

Advanced Motion Control and Sensing for
Intelligent Vehicles

智能汽车

先进传感与控制

李力 王飞跃◎著

李力 郭伟 杨柳青◎译



郑南宁院士 | 孙优贤院士 | 柴天佑院士 | 贺汉根教授 倾情推荐

详解未来汽车的终极梦想，迎接无人驾驶时代的来临
系统分析加速智能汽车产业化的前沿核心技术

深入阐述使车辆实现自动识别道路、路况感知以及自动驾驶功能的信息技术、计算机技术、电子技术、自动化技术、人工智能技术和通信技术

Advanced Motion Control and Sensing for

Intelligent Vehicles

智能汽车

先进传感与控制

李力 王飞跃◎著

李力 郭伟 杨柳青◎译



进入新世纪以来,人们对安全、节能省时、环境友好以及舒适的交通服务的需求与日俱增,汽车及其相关工业随之面临更多的挑战。因此,许多新兴的概念和技术得以不断研发并应用到汽车工业。为了更好地服务对智能汽车和先进交通系统有兴趣的专业群体并满足他们的迫切需求,我们撰写此书,以便为研究人员和工程师们提供有关智能汽车运动控制和相应传感技术的最新进展和信息。此外,本书也旨在帮助高年级本科生和研究了解有关汽车和交通系统的一些发展近况。本书也总结了作者对于智能汽车运动控制的当前趋势和未来发展的理解与感悟。

Translation from the English language edition;
Advanced Motion Control and Sensing for Intelligent Vehicles
by Li Li and Fei-Yue Wang
Copyright © 2007 Springer Science + Business Media, LLC
All Rights Reserved

本书由 Springer 授权机械工业出版社在中国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

版权所有,翻版必究

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2016-4512 号。

图书在版编目(CIP)数据

智能汽车:先进传感与控制/李力,王飞跃著;李力,郭伟,杨柳青译. —北京:机械工业出版社,2016.10

书名原文:Advanced Motion Control and Sensing for Intelligent Vehicles
ISBN 978-7-111-55107-2

I. ①智… II. ①李…②王…③郭…④杨… III. ①智能控制-汽车-研究 IV. ①U46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 244971 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:坚喜斌 责任编辑:韩冰 刘星宁

责任校对:张薇 责任印制:常天培

涿州市京南印刷厂印刷

2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·22 印张·418 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-55107-2

定价:72.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

进入新世纪以来，人们对安全、节能省时、环境友好以及舒适的交通服务的需求与日俱增，汽车及其相关工业随之面临更多的挑战。因此，许多新兴的概念和技术得以不断研发并应用到汽车工业。为了更好地服务对智能汽车和先进交通系统有兴趣的专业群体并满足他们的迫切需求，我们撰写此书，以便为研究人员和工程师们提供有关智能汽车运动控制和相应传感技术的最新进展和信息。此外，本书也旨在帮助高年级本科生和研究生了解有关汽车和交通系统的一些发展近况。本书也总结了作者对于智能汽车运动控制的当前趋势和未来发展的理解与感悟。

我们在智能汽车领域的研究要追溯至差不多 20 年前，那时我还在 RPI/NASA 空间探索智能机器人系统的中心做研究员。从那以后，人们对于智能汽车的研究和发展取得了巨大的进展，并在陆海空范围的科技、民事及军事等多领域都有诸多成功的应用。我们在智能汽车上的研究范围从有专门应用的机器人车辆到通用的智能车辆。1994 年，和美国国家标准与技术研究院（NIST, National Institute of Standards and Technology）合作，我们建立了 SPIDER 车辆系统，旨在针对原位火星/月球资源的利用，以及制造一个用于 UA/NASA 空间工程研究中心“本地行星资源利用项目”中火星造氧的原型机器。从 1996 年到 1999 年，我们修正了 Caterpillar 98T 轮式装载机来实现自动挖掘和装载操作，而这有助于高效地挖掘土壤和岩石。2000 年，我们制造了我们的第一个自动驾驶的客运车辆 VISTA（Vehicles with Intelligent Systems for Transport Automation），并在亚利桑那州凤凰城的 51 号公路展示了该车辆的功能。2002 年，我们完成了基于自动驾驶和无线通信的自动化测试场的设计。在 2005 年，与西安交通大学和山东科学院合作，我们研发了针对 vASOS（vehicular Application Specific Operating Systems）的 CASIC 移动平台。该平台能够对驾驶安全性、效率和舒适性等各种嵌入式电子和软件系统进行测试和评估。

本书的主要内容来自我们近期在智能汽车领域的研究成果。尽管本书的一些内容选自多位学者，但其主要内容是基于我 2001 年到 2005 年指导的学生李力的博士论文。本书包含九章内容，可以分为三大部分：引言（第 1 章）、智能汽车运动控制（第 2~7 章），以及相关的汽车传感技术（第 8~9 章）。

第 1 章主要讨论了智能汽车技术的研究目标、研究任务和研究背景。其为当前的研究成果和发展趋势做了详尽的总结。本章同样也讨论了智能汽车、先进交

通（公路）系统和辅助驾驶之间的相互关系。

第2章仔细研究了胎路摩擦现象并综述了一些常用的胎路摩擦模型。这些内容为第3~5章研究的单车运动控制提供了重要的背景知识，因为研究车辆和地面之间的相互关系对于车辆驾驶性能的研究至关重要。第3章的主题就是车辆横向动力学与转向控制，主要分析了一些转向控制器的设计方法。第4章阐述了内外部的车辆纵向动力学特性并重点讨论了车辆追踪、制动控制。第5章主要解决车辆横向与纵向运动控制的分解与合成问题。第6章主要研究车辆垂向动力学特征及车辆悬架控制器。最后，第7章研究了多车运动控制，主要讨论了该研究方向在通信和协同方面面临的新技术挑战。

第8~9章分别综述了应用在车辆视觉传感和轮胎状况检查方面的已有方法和一些新兴技术；也罗列了一些在相关研究领域，诸如材料和设备发展等方面的研究成果。

本书的主要目标在于提供对车辆运动控制和传感研究现有水平的调查，同时为该领域的研究者们提供一个跨学科的崭新视角。考虑到本书可能有广泛的受众，尽管我们均标明了参考文献，但在一些地方省略了具体的技术细节，而只阐述那些关键的发现和趋势。

借此机会，我要感谢所有对于智能汽车研究项目有所贡献的同事和同学们。首先也是最重要的，我要感谢我的博士生导师伦斯勒理工学院的 George N. Saridis 教授，是他将我领入智能机器人系统、智能汽车和一般智能系统的智能控制领域。我也要感谢我以前的同事 Paul J. Lever 教授、Pitu B. Mirchandani 教授和 K. C. Kuo 教授一直以来在 Caterpillar 项目和 VISTA 项目中给予的合作与支持。1996—2001 年间，许多来自中日韩并参与我的项目的访问学者们，尤其是 Tang Nan 教授、Guihe Qin 教授和 Wenxue Liu 教授在 VISTA 项目中做出了巨大的贡献。最后但同样重要的，我要感谢我在亚利桑那大学和中国科学院的学生的辛勤工作以及他们对于智能汽车项目所做的贡献，特别是 Xiaobo Shi、Hungman Kim、Yijia Xu、Yuetong Lin、Zhixue Wang、Shuming Tang 博士和 Deqian Chen、Hongyu Xie、Michael Williams、Javier Cortez、Pingzhong Li、Darko Babic、Chris Yao、Michael Do、Qunzhi Zhou 等。

最后，也要感谢中美两国的相关政府机构数年来给予我们研究的不断支持。

王飞跃

中国科学院自动化研究所，北京，中国

亚利桑那大学系统与工业工程系，图森，亚利桑那州，美国

| 目 录 |

前 言

第 1 章 引言	1
1.1 智能交通系统中的智能汽车	2
1.2 智能汽车研究与发展的问题	5
1.3 本书结构	9
1.4 超出本书讨论范围的内容	11
1.5 参考文献	15
第 2 章 轮胎摩擦的先进建模与监测	28
2.1 引言	29
2.2 纵向胎路摩擦建模	30
2.2.1 纵向胎路摩擦特性	30
2.2.2 典型的纵向胎路摩擦模型	31
2.3 横向胎路摩擦建模	38
2.3.1 横向胎路摩擦模型	38
2.3.2 自行车模型	40
2.4 集成的胎路摩擦建模	43
2.4.1 集成的胎路摩擦特性	43
2.4.2 经验和半经验集成模型	44
2.4.3 解析集成模型	45
2.5 胎路摩擦监测器	47
2.5.1 胎路摩擦监测器架构	47
2.5.2 经验纵向胎路摩擦模型辨识	47
2.5.3 解析的纵向胎路摩擦模型的观测器	49
2.5.4 经验横向胎路摩擦模型辨识	52
2.6 本章小结	53
2.7 参考文献	54
第 3 章 汽车横向的先进运动控制	62
3.1 引言	63
3.2 线控转向系统	63
3.3 车辆横向运动建模与控制策略	67
3.4 车辆横向运动检测器	69
3.5 车辆转向控制器设计	74

3.5.1 车辆横向运动控制目标	74
3.5.2 鲁棒车辆转向控制器	75
3.5.3 滑模转向控制器	87
3.5.4 自适应转向控制器	89
3.5.5 模糊转向控制器	89
3.6 本章小结	92
3.7 参考文献	92
第4章 汽车纵向的先进运动控制	106
4.1 引言	107
4.2 先进的车辆传动系统控制	108
4.2.1 先进的汽车发动机控制	108
4.2.2 先进的汽车变速器控制	115
4.3 汽车空气动力学	118
4.4 先进的车辆跟踪与制动控制	120
4.4.1 先进的汽车追踪与制动控制	120
4.4.2 防抱死制动系统设计	127
4.5 自适应巡航控制	133
4.6 本章小结	135
4.7 参考文献	135
第5章 汽车垂向的先进运动控制	145
5.1 引言	146
5.2 道路粗糙度建模	147
5.3 先进的车辆悬架系统	149
5.3.1 线性时不变悬架控制器	149
5.3.2 鲁棒悬架控制器	153
5.3.3 模糊悬架控制器	156
5.4 悬架系统的参数估计与故障检测	160
5.5 防侧翻控制	165
5.6 本章小结	168
5.7 参考文献	168
第6章 单车的先进运动控制	176
6.1 引言	177
6.2 车辆路径、轨迹规划	179
6.3 车辆泊车问题	190
6.4 纵向、横向、垂向车辆运动控制综合	198
6.5 参考文献	205
第7章 多车的先进运动控制	212
7.1 引言	213

7.2 车间通信技术	214
7.3 车队控制	215
7.4 换道和并道控制	219
7.4.1 车辆换道控制	219
7.4.2 车辆并道控制	226
7.5 交叉口协同驾驶	230
7.5.1 交叉口无协同驾驶	230
7.5.2 交叉口有协同驾驶	233
7.6 本章小结	242
7.7 参考文献	243
第8章 智能车辆视觉系统	253
8.1 概述	254
8.2 基于视觉传感器进行车道、路面检测的优势	255
8.2.1 使用 CMOS/CCD 摄像头和雷达的车道、路面检测	255
8.2.2 使用激光雷达和激光传感器的车道、路面检测	263
8.2.3 车道和车道偏离的同时检测和定位	266
8.3 基于视觉信息进行车辆检测的优势	266
8.3.1 基于 CMOS/CCD 的车辆检测	267
8.3.2 使用调频连续波雷达的车辆检测	273
8.3.3 使用激光雷达或激光传感器进行车辆检测	278
8.4 基于视觉信息进行行人识别的优势	278
8.4.1 使用 CCD/CMOS 摄像头的行人检测	279
8.4.2 使用红外摄像头的行人检测	281
8.5 基于视觉进行交通标志检测的优势	282
8.6 基于视觉的驾驶人监测器的优势	284
8.6.1 驾驶人、乘客位置和姿势检测	285
8.6.2 疲劳驾驶分析	286
8.6.3 驾驶行为分析	287
8.7 智能视觉系统的进一步讨论	287
8.7.1 多视觉传感器融合	287
8.7.2 视觉共享	288
8.7.3 交通基础设施和车辆视觉系统	290
8.7.4 视觉传感器设计、校准和故障检测	290
8.7.5 基于视觉的环境检测和视觉系统的灵活性	291
8.8 参考文献	293
第9章 智能汽车轮胎检查及监测	314
9.1 引言	315
9.2 离线轮胎检查技术进展	317

9.2.1 轮胎胎面检查	317
9.2.2 轮胎布帘层、束带层检查	318
9.2.3 轮胎轴承检查	321
9.3 在线实时轮胎监测技术的发展	322
9.3.1 SAW 轮胎传感器	322
9.3.2 轮胎滚动、旋转分析及气压监测	329
9.3.3 其他的轮胎形变、压强监测传感器	332
9.4 进一步讨论	334
9.5 参考文献	335

智
目

能汽车：先进传感与控制



第1章 引 言

1.1 智能交通系统中的智能汽车

近 20 年来,智能汽车(Intelligent Vehicles, IV)的研发投入大幅增长,并应用于海陆空运、军民两用及高科技领域,取得了巨大成功。智能汽车受到如此多的关注,主要源于其在提升驾驶安全性、效率以及改善人们现代化生活品质方面的潜在优势。作为智能交通系统(Intelligent Transportation Systems, ITS)的重要组成部分,智能汽车利用先进的传感、通信、计算和控制技术来获悉驾驶环境与状态,用以辅助车辆运行、交通控制、服务管理及其他相关事项。此外,诸如普适计算技术、自组织网络技术、智能空间技术等新兴技术的最新进展也为未来智能汽车的发展带来新的契机。我们深信:智能汽车行驶在智能道路上,甚至更为广阔的智能空间中,将是未来智能汽车领域发展的新浪潮。

智能汽车的相关技术发展可追溯到 20 世纪七八十年代。而地面智能交通工具(指智能汽车)的概念是在 20 世纪 90 年代末逐渐普及的。诚如 Little^[13]所述,“自本世纪初,伴随着计算机与信息技术的革命浪潮,无论从用户交互体验还是车辆保有量等方面,机动车都在经历最深刻的变革”。认识到智能汽车的重要性以及不将人因因素作为汽车设计核心将会带来意外的不良后果,美国交通部(Department of Transportation, DOT)展开了智能汽车先导(Intelligent Vehicles Initiative, IVI)计划。该先导计划旨在加强集成车载系统的发展、普及与应用,帮助货车、公交车、小轿车的驾驶员提升驾驶安全性与效率。不久之后,1998 年颁布的 21 世纪交通效率法案(TEA-21)授权 IVI 计划正式成为美国交通部智能交通项目的重要部分。

过去十年,智能汽车领域相关研究由于政府、公众、车企及车辆产品供应商的高度关注而持续推进^[1-25]。现在,越来越多的研究者和消费者相信智能汽车正是满足人们对于安全、节能、环保、舒适的交通服务日益增长需求的关键要素。然而,对于智能汽车应具备哪些功能、呈现何种形态的问题仍然没有形成共识。总之,对于智能汽车的定义标准,即何种汽车应当称为智能汽车,研究者们仍然存在争论。

美国交通部认为 IVI 计划应当至少在以下三种驾驶条件下提升安全性:正常驾驶条件、退化驾驶条件和迫近事故条件。为了实现该目标,联邦智能交通系统项目组给出了智能汽车必须具备的三大系统:冲突避让系统、碰撞通报系统和辅助驾驶系统。更精确地说,IVI 计划重点在以下八大功能领域实施:追尾碰撞避让、换/并道冲突避让、车道偏离冲突避让、交叉口冲突避让、驾车视野提升、车辆稳定性、驾驶员状态预警和安全警示服务。

全世界范围内在上述领域的研究已经获得了诸多成果。Bishop^[18]根据智能

汽车具备功能的多寡将正在研发的智能汽车分成以下三个等级：a) 车内系统可为驾驶员提供辅助或警示服务的功能（冲突预警系统）；b) 车内系统可获取车辆的部分控制权，如在平稳状态下的辅助驾驶或在冲突迫近下的紧急干预（冲突避让系统）；c) 车内系统获取车辆的全部控制权（车辆自动化）。一般而言，由于冲突避让的重要性，绝大多数研究者认为一辆所谓的智能汽车应用具备等级 a) 的功能。根据 Dravidam 和 Tosunoglu 的估计，15% ~ 20% 的交通事故涉及追尾碰撞^[27]。而美国国家公路交通安全管理局（National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA）的数据显示，美国 88% 的追尾碰撞事故是由于驾驶人精力不集中或后车跟车过近造成的。因此，冲突预警系统被认为是智能汽车最基本的功能。

然而，Bishop 同样指出，所谓的冲突预警系统本身也是由部分重叠的子功能系统构成的，包括前车冲突预警、障碍冲突预警、追尾冲突预警、自行车/行人冲突预警等。迄今为止，大多数实验车辆仅能实现上述这些子功能的一部分。图 1.1 所示为丰田 AHS 项目早期设计的智能汽车系统。但一般来说，这些早期的设计方案仍然被称为智能汽车。

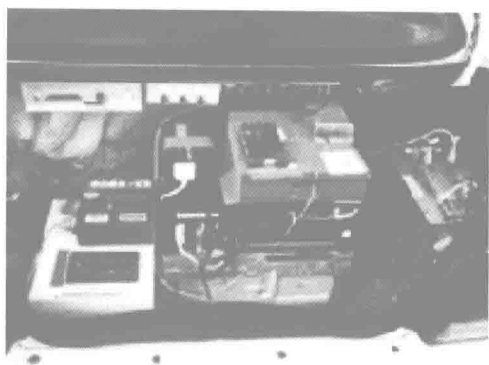


图 1.1 丰田 AHS 项目车辆的架构，包含早期面包车版本的计算机化车辆、操作控制器及基于 GPS 的导航系统^[28]

有些研究者却认为汽车不会实现自动驾驶^[21,29]，Jones^[21]将他们的观点总结如下：

“虽然汽车将会很快实现像驾驶人驾驶一样引导汽车驶入道路，但完全没有驾驶人介入的全自动驾驶车辆可能很难实现大规模的商业生产。”

“新技术是为了辅助而不是取代驾驶人”，爱荷华市爱荷华大学公共政策中心人因研究项目组首席专家 Daniel McGehee 如是说。他提到给予汽车完全的自身控制权，将会引发一系列复杂程度类似于“谁应该对一起交通事故负责，是驾驶人还是汽车制造商”的法律纠纷问题。

其余一些不愿透露姓名的汽车传感和人因研究领域的专家们则强调智能汽车

系统的制造商和经销商可能需要面临承担严重赔偿责任的潜在危险。

这种潜在的危险还使得那些曾出现在电影电视中的汽车只需要询问驾驶人目的地就可到达的场景也仅可能局限在电影镜头之中。

他们的论断不无道理，由于各种各样的原因，全自动驾驶的商业车辆在短期内很难出现在城市道路中。但智能汽车绝不仅是智能商业汽车。尽管全自动驾驶的车辆很难进入一般领域，但其在特殊领域的制造与应用则越来越多。一个典型的案例就是为了响应美国国会和国防部有关加强智能汽车的研发用以在战场上挽救美国士兵生命的呼吁，DARPA 智能车辆挑战赛应运而生。数十组来自世界各地的高校和企业的代表队积极参与其中^[30-33]。图 1.2 所示为在 2004 年 DARPA 挑战赛中由奥本大学队设计的自动驾驶汽车。2005 年，也有一些全自动驾驶汽车成功通过整个挑战测试赛。



图 1.2 Fontana 挑战赛中，AVIDOR-2004 汽车行驶在加州 QID 高速公路上^[32]。

车辆控制系统主要依赖于放置在各锚点的差分 GPS (Starfire) 和惯导传感器来导航路径，它利用红外传感器 (LIDAR) 的超声波传感器提供路径跟踪和障碍避让功能

全自动汽车在采矿场和驾驶测试场等场合也得到设计与应用^[34]。图 1.3 所示是由布伦瑞克技术大学团队进行的一次有趣的商业尝试。这个驾驶机器人 Klaus 是由德国汽车制造商大众 (Volkswagen) 公司研发的，正在驾驶一辆大众多用途客货车进行测试。精细的汽车控制系统和传感技术可检测周边道路环境并计算出合理的驾驶行为。

智能汽车的概念及其引申内容在过去十年间逐渐发生了变化。一方面从字面含义看，尽管 IVI 计划中仅涉及地面交通运输系统，但绝不仅是地面智能汽车称为智能汽车，其他水下运输工具或气垫船、空中运输工具都可看作是智能汽车。而另一方面，智能汽车与智能移动机器之间的概念界线越来越模糊，一些大型的移动机器有时也被认为是智能汽车。需要指出的是，严格意义上的智能汽车仍然尚待研发。本书仅

考虑并讨论目前被广泛接受的地面智能汽车。然而毋庸置疑的是,由于移动机器人技术已经得到广泛应用或获得了认可,智能汽车研究者们将会对该领域的成果择善而从,继承并扩展许多实用的技术和方法并将其应用到智能汽车领域^[35-38]。



图 1.3 由德国汽车制造商大众公司研发的驾驶机器人 Klaus,正在驾驶一辆大众 MPV 进行测试, <http://www.vw-personal.de/>

1.2 智能汽车研究与发展的问题

如上所述,智能汽车相关研究包含以下几类多重准则的目标:

- 1) 安全性是最重要的目标,并应当重点关注。
- 2) 节能高效性有利于交通流的控制。
- 3) 舒适性,需要考虑驾驶和乘坐人员的感受。
- 4) 环保性,低噪低污染。

为了满足上述目标,智能汽车应具备处理以下任务的功能:

- 1) 快速的车路信息采集与处理功能,包括视觉传感(CCD/CMOS、雷达、激光)、位置传感(INS、GPS、MNS)、发动机传感和轮胎传感等。
- 2) 基于采集信息的驾驶决策功能,包括冲突避让、路径导航、最短路径规划、换道并道辅助等。
- 3) 基于生成决策的驾驶控制功能,包括横向运动控制、纵向运动控制和横纵向结合控制。

基于对上述功能的分类,智能汽车的相关研究也可相应地分为三大领域:传感、决策和控制。

现代汽车是由大量机械、电子和机电类元件构成的高度复杂的系统^[39-44]。为了描述和感知车辆的状态,近30年来大量的传感器得以研发。例如, Jones^[21]列举了智能汽车所配备的各类传感器并将它们分成若干独立的类别,如

聚焦于这些独立功能的应用。

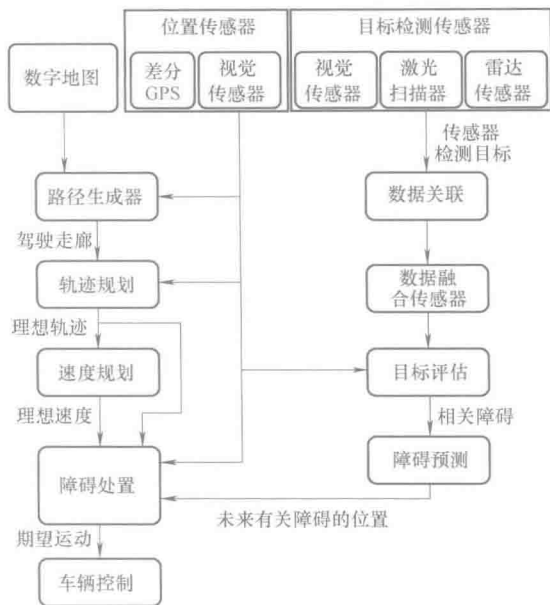
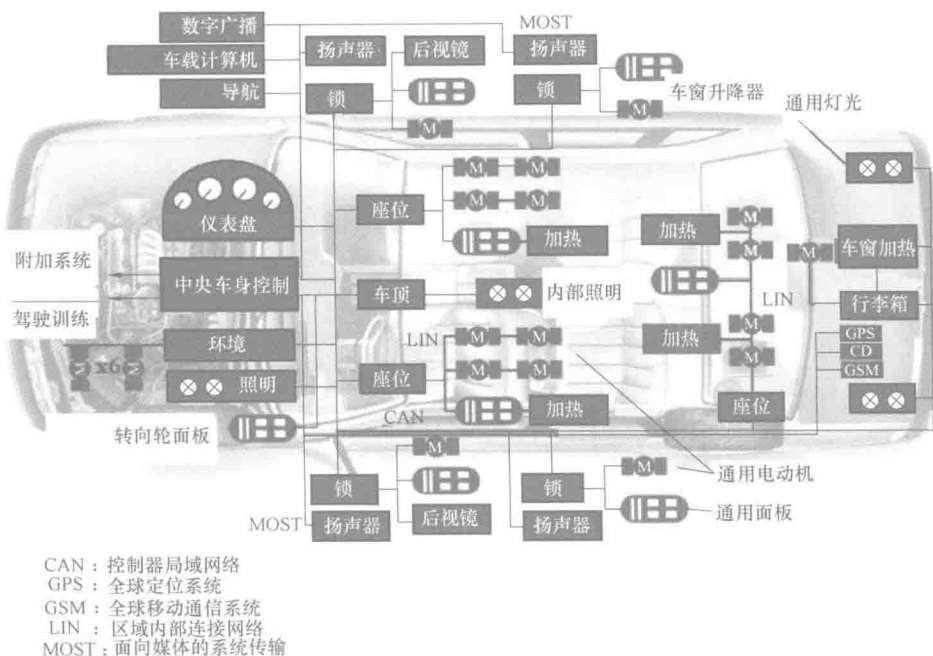
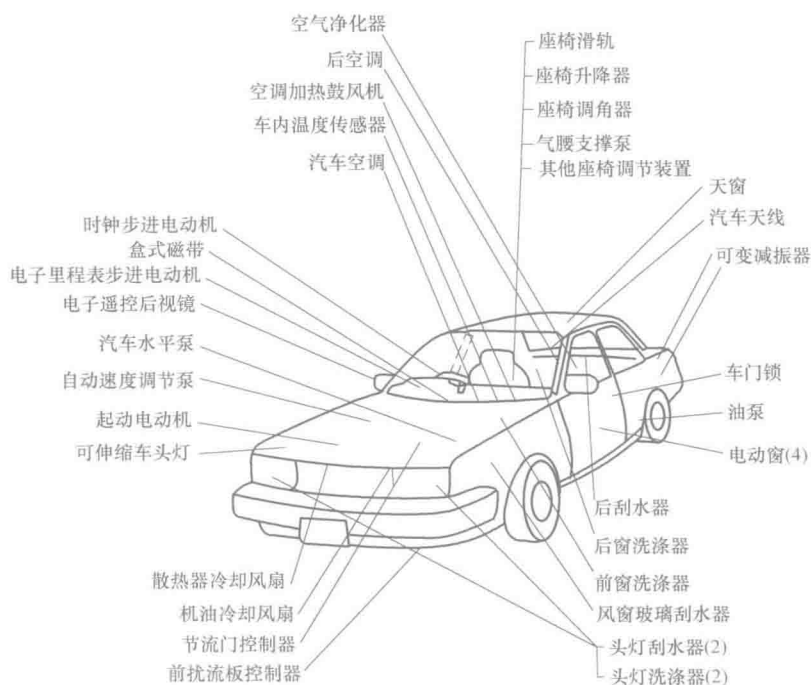


图 1.5 智能汽车导航算法流程图^[57]

此外，对于支持实现上述功能的软硬件研发工作近年来也越来越受到关注。例如，人们对于安全驾驶和舒适驾驶日益增长的需求促使汽车经销商与供应商主动推进类似“线控”子系统新技术的进步^[45-53]。这些计算机控制子系统包含线控转向、线控制动、线控驱动等，均通过车载计算机网络相连。线控转向系统采用电子连接，能够取代传统汽车方向盘与车轮执行机构之间的机械联动装置。因为它能够消除方向盘和车轮之间直接的运动学联系，因此，能够通过汽车控制算法来改善车辆的转向性能。

比线控子系统更加复杂和有效的是车内总线系统，它也越来越受到人们的重视。通常车辆总线是指连接汽车内部各部件的电子通信网络。由于成本、可靠性和实时性等专业的需求和约束，传统的网络通信协议（如以太网、TCP/IP）并不适合车内总线系统。OSEK-VDK 就是一种典型的车内总线系统。诸如发动机控制模块（Engine Control Modules, ECM）、传输控制模块（Transmission Control Modules, TCM）、防抱死制动系统模块（Anti-lock Brake System Modules, ABS）等越来越多的车辆控制部件均通过车内总线系统相互连接，如图 1.6 所示。

在不久的将来，可以预见到每一辆智能汽车的部件，包括车窗、座椅、刮水器、风扇、空调等均能和车内智能中心通信，如 1.7 所示。当然，由于这些部件与车辆运动控制关联不大，因此，相关内容不在本书的讨论范围之内。

图 1.6 车内总线系统示意图^[52]图 1.7 纯电动或混合动力电动汽车的电动机示意图^[54]