

第1章 汽车动力学与控制概论

1.1 本章概述

本章首先介绍了汽车动力学一般问题，对其动力学机理进行简要阐述。然后针对汽车动力学里程碑技术的发展进行概述，回顾了底盘动力学及其典型控制技术，分别对轮胎动力学，制动、驱动、转向和垂向动力学进行原理性的说明。进一步地，对面向智能汽车的底盘动力学发展趋势与关键问题进行探讨，包括智能汽车以及底盘动力学域控制的发展展望。最后，在汽车动力学性能测试方面，对其主客观评价与试验方法进行列举介绍。

1.2 汽车动力学一般问题简述

自 1886 年由德国人卡尔·本茨研制的汽车诞生，发展至 21 世纪的智能汽车热潮，汽车动力学关键技术发展，从侧重结构设计到底盘的电控化，再至人工智能控制，一直随着汽车行业变革不断完善、迭代更新，逐渐形成完备、可持续发展的汽车动力学理论体系。一百多年来，众多专家学者潜心研究，从底盘构造设计、轮胎特性机理探究、动力学分析、底盘电控研究等方面深度剖析，笔耕不辍留下众多经典著作。荷兰 H. B. Pacejka 《Tire and Vehicle Dynamics》^[1]、德国 M. Mitschke 和 H. Wallentowitz 《Dynamik der Kraftfahrzeuge》^[2]、日本安部正人《自動車の運動と制御》^[3]、美国 William F. Milliken 和 Douglas L. Milliken 《Race Car Vehicle Dynamics》^[4]、中国余志生教授《汽车理论》^[5]、郭孔辉院士《汽车操纵动力学》^[6] 等，构建出了汽车动力学理论体系。

汽车已经发展成为由车轮、车身、悬架等众多运动部件构成的复杂机电系统。分析汽车动力学问题，可将汽车视为是由 5 个刚体即 4 个车轮和 1 个车身组成的，并由悬架导向装置、弹簧和减振器连接在一起的复杂动力学系统。车轮和车身每个刚体有 3 个平移和 3 个转动共 6 个自由度，这样简化的汽车动力学系统有 30 个运动自由度^[1]。要分析车辆动力学问题，首先，通过建立微分方程描述车辆相应的运动自由度；然后，基于悬架等部件的机械连接及各个部件之间的运动约束关系，将各个运动微分方程互相关联；除此之外，还需要分析包括发动机（驱动电机）、变速器、减速器等部件构成的驱动装置，包括转向横拉杆、转向器和转向盘等部件构成的转向机构等的运动。这样，描述汽车真实运行状态的运动微分方程即车辆的运动自由度将增加很多。即便如此，不断增多的相互关联的运动微分方程也难以全面描述汽车的行驶运动。

驾驶员在车辆行驶过程中根据车辆期望行驶任务，操纵车辆加速踏板、制动踏板和转向盘控制车辆车速和运行方向。根据车辆的实时响应和由于道路倾斜、大风等不可避免的交通环境干扰造成的汽车偏离期望行驶方向，再进行车辆操纵，修正其行驶状态^[6]。

这样，人车路形成闭环，研究汽车的行驶运动就不仅要把车辆用数学模型描述出来，还需要把驾驶员甚至是道路环境用数学表达式描述出来。可见，车辆动力学分析面临着建模非线性、不确定性的挑战。

人工智能技术发展为汽车产业带来颠覆性变革，智能汽车逐渐成为国际竞争的前沿焦点。驾驶员的操作权逐步向车辆智能驾驶控制系统转移，甚至完全由车辆智能驾驶控制器来操纵车辆运动。各类高级驾驶辅助系统广泛应用于量产车型，全球各汽车企业纷纷部署智能汽车关键技术开发。人机共驾机理尚付阙如，智能汽车动力学的数字化技术及底盘动力学控制新机制亟须探明，是汽车工业进入人工智能时代面临的新挑战。

安全、高效、舒适、可控是汽车工业永恒的主题，也是汽车动力学理论不断完善、形成完备体系的促动力以及可持续发展的源泉。为了提升车辆的动力性能、经济性能、制动性能、操稳性能、平顺性、通过性等各方面性能，汽车行业科技工作者一直致力于汽车动力学关键问题研究。

在提升车辆的动力性和经济性发展历程中，从第一台内燃机汽车诞生后的百年历程中内燃机经历了技术革新三大里程碑。从控制油气比例的化油器发动机，到控制空燃比的电喷发动机，发展到缸内直喷发动机。为更进一步提高汽车节能减排性能，混合动力汽车以及纯电动汽车相继问世。

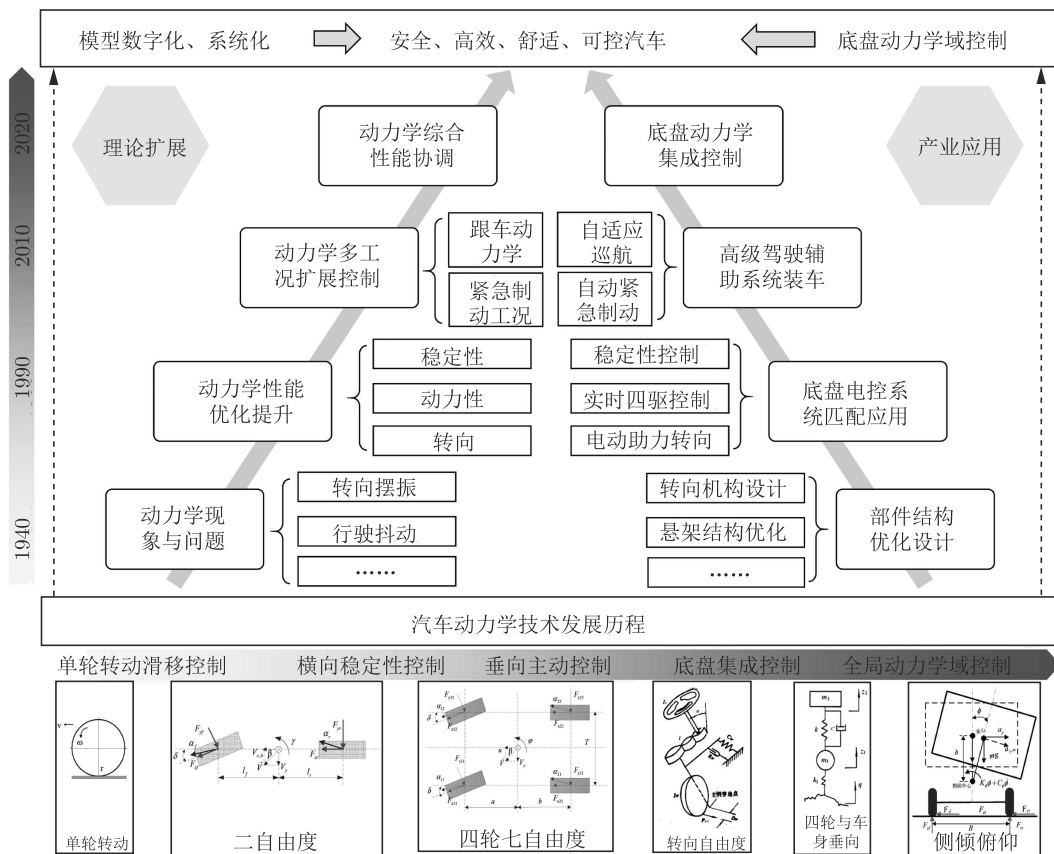


图 1.1 汽车动力学发展历程图

随着汽车向高速化、高安全性发展, 为了提升车辆的操稳性能, 轮胎由最原始的实心胎逐渐发展为充气轮胎, 随后迎来轮胎工业的革命——子午线结构轮胎, 汽车轮胎朝着子午化、扁平化、无内胎化甚至智能轮胎方向发展。在经历了底盘部件结构反复迭代优化后, 在电子化、信息化技术发展驱使下底盘电控技术飞速发展, 以进一步提升车辆操稳、平顺、通过等各方面性能。

如图 1.1 所示, 汽车动力学在百余年发展历程中经历了底盘部件设计创新、动力学性能匹配设计、底盘动力学电控突破等阶段。逐步解决了随着运行速度提升带来的各种动力学问题, 并进一步针对性地提升车辆动力学性能。在汽车向更加安全、高速的发展趋势下, 未来汽车动力学在应对智能汽车这一颠覆性变革时仍有很远的路要走。一方面, 底盘机电一体化导致电控部件日益增多的趋势, 迫切要求汽车底盘从单目标控制到多系统集成控制, 乃至走向智能汽车的底盘动力学域控制。另一方面, 汽车系统动力学的数字化和智能化又是自动驾驶汽车的发展必由之路。

1.3 汽车动力学发展历程

汽车作为复杂的运动系统, 其动力学理论体系的建立走过了一个漫长的历程。汽车研究人员一直在不断地通过问题观察、经验积累、理论研究、技术与实车测试, 探索汽车动力学机理。汽车动力学可以大致划分为 4 个里程碑式的发展阶段。第一阶段(延续到 20 世纪 40 年代末)为车辆动力学发展的探索时期。第二阶段(20 世纪 50 年代至 20 世纪 90 年代)为车辆动力学发展的理论成熟和实践探索的黄金时期。第三阶段(20 世纪 90 年代至 20 世纪末)为车辆动力学发展的规模工程应用发展时期。进入 21 世纪, 车辆动力学发展进入第四阶段, 即智能汽车动力学发展新时期。

早期人们缺乏成熟的理论支撑, 对车辆的动态性能和乘坐舒适性仅仅只有经验性的观察, 进行尝试性的改进设计。20 世纪 30 年代, 一些学者和工程师们由车辆行驶过程中的振动问题入手, 开始探索车辆转向、稳定性和悬架的研究, 分析车辆转向和悬架运动对车辆性能的影响, 如英国的 Lanchester^[7]、美国工程师 Olley^[8]、法国的 Broulhiet^[9] 等。针对车辆的平顺性提升问题, 众多学者、工程师们开始探索着设计了各种各样的独立悬架结构, 以克服车辆的摆振问题。同时开始关注车辆平顺性和操纵稳定性协调问题。其中, Olley 在美国凯迪拉克公司建立了由前、后活动质量的车架组成的测试试验台, 用来研究前后悬架匹配和轴距对前后轮相位差的影响。他曾对早期车辆动力学的设计研究工作进行总结^[8]: “人们对车辆转向的不稳定问题已经习以为常。工程师们设计制作的每一个零部件都精致完美, 但是这些零部件装配出的整车性能却总是不很满意; 为了提高车辆行驶性能而零星地采用的尝试性方法实际上却几乎没有任何作用”。清华大学管迪华教授等早期针对汽车转向摆振问题进行了深入研究, 分析并优化了汽车转向系统机构^[10, 11]; 吉林大学郭孔辉院士等早期在汽车悬架系统设计领域也展开了深入研究^[12]。

20 世纪 50 年代至 90 年代为车辆动力学发展的理论成熟和实践探索的黄金时期, 汽车操纵动力学建立了完整的理论体系并且通过测试试验, 各种底盘电控零部件逐渐运用在整车上。一方面, 轮胎作为车辆底盘的关键部件, 人们开始使用轮胎测试台来测试轮胎的力学特性, 进行轮胎力特征的理论和试验研究。另一方面, 得益于一些航空工程师转而从从事车辆开发, 有关飞机稳定性及其控制理论开始逐渐应用于汽车中, 然后不断发

展形成车辆动力学的完整理论体系。先是各种各样的轮胎模型被开发出来,并得到应用,为车辆动力学研究和车辆动力学性能设计提供了基础支撑,如基于实测数据的半经验模型——魔术公式(Magic Formula, MF)、HSRI 轮胎模型(又称 Dugoff 轮胎模型)等。MF 模型由 Volvo 公司和荷兰 Delft 大学在 20 世纪 80 年代联合提出, H. B. Pacejka 等人对此做出了突出的贡献^[16]。HSRI 轮胎模型是 Dugoff 在 20 世纪 70 年代提出的半经验模型^[17]。郭孔辉院士提出了 UniTire 轮胎模型^[13]; 管迪华教授提出了对轮胎进行模态试验分析的方法^[14,15]。

1956 年,机械工程师学会在伦敦组织了关于汽车稳定性控制及轮胎性能的研讨会。众多学者针对车辆动力学的关键问题提出极具创意的思想。标志着汽车操纵动力学建立起完整的基础理论体系^[18]。至 20 世纪 80 年代末,汽车工程师已开始研究通过横摆力偶矩改善车辆极限工况下的稳定性。在 1992 年的 AVEC 会议上,来自日产^[19]、三菱^[20]、本田^[21] 等公司的专家就电子稳定性控制系统(Electronic Stability Control, ESC)的研究展开了比较深入的讨论,系统地提出了基于差动制动的车辆稳定性控制方法^[22]。在 AVEC'94 会议上, Inagaki 等提出了用相平面法分析车辆稳定性的方法^[23]。清华大学宋健教授等提出了汽车基于制动器耗散的制动防抱死系统(Anti-Lock Brake System, ABS)研究方法^[24]。清华大学李亮教授提出了汽车临界失稳判据以及动力学扩稳机理^[36]。同济大学余卓平教授等在车辆动力学控制及四轮分布式驱动控制领域取得了积极进展^[25,26]。东南大学殷国栋、陈南教授等在四轮转向车辆的操纵稳定性控制领域开展了深入研究^[27]。上海交通大学喻凡教授对车辆操纵稳定性及其集成控制关键技术进行了系统的研究^[28]。此外,在悬架、传动系统控制领域,我国也取得很大进展。合肥工业大学陈无畏教授、张农教授,江苏大学陈龙教授等在主动、半主动悬架控制领域做了大量工作^[29,30]。重庆大学秦大同教授等在混合动力系统及其控制技术领域取得了积极进展^[31,32]。

随着传感器技术、电子技术以及自动控制技术的快速发展,汽车主要零部件完成了由纯机械系统到机电一体化系统的转变,车辆动力学、控制研究成果开始应用于实车。如牵引力控制系统(Traction Control System, TCS)、ABS、ESC 和英国莲花工程公司(Lotus Engineering)开发的主动悬架系统等。1995 年,德国博世(Bosch)公司与奔驰(Benz)公司联合开发了 ESC 产品并成功匹配到奔驰 S600 车型上。这一时期,福特(Ford)、宝马(BMW)、丰田(Toyota)、本田(Honda)等汽车公司相继推出了各自 ESC 产品,各公司的产品各有特色,但基本构型和原理大致相同^[33-35]。

20 世纪 90 年代至 21 世纪初为车辆动力学电控系统技术应用发展时期,各种底盘电控零部件开始大规模应用于量产车型,解决了汽车存在的各种各样的动力学问题,比如,ESC 极大地提升了车辆的主动安全性。目前,ESC 生产厂商包括德国博世(Bosch)、德国大陆特维斯(Teves)、美国天合(TRW)、日本电装(Denso)、韩国万都(Mando)等几家公司。国内也开始了 ESC 的自主产品研制,在清华大学宋健教授团队努力下,我国自主知识产权的 ABS 已经实现大规模产业化;北京英创汇智开发出具有自主知识产权的 ESC 产品^[36],先后匹配到多款车型上,开启了自主 ESC 技术的批量应用。

近年来,车辆动力学技术进入智能化时代。一方面,随着汽车保有量的不断增加,交通拥堵、交通事故等问题日益突出,智能汽车被视为可以有效解决交通问题的战略性技术。另一方面,人工智能技术、互联网技术、环境感知技术、高性能运算硬件系统的发展,使智能汽车成为了可能。智能汽车已成为研究热点,汽车工业迎来一场颠覆性技术变

革^[37]。1984年,美国陆军与国防高级研究项目部(DARPA)合作推进智能驾驶研发计划。1986年,美国加利福尼亚州交通运输局、加州大学伯克利分校与其他研究机构联合开展了先进交通和高速公路伙伴(PATH)计划,旨在发展智能驾驶技术来提高公路通行能力、消除交通拥堵并减少能源消耗。1986年,欧洲启动普罗米修斯计划(PROMETHEUS),投资7.5亿欧元对智能驾驶相关技术进行研究。日本交通运输部Advanced Safe Vehicle计划执行,将智能汽车和安全驾驶系统开发放在关键位置。“中国制造2025”将智能网联汽车列入国家智能制造发展的重点领域,指出到2025年攻克自动驾驶总体及各项关键技术。我国提出的基于人-车-路协同的事故零死亡智能交通系统如图1.2所示。百度公司发布了自动驾驶开放平台Apollo,旨在搭建自动驾驶生态系统。

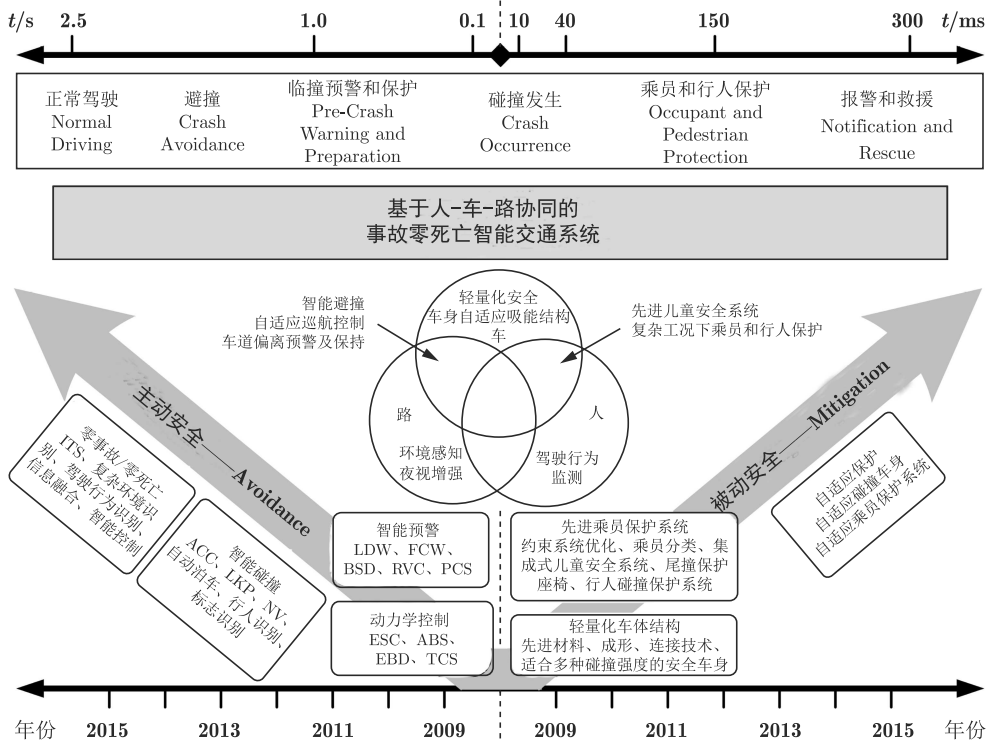


图 1.2 基于人-车-路协同的事故零死亡智能交通系统^[51]

关键技术研究方面,美国工程院院士 Hedrick 和加州大学伯克利分校 Tomizuka 较早开展了自动驾驶车辆动力学控制问题,于1994年对自动驾驶系统架构进行了详细的描述^[38]。美国俄亥俄州立大学王俊敏等提出了拟人式驾驶员模型用于自动驾驶控制策略研究^[39]。明尼苏达大学双城分校 Rajesh Rajamani 考虑车辆稳定性和乘坐舒适性提出了典型安全车速模型^[40]。加拿大滑铁卢大学曹东璞教授研究了深度强化学习的智能驾驶认知、决策方法^[41]。美国密歇根大学彭晖教授等在自动驾驶横向控制问题取得了积极进展^[42]。谷歌等互联网公司、特斯拉等新势力造车企业、德国博世等企业均在高级驾驶辅助系统以至智能驾驶技术方面进行投入。清华大学李克强院士等在高级驾驶辅助系统技术及智能网联汽车领域研发取得阶段成果^[43]。清华大学成波教授等在驾驶员驾驶特性分析和预警系统领域做出积极工作^[44]。同济大学陈虹教授等研究了模型预测控制理论并应用于车辆动力学稳定性控制及自动驾驶控制领域^[45,46]。北京理工大学项昌乐院士、中

国北方车辆研究所毛明院士在特种车辆动力学关键领域做了大量工作^[47,48]。吉林大学高振海教授等在高级驾驶辅助系统开发领域进行研究工作^[49]。此外,还有众多专家学者在相关领域做了积极工作,在此不再一一详述。

随着汽车电控系统不断发展完善,汽车智能化进程已经开启。在智能汽车“前端传感,上层决策,底层执行”的分层架构中,底层执行元件是其关键的组成部分,车辆底盘是智能驾驶稳定安全运行的保障,车辆动力学在智能驾驶发展引领下进入全新的时代。智能汽车的线控底盘是智能驾驶上层指令的执行系统,底盘动力学稳定性是智能驾驶功能实现的前提。在智能汽车发展背景下,汽车动力学与智能安全控制关键技术亟须攻克,例如,包括底盘传感器共享和状态全局观测、多自由度车辆动力学模型实时精确解算、基于底盘域控制的架构设计、多目标多系统协调的底盘动力学集成与域控制技术,包括线控驱动、线控制动、线控转向的线控底盘精确控制执行技术等。本书作者团队率先提出智能汽车底盘动力学域控制技术路线,在总体架构设计、软件硬件设计及通信交互等方面布局了一系列的发明专利^[50]。

1.4 汽车底盘动力学典型控制技术概述

1.4.1 轮胎动力学概述

轮胎是车辆与地面发生直接相互作用的部件,它支持车辆全部重量,传送牵引和制动的力矩,保证车轮与路面的附着力,减轻甚至吸收汽车在行驶时的振动和冲击力,保证行驶的安全性、操纵稳定性、舒适性和节能经济性。因此,进行轮胎动力学特性的研究对车辆各项性能的保障来说极其重要。车辆运动依赖于轮胎所受力,如纵向制动力和驱动力、侧向力和侧倾力、回正力矩和侧翻力矩等。所有这些力都是滑转率、侧偏角、外倾角、垂直载荷、道路摩擦系数和车辆运动速度的函数,如何有效地表达这种函数关系,即建立精确的轮胎动力学数学模型,一直是轮胎动力学研究人员所关心的问题。

为了便于研究人员统一进行轮胎力学模型分析,美国汽车工程师学会(SAE)制定了一套标准的轮胎运动坐标系,并定义了轮胎作用力相关运动量。轮胎SAE坐标系被定义为法向坐标系下的三维右手正交坐标系。国际标准(ISO)定义了一套遵循右手定则的轮胎坐标系。对轮胎动力学的研究建模主要分为以下三类:一是基于轮胎力产生机理的物理模型;二是通过数据插值得到表达轮胎特性的数值模型;三是由试验测试数据构成的经验模型。具体分析内容详见第2章。

国内外学者在轮胎动力学上取得了显著成果。荷兰代尔夫特理工大学的H. B. Pacejka等提出了一套基于三角函数拟合的轮胎公式,即魔术公式(MF)^[16]。随后在MF公式基础上加入刚性环理论和等效路面模型构建了短波中频轮胎模型(Short Wave Intermediate Frequency Tire Model, SWIFT),用以描述胎体振动频率达到60~80Hz,适用于小波长(> 0.2m)、大滑移的中频输入工况^[52]。美国密歇根大学公路安全研究所(Highway Safety Research Institute)的Dugoff等基于大量轮胎试验,研究出一种轮胎半经验模型,即高速公路安全研究所(HSRI)轮胎模型^[17]。郭孔辉院士以理论模型为基础提出了适用于各种工况、模型简洁、具有预测和外推能力的UniTire轮胎模型^[13]。清华大学管迪华教授对轮胎进行了模态试验分析的方法,宋健教授提出了一种轮胎拟合折线模型^[14,15]。此外,还有刷子模型、环模型等机理模型以及常用于控制策略设计的线性

化轮胎模型。

1.4.2 制动动力学概述

随着汽车工业的发展,汽车行驶速度的提高,人们对汽车的行驶安全性越来越重视。制动系统设计与控制关键技术是其中的核心问题。首先,需要保证车辆的制动安全性能,汽车在紧急工况强制制动时 ABS 主动对制动压力进行调控防止车轮“抱死”,是汽车主动安全的重要装置。进一步地,为了缩短制动距离,提高制动稳定性,汽车制动主动安全技术电子制动力分配系统(EBD)应运而生。为了提高汽车燃油经济性、降低排放,混合动力以及纯电动汽车迅速发展,车辆制动动力学发展出新的研究领域,即制动能量回收技术。

ABS 一般由电子控制单元(Electric Control Unit, ECU)、液压控制单元(Hydraulic Control Unit, HCU)和轮速传感器组成,ABS 示意图如图 1.3 所示。轮速传感器采集车轮转动信号并送到电子控制单元中,电子控制单元根据轮速信号按照一定的控制逻辑进行分析判断发出控制信号。控制信号送到液压控制单元中驱动相应电磁阀动作,执行增压、减压或保压操作,使制动器获得合适的制动力矩。保证车轮最有效地利用地面附着力,得到最佳的制动距离和制动稳定性。

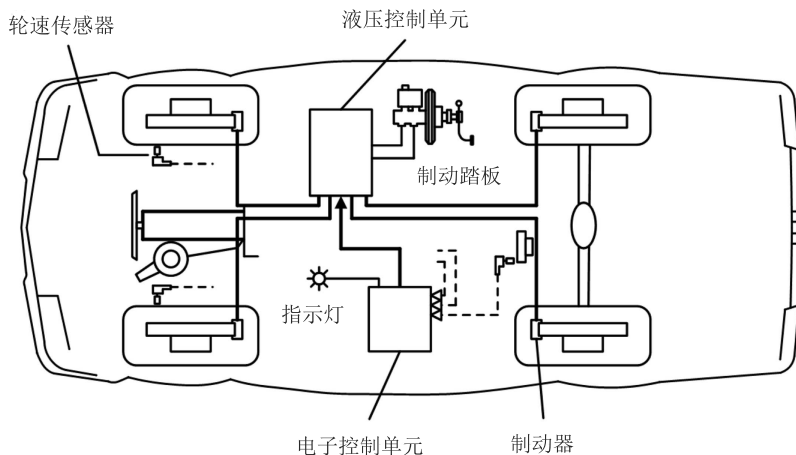


图 1.3 ABS 示意图

装配 ABS 的汽车优越性如下:

(1) 制动过程中,车轮仍然可以滚动,保证转向轮的操纵性,同时防止由于后轮抱死而导致的汽车侧滑甩尾,提高制动稳定性。

(2) 能有效地利用轮胎与路面间的附着能力,缩短制动距离。

(3) 减少了轮胎的磨损,可以提高轮胎的使用寿命,同时减少粉尘向空气中的污染。

ABS 技术的研究可溯源到 1932 年英国的“制动时防止车轮压紧转动的安全装置”专利。1936 年,博世公司将电磁传感器用于测量车轮的转速,当传感器探测到车轮抱死拖滑时,调节装置启动,调节制动管路压力,这一思路一直延续至今。ABS 首先应用于火车上,而后飞机工业的发展需要推动了 ABS 的发展。1954 年,福特汽车公司在载货汽车上试装了法国航空公司的 ABS 装置,揭开了 ABS 应用于汽车工业的序幕。

20 世纪 60 年代, ABS 开始应用电磁式车轮速度传感器, 但简单的机械式控制部分并不能适应车辆参数和工况的变化, 经常出现防抱死功能失效, 所以 ABS 发展陷于进退两难的境地。20 世纪 70 年代初期, 随着大规模集成电路发展和应用, 依赖于硬件逻辑电路的 ABS 控制器应运而生, 但 ABS 本身复杂的控制逻辑又制约其体积减小和可靠性的增加。1978 年, 博世公司与奔驰公司合作研制出带有数字式微处理器控制器的三通道 ABS, 并批量加装于奔驰轿车上, 这是 ABS 技术突破性的进展, 奠定了 ABS 的基本模式。

进入 20 世纪 80 年代, 由于数字电子计算机技术的发展, 同时也得益于液压控制技术的进步, ABS 技术逐步发展起来, 许多汽车零部件公司纷纷开始生产 ABS 产品, ABS 也进入了快速推广应用阶段。ABS 的发展是与汽车安全法规密切相关的。20 世纪 90 年代, 欧、美、日等发达国家为了提高汽车制动的安全性, 制定了严格的法规, 促进了 ABS 的应用。截至 2000 年, 北美的 ABS 装车率已达 80%, 西欧、日本和澳大利亚均为 50%, 汽车工业的后起之秀韩国和巴西也已分别达到 40% 和 30%。目前, ABS 已成为这些国家生产轿车的标准装备。当前, 世界上生产 ABS 的厂家主要有博世、TEVES、TRW、DENSO 以及 MENDO 等; 国内自主研发的 ABS 也已投产。

EBD 在 ABS 硬件系统的基础上进一步发展而来, 可以分配制动器制动力, 并防止后轮先于前轮抱死而出现“甩尾”和侧滑现象, 提高制动时汽车的方向稳定性。EBD 最早由日产汽车公司的 Nakazato 等于 1989 年提出。1992 年 Nissan Motor 公司的 Shinji Matsumoto 等进一步提出转向角前馈的制动力分配控制策略。ITT TEVES 公司 Bushman G 等提出了半制动状态下, 通过改变控制策略进行前后轮制动力分配的方法。1995 年 Nissan Diesel Motor 公司的 M. Nakazawa 等提出了考虑车轮侧偏角的制动力分配控制方法。

制动能量回收系统能在车辆减速或制动过程中, 将其部分动能转化为电能储存于电池中, 从而提高电驱车辆的能量经济性。针对制动能量回收的研究主要集中在以下两个方面: 制动能量回收液压制动控制系统的设计与制动能量回收策略的研究。德国博世、日本日立等汽车企业及零部件公司纷纷推出有能量回收功能的液压控制系统。日本东京大学 Yoichi Hori、韩国成均馆大学 Kim 等在能量回收制动领域开展了大量工作^[53,54]。北京英创汇智、上海同驭汽车科技公司等对线控制动及能量回收制动关键零部件攻关取得较大进展。同济大学余卓平^[55]、清华大学张俊智^[56]、吉林大学陈虹^[57]等专家学者均在制动能量回收设计与控制方面开展积极工作。

1.4.3 驱动动力学概述

车辆行驶在复杂路况下其驱动系统是保障车辆动力性、经济性、通过性等性能的关键系统。从驱动形式方面分析, 可分为内燃发动机驱动、纯电动驱动、混合动力、四轮分布式电驱动等形式。从传动方面分析, 车辆驱动系统主要包括发动机管理系统或整车控制器、离合器、变速器、四驱分动器等关键部件; 为应对复杂工况, 还有驱制动协同的 TCS 等。

汽车传统驱动形式为内燃发动机驱动, 通过离合器、变速器等传动部件将驱动转矩传递至车轮为汽车提供行驶动力源。国内外各大零部件企业、专家学者就相关领域分别从发动机、离合器、各类变速器(机械式自动变速器、无级变速器、双离合变速器等)、

四驱分动器等核心部件展开了大量系统设计和控制方法研究^[58]。随着汽车节能减排需求日益迫切,纯电动驱动、混合动力驱动及四轮分布式电驱动等更多驱动形式应运而生。电动汽车电驱系统设计与控制方法研究、混合动力关键装置设计与控制、四轮分布式驱动控制技术等关键问题被广泛关注^[59-62]。其中,四轮驱动系统(4 Wheel Drive System, 4WD)和 TCS 是保证车辆动力性和驱动稳定性的关键技术。

4WD 根据车辆行驶路面条件,将驱动力矩按不同比例分配给前后车轮,提高车辆越野性和转弯性能等。一般地,可将 4WD 分为“全时四驱”“分时四驱”和“适时四驱”三类。其中“全时四驱”证动力转矩时刻分配到每个车轮,车辆在行驶中始终保持四轮驱动。“分时四驱”允许驾驶者根据路面情况,通过接通或断开分动器来改变驱动模式,实现两驱和四驱自由转换。“适时四驱”根据车辆运行状态和路面条件实时自动切换两驱或者四驱驱动模式。“适时四驱”常见车型有本田 CR-V、丰田 RAV4、日产奇骏等。“分时四驱”常见车型有 Jeep 牧马人、陆风 X8 等。“全时四驱”常见车型有奔驰 4MATIC、奥迪 quattro、宝马 X 系 xDrive 等。针对 3 款典型的四驱系统进一步概述如下。

奔驰 4MATIC 四驱系统由分动器、锥齿轮差速器、差速锁和电子限滑辅助构成,如图 1.4 所示。四驱系统变速器通过输出轴与分动器相连,前后轴驱动转矩分配比为 50:50,分动器带有低速爬行挡,配有前、中、后 3 个差速器锁,并可手动将 3 个差速器进行 100% 锁止。

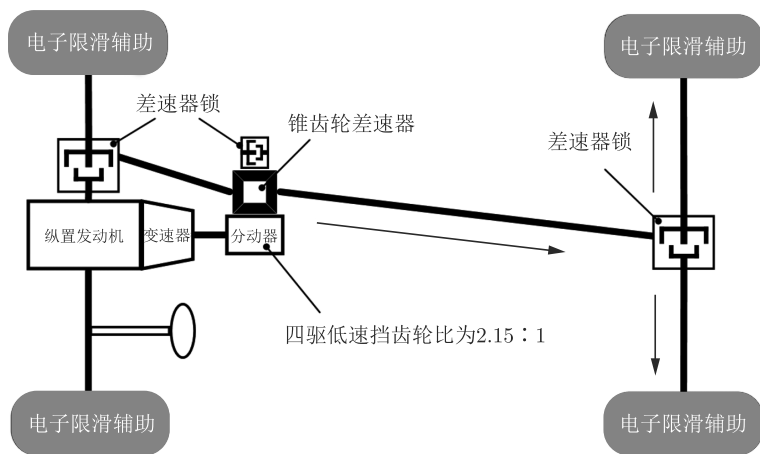


图 1.4 奔驰 4MATIC 四驱系统

奥迪 quattro 四驱系统技术方案如图 1.5 所示,该四驱系统由分动器、托森 C 型转矩感应自锁式差速器、电子限滑辅助构成。托森 C 型中央差速器为行星齿轮结构,结构更紧凑、自动锁止反应更迅速。其在正常行驶工况下以前后轴 40:60 的比例分配驱动力。调整极限为前轴最多分配 65% 驱动力输出,后轴最大 85% 的驱动力输出,即前后驱动力在 65:35 至 15:85 之间自动调节。

宝马 xDrive 四驱系统由电控多片离合器和分动器组成如图 1.6 所示。电控多片离合器根据传感器信息(如车轮转速、转向盘角度等)获取车辆动力学状态,基于控制策略主动分配前后轴的动力。在常规行驶工况下,多片离合器保持一定的闭合状态,xDrive 智能全时四驱系统按照约 40:60 的比例将发动机的动力分配至前后车轴。一旦感知到车

轮有打滑趋势，xDrive 通过调节多片离合器压紧力实现驱动力的重新分配，使前后轴驱动力分配比在 0:100 至 50:50 之间连续变化。

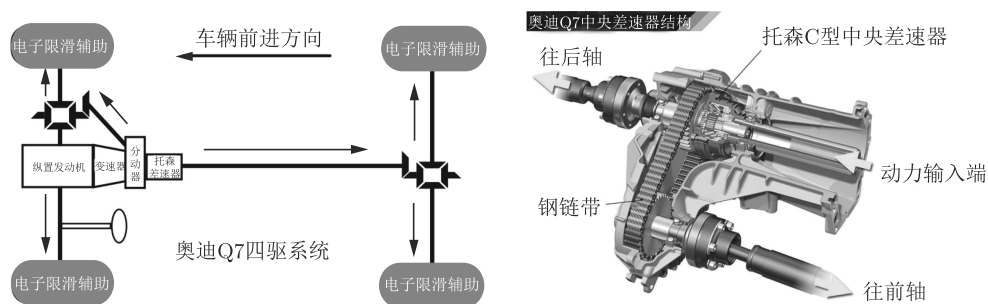


图 1.5 奥迪 Q7 搭载的四驱系统

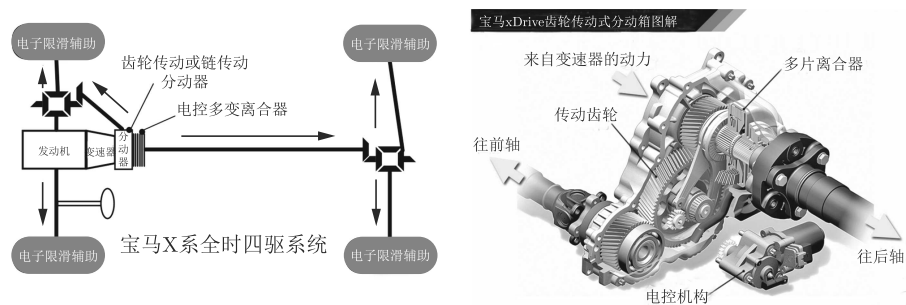


图 1.6 宝马 X 系全时四驱系统

TCS 是保证车辆驱动稳定性的部件。TCS 和 ABS 都是利用轮胎-路面附着特性，调节车轮转动状态，保持纵、横向均具有较高的附着性能，属于汽车纵向动力学控制技术。在调控对象上，二者存在相似之处。ABS 应用于汽车紧急制动，调控制动车轮滑移，使制动滑移率维持在理想范围内，在保证较高制动强度的同时，保持较好的横向稳定性。类似地，TCS 应用于汽车强驱动，调控驱动车轮滑转，使驱动滑转率维持在理想范围内，在保证较高驱动能力的同时，保持较好的横向稳定性。TCS 利用发动机转矩调节和驱动轮制动压力调节，通过二者的协调控制，抑制打滑车轮，使其滑转率维持在理想滑转率范围内，保证汽车具有较高驱动能力的同时，维持一定的横向稳定性^[101]。

1971 年，美国别克公司研发出利用电控装置调节发动机自动熄火的功能，此方法可以用于减少发动机输出转矩，进而抑制驱动轮过度打滑，该装置的调节思路与后来出现的 TCS 类似。20 世纪 80 年代后 ABS 技术得到快速发展，进而促进了 TCS 的发展。1985 年，由瑞典沃尔沃公司研发的驱动防滑装置——电子牵引力控制系统，试装在 Volvo 760 Turbo 汽车上，该系统成为首个产业化的驱动防滑系统。随后，1985 年 12 月，博世公司在 ABS 基础上，改进执行机构，加入 ASR 功能，上市了第一个具有 ABS 和 ASR 功能的量产产品——ABS/ASR 2U，并在奔驰高级轿车上完成试装。20 世纪 90 年代后，TCS 研发上采用了更多的先进控制方法和设计技术，丰田公司所设计的驱动防滑装置，利用调控节气门开度的方式来实现对发动机输出转矩的调节，降低了产品开发成本。1995 年，博世公司所开发的行驶驱动力控制系统引入了对横向力的自动校正功能，增强了制动和驱动过程中车辆的横向稳定性。当前，TCS 功能大都集成在 ESC 中。生