

QICHE ZONG-CEXIANG DONGLIXUE JI DIANKONG JISHU

# 汽车纵侧向动力学 及电控技术

王金波 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 汽车纵侧向动力学及电控技术

王金波 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

·北京·

## 内 容 提 要

本书紧密围绕汽车纵侧向动力学控制及关键技术,介绍系列理论建模、仿真计算、试验验证等内容,包括汽车纵侧向动力学及电控技术概述、相关技术发展现状、汽车系统动力学建模、驾驶员的特性与汽车安全运行、EPS 回正控制技术、EPS 与 ESP 协调控制、EPS/ESP 协调控制试验等。

本书可作为高等院校汽车类(车辆工程、交通运输)专业教材,也可供汽车电控系统开发等行业工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

汽车纵侧向动力学及电控技术 / 王金波著. — 北京:  
中国水利水电出版社, 2019. 4  
ISBN 978-7-5170-7589-9

I. ①汽… II. ①王… III. ①汽车—动力转向装置—  
研究②汽车—电子系统—控制系统—研究 IV.  
①U463.403②U463.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第069201号

策划编辑: 杜 威 责任编辑: 张玉玲 加工编辑: 高双春 封面设计: 李 佳

书 名	汽车纵侧向动力学及电控技术
作 者	王金波 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a> E-mail: <a href="mailto:mchannel@263.net">mchannel@263.net</a> (万水) <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a>
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市元兴印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 11.25印张 145千字
版 次	2019年4月第1版 2019年4月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	50.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换  
版权所有·侵权必究

# 前 言

汽车动力学及其控制问题一直是学界研究的热点。在我国曾出版过不少关于这方面的图书，但很多显得内容陈旧；新近的文章和书籍虽然不少，但都比较分散并各有侧重点，一些新颖的观点尚未反映在书中，急需改革、更新。撰写一本内容新颖并具有理论意义和工程背景的汽车纵侧向动力学及电控技术方面的专著，是作者多年的梦想。

本书不想在阐述前人的理论和方法方面求多求全，而力求内容能够新颖和切合实用。本书的内容多为作者近年来发表的一些研究及学习心得以及指导研究生的成果，并吸收了国内外同行的研究成果。本书可作为工程技术人员及高校学生的参考书。在本书的研究和形成过程中，得到导师合肥工业大学王其东教授、陈无畏教授的悉心指导和帮助，是他们把我引入了汽车纵侧向动力学研究领域。在日常工作及科学研究方面，得到作者单位山东交通学院汽车工程学院刘树民书记、于明进院长等领导的指导和帮助；在控制算法、数值计算方面，作者曾请教过合肥工业大学赵林峰副教授、夏光副教授、黄鹤博士、王家恩博士等；在试验方面，得到了朱文勃、从光好、时利、黄清泉、刘伟等硕士的帮助，在此向他们表示深深的感谢。

由于水平有限，书中难免有疏漏之处，诚恳期望得到同行专家和广大读者的批评指正。

作者

2019年1月

# 目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 汽车纵侧向动力学及电控技术概述	1
1.2 相关技术历史及现状	4
1.2.1 EPS 研究现状	4
1.2.2 ESP 研究现状	8
1.2.3 汽车底盘协调控制研究现状	12
1.2.4 EPS/ESP 协调控制研究现状	15
1.3 本书主要内容	18
1.4 本章小结	20
第 2 章 汽车系统动力学建模	21
2.1 引言	21
2.2 二自由度车辆模型	21
2.3 七自由度车辆模型	23
2.4 侧向-纵向联合轮胎模型	24
2.5 驾驶员模型	27
2.6 仿真分析与试验验证	30
2.7 本章小结	33
第 3 章 驾驶员的特性与汽车安全运行	34
3.1 前言	34
3.2 驾驶员-车辆模型	35

3.2.1	人-车-路闭环系统 .....	35
3.2.2	驾驶员-车辆模型 .....	36
3.3	EPS 控制算法设计 .....	38
3.4	双移线工况仿真分析 .....	40
3.5	驾驶员紧急转向工况分析 .....	45
3.5.1	驾驶员紧急转向行为特性 .....	45
3.5.2	紧急转向时的车辆运动轨迹 .....	47
3.5.3	纵向车速与车辆运动位置的关系 .....	47
3.5.4	车辆道路位置与车辆运行轨迹的关系 .....	48
3.5.5	驾驶员反应时间与车辆运动轨迹的关系 .....	49
3.5.6	相同 TLC 时的车辆紧急转向运行轨迹 .....	50
3.5.7	道路曲率与车辆运动位置的关系 .....	51
3.6	EPS 硬件在环试验 .....	52
3.6.1	试验台结构及功能介绍 .....	52
3.6.2	EPS 转向国标试验 .....	54
3.6.3	EPS 硬件在环试验 .....	58
3.7	本章小结 .....	61
<b>第 4 章</b>	<b>EPS 回正控制技术 .....</b>	<b>62</b>
4.1	引言 .....	62
4.2	汽车自回正转矩分析 .....	63
4.3	质心侧偏角的估计 .....	67
4.3.1	EKF 滤波 .....	68
4.3.2	UKF 滤波 .....	70
4.3.3	质心侧偏角估计—UKF .....	73
4.4	控制器设计 .....	76

4.4.1	控制系统总体结构 .....	76
4.4.2	EPS 控制器设计 .....	77
4.5	仿真分析 .....	80
4.6	EPS 转向回正性试验 .....	83
4.7	逆向冲击力矩测试 .....	86
4.8	本章小结 .....	88
<b>第 5 章</b>	<b>EPS 与 ESP 协调控制 .....</b>	<b>89</b>
5.1	引言 .....	89
5.2	汽车失稳机理 .....	90
5.3	汽车行驶安全边界 .....	91
5.3.1	汽车行驶安全边界的定义 .....	93
5.3.2	路面附着系数的估计 .....	93
5.3.3	汽车行驶安全边界的确定 .....	96
5.4	EPS 与 ESP 系统协调控制器 .....	98
5.4.1	上层控制器 .....	102
5.4.2	下层控制器 .....	107
5.5	计算机仿真分析 .....	111
5.6	ESP 硬件在环试验 .....	113
5.6.1	ESP 的工作原理 .....	113
5.6.2	ESP 试验台介绍 .....	115
5.6.3	ESP 控制硬件在环试验 .....	125
5.7	本章小结 .....	128
<b>第 6 章</b>	<b>EPS/ESP 协调控制试验 .....</b>	<b>129</b>
6.1	EPS 控制系统 .....	129
6.1.1	硬件电路 .....	129

6.1.2	软件程序.....	130
6.2	ESP 控制系统.....	131
6.2.1	硬件电路.....	131
6.2.2	软件程序.....	132
6.3	EPS 与 ESP 上层控制器.....	133
6.3.1	硬件电路.....	133
6.3.2	软件程序.....	138
6.4	实车试验.....	139
6.4.1	试验设备及仪器介绍.....	139
6.4.2	试验软件.....	144
6.4.3	试验仪器标定.....	146
6.4.4	EPS 与 ESP 协调控制试验.....	148
6.5	本章小结.....	152
<b>第 7 章</b>	<b>本书总结与展望.....</b>	<b>153</b>
7.1	总结.....	153
7.2	展望.....	155
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>156</b>
<b>附录</b>	<b>.....</b>	<b>170</b>

# 第 1 章 绪论

随着汽车动力学、电子技术的发展,各种基于提高和改善汽车动力性、经济性、安全性等的电控技术在汽车上得到广泛应用。汽车纵向动力学主要研究汽车的动力性和制动性,汽车侧向动力学主要研究汽车的操纵稳定性。本书的汽车纵侧向动力学忽略垂向运动的影响,仅考虑汽车平面运动。以电动助力转向(Electric Power Steering, EPS)系统和电子稳定程序(Electronic Stability Program, ESP)为代表的汽车底盘电控系统装车率越来越高,对提高汽车的各方面性能发挥了重要作用。然而,这些系统大都侧重于提高汽车单一的性能指标,由各零部件厂商单独开发,未考虑与其他电控系统的信号共享及协调等问题,简单的功能叠加往往会导致子系统之间的冲突,不能使汽车性能达到最优。汽车底盘集成与协调控制是近年来研究的热点之一。底盘协调控制实现各系统之间的信号共享,避免各子系统之间的冲突和干扰,根据行驶工况和车辆状态等的变化,充分发挥各子系统的特长,实现整车综合性能的最优。

## 1.1 汽车纵侧向动力学及电控技术概述

近年来,用于改善汽车的纵向、侧向和垂向动力学特性的电控技术已广泛应用于汽车底盘控制中,使汽车的动力性、操纵稳定性和行驶安全性都得到了极大提升。车载传感器使得现代汽车能够足够智能地去感知周围的环境,给电控系统提供相应的信号,提高了汽车的操纵性、稳定性、安全性和舒适性。在车辆纵向、横向、垂向控制方面,出现的电控系统有牵引力控制系统(Traction Control System,

TCS)、制动防抱死系统 (Anti-lock Braking System, ABS)、电子稳定程序 (ESP)、直接横摆力矩控制 (Direct Yaw-moment Control, DYC); 主动前轮转向 (Active Front Steering, AFS)、电动助力转向 (EPS)、四轮转向 (4 Wheel Steering, 4WS); 连续阻尼控制 (Continuous Damping Control, CDC)、主动悬架 (Active Suspension, AS) 等。

汽车底盘电控系统的发展经历了以下阶段: 第一阶段是以 4WS、ABS、ESP、TCS 等为代表的汽车电控系统的应用。这些系统主要由传感器、电子控制单元及执行机构组成, 某些技术已发展的较为成熟。第二阶段主要有线控转向 (Steer by Wire, SBW)、线控制动 (Brake by Wire, BBW)、线控油门 (Throttle by Wire, TBW) 等以线控技术为核心的汽车电控系统, 降低了机械连接的复杂程度, 取而代之的线控单元随时根据汽车状态信息提供相应的控制信号, 改善了汽车的操纵稳定性和乘坐舒适性。第三阶段是底盘集成控制系统 (Integrated Chassis Control, ICC), 又称为底盘综合控制系统 (Global Chassis Control, GCC), 这是汽车底盘电控系统未来发展的方向。

在转向方面, EPS 因其具有技术成熟、可靠性高、节能环保等优点, 已成为绝大多数乘用车的标准配置; 制动方面, ESP 已逐渐成为中高级乘用车的标准配置。转向回正性是反映汽车操纵稳定性的重要指标。现有研究大多以转向盘转角、转矩、前轮回正力矩作为转向回正控制的参考输入。基于此, 需要充分利用车载 ESP 传感器的信号, 对车辆状态的参数进行估计, 并将估计到的车辆状态参数作为 EPS 转向回正性控制的依据, 来提高汽车的转向回正性。人们对汽车的性能提出了越来越高的要求, 由于车辆与驾驶员之间存在着相互作用和影响, 而驾驶员个体之间的差异很大, 故有必要考虑不同驾驶员之间的个体差异, 利用 EPS 控制来提高汽车的性能。

实践证明, 单一的电控系统往往只能改善车辆某方面的性能, 当多个子电控系统同时装在车辆上时, 由于子系统控制目标不同, 而控制的执行元器件有重合

部分,造成了各子系统之间的干扰、重叠甚至冲突,影响控制效果。作为控制汽车侧向、纵向运动的转向、制动系统都是汽车底盘的重要组成部分,直接影响到车辆的操纵稳定性。轮胎的纵向力和侧向力存在摩擦椭圆的耦合,纵向附着系数-滑移率的关系表明轮胎纵向力和垂向力之间存在耦合,同理,侧向附着系数-侧偏角之间的关系表明轮胎侧向力和垂向力存在耦合,汽车控制的规律大多与轮胎的线性、非线性特性有关。影响轮胎-路面接触特性,并对侧向力有直接影响的因素有前轮转角、轮胎的侧偏角、后倾角,驱动和制动操作对纵向力有直接影响。由于最大附着潜力的存在,轮胎垂向力对纵向力和垂向力均有影响。纵向/侧向/垂向动力学之间的耦合如图 1.1<sup>[1]</sup>所示。

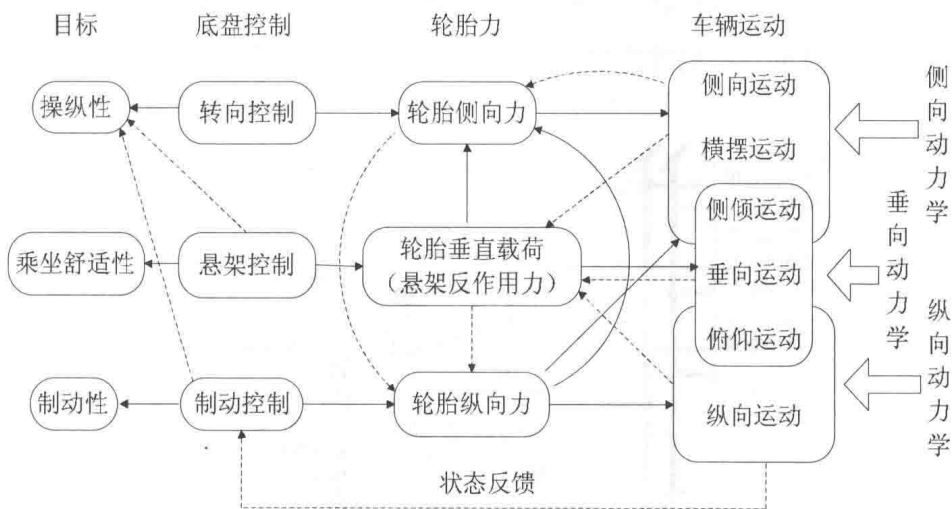


图 1.1 纵向/侧向/垂向动力学之间的耦合

由于 EPS、ESP 的装车率越来越高,二者对于提高汽车的操纵稳定性和行驶安全性都具有重要作用,汽车侧向、纵向运动之间存在动力学耦合关系。故研究二者之间的协调控制及关键技术具有重要意义和良好的应用价值。

本书以 EPS/ESP 协调控制为核心,进行了 EPS 回正性、考虑驾驶员因素的 EPS 控制、协调控制等关键技术的研究。

## 1.2 相关技术历史及现状

### 1.2.1 EPS 研究现状

EPS 主要由助力电机、转矩传感器、管柱总成及 ECU 等组成。其工作原理如图 1.2 所示。ECU 根据整车 CAN 网络上仪表盘模块对汽车的点火状态及发动机的运行状态进行判断，感知汽车是否处于运动状态。同时，由轮速传感器信号，对当前汽车的轮速/车速进行一定的逻辑判断，并结合转矩传感器获得的转向盘转矩信号判断驾驶员的操作意图，从而控制 EPS 助力电机进行助力控制、低速回正补偿控制或高速回正阻尼等控制。

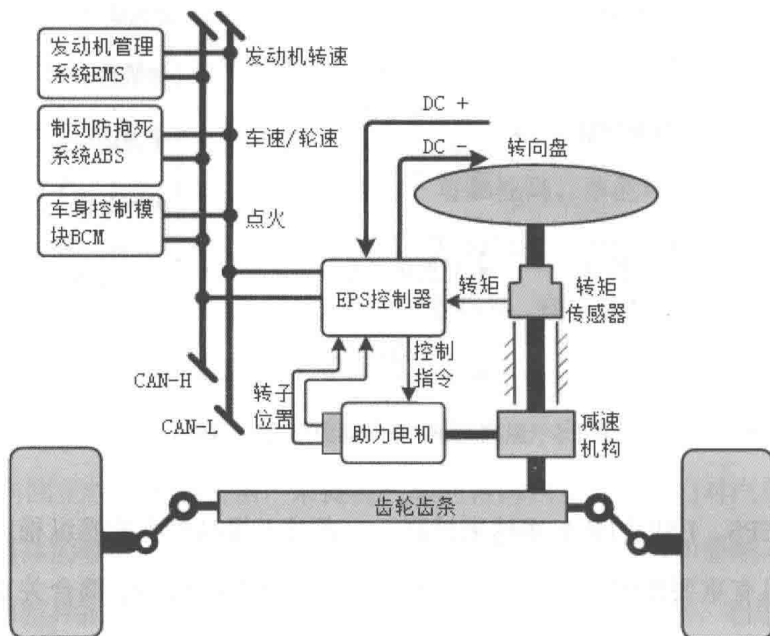


图 1.2 EPS 原理图

状态参数估计方面。范璐等<sup>[2]</sup>利用轮速和横摆角速度实时估计路面附着系数，

并设计电流补偿助力控制器,提高了驾驶员的驾驶路感。赵飞翔等<sup>[3]</sup>采用电阻在线辨识和前馈反馈综合控制的方法改善了电机的电流跟随速度和力矩控制精度。郑太雄等<sup>[4]</sup>通过估计路面附着系数获取 EPS 系统阻力矩,用未知输入观测器估计转向盘转矩,基于 EPS 状态反馈实现对系统的无传感器最优控制。李绍松等<sup>[5]</sup>通过建立 EPS 模型估计折算到转向小齿轮上的路面冲击力矩,确定出路面冲击补偿电流,衰减了由路面冲击导致的转向盘干扰力矩。Hsu 等<sup>[6-8]</sup>通过量产车上的传感器(包括 SBW、EPS 的转矩传感器)估计轮胎侧偏角,基于一个简单的回正力矩模型,利用转向盘转矩及 GPS 测得的侧偏角信息来估计各种路况下轮胎的侧偏刚度。

利用 EPS 转向盘转矩中的轮胎气胎拖距信息在车辆达到侧向极限之前就能监测到其侧向操纵极限(操纵极限由轮胎侧偏角和最大侧向力决定),来估计最大侧向力<sup>[9]</sup>。Yasui 等通过转向力矩和 EPS 电机电流来获得回正力矩,轮胎侧偏角通过 ESP 的车辆侧偏角来计算,由回正力矩和轮胎侧偏角的关系估计横向附着裕量(Lateral grip margin, LGM),LGM 在道路湿滑和轮胎抓地能力变差时提醒驾驶员,通过集成基于 LGM 的制动控制和 ESP 来改善车辆的行驶稳定性。

控制策略方面。赵树恩等<sup>[10]</sup>设计了一种能主动转向的 EPS 控制系统,满足了汽车极限运行工况时整车操作稳定性的要求,使得车身质心侧偏角和横摆角速度减小。吕英超等<sup>[11]</sup>设计了 EPS 用永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)的弱磁控制策略。詹长书等<sup>[12]</sup>为了减小系统的跟踪误差,采用转向盘转矩和电流环反馈进行闭环控制,获得了良好的动态响应特性。程安宇等<sup>[13]</sup>利用转矩信号和电机控制信号相融合的方法,改善了 EPS 系统的稳定性和安全性。文献[14]基于线性二次高斯控制(Linear-quadratic-Gaussian control, LQG)设计主动转向系统,具有较好的鲁棒性。郑太雄等<sup>[15]</sup>设计了基于模糊规则的助力-回正特性,采用 EKF 估算定子磁链与位置,利用直接转矩控制算法提高了电机控制精度与响应速度。张海林等<sup>[16]</sup>集成 EPS 与车道保持系统,介绍一种考虑驾驶员跨道时间与操作行为判断的车道保持协调控制方法,确保了车辆的行驶安全性。臧怀泉

等<sup>[17]</sup>基于遗传算法的鲁棒  $H_{\infty}$  EPS 控制策略提高了驾驶员的路感和行驶安全性。向丹等<sup>[18]</sup>提出综合惯性补偿、相位超前补偿和阻尼补偿等的控制策略,满足了低速转向轻便性和高速转向路感强的要求。张虎等<sup>[19]</sup>基于扰动观测器设计鲁棒预测电流控制算法,提高了电流跟踪的稳态与动态性能。张荣芸等<sup>[20]</sup>设计了 LPV/ $H_{\infty}$  鲁棒控制器,减小了系统参数的不确定性对其性能的影响,提高了路感和助力性能。周兵等<sup>[21]</sup>为了提高在低附着路面的路感和防止驾驶员的误操作,根据估计到的低附路面的前轴侧向力来确定 EPS 的补偿电流值,取得了较好的效果。程寿国<sup>[22]</sup>建立了 EPS 电子控制单元的有限元热模型,设计了最优的 ECU 散热结构,提高了 ECU 的散热能力。罗苏安等<sup>[23]</sup>设计基于 MC9S12P64 ECU 的 EPS 系统。转向助力矩的频率响应受汽车动力学的影响而改变,Yamazaki 等<sup>[24]</sup>通过在现有的 EPS 系统的滤波器增加黏度控制来改善驾驶感。为提高车辆的操纵稳定性,在侧向加速度或横摆角速度达到临界值时采取适当的控制策略。Wang 等<sup>[25]</sup>提供了防止过度转向的方法,横摆角速度传感器检测横摆角速度信号并传给 CPU,横摆角速度达到临界值时,控制助力电机防止过度转向。转向系统的设计必须确保驾驶员的安全和舒适,然而,这些特性很难定量描述,因此现在的控制器设计需要很多实验,Sugita 等<sup>[26]</sup>提出 EPS 包括阻尼、惯性补偿、振动抑制的控制器。

Sugiyama 等<sup>[27]</sup>开发了一套减小转向时来自地面车轮振动的 EPS 控制策略,不影响不同频率下回正力矩产生的路面信息,此 EPS 控制器根据特定频率下的电机角速度阻尼特性设计,试验验证了在不平路面上不牺牲回正力矩产生的路面信息的基础上,能够减小转向振动。路面车辙产生的干扰力矩影响车辆行驶的机动性,传统的 EPS 不能分辨驾驶员输入力矩与路面产生的力矩,Koyama 等<sup>[28]</sup>基于 EPS 来提高在车辙路面上转向机动性,检测来自路面凹槽的力矩。当检测到干扰力矩时,EPS 进行相应的补偿,转向拉力减小并未妨碍驾驶员转向感。该方法减小了转向力,提高了在凹槽路面上的转向机动性。

Hung 等<sup>[29]</sup>设计了小波模糊神经网络、不对称的隶属函数与改进的微分进化

算法,用来控制 EPS 的 PMSM,改善驾驶舒适度和车辆的稳定性。Marouf 等<sup>[30]</sup>用滑模控制来跟踪期望的 EPS 助力电机转角,以满足期望的性能。用测得的电机电流和转向角,设计了未知输入的级联滑模观测器对 EPS PMSM 进行无传感器控制<sup>[31]</sup>。Hanifah 等<sup>[32]</sup>通过蚁群优化算法寻找 PID 控制器最优的增益参数,减小电动汽车上 EPS 的能量损耗。

转向回正控制方面。赵万忠等<sup>[33]</sup>以转向盘转角和转速为控制信号的输入,采用模糊自整定 PID 回正控制策略,以回正控制电压为输出,改善了电动客车的转向回正性。滕广宇等<sup>[34]</sup>以转向盘残余转角及转向盘回正角速度作为评价车辆低速转向回正性的试验指标。赵林峰等<sup>[35]</sup>融合估算的转向盘转角值和测得的转向盘转矩信号来判断转向状态,用模糊 PD 控制策略进行助力控制和回正控制。熊亮等<sup>[36]</sup>介绍一种仅通过改变 EPS 控制程序的无转向盘转角传感器主动回正控制方法。史松卓等<sup>[37]</sup>基于转向盘转角进行 EPS 主动回正控制研究,改善转向回正性。由于 EPS 摩擦转矩和系统参数具有不确定性,Chen 等<sup>[38]</sup>提出了助力和回正控制的触发规则,设计了 EPS 回正滑模控制策略,改善了转向回正性。张维等<sup>[39]</sup>基于目标操纵转矩和转向盘转角进行转向回正的 PID 控制,改善了转向回正性能。此外,程勇等<sup>[40]</sup>根据转向盘转矩信号估计转向盘转角,无需配置转角传感器进行回正控制。黄清泉等<sup>[41]</sup>通过估计到的电机转角反算转向盘转角及转矩,并以此计算回正助力力矩。李绍松等<sup>[42]</sup>介绍一种无转向盘转角传感器的主动回正控制方法,无需附加系统元件,只需要以软件形式附加在 EPS 系统控制程序中。何殿福等<sup>[43]</sup>针对 EPS 回正不足,基于转向盘角度信息进行主动回正控制算法设计。由于传统 EPS 控制中低附着系数路面或转向管柱摩擦损失力矩使转向回正性变差,Kurishige 等<sup>[44-45]</sup>基于估计到的轮胎回正力矩,提高了在易滑路面上的转向机动性和转向盘的回正能力。上述研究大多以转向盘转角、转矩、前轮回正力矩作为转向回正控制的参考输入。

Sugita 等<sup>[46]</sup>利用人-机交互作用原理设计 EPS 控制器,确保驾驶的安全运行和

操作舒适。何杰等<sup>[47]</sup>将驾驶特性分为 12 类, 分类的根据是驾驶员的生理、心理和疲劳程度等的差异, 并分析了行车安全与驾驶行为特性的关系。Mehrabi 等<sup>[48]</sup>开发了驾驶员和车辆之间的界面, 目的在于设计考虑驾驶员特性影响的 EPS 控制器。Fujiwara<sup>[49]</sup>考虑驾驶员的操纵特性, 利用转向盘转角和转矩, 基于增益调度控制实现驾驶员和辅助系统的协调。李昌刚等<sup>[50]</sup>设计了一种底盘集成控制系统, 包括后轮主动转向、直接横摆力矩控制和纵向驱动力补偿。驾驶员模型与车辆组成人-车闭环系统, 改善了车辆的路径跟踪能力, 提高了车辆的主动安全性和操纵稳定性。Li 等<sup>[51]</sup>开发了包含准线性驾驶员模型和牵引半挂车的闭环系统, 研究结果表明, 驾驶员的固有延时、半挂车的载荷和车速对闭环系统有重要的影响。胡延平等<sup>[52]</sup>针对传感器故障情况设计控制器研究了 EPS 系统的容错控制, 改善驾驶员的驾驶安全性。Jalali 等<sup>[53]</sup>设计了包含四轮驱动电机和主动转向系统的全轮驱动电动汽车, 开发了路径跟踪和增益调度速度控制驾驶员模型, 通过控制输入从而跟踪预定路径, 改变四轮的驱动转矩使得实际车速与期望车速偏差最小。上述研究均考虑了驾驶员与车辆之间的相互作用及影响, 但考虑驾驶员个体差异影响的汽车 EPS 控制方面, 尚未有深入研究。

### 1.2.2 ESP 研究现状

汽车安全系统可以分为被动安全系统和主动安全系统。被动安全系统如安全带、安全气囊和保险杠等, 旨在降低事故发生后车内人员的受损程度。而随着科技的发展, 汽车技术人员提出了主动安全的概念, 希望通过主动安全系统预先做出动作以避免事故的发生。

当汽车进行转向操作时, 如果路面较滑或者车速过高, 汽车便会产生转向不足, 或者转向过多的现象。转向不足是由于前轮侧向力过小引起的, 此时汽车由于没有能够及时调整行驶方向则有可能冲出跑道; 转向过多是由于后轮侧向力过小而造成的, 在转向时无法维持车身后部的姿态, 从而使汽车会发生甩尾甚至自

旋的现象。这两种现象都很容易引发交通事故。不管是转向不足还是转向过多，归根结底都是由车轮的侧向力会饱和这一特性造成的。随着车轮侧偏角的增加，车轮侧向力从线性增长逐渐过渡到非线性增长，并趋于饱和，而当饱和的侧向力无法提供足够的横摆力矩时，汽车便会失去控制。由于车轮侧向力进入非线性状态时，侧向力的增长极为有限，因此车轮处于线性状态时，汽车处于最安全的状态，这也是二自由度线性汽车模型被用来作为反映汽车正常行驶状态的原因。ESP的结构组成如图 1.3 所示。

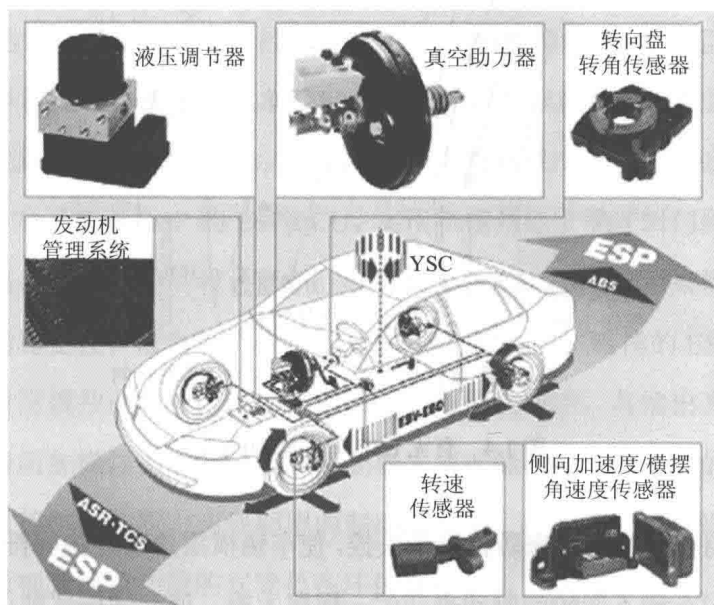


图 1.3 ESP 的结构组成

ESP 系统利用了汽车不对称制动会使车身发生偏转的原理。ESP 在汽车不足或过多转向的情况下，及时对汽车进行干预，从而使汽车保持稳定。其基本原理如图 1.4 所示。当汽车车速过快，转弯出现转向不足时，可能会因为前轴失去转向能力而驶出正常行驶路径，此时 ESP 会制动内后轮，产生一向内侧的横摆力矩，从而弥补汽车的不足转向趋势，也可以通过 EMS 减少发动机动力输出，降低车速，增大轮胎侧向力，产生与运动方向相同的横摆力矩，辅助汽车转向，防止汽车驶