于一般的测评，标准符合性测评的依据和规程一定是国家标准或行业标准，而不是实验室自定义的或其他的、非正式的相关规范要求。

### 二、比对测评

比对测评是为了比较各种汽车的性能而进行的测试与评价活动。一般来说，需要选取两个或两个以上的对象，选取一个变量作为测评的物理量，需要在其他条件一致或基本相同的前提下进行，例如各种汽车专业杂志进行的各种汽车性能比较活动，汽车主管部门为了以公告形式向消费者提供各类汽车的排放、油耗信息而进行的测试活动。当然，也有在汽车设计初始阶段，作为决定质量目标的一种信息来源，对竞争对手的车的性能进行调查、比较研究的测评活动。

比对测评最重要的目标是通过两个或两个以上对象的对比结果进行分析，获得或探究某种因素与对象之间的关系，并将之作为某种选择或决定的依据。例如，在汽车 ECU 控制软件开发过程中，为了检验和评估所开发的或自动代码生成的控制器代码与所设计逻辑的一致程度，往往需要通过比对测评的方式，测量代码模块与设计控制器模型在不同设定输入条件下的输出结果，并根据一定的差异许可范围评价所获得的控制器代码是否实现了设计的功能。例如，目前在符合国际汽车功能安全标准 ISO26262 规定的软件开发过程中，在采用基于模型的自动代码生成开发方式中，采用代码与模型的一致性对比测评，可以将代码安全审查的工作转移到模型安全审查和工具安全审查上，因而大大降低了开发方承担的工作量和难度。

### 三、研发测评

研发测评是为了改进汽车性能和开发产品而进行的测试与评价活动。一般来说，大学、研究所或汽车制造厂商、汽车零部件厂商、汽车电子厂商进行的研究或开发测评属于此范畴。为了适应市场对汽车性能、功能的要求和用户需求的多样化，研发阶段的测试与评价涉及范围非常广，为了适应新技术还需要不断地制订新的测试与评价方法。

研发测评最重要的目标是在最初阶段就把相应的质量问题或安全问题考虑进去，以便可以直接把研发设计阶段的成果作为生产的模板，如成本，这就要求在研发阶段进行一定量的模拟测试和实车测试。值得注意的是，研发测评不仅仅是为了证明产品能够实现既定功能，还要尽可能多地发现产品中的错误和缺陷，而且这种发现越早越好。这样更改产品设计的成本更低。理想情况下，通过所有研发测评意味着车辆开发能够最终定型，因此，对于研发测评来说，最重要的是保障有效性、客观性和完整性。

## 任务二 通用测试原理

测试主要涉及两个方面：一是测量；二是试验。测量侧重于测量工具的使用以及处理与分析从测量中所获取的数据，而试验侧重于通过设置环境来探测产品、设备某项最优性能或是否满足某项性能。如



何使用测量工具和进行相应的数据处理不是本任务关注的重点。本任务简要介绍在探测产品、设备某项最优性能或是否满足某项性能时测试方案的常用设计方法和相应测试环境设置应遵循的数学原理——相似原理。

### 一、测试方案设计方法

测试方案设计是以概率论与数理统计为理论基础，经济地、科学地安排测试的一项科学技术，其主要内容是讨论如何合理地安排测试方案和正确地分析测试数据，以用尽量少的测试次数尽快地达到测试的目的。测试方案设计实际上是测试优化技术，它通过在测试过程中运用各种不同的数学方法来达到测评目标以及实现测评过程的最优化，从而达到节省人力、物力、时间的目的。本任务在这里仅仅介绍几种常见的测试方案设计方法。

#### 1. 单因素测试方案设计

单因素测试是指影响测评的主要因素只有一个，一般在改进汽车性能和开发产品时进行，根据生产和科研中的不同问题，利用数学原理，合理地安排测试，优化测试流程。通常可以运用常见的一维寻查法（如序贯实验的平分法、斐波那契法、黄金分割法、三点二次插值法等）逼近或获取最优。

#### 2. 多因素测试方案设计

当影响因素较多时，即需要进行多因素测试方案的设计。一般常采用正交设计法，也可在一轮或多轮多因素测试后找到其中的主要影响因素并进行较为细致的单因素测试，用一维寻查法求其最优化结果。

正交设计法又叫正交法或正交试验设计法，是安排和分析多因素测试方案的一种科学试验方法。它是人们的生产实践经验、有关的专业知识和概率论与数理统计为基础，利用一套根据数学上的“正交性”原理而编制的并已标准化了的表格——正交表来科学地安排测试方案和对测试结果进行计算、分析，找出最优或较优的生产条件或工艺条件等的数学方法。简言之，它是一种使用正交表安排测试并对结果进行统计分析，迅速找出优化方案的科学方法。它可以成倍地减少测试次数，提高效率，缩短测试周期，并可对多因素测试项目做比较全面的考核。

#### 3. 疲劳测试/寿命试验方案设计

模拟零部件使用载荷对零部件直接进行疲劳测试以确定零部件的疲劳强度与寿命的方法称为疲劳测试/寿命试验设计方法。

一般常说的疲劳测试主要是指金属疲劳测试，主要测定金属及其合金材料在室温状态下的拉伸、压缩或拉、压交变负荷的疲劳性能。一般来说，在足够大的交变应力的作用下，于金属构件外形突变、表面刻痕或内部缺陷等部位，都可能因较大的应力集中而引发微观裂纹。分散的微观裂纹经过集结、沟通将形成宏观裂纹。已形成的宏观裂纹逐渐缓慢地扩展，构件横截面逐步削弱，当达到一定限度时，构件会突然断裂。这种金属因交变应力引起的失效现象称为金属疲劳。金属疲劳测试就是测定金属材料疲劳极限的方法。

寿命试验是研究产品寿命特征的方法，这种方法可在实验室环境下模拟各种使用条件来进行。寿命试验是可靠性试验中最重要、最基本的项目之一，它是将产品放在特定的试验条件下考察其失效（损坏）随时间变化的规律。通过寿命试验，可以了解产品的寿命特征、失效规律、失效率、平均寿命以及在寿命试验过程中可能出现的各种失效模式。如结合失效分析，可进一步弄清导致产品失效的主要失效机理，以此作为可靠性设计，可靠性预测，改进产品质量，以及确定合理的筛选、例行（批量保证）试验条件等的依据。如果为了缩短试验时间，可在不改变失效机理的条件下用加大应力的方法进行试验，这就



是加速寿命试验。通过寿命试验可以对产品的可靠性水平进行评价，并通过质量反馈来提高新产品的可靠性水平。

#### 4. 攻防测试方案设计

攻防测试主要是指在信息安全领域通过模拟各种攻击手段来检测系统信息安全防护能力的测试。常见的有渗透测试——指为了对一个目标网络的安全性进行实际检查，进行带有攻击性行为的全面的安全压力测试。渗透测试是一个在评估目标主机和网络的安全性时模仿黑客特定攻击行为的过程。详细地说，是指安全工程师尽可能完整地模拟黑客使用的漏洞发现技术和攻击手段，对目标网络的安全性做深入的探测，发现系统最脆弱环节的过程。测试过程中，会采用各种手段和途径，包括端口扫描、漏洞扫描、密码猜测、密码破解、数据窃听、伪装欺骗等技术方式，最终目的就是检验该网络各个环节的安全性。

## 二、相似理论

相似的概念在科学研究及工程设计中起着十分重要的作用。目前，在工程技术领域中，一般都能接触到与相似有关的问题。对于具有许多物理量变化的现象，相似是指表述此种现象的所有量在空间中相对应的各点及在时间上相对应的各瞬间互成一定的比例关系。相似理论是将描述物理现象的微分方程进行相似变换，以得到无因次数群之间的关系式的方法。它与因次分析方法一样，是一种指导实验研究的方法，广泛用于汽车、航空、航海、水利、建筑等工程学科的实验研究。在汽车工程领域，它一般主要用于指导实验室条件下的仿真、模拟测试环境的建设，常常涉及几何相似、运动相似和动力相似等方面，是对相关测试技术的形成和发展起过重要作用的一种研究方法。

相似的概念起源于几何学中，例如两个三角形的对应角相等，则其对应边长度之比值必相等，这两个三角形称为几何相似。在几何相似的系统中，若各对应点或对应部位上各相应物理量之比值相等，则这些系统为物理相似。

早在1687年牛顿就在《自然哲学的数学原理》一书中讨论了流体运动相似的条件，并预见了相似论这一学科的创立。1822年，法国物理学家傅里叶在研究热传导时提出了热相似的概念。但他们提出的流体运动相似和热相似，都还是就个别情况而言的。直到1848年，法国贝特朗以力学方程式的分析为基础，首次阐明了相似现象的基本性质，提出了相似第一定理，即凡相似的现象，其相似准数的数值相等。

此后，有许多学者将它应用于声学、流体力学、航空动力学的研究，以相似准数的形式来处理实验数据。比如英国科学家雷诺在研究管流的规律时，以雷诺数作为确定流动状态为层流还是湍流的判据。后来俄国学者费捷尔曼和美国学者白金汉分别导出了相似第二定理，该定理指出：可以用相似准数与同类量比值的函数关系来表示微分方程的积分结果。

1930年，苏联科学家基尔皮契夫和古赫曼提出的相似第三定理指出：现象相似的充分必要条件是单值条件相似及由单值条件组成的相似准数相等。至此，相似论形成了一门完整的学科。

### 1. 相似第一定理

相似第一定理：对于相似的现象，其相似指标等于1（或者说其相似准数的数值相等）。

#### (1) 相似性质

①相似现象能够用完全相同的方程式/方程组来描述。大多数物理现象表现为微分方程的形式。如质点运动方程：

$$v = \frac{dl}{dt} \quad (2-1)$$

$$f = m \frac{dv}{dt} \quad (2-2)$$





②用来表示现象的一切物理量，在空间上对应的各点和时间上，相对应的瞬间各自互成一定的比例关系。

③各种相似参数的选择不能随心所欲，而是要服从某些自然规律。例如，设第一现象的物理量为  $l$ 、 $t$ 、 $v$ ，第二现象的物理量为  $l'$ 、 $t'$ 、 $v'$ 。第一现象  $v = dl/dt$  和第二现象  $v' = dl'/dt'$ ，它们的相似常数是  $l'/l = C_l$ 、 $t'/t = C_t$ 、 $v'/v = C_v$ ，根据相似常数有  $C_v C_t / C_l \cdot v = dl/dt$ 。

如果两个现象相似，则有：

$$C = \frac{C_v C_t}{C_l} \quad (2-3)$$

相似指标说明相似常数不能任意选择，它必须遵循相似第一定理，即相似指标等于 1 的约束。

## (2) 相似准则

无因次的综合数群称为相似准则。这里通过牛顿第二定律来举例说明确定相似准则的方法。对于两个相似现象，可用下列方程表示：

$$\begin{aligned} f_1 &= m_1 \frac{dv_1}{dt_1} \\ f_2 &= m_2 \frac{dv_2}{dt_2} \end{aligned} \quad (2-4)$$

它们的相似常数分别是  $C_v$ 、 $C_t$ 、 $C_f$ 、 $C_m$ ，两个现象相似时可求得相似指标为：

$$\frac{C_f C_t}{C_m C_v} = 1 \quad (2-5)$$

并存在关系式：

$$\frac{f_1 t_1}{m_1 v_1} = \frac{f_2 t_2}{m_2 v_2} \quad (2-6)$$

或用另一种表现形式：

$$\pi = \frac{ft}{mv} = \text{不变量} \quad (2-7)$$

$\pi$  就是相似准则。

对于复杂现象，常常存在几个相似准则。例如，对于黏性不可压缩流体的定常流动，便有：

雷诺准则：

$$\pi_1 = Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \text{不变量} \quad (2-8)$$

弗劳德准则：

$$\pi_2 = Fr = \frac{gl}{v^2} = \text{不变量} \quad (2-9)$$

欧拉准则：

$$\pi_3 = Eu = \frac{p}{\rho v^2} = \text{不变量} \quad (2-10)$$

显然，同一系统的不同点或不同截面的相似准则具有不同的数值，而彼此相似的系数中同一对应点或对应截面上则有数值相同的相似准则。因此，相似准则不能算是常量，而只能称为不变量。

## 2. 相似第二定理

相似第二定理：凡是同一种类现象，当单值条件相似，而且由单值条件中的物理量所组成的相似准则在数值上相等时，则这些现象必定相似。



①现象相似的第一个必要条件：描述现象的微分方程或微分方程组必须相同。这是不言而喻的，因为在某一过程中，相同的微分方程或微分方程组描述的是同种类的自然现象，只有同种类的现象才存在彼此相似的问题。

②现象相似的第二个必要条件：单值条件相似。因为服从同一微分方程或者同一微分方程组的同类现象可以有许许多多，如果把我们要研究的具体现象从这无数的现象中单一地划分出来，便要靠它的单值条件。若两种物理状态的单值条件相同，则由上述微分方程或微分方程组得到的解是一个，即这两种物理状态是完全相同的一种现象。若两种现象的单值条件相似，则得到的解也是相似的，即这两种现象相似。若它们的单值条件既不相同也不相似，则得到的仅是服从同一自然规律的两个互不相同又不相似的现象。

③现象相似的第三个必要条件：由单值条件中的物理量所组成的相似准则数值相等。

### 3. 相似第三定理

相似第三定理：描述某现象的各种物理量之间的关系可表示成相似准则  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$  之间的函数关系

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = 0 \quad (2-11)$$

这种关系式称为相似准则关系式或相似准则方程式，也称为  $\pi$  定理。

因为对于所有彼此相似的现象，相似准则都保持相同的数值，所以它们的准则方程式也应该是相同的。由此，如果把遵循相似第二定理的规定所进行的模拟试验的结果整理成相似准则方程式，则该方程式就可以应用到实物中去。

在相似准则  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$  中，那些由单值条件的物理量所组成的定性准则，用  $\pi_{定1}, \pi_{定2}, \dots, \pi_{定m}$  来表示；而包含非单值条件的物理量的非定性准则，用  $\pi_{非m+1}, \pi_{非m+2}, \dots, \pi_{非n}$  来表示。由于定性准则是决定现象的准则，当它们被确定之后，现象即被确定，非定性准则也随之被确定。这种因果关系使准则方程也可以表示为：

$$\pi_{非i} = f(\pi_{定1}, \pi_{定2}, \dots, \pi_{定m}) \quad (2-12)$$

即任一非定性准则可表示为定性准则的函数。

由上述可知，通过试验得到的准则方程式就是描述某种现象的微分方程组的解。也就是说，对于某些复杂现象，期望在进行大规模试验之前先进行验证和评估，相似原理提供了通过一些模拟试验进行评价的可能。因此，相似原理是模拟试验的理论依据。

### 4. 相似准则的求法

相似第三定理阐明了应如何整理测试结果：必须把测试结果整理成相似准则之间的关系式。这样，就可用通过模拟进行的测试研究来揭示原型的内在规律性或将模拟测试获得的结果推广到原型上。因此，相似准则的求解是衡量模拟测试是否准确或开展模拟测试的重要环节。

目前，相似准则的导出有证实物理定律法、方程分析法和量纲分析法三种。而方程分析法和量纲分析法在实际中应用较多，特别是量纲分析法（又称因次分析法）应用最广。下面我们举例说明这两种方法的应用。

#### (1) 方程分析法

方程分析法一般是指利用微分方程导出相似准则，其结构严密、结论可靠、分析过程的程序明确、便于检查，同时方程中的各种成分一目了然，便于推断、比较和校验，但由于积分运算上的困难，并不是任何时候都能找到其完整解。

例如，某种黏性不可压缩流体做稳定等强运动，其运动微分方程式为：

$$\rho \left( \omega x \frac{\partial \omega}{\partial x} + \omega y \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega z \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) = \rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) \quad (2-13)$$



如何求解相似准则？

第一步，简化方程式。

$$\rho \left( v \frac{\partial v}{\partial l} \right) - \rho g + \frac{\partial p}{\partial l} - M \frac{\partial^2 v}{\partial l^2} = 0 \quad (2-14)$$

第二步，求相似准则数目。式(2-14)中的物理量有： $l$ 、 $\rho$ 、 $v$ 、 $g$ 、 $p$ 、 $M$ ，所以  $u=6$ 。又因为其包含的基本量纲为： $F$ 、 $L$ 、 $T$ ，所以  $K=3$ ，由此可得到相似准则的数目  $S=u-K=3$ 。

第三步，求相似准则。

用所简化方程中的第一项去除方程的其他各项得：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{第二项}}{\text{第一项}} = \frac{\rho g}{\rho \left( v \frac{\partial v}{\partial l} \right)} = \frac{gl}{v^2} = \text{不变量} \\ \frac{\text{第三项}}{\text{第一项}} = \frac{\frac{\partial p}{\partial l}}{\rho \left( v \frac{\partial v}{\partial l} \right)} = \frac{p}{\rho v^2} \\ \frac{\text{第四项}}{\text{第一项}} = \frac{M \frac{\partial^2 v}{\partial l^2}}{\rho \left( v \frac{\partial v}{\partial l} \right)} = \frac{M}{\rho l} = \text{不变量} \end{array} \right. \quad (2-15)$$

所得相似准则即为式(2-15)中的不变量。

(2) 量纲分析法

量纲方程是量纲分析的核心，它是以物理方程的齐次理论为依据的。

量纲系统分为力系统 (FLT) 和质量系统 (MLT)，这两个系统可以用牛顿第二定律联系起来。

$$W = mg \quad (2-16)$$

$W$  的量纲是  $F$ ， $m$  的量纲是  $M$ ， $g$  的量纲是  $LT^{-2}$ 。

常用物理量的量纲及在这两个系统中的转换关系见表 2-1。

表 2-1 常用物理量的量纲及力系统、质量系统量纲关系转换表

物理量	力系统	质量系统	物理量	力系统	质量系统
质量	$FL^{-1}T^2$	$M$	力矩	$FL$	$ML^2T^{-2}$
力	$F$	$MLT^{-2}$	转动惯量	$FLT^2$	$ML^2$
长度	$L$	$L$	功	$FL$	$ML^2T^{-2}$
时间	$T$	$T$	功率	$FLT^{-1}$	$ML^2T^{-3}$
面积	$L^2$	$L^2$	压力	$FL^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$
体积	$L^3$	$L^3$	应力		
容重	$FL^{-3}$	$ML^{-2}T^{-2}$	内聚力		
密度	$FL^{-4}T^2$	$ML^{-3}$	弹性模量		
速度	$LT^{-1}$	$LT^{-1}$	摩擦系数	—	—
加速度	$LT^{-2}$	$LT^{-2}$	滑转率		
角度	—	—	效率		
角速度	$T^{-1}$	$T^{-1}$	应变		
角加速度	$T^{-2}$	$T^{-2}$	应变率	$T^{-1}$	$T^{-1}$

续表2-1

物理量	力系统	质量系统	物理量	力系统	质量系统
动量	FT	MLT <sup>-1</sup>	黏性系数	FL <sup>-2</sup> T	ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup>
冲量					

举例说明量纲分析求解相似准则。例如，图 2-1 所示为弹簧质量阻尼系统，试用量纲分析法求相似准则。

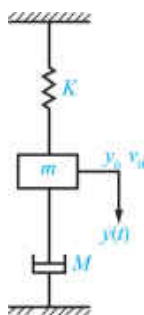


图 2-1 弹簧质量阻尼系统

由图 2-1 可知，这个系统的所有物理量的量纲见表 2-2。

表 2-2 弹簧质量阻尼系统的量纲

参数	量纲	参数	量纲
$y$	L	$v_0$	LT <sup>-1</sup>
$m$	FL <sup>-1</sup> T <sup>2</sup>	$y_0$	L
$M$	FL <sup>-1</sup> T	$t$	T
$K$	FL <sup>-1</sup>		

第一步，我们构造一个量纲矩阵如下：

$$\begin{array}{cccccccc}
 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 \\
 & y & m & M & K & v_0 & y_0 & t \\
 \text{F} & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 \text{L} & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 0 \\
 \text{T} & 0 & 2 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1
 \end{array} \tag{2-17}$$

第二步，求相似准则数目。独立方程的数目等于矩阵的秩（计算秩从略），上面矩阵的秩等于 3，所以相似准则的数目为

$$S = n - r = 7 - 3 = 4 \tag{2-18}$$

第三步，联立方程并且解方程组

$$\begin{cases}
 \text{F: } a_2 + a_3 + a_4 = 0 \\
 \text{L: } a_1 - a_2 - a_3 - a_4 + a_5 + a_6 = 0 \\
 \text{T: } 2a_2 + a_3 - a_5 + a_7 = 0
 \end{cases} \tag{2-19}$$

可求解得到：

$$\begin{cases}
 a_1 = -a_5 - a_6 \\
 a_2 = a_4 + a_5 - a_7 \\
 a_3 = -2a_4 - a_5 + a_7
 \end{cases} \tag{2-20}$$



令  $a_4=1, a_5=a_6=a_7=0$ , 可得:  $a_1=0, a_2=1, a_3=-2$ 。

令  $a_5=1, a_4=a_6=a_7=0$ , 可得:  $a_1=-1, a_2=1, a_3=-1$ 。

令  $a_6=1, a_4=a_5=a_7=0$ , 可得:  $a_1=-1, a_2=0, a_3=0$ 。

令  $a_7=1, a_4=a_5=a_6=0$ , 可得:  $a_1=0, a_2=-1, a_3=1$ 。

第四步, 建立另一个矩阵:

$$\begin{array}{cccccccc}
 & y & m & M & K & v_0 & y_0 & t \\
 \pi_1 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 \pi_2 & -1 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 \pi_3 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 \pi_4 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \tag{2-21}$$

则所求的相似准则为

$$\pi_1 = mM^{-2}K \tag{2-22}$$

$$\pi_2 = y^{-1}mM^{-1}v_0 \tag{2-23}$$

$$\pi_3 = y^{-1}y_0 \tag{2-24}$$

$$\pi_4 = m^{-1}Mt \tag{2-25}$$

## 任务三 常见测试方法

随着技术的不断进步, 汽车测试方法的主要内容不仅包括以传感器为核心的测量原理、测量方法、测量工具及数据处理等, 还发展为将被测对象置于模拟运行状态的在环测试方法并被广泛运用。前者在本任务中不再提及, 感兴趣的读者可以阅读传统汽车测试技术文献。这里将介绍近年来在汽车测试中常见的几种在环测试方法以及实车测试方法。

### 一、模型在环、软件在环测试方法

在汽车涉及的各种控制算法开发流程中, 为了降低研发成本, 更早地发现算法中存在的问题和错误, 常常需要在设计阶段进行相应的测试。在实际控制器完成之前可以进行的测试主要是模型在环测试和软件在环测试。

#### 1. 模型在环测试方法

基于模型的系统工程 (model-based system engineering, MBSE) 是一种用于解决设计复杂控制、信号处理以及通信系统中相关问题的数学和可视化方法。它被广泛应用于运动控制、工业设备、航天以及汽车的相关应用中, 是一种主流的开发与测试方法。模型提供了一个物理系统的抽象, 可以使工程师忽略无关的细节而把注意力放到最重要的部分来思考系统的整体设计。工程中的所有工作内容都是依赖模型来理解复杂的、真实世界的系统。在 MBSE 中, 模型是整个开发过程中不断细化的可执行规范 (通常使用文本形式表示的需求来指导正式模型的开发, 这些模型随后将使用代码生成转化为代码), 与写在纸上的规范相比, 可执行规范能使系统工程师更深入地了解其策略的动态表现。在开始编码之前的早期开发阶段就对模型进行测试, 将产品的缺陷暴露在项目开发的初期, 并在开发过程中持续不断地验证与测试, 这样工程师就可把主要精力放在算法和测试用例的研究上, 以确保规范的完整性和无歧义, 而不必花时间去处理烦琐的、易于出错的任务, 例如创建测试装置。模型建立后, 添加基于模型的测试, 确保模型确实正确地捕获了需求。

与“静态”的书面设计不同, 可在基于模型的测试过程中评估可执行规范。通常可通过改变一组模

型参数或输入信号，或通过查看输出结果或模型的响应来完成这一操作。依据模型执行的仿真顺序也称为模型在环测试（如图 2-2 所示）。模型在环测试的测试数据可来自测试矢量数据库，或来自实际系统的模型。可执行规范通常不仅包含功能设计模型和软件逻辑，还包括设备和环境模型、高层需求的链接以及其他文件。通常它还包括用于自动化仿真结果评估的验证数据。模型在环测试的结果可用于验证软件行为是否正确，并确认开发流程的初始需求。通过模型在环测试收集的信息会成为代码验证的基准。

## 2. 软件在环测试方法

一般的软件在环测试（图 2-2）是指在主机上对仿真中生成的代码或手写代码进行评估，以实现生成代码的早期确认。但这种测试仅仅针对生成的代码，并没有考虑代码与模型之间的关联，因此当测试过程中发现代码问题时，还需要人工定位到具体是哪个模型上的问题。

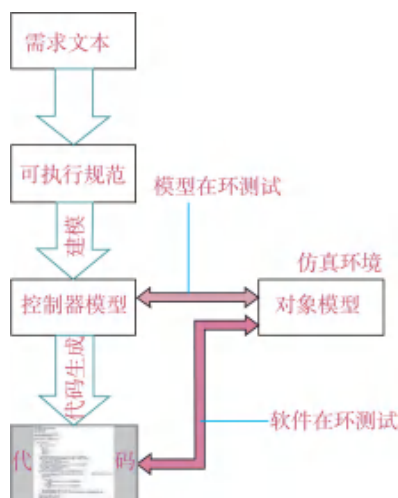


图 2-2 模型在环测试和软件在环测试

此外，还有一种软件在环与模型在环的对比测试方法，主要实现了模型和代码的同步执行记录状态信息，并将这些状态信息实时发送给建模平台，平台解析后以高亮显示的方式同步展示模型的执行过程；同时，测试过程中还可以获取当前监视的全局变量信息，测试人员通过监视所要观察的全局变量信息，分析具体建模是否正确或是否满足实际需要。

根据以上描述，这种测试方法的重点就是要确保生成的代码和模型同步执行，并且这个执行过程要足够直观，方便用户查看。此外，由于在测试代码中加入了额外的控制代码，测试代码和产品代码有了差异，这势必会对代码的执行性能等指标产生影响，因此还需要考虑如何将这个影响降低到最小。具体来说，在测试方案设计时需要考虑以下几个问题。

### (1) 测试过程应能正确反映模型的执行过程

图形化描述的建模模型实例和监视变量信息要能在测试过程中正确展示。当某个模型元素实例生成的代码被执行时，该模型元素实例要高亮显示。在状态图模型中，当发生状态迁移时，该模型元素实例能自动转换到下一个满足迁移条件的状态。此外，监视变量信息也需要与代码执行保持一致。

### (2) 测试过程应具有直观性

测试过程的中间信息应清晰反映在图形化的建模模型上。测试过程在模型上显示得越直观，越方便进行错误检查。同时，测试过程的展示应借鉴已有工具的显示方式，使建模人员更方便使用。

### (3) 测试过程对被测系统的影响应最小化

对于任何一种进程内测试来说，测试进程都应该尽量减少对被测系统的影响。同样，对测试代码来说，如果在测试的执行过程中插入了过多的控制代码，那么测试代码与图形化的模型之间就会存在较大



的不一致性，因此应该尽量少地在自动生成的测试代码中加入控制代码。

## 二、硬件在环测试方法

### 1. 硬件在环测试方法简介

汽车系统项目的开发是一项系统工程，科技含量高、工作量大，整车和各零部件的开发同步进行。为了保证项目的进度，将硬件置于测试回路是一种将实物部件和软件模型联合、广泛运用于部件测试或控制系统测试的技术形式。广义上来说，硬件在环测试系统可以分为四种类型：第一类，将真实的控制器置于测试回路，将其余部件的压力或电信号用真实信号或者仿真环境模拟的信号纳入控制器的控制回路，不包含动力加载装置；第二类，用计算机快速地建立其控制器模型，而将受控对象作为实物放置在仿真回路中，构造出在环测试系统，这个过程也称为快速原型设计；第三类，利用动力加载装置模拟系统其余部件的动力学特性对实物部件进行加载，实物部件输出的信号反馈回系统模型，构成系统回路；第四类，主要是在第二类的基础上，将回路系统模型过程量或实物部件的输出量纳入一个更大的控制器控制回路。本任务所说的硬件在环测试只是第一类（图 2-3），第二类不在本书讨论范围之内，第三类和第四类被归入台架在环测试方法。

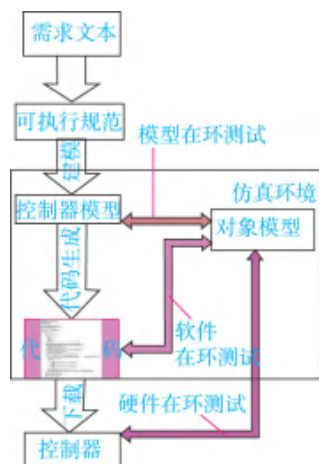


图 2-3 硬件在环测试

汽车硬件在环测试系统的研制是实施并行工程、实现同步开发最重要的一项措施。利用计算机仿真试验系统，能较好地解决下述问题。

- ①在同步开发工程中，解决开发初期缺乏控制对象和原型车情况下的控制器测试。
- ②完成实际中无法进行或费用昂贵的测试，方便地进行精确的极限测试、失效测试和各种故障的再现，使测试更加全面、完整。
- ③模拟危险情况而不产生实际的危险，且测试可以被重复和自动进行。
- ④控制策略的优化、各参量相互间可能的影响、参数变化的敏感性等的确认可以既快又省地进行验证，冲突的目标可以被早期发现并协调。
- ⑤开发过程中的重复与更改可以被最大限度地避免，由于模拟仿真已验证了各种运行状态和功能，避免了绝大多数设计中的错误，开发风险大大减少。
- ⑥硬件与试验的费用将被减少到最低，研究的时间与开发的费用大为节省。

但与模型在环测试和软件在环测试不同，硬件在环测试引入了信号的传递环节。图 2-4 所示为典型的硬件在环测试系统的模型，其中： $P(s)$ 表示控制器传递函数； $D(s)$ 表示控制对象模型； $T_z(s)$ 表示传感

器的传递函数； $\xi(s)$ 表示噪声信号； $N(s)$ 表示测试系统的其余部件模型。该类系统中，传感器的传递函数将实物部件和软件模型连接起来，但也将其本身的特性和噪声引入其中。这时，搭建硬件在环测试系统时主要关注传感器噪声和传递函数的闭环控制性能是否明显地偏离。值得注意的是，这一偏离在输入变换缓慢或者不变的时候较为明显，因此当采用硬件在环方法进行动态性能测评时或在一些要求较高的测试过程中会影响测试的结果时，需要考虑补偿传递环节影响的问题。本任务将给出补偿传递环节影响的做法，供读者在设计硬件在环测试系统时参考。

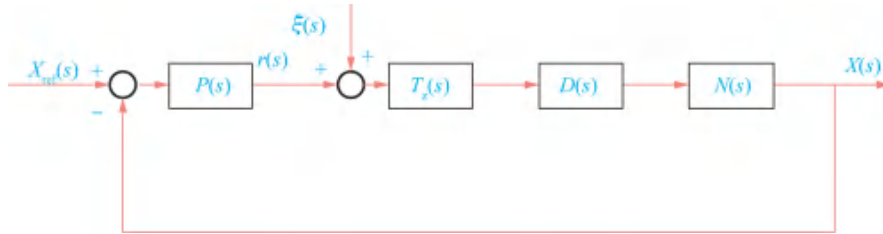


图 2-4 硬件在环测试系统的模型

## 2. 硬件在环测试环境的精确设计

本任务中，基于现有常见的稳态或缓变化硬件在环测试技术，将传递环节的传递函数从硬件在环系统中移除的问题通过变形与转化而转换为将指定特性  $K(s)$  [针对传感器特性则为  $T_z(s)$ ] 从回路中补偿，并保证现有测试系统设计好的噪声特性  $\xi(s)$  到输出  $T(s)$  带宽不增大的问题（图 2-5）。

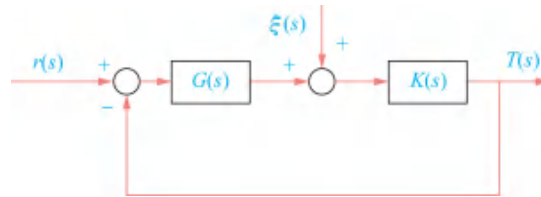


图 2-5 硬件在环测试系统的等效简化

该系统的传递函数描述如下：

$$T(s) = r(s) \frac{G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)} + \xi(s) \frac{K(s)}{1+G(s)K(s)} \quad (2-26)$$

式中： $G(s)$ 表示控制器和模拟对象的传递函数； $\xi(s)$ 表示测量控制器输出的噪声信号，其与  $G(s)$  的输出不可拆分，表征常见硬件在环测试系统中设计好的噪声特性； $K(s)$ 表示期望补偿的传递环节的传递函数。

$$G(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (2-27)$$

噪声  $\xi(s)$  到输出  $T(s)$  的传递函数为

$$T(s) = \xi(s) \frac{K(s)}{1+G(s)K(s)} \quad (2-28)$$

需要注意的是，考虑到噪声传递频带宽度已经满足要求，在将  $K(s)$  从输入  $r(s)$  到输出  $T(s)$  的传递函数中补偿掉时，理论上不应该增加噪声到输出的频带宽度，但在仅有控制器的硬件在环测试中，噪声在信号输出前得到较好的控制，即使之后的输出频带宽度增加，往往也不会影响信号质量。

当  $K(s)$  的传递函数表示为

$$K(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (2-29)$$