

DIAN DONG QI CHE DE QU DONG YU KONG ZHI

电动汽车

的驱动与控制

徐国凯 赵秀春 苏 航 编著
杜元虎 王培昌 主审



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国家外国专家局资助项目[2006—2009]

辽宁省教育厅科学技术研究项目[2008133]

大连民族学院学科建设基金资助项目[2009 机电]

电动汽车的驱动与控制

徐国凯 赵秀春 苏 航 编著

杜元虎 王培昌 主审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书比较全面地介绍了电动汽车驱动系统控制技术的现状,阐述了电动汽车驱动系统的基本结构、工作原理、驱动电动机技术、功率变换技术、传感器技术及相关的建模与仿真技术。针对纯电动汽车的驱动系统进行建模,对电动汽车驱动系统的速度闭环控制的稳定性问题和控制策略进行了深入研究。根据两款电动轿车驱动系统的主要参数,建立了简化的被控对象数学模型,设计了PID控制器、自适应控制器、模糊控制器和预测控制器,利用数值仿真进行比较分析并研究了其控制性能。书中融入了编著者近期的研究成果,对于电动汽车设计具有重要的指导意义。

本书理论联系实际,研究成果比较丰富,深入浅出、图文并茂,可作为高等院校相关专业的研究生教材及本科生参考用书,也可供电动汽车及其相关领域的工程技术人员和科研人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电动汽车的驱动与控制/徐国凯,赵秀春,苏航编著. —北京:电子工业出版社,2010.6
ISBN 978-7-121-11162-4

I. 电… II. ①徐… ②赵… ③苏… III. 电传动汽车—电机—控制系统 IV. U469.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第115199号

责任编辑: 窦 昊

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 16.75 字数: 428 千字

印 次: 2010年6月第1次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

本书由国家外国专家局、辽宁省教育厅和大连民族学院资助出版
The published book is Supported by the State Bureau of Foreign
Experts Administration, Liaoning Educational Committee and
Dalian Nationalities University

前 言

2009 年 12 月 7 日至 18 日在丹麦首都哥本哈根 Bella 中心举行了联合国气候变化峰会。人们从会议的规模、级别,以及会议发出的激烈的争吵声中强烈地意识到,解决全球气候变暖的问题已刻不容缓。事实上,这只是 21 世纪人类所面临的三大难题之一,环境污染与能源危机同样是我们发展路上的绊脚石。目前能够采取的破解之道就是要借助法律、道德和技术的力量,实现综合治理、协调发展。从技术层面上看,就是要引领世界走低碳经济的道路。在汽车工业领域,开发与利用新能源汽车是可行的措施之一。

我国非常重视发展包括电动汽车在内的新能源汽车。目前已经在 13 个城市开展了电动汽车产业化示范运营工作,这项活动的开展大大推动了我国电动汽车产业的发展。同时,随着电动汽车产业化的开展,有关电动汽车的理论研究也必须跟上步伐,两者相辅相成才能产生自主知识产权,推动我国电动汽车技术的良性发展。因此,将控制理论、电力电子、新能源等技术和电动汽车技术相融合,促进电动汽车理论和技术的进步,也是必须进行的一项关键性工作。

现代电动汽车控制技术是提高电动汽车实用性的一个关键技术。编著者及其团队在多年的研究过程中积累了一些学术成果和经验体会。为了给有关同仁在电动汽车驱动系统控制技术的研究方面提供一些参考,并借此抛砖引玉,推动控制理论和技术的应用和发展,编著者在已有的研究成果的基础上,对电动汽车驱动系统及其控制技术进一步充实和扩展,整理出版了这本书。

本书的特点是研究成果比较丰富,理论联系实际,在注重理论阐述的前提下,力图做到深入浅出、图文并茂,增强了本书的实用性,比较全面地反映了电动汽车驱动系统控制技术的现状。全书内容分为 10 章,主要阐述电动汽车驱动系统中的主要环节,如电动机、功率变换器和系统控制器的设计方法。除第 3 章和第 4 章外,其他主要或全部内容均为编著者及其研究团队在将现代控制理论与技术融合到电动汽车控制技术研究中的成果。书中所有的控制器方案都是针对实际驱动系统中出现的真实情况提出来的,因而具有很强的针对性;另外,所有控制器方案都以实际的被控对象为背景进行了仿真检验或实验验证,其可行性是有保证的。

本书的研究成果和应用实例可以帮助读者加深对现代控制理论与技术的理解和掌握;进而将其应用于电动汽车驱动系统设计。因此,本书可供电动汽车及其相关领域的工程技术人员和科研人员设计时使用或参考,也可作为高等学校相关专业硕士研究生的教材。

本书由辽宁省教育厅科学技术研究项目“电动汽车制动能量回收控制策略研究”[项目编号 2008133]课题组成员共同编写。徐国凯负责统筹并编写了第 3 章,赵秀春负责内部协调并编写了第 2 章、第 9.2 节和 10.5 节,苏航承担了部分协调工作并编写了第 6、7 章,宋鹏编写了第 1 章、第 10.1 节和 10.2 节,陈晓云编写了第 4.1 节和 4.2 节,王娟编写了第 4.3 节、10.3 节、10.4 节和 10.6 节,刘忠富编写了第 5.1 节、5.2 节和 5.3

节，刘岩川编写了第 5.4 节、5.5 节和 5.6 节，杜海英编写了第 8 章，赵凤强编写了第 9.1 节，张涛编写了第 9.3 节、10.7 节和 10.8 节。

本书是在国家外国专家局、辽宁省教育厅和大连民族学院资助下出版的。本书在编写的过程中参考了大量的文献资料，在此向其作者表示诚挚的谢意。杜元虎教授和王培昌教授审阅了全部书稿并提出了切实的改进意见，谨此表示衷心的感谢。

限于编著者水平，疏忽和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 电动汽车的发展	1
1.1 环境、能源与汽车	1
1.1.1 汽车引起的环境问题	1
1.1.2 世界能源危机	3
1.1.3 节能环保的电动汽车	4
1.2 电动汽车及其分类	5
1.2.1 纯电动汽车	5
1.2.2 燃料电池电动汽车	5
1.2.3 混合动力电动汽车	5
1.3 电动汽车的发展简史	6
1.3.1 早期电动汽车的发展	6
1.3.2 燃料电池电动汽车的问世	8
1.3.3 混合动力电动汽车的兴起	8
1.4 电动汽车的发展现状	8
参考文献	14
第 2 章 电动汽车的基本原理	15
2.1 电动汽车的基本结构	15
2.1.1 电动汽车的系统组成	15
2.1.2 电动汽车的结构形式	17
2.2 电动汽车的基本原理	18
2.2.1 车辆动力学	18
2.2.2 车辆的性能	25
2.2.3 电动汽车的性能	34
2.3 电动汽车的典型工况与性能指标	39
参考文献	41
第 3 章 驱动系统的闭环控制与性能分析	42
3.1 闭环驱动系统的概念	42
3.1.1 运动与系统	42
3.1.2 驱动系统的闭环控制	42
3.2 驱动系统的数学模型与动态过程	44
3.2.1 典型 I 型驱动系统的数学模型	44
3.2.2 典型 I 型驱动系统的动态过程	45
3.3 驱动系统的性能分析	47

3.3.1 驱动系统的性能	47
3.3.2 驱动系统的动态性能指标	48
3.3.3 驱动系统的稳态性能指标	50
3.3.4 驱动系统的频域性能指标	51
3.3.5 典型二阶驱动系统的性能与参数的关系	53
3.3.6 闭环频域性能指标与时域性能指标的关系	57
参考文献	59

第4章 驱动系统的稳定性和鲁棒性

4.1 控制系统的稳定性及其判据	60
4.1.1 稳定性的基本概念	60
4.1.2 线性系统稳定的充要条件	61
4.1.3 劳斯稳定判据	62
4.2 李雅普诺夫稳定性理论	63
4.2.1 李雅普诺夫稳定性定义	63
4.2.2 稳定性的直接判据	65
4.2.3 李雅普诺夫稳定性定理	66
4.2.4 线性离散系统的李雅普诺夫稳定性分析	69
4.3 系统的鲁棒性分析	70
4.3.1 H_2 性能	71
4.3.2 H_∞ 性能	71
参考文献	74

第5章 驱动电动机的工作原理与性能

5.1 驱动系统对电动机的要求	75
5.2 直流电动机	77
5.2.1 直流电动机的结构	77
5.2.2 直流电动机的工作原理	79
5.2.3 直流电动机的运行特性	80
5.3 交流电动机	84
5.3.1 交流电动机的结构	84
5.3.2 交流电动机的工作原理	87
5.3.3 交流电动机的运行特性	87
5.4 永磁无刷电动机	93
5.4.1 永磁无刷电动机的结构	93
5.4.2 永磁无刷直流电动机的工作原理	95
5.4.3 永磁无刷直流电动机的运行特性	97
5.4.4 永磁无刷电动机的数学模型	98
5.4.5 永磁无刷直流电动机的调速原理	100
5.4.6 无刷直流电动机的调速方法和机械特性	101

5.5	开关磁阻电动机	102
5.5.1	开关磁阻电动机的结构	103
5.5.2	开关磁阻电动机的工作原理	105
5.5.3	开关磁阻电动机的运行特性	107
5.6	驱动系统电动机的选择	108
	参考文献	110
第6章	电动汽车动力电源	112
6.1	动力电池模型的分类	112
6.2	电动汽车电池的基本参数	113
6.3	电动汽车常用的电池	114
6.4	电动汽车动力电池的应用与维护	125
	参考文献	129
第7章	电动汽车功率变换技术	131
7.1	功率变换器概述	131
7.1.1	一般功率变换器技术	132
7.1.2	一般功率变换器分类	132
7.1.3	功率变换器的主要拓扑结构	133
7.2	电动车用功率变换器	136
7.2.1	高功率密度功率变换器	136
7.2.2	DSPM 功率变换器	137
7.2.3	大功率移相调宽功率变换器	138
7.3	电动汽车功率变换器的抗干扰(电磁兼容)设计	139
7.3.1	电动车用功率变换器抗干扰问题的提出	139
7.3.2	功率变换器电磁干扰产生的原因	140
7.3.3	功率变换器电磁干扰的辐射与传导	142
7.3.4	功率变换器的抗干扰设计	143
7.4	具有制动能量回馈能力的功率变换器技术	145
7.4.1	制动能量回收的技术要求	145
7.4.2	具有制动能量回馈能力的功率变换器设计	147
7.4.3	超级电容技术在电动汽车能量回收系统中的应用	149
	参考文献	150
第8章	汽车传感器	152
8.1	汽车传感器基本知识	152
8.1.1	汽车传感器的历史	152
8.1.2	汽车传感器的发展趋势	153
8.1.3	电动汽车传感器	153
8.1.4	电动汽车传感器的组成与分类	154
8.1.5	电动汽车传感器的性能与要求	154

8.2	速度传感器	155
8.2.1	转速传感器	156
8.2.2	车速传感器	159
8.2.3	轮速传感器	162
8.3	转向传感器	163
8.4	电压、电流传感器	171
8.4.1	霍尔元件式电压、电流传感器	171
8.4.2	分流电阻式电流传感器	174
8.5	电池温度传感器	174
8.6	扭矩传感器	177
	参考文献	179
第9章	电动汽车驱动系统的建模与仿真	180
9.1	电动汽车驱动系统的组成	180
9.1.1	电动汽车驱动系统结构	180
9.1.2	电动机	180
9.1.3	逆变器	181
9.2	整车模型的建立	181
9.2.1	循环工况模型	181
9.2.2	驾驶员模型	181
9.2.3	车辆动力学模型	182
9.2.4	传动系统模型	182
9.2.5	动力系统模型	182
9.3	电动汽车驱动系统的仿真技术	196
9.3.1	电动汽车仿真的意义	196
9.3.2	电动汽车仿真结构及特点	197
9.3.3	电动汽车仿真软件	199
	参考文献	204
第10章	驱动系统控制器设计与应用	205
10.1	燃料电池汽车直流驱动系统建模及其PID控制	205
10.1.1	燃料电池汽车	205
10.1.2	直流驱动系统数学模型	206
10.1.3	PID控制器	207
10.2	燃料电池汽车直流驱动系统自适应控制器设计	210
10.2.1	模型参考自适应控制的基本理论	211
10.2.2	直流驱动系统自适应控制器设计	212
10.3	基于滑模的直流驱动系统广义预测控制器设计	216
10.3.1	驱动系统的CARMA模型	216
10.3.2	具有终端滑模等式约束的广义预测控制	217

10.3.3	闭环系统稳定性	221
10.3.4	控制性能研究	222
10.4	直流驱动系统滚动时域 H_∞ 控制器设计	222
10.4.1	驱动系统的状态空间模型	223
10.4.2	约束系统的滚动时域 H_∞ 跟踪控制	226
10.4.3	仿真研究	230
10.5	电动轿车交流驱动系统的自适应控制器设计	230
10.5.1	电动轿车交流驱动系统数学模型	230
10.5.2	连续系统的模型参考自适应控制策略	231
10.6	电动汽车驱动系统的连续预测控制器设计	237
10.6.1	连续非线性系统的滑模变结构控制	237
10.6.2	电动汽车异步电动机驱动系统数学模型	239
10.6.3	基于滑模的连续预测控制方法	239
10.6.4	系统性能研究	239
10.7	电动汽车驱动系统的模糊控制器设计	240
10.7.1	模糊控制器的设计步骤	240
10.7.2	电动汽车驱动系统的模糊控制器	243
10.8	电动汽车制动力分配及能量回馈控制策略	245
10.8.1	ADVISOR 制动力分配方案	246
10.8.2	基于模糊逻辑的制动力分配及能量回收控制策略	247
10.8.3	改进型的制动力分配及能量回收控制策略	250
10.8.4	控制性能分析	251
	参考文献	252

第 1 章 电动汽车的发展

1.1 环境、能源与汽车

人类自诞生以来就不断探索生存与发展的途径与方法,汽车就是伴随着人类的发展而产生的重要交通工具。早期人类的交通工具使用普通的自然力,如借助水流的竹筏和船,或是凭借牛、马、骆驼等拖动的橇。18 世纪后期,英国的产业革命使蒸汽机进入了人们的生活,应用到汽车领域,就变成了后来的蒸汽机汽车,此后有限的地球矿产资源——煤就开始被汽车产业所利用。约 100 年后的 19 世纪末,以天然气、酒精、石油等为燃料的内燃机诞生了,和蒸汽机比较内燃机的质量轻、效率高、使用方便、不产生大量的化学烟雾,于是内燃机汽车也随之产生。此后,和煤的采掘方法大体相同的矿物燃料——石油成为继煤之后汽车的主要能源。几乎在内燃机出现的同时,利用电能驱动的电动机出现了,它的能源主要从蓄电池、水力和火力发电装置得到,电动机应用于汽车便出现了早期的电动汽车^[1]。

在汽车的发展过程中,用蒸汽机驱动的蒸汽机汽车、由蓄电池和电动机组合驱动的电动汽车以及利用石油做燃料的内燃机车曾经同时被使用,之后蒸汽机汽车首先退出,电动汽车经历了 3 个发展时期延续应用到今天,而内燃机汽车成为主流。

1945 年之后,汽车在各种交通工具中的比重显著增大,汽车工业成为了国民经济的支柱产业,它是衡量一个国家工业和科学技术发展水平的重要标志。但是,汽车的发展离不开地球上有限的能源,随着汽车工业的发展,能源消费将不断增长,同时由于能源的使用带来的环境污染问题日益严重,这都会给人类社会的生存和发展带来严峻的挑战。

1.1.1 汽车引起的环境问题

环境问题是指由于人类活动作用于周围环境所引起的环境质量变化,以及这种变化对人类的生产和健康造成的影响^[2]。随着人类社会的发展进步,人类活动在日常生产生活中会不断地影响和改造着自然环境,但是与此同时自然环境仍以其固有的自然规律变化着,人类与环境不断地相互影响和作用,就产生了环境问题。目前已经被人类所认识到的环境问题主要有多种:全球变暖、臭氧层破坏、空气污染、酸雨、淡水资源危机、能源短缺、森林资源锐减、土地荒漠化、物种加速灭绝、垃圾成灾、有毒化学品污染、噪声污染等。其中由于汽车的使用而导致的环境问题有很多。传统汽车由于使用汽油和柴油,燃料燃烧的不完全会导致尾气中包含大量有害物质。汽车尾气成分非常复杂,有 100 种以上,这些有害物质直接危害着人体健康,对人类生活的环境产生深远的影响。上述的全球变暖、空气污染、酸雨、淡水资源危机、能源短缺、噪声污染等问题都与其有直接的关系,这些污染问题已逐渐影响到了人类的生存与发展。

1) 全球变暖

全球平均气温在近 100 多年来已经经历了冷—暖—冷—暖两次波动,总体为上升趋势



势。近年来全球气温明显上升, 1981—1990 年全球平均气温比 100 年前上升了 0.48°C 。科学家预测, 如果地球表面温度的升高按现在的速度继续发展, 到 2050 年全球温度将上升 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$, 南北极地冰山将大幅度融化, 导致海平面大大上升, 一些岛屿国家和沿海城市将淹于水中, 如纽约、上海、东京和悉尼。导致全球变暖的主要原因是温室气体(CO_2 , CH_4 , N_2O) 的排放。从世界范围看, 交通运输是温室气体排放的主要领域之一, 根据 2007 年欧洲运输部长会议《减少运输二氧化碳排放报告》, 2003 年经济合作组织国家来自燃油消费排放的二氧化碳中, 交通运输(包括营业性运输及私人运输)占到 34%, 其中公路为 23%; 在全世界范围, 交通运输占 28%, 其中公路为 18%。美国运输部发布的《2005 年运输统计报告》指出, 2003 年美国运输部门温室气体排放总量为 18.64 亿吨二氧化碳当量, 占当年美国全部温室气体排放量的 27%。在所有运输方式温室气体排放量中, 道路运输占 82%。

2) 空气污染

空气污染是指一些危害人体健康及周边环境的气体、固体或液体悬浮物对大气层所造成的污染。汽车释放出的一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化物、二氧化碳、固体悬浮颗粒、铅及硫氧化物会对空气造成污染。很多大都市的空气污染物和烟雾混合物中, 燃油车的排放所占的比重已经超过 50%。尽管燃油车的发动机在不断改进以降低排放, 但燃油车数量的增加所带来的影响远远大于单台车辆降低排放所取得的效果。因此, 由燃油车所造成的空气污染物的总量仍在以令人担忧的速度持续增加。

3) 酸雨

酸雨是由于空气中二氧化硫(SO_2)和氮氧化物(NO_x)等酸性污染物引起的 pH 值小于 5.6 的雨水、冻雨、雪、雹、露等酸性降水。汽车尾气排放出来的氮氧化物、硫氧化物会导致酸雨的形成, 酸雨会导致土壤和湖泊酸化, 植被和生态系统破坏, 建筑材料、金属结构和文物被腐蚀等一系列严重的环境问题。酸雨在 20 世纪五六十年代最早出现于北欧及中欧, 目前全球受酸雨危害严重的有欧洲、北美及东亚地区, 我国酸雨正呈急剧蔓延之势, 是继欧洲、北美之后世界第三大重酸雨区。

4) 淡水资源危机

地球表面 $2/3$ 被水覆盖, 但其中 97.5% 是海水, 淡水仅占 2.5%, 而在这有限的淡水资源中, 又有 90% 是南北两极冰盖、冰川和冰雪。此外, 还有一定比例的深层地下淡水资源很难被利用。因此, 人类目前能够利用的淡水资源相当有限, 只占全球水资源总量的 0.26%。汽车排放物形成的酸雨以及其他物质会污染湖泊与河流, 造成淡水资源的污染。全球用水量在 20 世纪增加了 7 倍, 联合国环境规划署的数据显示, 如按当前的水资源消耗模式继续下去, 到 2025 年, 全世界将有 35 亿人口缺水, 涉及的国家和地区将超过 40 个。

5) 资源、能源短缺

由于人类无计划、不合理地大规模开采, 资源和能源短缺问题已经在世界上大多数国家甚至全球范围内出现。半个世纪以来, 全球能源消耗量大增, 全世界能源消耗总量在 1950 年是 26 亿吨标准煤, 1987 年就是 110 多亿吨标准煤, 2000 年为 131.32 亿吨标准煤, 2004 年为 146.10 亿吨标准煤。据美国能源信息署发布的国际能源展望, 世界能



源市场消耗量在 2005—2030 年间预计增加 50%，非经合组织国家的总能源需求增加 85%，经合组织国家能源需求增加 19%，世界能源供应将日趋紧张。石油是目前汽车的主要能源，而汽车工业作为各国的支柱产业被大力发展，显然汽车工业的发展将进一步加剧能源短缺问题的严重性。

6) 噪声污染

人为造成的一些我们不需要的声音甚至是厌恶的声音可以称为噪声。噪声的污染源主要有工厂噪声、交通噪声、建筑施工噪声、社会生活噪声等。城市噪声的 70% 来源于交通噪声，而汽车噪声正是交通噪声的主要组成部分。汽车噪声主要有发动机噪声、进气噪声、排气噪声、风扇噪声、传动噪声、轮胎噪声、空气动力噪声以及各种发动机附件的噪声等。虽然噪声污染看起来比空气污染危害小，但是噪声可以引起心绪不宁、心情紧张、心跳加快和血压增高等。“噪声病”一词已出现于医学书刊，其发病率也日益增加。

1.1.2 世界能源危机

能源是人类社会经济发展的重要物质基础，是生产力发展的主要动力源泉。世界经济发展充分表明，能源的增长速度与国民生产总值同步增长。20 世纪 50—70 年代，世界资本主义经济大发展与充足的廉价能源供给，特别是与石油供给密切相关，石油供给问题是能源问题的重要内容。

石油资源的蕴藏量不是无限的，容易开采和利用的储量已经不多，剩余储量的开发难度越来越大，到一定限度就会失去继续开采的价值。在世界能源消费以石油为主导的条件下，如果能源消费结构不改变，就会发生能源危机。20 世纪 50 年代以后，由于石油危机的爆发，对世界经济造成巨大影响，世界各国开始关注“能源危机”问题。此后 1973 年、1979 年、1990 年又相继发生了 3 次与石油有关或纯粹是为了石油的战争，导致了 3 次世界石油危机，严重影响了世界经济的发展。原油价格的变化与原油的产量、成本、世界经济的发展状况、世界石油消费水平等多种因素有关。在 1958—1970 年之间，原油价格稳定在每桶 3 美元，中东战争的爆发使原油价格在 1974 年上涨了 4 倍达到了每桶 12 美元，此后价格变动相对稳定。两伊战争导致新一轮的原油价格上涨，1981 年原油价格上涨到了每桶 35 美元，之后逐渐回落，到 1986 年原油价格为每桶 10 美元。随着 1990 年伊拉克对科威特的入侵，油价再次上涨达到近每桶 36 美元，在战争结束后，油价进入了稳定的下降期，1998 年降到了每桶 9.82 美元。此后原油价格开始持续攀升，2008 年世界原油价格首次突破每桶 146 美元，再创历史新高。显然随着世界经济的不断发展，石油需求量日益加大，价格在不断上升。2009 年欧洲第二大石油公司英国石油公司（BP）公布的世界能源统计回顾年度报告中称，由于俄罗斯、挪威和中国的石油储量的下降，全球 2008 年探明石油储量下降到了 1.258 万亿桶，与 2007 年的 1.261 万亿桶的探明石油储量相比，全球探明石油储量出现了 1998 年以来的首次下降。按照目前的生产速度，全球拥有的石油储量还可开采 42 年。

石油的各种用途中，目前最主要是提供取暖和交通运输。汽车作为交通运输的主要工具无疑成为了能源消耗大户，能源紧张与汽车行业发展的关系十分密切。联合国的统计数据显示，目前世界拥有 8 亿辆汽车，一年要消耗 250 亿桶石油，占世界石油消耗的 75%。



自 2006 年起,我国取代日本成为仅次于美国的世界第二大新车消费市场。2030 年将超过美国,位列第一。从我国油耗总量来看,继美国之后,取代日本成为全球第二大石油消费国。2005 年我国汽车保有量为 3 120 万辆,到 2009 年上半年迅速增加至 6 962.6 万辆,与 2008 年年底相比,增加 495.4 万辆,增长 7.66%。在未来 5 年内,还将增加 5 倍。我国汽车行业对石油的消耗量已经高达总消耗量的 1/3 以上。由此推算,在未来的 20 年,汽车行业将成为石油最大的消耗部门,而 30 年后汽车行业对石油的消耗量将达到总消耗量的 80%以上。如果中国的汽车业以当前年均增长率发展,如此庞大的汽车数量将对能源和环境产生巨大压力。中国在 2030 年将需要进口近 10 亿吨石油来提供汽车燃油。

1.1.3 节能环保的电动汽车

据预测,到 2010 年全球汽车保有量将接近 10 亿辆,而到 2015 年这一数字还将增加 20%,将超过 12 亿辆,汽车的快速发展带给环境和能源的压力将迅速加大,所以节能环保的电动汽车是人类发展的必须选择。早在世界上第一辆内燃机汽车诞生前,在法国巴黎举行的国际电器展览会上就展出了世界上第一辆电动汽车。随着石油的大规模开采及科学技术的进步,内燃机汽车的性能大大超过了电动汽车,电动汽车逐渐淡出历史舞台。到了 20 世纪末期,100 多年来的许多科学技术和文化成果融入汽车技术之中,使汽车的生产技术越来越先进,汽车的性能越来越完善。然而汽车给人类做出巨大贡献的同时,每天都在大量消耗地球上有限的石油资源,排出大量有害气体,严重污染了人类赖以生存的自然环境,给人类的生存造成了严重的危害,这与人类追求美好生活的愿望背道而驰^[3]。能源与环境的压力使清洁而环保的电动汽车再次登上历史舞台。为了适应这个世界发展的趋势,世界各国政府、学术界、工业界都在加大对电动汽车开发投入的力度,加速电动汽车发展的步伐。

电动汽车可以部分或者全部地利用电能。电能可以通过其他形式能量的转换获得,例如水能(水力发电)、内能(俗称热能、火力发电)、原子能(原子能发电)、风能(风力发电)、化学能(电池)及光能(光电池、太阳能电池等)等,可以减少石油资源的使用量,而且这些新能源不会产生有害的排放和温室气体。电动汽车还可以充分利用晚间用电低谷时富余的电力充电,使发电设备日夜都能充分利用,大大提高其经济效益。有研究表明,同样的原油经过粗炼,送至电厂发电,经充入电池,再由电池驱动汽车,其能量利用效率比经过精炼变为汽油,再经汽油机驱动汽车高,因此有利于节约能源。

电动汽车的有害排放物很少甚至可以实现零排放,减小对环境的污染。把提炼汽油和柴油的冶炼厂所产生的排放物考虑在内,同样也考虑为电动汽车产生电力的发电厂所产生的排放物,给出对燃油车和电动汽车在全球产生的有害排放的比较,如图 1.1 所示^[3]。可见,在全球范围内,由电动汽车产生的有害排放物比燃油车的少得多。另外,为了减少全球污染物的排放,电动汽车的使用为通过集中处理进一步减少空气污染物的排放提供了一种可能。在发电过程中会产生相应的排放物,通过集中处理的方法,这些污染物很容易被收集起来。但这种集中处理的方法不适用于燃油车。

此外电动汽车还有一个明显的优势,就是不会产生噪声污染。燃油车的发动机和复杂的机械传动装置会对环境产生严重的噪声污染。而电动汽车用电动机驱动,电动机工作时噪声很小。电动汽车运行时非常安静,你很难觉察到向你靠近的电动汽车。图 1.2 比较了电动汽车和燃油车在起步、正常行驶和刹车过程中所产生的噪声^[3]。

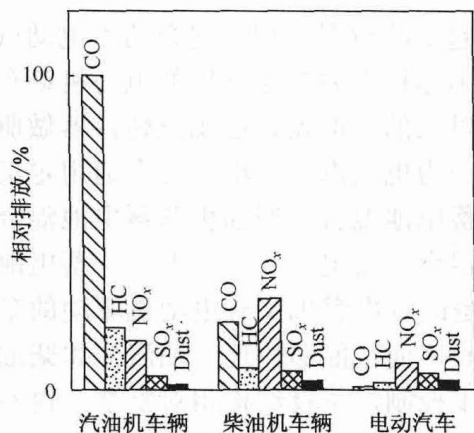


图 1.1 各种车辆全局有害排放物的比较

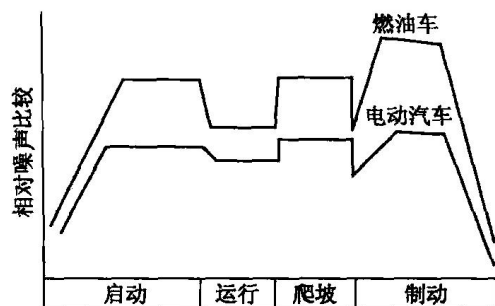


图 1.2 燃油车和电动汽车产生的噪声比较

1.2 电动汽车及其分类

现代的电动汽车已不是 100 年前陈旧电动汽车技术的重复，它是以电池为动力源，全部或部分由电动机驱动，集中了机、电、化等各个学科领域中的高新技术，是汽车、电力拖动、功率电子、自动控制、化学能源、计算机、新能源、新材料等工程技术中的最新成果的集成产物。按照目前技术状态和车辆驱动原理，电动汽车划分为纯电动汽车（PEV）、燃料电池电动汽车（FCEV）和混合动力电动汽车（HEV）三种类型。

1.2.1 纯电动汽车

纯电动汽车又称为蓄电池电动汽车，是一种仅采用蓄电池作为储能动力源的汽车。电池通过功率变换装置向电动机提供电能并驱动其运转，电动机经传动装置带动车轮旋转从而推动汽车运动。纯电动汽车主要由蓄电池、电池管理系统、驱动电动机和驱动系统、车身和底盘，以及安全保护系统等构成。电动车用蓄电池主要有铅酸电池、镍-氢电池、镍-镉电池、钠-硫电池、锂离子电池、锌-空气电池等。

1.2.2 燃料电池电动汽车

燃料电池电动汽车是以氢气为燃料，氢气与大气中的氧气发生化学反应，通过电极将化学能转化为电能，以电能作为动力驱动汽车前进^[4]。燃料电池的化学反应过程不会产生有害产物，具有高效率、无污染、零排放、无噪声等优势。燃料电池的能量转换效率比内燃机要高 2~3 倍，因此从能源的利用和环境保护方面看，燃料电池汽车是一种理想的车辆。

燃料电池汽车的基本结构按照驱动形式可分为纯燃料电池驱动和混合驱动两种；按照能量来源可分为车载纯氢和燃料重整两种；根据燃料电池所提供的功率占整车总需求功率比例的不同，燃料电池混合动力汽车可分为能量混合型和功率混合型两种。

1.2.3 混合动力电动汽车

混合动力电动汽车，是在目前还找不到理想的高质量比能量和高质量比功率的车载



电源之前,电动汽车的发展暂时受到限制而发展起来的新型车型,混合动力电动汽车既是一种过渡型车型,也是一种独立型车型。根据国际机电委员会下属的电力机动车委员会的建议,混合动力电动汽车是指有两种和两种以上的储能器、能源或转换器做驱动能源,其中至少有一种能提供电能的车辆称为混合动力电动汽车。根据这个通用定义,混合动力电动汽车有很多种形式,可以是汽油机和蓄电池混合,柴油机和蓄电池混合,柴油机和燃料电池混合,蓄电池和超大容量电容器混合,蓄电池和飞轮混合,蓄电池和蓄电池混合等^[3]。但是一般认为混合动力电动汽车是既有内燃机又有电动机驱动的车辆。混合动力电动汽车能够把电动汽车的续驶里程延长,而且能够快速添加汽油和柴油,并且内燃机稳定的工况使得对其排放气体的成分易于控制,不过结构相对复杂,也不是完全零排放。与燃油车相比,在相同行驶里程条件下,它的燃油消耗和排放要小得多,也可以工作在零排放区域。混合动力电动车按照能量合成的形式主要分为串联式、并联式、混联式和复合式。

1.3 电动汽车的发展简史

1.3.1 早期电动汽车的发展

电动汽车最早的历史可以追溯到 19 世纪后期,在 1881 年 8—11 月巴黎举行的国际电器展览会上,展出了法国人古斯塔夫·特鲁夫研制的电动三轮车,这是世界上第一辆电动车辆^[5],它采用多次性铅酸充电电池和直流电动机,可以实际操作使用,这辆车的诞生具有划时代的意义。在接下来的 1882 年,英国的威廉·爱德华·阿顿和约翰·培里也合作研制了一辆电动三轮车,并留下了图片,车的速度是 9 mile/h (1 mile≈1 609 m)。三位先驱的努力使得在燃油汽车尚未问世之前,电动汽车已经诞生,此后电动车辆在欧美等国家迅速兴起。

1. 美国

法国和英国出现电动汽车的消息很快传到美国,1890 年美国纽约市的安德鲁·里克组装了美国的第一辆电动三轮车,该车的车身重量只有 150 lb (1 lb=0.454 kg),在平坦道路上车速可达 8 mile/h,电池可用 4 h,产生电压为 8 V,续驶里程为 30 mile。1891 年美国中西部地区的莫里森组装了美国第一辆电动四轮车,该车速度为 14 mile/h,装有 24 个蓄电池,可以提供 112 A 的电流和 48 V 的电压,充电时间为 10 h,电动机是 4 hp (1 hp=745.7 W) 的西门子电动机。

1894 年堪萨斯城的贝克博士和艾尔伯格也开发了四轮的电动车,该车靠接触摩擦来完成电动机与车轮之间的动力传输,落后于里克和伍兹的链轮传动,以及莫里斯和萨罗姆的齿轮传动,但是第一次提出了利用“反向电流”的概念达到刹车的目的,也就是今天的反向制动。

此后美国的电动车辆不断进步。1895 年里克的第二辆电动车、第一辆电动四轮车的车轮全部采用了钢丝辐条,这是电动车辆上的一个创举。1894 年莫里斯和萨罗姆成立了电动客车与货车公司,并且组装了第一辆电动运输车辆,此后又推出了一个电动车辆系列,并在纽约市创建了第一个电动车辆出租队,这是电动车辆的首次商业应用。