

# 电动汽车

—— 21 世纪的重要交通工具



孙逢春 张承宁 祝嘉光 编著

北京理工大学出版社

# 电 动 汽 车

— 21 世纪的重要交通工具

孙逢春 张承宁 祝嘉光 编著

北京理工大学出版社

## 内 容 简 介

“电动汽车”是一门跨学科的新技术。本书用简洁通俗的语言向读者系统地介绍这一新技术的发展状况及现状。全书共分六章：第一章从汽车发展情况出发，分析了当今全球的能源与环境状况，对电动汽车技术的发展情况进行了综述。第二章介绍了电动汽车的结构布置与组成原理。第三章分析了电动汽车的储能动力源及各种蓄电池的原理与特性。第四章对直流、交流电动机及其驱动控制系统的原理与特性进行了概述。第五章介绍了电动汽车的充电系统。第六章对电动汽车行驶的动力性能、主电路的负载电流及续驶里程进行了初步的理论分析，提出了续驶里程的估算方法。

本书可供从事汽车工程、电动汽车开发研究、环境保护、城市公共交通运输等领域的工程技术人员、大专院校师生及电动汽车爱好者阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电动汽车——21世纪的重要交通工具/孙逢春等编著.  
—北京:北京理工大学出版社,1997.1

ISBN 7-81045-219-3

I. 电… II. 孙… III. 电传动汽车 IV. U460.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 24833 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

邮政编码 100081 电话(010)68422683

各地新华书店经售

北京房山先锋印刷厂印刷

\*

787×1092 毫米 32 开本 7.375 印张 161 千字

1997 年 1 月第一版 1997 年 1 月第一次印刷

印数:1—4000 册 定价:10.00 元

---

※图书印装有误,可随时与我社退换※

# 前 言

早在世界上第一辆汽车诞生的 1886 年之前,在巴黎等欧洲城市的街道上就出现了电动汽车。随着科学与技术的进步,燃油机汽车的性能大大超过了电动汽车,电动汽车开始衰落。到 20 世纪 70 年代,近百年来许多的科学技术和文化成果溶进到汽车技术之中,汽车的生产技术愈来愈先进,汽车的性能愈来愈完善,汽车技术更加成熟。当前全世界汽车的年产量超过了 4000 万辆,保有量超过 6 亿辆,其中七八成是小轿车。汽车工业的发展给人们带来了许多就业机会,带来了财富;汽车缩短了人们之间的距离,带来了舒适与繁荣。然而,汽车给人类带来巨大贡献的同时,每天都在大量消耗地球上有限的石油资源,排出大量的有害气体,严重地污染了人类赖以生存的自然环境,汽车给人类生存造成了严重的危害,与人类的愿望背道而驰,这是促使电动汽车发展的主要因素。

最新的电动汽车绝不是百年前陈旧技术的重复。它是集光、机、电、化各学科领域中的最新技术于一体,是汽车、电力拖动、功率电子、智能控制、化学电源、计算机、新能源、新材料等工程技术中最新成果的集成产物。电动汽车与传统汽车在外形上没有什么区别,它们之间的主要区别在于动力驱动系统。电动汽车采用蓄电池组作储能动力源,给电机驱动系统提供电能,驱动电动机,推动车轮前进。电动汽车在行驶过程中没有排放污染,热辐射低,噪音小,不消耗汽油,可应用多种能源,结构简单,使用维修方便,是一种新型的交通工具,被国外报刊誉为“明日之星”,受到世界各国的青睐。我国也是研究应

用电动车辆最早的国家之一。我国政府非常重视研究发展电动汽车,已把电动汽车列入国家“八五”和“九五”科技攻关计划。电动汽车的研究开发、试制生产、运行示范、推广应用、基础设施建设等是一项完整的系统工程,发展电动汽车对我国的国民经济具有长远的战略意义与潜在的经济价值,是一件利国利民的伟大事业。为了普及与推广电动汽车技术,迫切需要一本系统地介绍电动汽车技术的书籍,目前国内还缺少这类书籍,国外也很少见,这是编写本书的主要目的。

我们在从事远望电动公共汽车的开发试制过程中,接触了大量关于电动汽车的国内外资料,结合研制过程中的体验编写成这一本书。本书由北京理工大学教授孙逢春博士担任主编,并编写了其中的第二章,张承宁副教授编写第三、四、五章;祝嘉光教授编写第一章和第六章。由于作者水平有限,时间仓促,难免出错,请读者批评指正。本书编写过程中,北京理工大学姜正根教授、余晓江等老师参加了编写大纲的讨论,远望电动公共汽车试制组的领导和同志们给了热情的指导和帮助。编写中参阅了报刊有关文章、书籍和学术会议的论文,作者谨向有关人员一一表示感谢。

**编著者**

一九九六年四月于北京

# 目 录

<b>第一章</b>	<b>国内外电动汽车发展状况</b>	( 1 )
§ 1	汽车发展的进步与难题	( 1 )
§ 2	21 世纪的能源与环境问题	( 6 )
§ 3	国外电动汽车发展状况	( 19 )
§ 4	电动汽车的优缺点及我国电动汽车的发展状况	( 38 )
<b>第二章</b>	<b>电动汽车原理与结构</b>	( 50 )
§ 1	汽车的结构与工作原理	( 50 )
§ 2	无轨电车的结构与工作原理	( 54 )
§ 3	电动汽车结构与工作原理	( 55 )
§ 4	直流电机驱动系统	( 59 )
§ 5	交流电机驱动系统	( 62 )
§ 6	混合型电动汽车	( 68 )
§ 7	电动轮电动汽车	( 79 )
<b>第三章</b>	<b>电动汽车的储能动力源</b>	( 81 )
§ 1	储能动力源发展概况与蓄电池基本电特性	( 81 )
§ 2	电动汽车的各种储能动力源	( 88 )
§ 3	电动汽车储能动力源发展展望	( 110 )
§ 4	电动汽车电池能量管理系统	( 111 )
<b>第四章</b>	<b>电动汽车的驱动系统</b>	( 114 )
§ 1	概述	( 114 )
§ 2	直流电机	( 123 )
§ 3	直流电机斩波控制器	( 139 )
§ 4	三相交流感应电机	( 147 )
§ 5	电动汽车三相感应电机逆变器	( 158 )

§ 6	电动汽车感应电机驱动系统实例 .....	( 168 )
<b>第五章</b>	<b>电动汽车的充电系统 .....</b>	<b>( 175 )</b>
§ 1	铅酸电池的充放电特性 .....	( 175 )
§ 2	电动汽车用铅酸蓄电池的一般充电方法 .....	( 179 )
§ 3	快速充电方法 .....	( 181 )
§ 4	电动汽车铅酸电池的几种充电系统介绍 .....	( 185 )
<b>第六章</b>	<b>电动汽车的行驶性能 .....</b>	<b>( 195 )</b>
§ 1	电动汽车的驱动力与行驶阻力 .....	( 195 )
§ 2	电动汽车行驶时的驱动力平衡 .....	( 204 )
§ 3	电动汽车的功率平衡 .....	( 207 )
§ 4	电动汽车主电路的负载电流 .....	( 210 )
§ 5	电动汽车的续驶里程 .....	( 213 )
<b>参考文献</b>	.....	<b>( 226 )</b>

# 第一章 国内外电动汽车 发展状况

为什么要发展电动汽车?为了弄清楚这个问题,首先要回顾一下汽车的发展情况及它给人类带来的巨大贡献;同时,还应了解在发展以石油为燃料的汽车的过程中出现的一些问题及对人类的生存造成的危害。通过技术进步与新技术的采用,可以使某些问题不断地得到改善。保护人类赖以生存的自然环境,珍惜地球上有限的石油资源,从现在起到下世纪中叶,是摆在人类面前迫切需要解决的两个重大课题。燃油机汽车正是在这两个重大问题上与人类的愿望背道而驰。

## § 1 汽车发展的进步与难题

人类为了生存需要,从事生活、生产以及社会政治活动,都要解决载人运物的交通运输问题。人们经过多次的试验与失败,直到 1885 年,德国奔驰汽车公司的创造人本茨将一台小型汽油机装在一辆三轮车上,时速达 15km/h,1886 年 1 月 26 日正式为本茨的内燃机汽车专利立案,为了纪念本茨一生对汽车做出的贡献,将这一天作为第一辆汽车的誕生日。当时欧洲的汽车是作为有钱人消遣、娱乐的工具,设计豪华,价格昂贵,一般工薪阶层买不起,所以市场有限,产量不高,发展缓慢。1905 年欧洲汽车年产量仅 3.7 万辆,当年全世界汽车产量总共有 6.2 万辆。由于欧洲各国受到第一次世界大战的影响,工业发展缓慢,而美国工业发展很快,人们的购买力增强。

1902年美国人福特提出,要使汽车成为人们生活的必需品,只有汽车的价格低廉,可靠耐用,操作简易,易于普及,汽车才会有市场,才能得到发展。在这种设计思想的影响下,采用先进的技术与生产方式,引入标准化、专业化。采用流水线生产,使汽车工业得到快速发展,这是汽车工业发展的一项重大突破。到1920年美国的汽车产量达到220多万辆。二次世界大战后,随着科学技术的飞速发展,许多高新技术引入到汽车工业中。到20世纪70年代,生产汽车的技术愈来愈先进,汽车性能愈来愈完善,美国、欧洲各国及日本先后形成了年产1000万辆以上的生产规模。目前,全世界每年的汽车产量在4000万辆以上,保有量超过6亿辆,其中的七八成是小轿车。汽车已给人类的生活带来了不可估量的巨大变化。

### **1.1 汽车工业已成为世界经济和各国经济发展的支柱产业**

汽车工业的发展不仅仅在汽车本身,它涉及许多产业部门的发展,带动了石油化工、钢铁冶金、有色金属材料、橡胶工业、电子工业、纺织工业、机器制造业等的发展,促进城市的市政建设,以及与汽车有关的第三产业的发展。汽车还是国际贸易的主要商品,是许多发达国家出口贸易的第一产业。一个国家的汽车工业发展可以提供千百万人的就业机会。据日本专家1976年统计,日本的汽车制造业,及其相关的销售、加油站、出租、维修、保险等产业的就业人口达360多万人,占日本大约5000万就业人口的7%。一个国家的汽车产量和保有量是国家经济发展水平与国家实力的标志之一。总之,汽车给人们带来了财富与幸福。

## 1.2 汽车不仅在经济上造福于人类，而且也给人们带来全新的汽车文化

一百多年来科学技术与文化的成果，都溶进到汽车技术之中，使得现代汽车成为人类智慧的结晶。一辆设计成功的汽车及其内外装饰不仅反映了当代的科学技术水平，而且也浸透了人们的价值观念和文化修养。高档次的豪华轿车就是一件精美的工艺美术品，拥有这样的轿车是车主人的地位与财富的象征。人们高价收购老式轿车象收藏世界稀有的古玩一样珍贵。同时，随着汽车车速的提高，高速公路得到迅速发展，小轿车已深入千家万户，缩短了人们的距离，适应了现代工业社会快节奏生活的需要，大大缓解了工业化和城市化带来的种种弊端，使得消灭城乡差别成为可能。许多汽车大国甚至经济较为发达的地区，出现“空心”的市中心而乡镇连成一片的新的繁荣景象。这些方方面面交织成了丰富多彩的汽车文化，成为人类文明的一个组成部分。

## 1.3 汽车工业发展给人类带来的难题之一是交通事故危及人们的生命安全

1885年本茨驾驶着第一辆汽油机汽车碰撞在围墙上。伴随着汽车的诞生，交通事故及人员伤亡不断发生。随着汽车的普及和车速的提高，交通安全引起人们广泛重视。1949年英国学者史密特教授深入研究了欧洲20多个国家交通事故的资料后，提出了一个关系式：令一个国家的交通事故死亡人数为 $D$ ，该国汽车（机动车）的保有量为 $N$ ，该国总人数为 $P$ ，则有

$$D = 0.0003(NP^2)^{1/3} \quad (1-1)$$

此式警告人们,汽车保有量的增加势必增加交通事故的死亡人数,美国到1979年为止的80年中,由于汽车肇事死亡人数约200万,日本到1979年的45年中,死亡人数是40万。各国政府十分重视交通安全,采取了许多有效措施,制定并不断完善交通安全法规。美国的汽车普及最早,保有量最多,发生交通事故的经验教训也最丰富,制定的交通安全法规最为详细,对汽车的有关性能和结构提出了最严格的要求,其中防止汽车发生事故的安全标准有24项,汽车发生事故后保护乘员二次冲击的标准有17项,汽车制造厂商采取了许多技术措施提高汽车的安全性,如在汽车上采用安全玻璃、安全带、安全气囊、感载比例阀、盘式制动器、车轮防抱死装置等。加上不断改善道路安全设施,驾驶员的安全培训及人民群众的安全教育,汽车的安全性得到显著改善,在汽车保有量增加的情况下,汽车肇事死亡人数反而下降,改变了上述史密特模型的规律。

我国的汽车发展目前还处于起步阶段,汽车的保有量迅速增加,1995年我国汽车保有量达1000万辆。前两年交通事故发生次数、伤亡人数每年以10%的速度增加。采取了许多有效的安全措施后,1994年全国道路交通事故仍发生了253675起,平均每天发生695起,全年死亡66430人,受伤148920人,平均每天死亡182人,每天受伤408人。减少交通事故,仍是我国及其它国家的重要课题。

综上所述,汽车肇事引起交通事故已显著改善,显示了较好的前景。但汽车引起的交通伤亡事故,是发展汽车工业应引起我们重视的一个重要课题。

## 1.4 汽车给人类带来的难题之二是汽车的排放与噪音污染

人们早期并不重视汽车的排放物。经常看见汽车的排气管后拖着一条兰烟,其中含有氮氧化合物、一氧化碳、二氧化碳及碳氢化合物等有害气体。1943年美国洛杉矶市上空出现光化学烟云,经过科学工作者近20年的研究得出了结论,这种光化学烟云主要是燃油机汽车排放物造成的,这才引起人们的忧虑。特别是汽车尾气中一氧化碳和铅污染对人类危害最大,更加引起人们的重视。1960年后各国政府先后制订了限制汽车尾气排放的法规,迫使汽车制造厂商和研究人员进行大量的研究工作,采取了许多有效措施,如曲轴箱强制通气装置,用空气泵将空气喷入排气管,促使未燃烧的气体在燃烧室外充分燃烧。由于柴油机排放的有害气体低于汽油机的排放,柴油机在汽车上的使用范围扩大,逐渐在小轿车上也采用柴油机。但柴油机排气的烟尘污染较汽油机严重。1981年美国一些研究机构证明,这些烟尘是有毒的致癌物质。所以,美国对排放烟尘的限制法规更加严格。人们曾研制出多种烟尘捕捉器,可清除柴油机排放的90%的烟尘,可达到1987年美国规定的烟尘排放标准。但是,随着科学技术的发展和人们对生活质量要求的提高,更为严格的排放法规已经出现。如1990年美国加州制订的汽车尾气排放法规,要求从1998年开始,在销售的汽车总数中要有2%无尾气排放污染的汽车,即所谓零排放汽车(ZEV)。2003年零排放汽车要达到10%。以石油制成品为燃料的汽车如何迎接这一严峻的挑战,人们正视目以待。

噪音、大气和水的污染是城市的三大污染。世界各国都制

订了噪音法规,在汽车上采取降噪音措施,取得了显著的效果。我国城市的交通噪音尤为严重,城市噪音的70%来源于汽车的交通噪音,随着我国汽车保有量的迅速增加,城市交通噪音还将进一步提高,这是发展汽车工业过程中,又一个必需认真解决的重要课题。

### 1.5 有限的石油资源是对汽车发展的另一个严峻挑战

当世界上第一升汽油诞生之初,人们就清楚地认识到地球上的石油资源不是取之不尽的。以燃油机为动力的汽车,消耗的燃料百分之百是以石油为原料的制成品,估计每辆汽车每年要消耗10~20桶石油的制成品。美国每天消耗的石油有2/3是用于交通运输,其中的一半用于轿车、轻型货车和厢式货车上。根据1988年的统计全世界的汽车保有量为5.37亿辆,每年仍以5%的速度增加,作为重要的化工资源的石油被大量消耗,同时造成大气的严重污染。根据有关专家的估计,地球上已探明的石油储藏量在50年内即可耗尽。为了降低汽车的油耗,各国的汽车制造商和科技工作者进行了大量的卓有成效的工作,取得了显著的效果。全世界的汽车保有量从1973年到1983年的10年里增加了50%,每年汽车的石油总消耗量仍保持在50~55亿桶的水平上。但是从长远观点看,石油枯竭,寻找新的能源,是一项非常迫切的任务。

## § 2 21世纪的能源与环境问题

### 2.1 全球的能源概况

1860年以前,人类处于工业化前期,技术落后,能源消耗

以木柴和农作物的桔杆为主,占世界能源总消耗的 73%,煤炭消耗只占 24.7%。从 19 世纪末到 20 世纪初,人类开始进入工业化年代,蒸汽机得到广泛应用,随着钢铁和煤炭工业的发展,对煤炭能源的消耗始终保持在 50%以上。20 世纪五六十年代,汽车工业和化学工业迅速发展,石油制成品及天然气逐渐取代煤炭占据了主导地位。1973 年的中东战争引起了石油危机,国际石油输出国组织对石油的生产与销售实行垄断,采取减产、提价和禁运等措施,西方工业发达国家受到沉重的打击。能源问题开始严肃地摆在各国政府面前。根据 1976 年 10 月伦敦国际会议估计,当时已探明的剩余的可采储量不足 1 000 亿吨,加上近年来新的发现,1994 年全球已探明石油总储量 1 428 亿吨。1980 年以来全世界每年石油产量在 30 亿吨左右,即在未来的 50 年内即可用完。全世界的煤炭总储量在 30 万亿吨左右,按目前的技术水平,可经济开采储量只有 7 000 亿吨标准煤,可供开采 200 年左右。天然气是一种清洁的能源,但储量太少,大约有 73 万亿立方米,年产量约 2 万亿立方米,也不会使用得太久。

我国是世界上能源较为丰富的国家,仅次于美国和独联体国家,但能源种类主要是煤炭和水资源。国外估计我国的煤炭储量有 1.44 万亿吨,我国已探明储量为 9 300 亿吨,可开采储量为 1 000 多亿吨。1990 年我国煤产量为 10.8 亿吨,可开采 100 年左右。我国水力资源十分丰富,居世界第一位。根据 1979 年复核资料,水力资源理论储量为 6.8 亿千瓦,可开采储量为 3.7 亿千瓦。我国对石油和天然气的地质勘探程度较低,1992 年已探明的石油资源的工业储量为 43 亿吨,1991 年年开采量达 1.4 亿吨,只能开采 30 年。实际上,1994 年我国已经成为石油进口国,当年进口石油 2 000 万吨左右。从人

均能源资源量看,由于我国人口众多,人均能源资源并不丰富,只相当世界平均数的二分之一,美国的十分之一。

能源问题不仅是各国的经济问题,而且是关系各国生存的重大问题,在1973年中东战争期间由于石油危机造成巨大的经济损失,美国缺少1.16亿吨标准煤的能源,减少产值930亿美元,日本缺少0.6亿吨标准煤的能源,减少产值485亿美元。本世纪90年代初引发海湾战争的根源仍然是石油。在21世纪即将来临之际,能源问题——尤其是具有战略地位的石油资源问题,已成为世界范围内迫切要求各国政府和科学工作者认真对待和优先解决的重大课题。

## 2.2 汽车的能源消耗与对策

目前汽车消耗的能源几乎完全依赖于石油的制成品。随着汽车工业的大发展,汽车的年产量和保有量迅速增加,1950年全世界的汽车产量为1000万辆,保有量为6900万辆,到1988年汽车产量增加到4800万辆,保有量达5.37亿辆。这些汽车大约要消耗6亿吨石油制成品,大约相当于全球石油产量的一半,表1-1给出美国等六个工业发达国家1990年的汽车保有量及其消耗的石油制成品的数量。随着汽车在全球每个角落的普及,石油消耗的数量还会进一步增加。如此巨大的消耗,不仅浪费了宝贵的化工原料,而且会造成严重的环境污染,威胁人类的健康与生活,要治理这一严重污染及补偿由于污染使健康受到伤害的人们的费用,将加重社会的经济负担。

在本世纪的最后10年里,我国的汽车工业处于快速发展的年代,汽车的产量及保有量将大步攀升。我国1994年汽车产量为138万辆,汽车保有量为1000万辆,当年我国生产原

油 1.4 亿吨，进口原油达 2 000 万吨。预计到 2000 年汽车的产量达到 300 万辆，保有量达到 2 000 万辆，汽车所需的石油制成品的消耗量将达到 3 000 万吨以上，这是对我国经济发展的一个沉重的负担。因此，国内不少有识之士提出一个疑问，我国汽车工业发展应该走什么样的道路，依旧走世界工业发展的老路呢？还是结合国情有步骤地走多能源、无污染、低污染的汽车工业发展道路？很值得我们深思。

表 1-1 六个工业发达国家 1990 年的汽车保有量与汽车油耗量

国别	汽车/万辆		石油制成品/万吨			油耗/ (吨/辆)
	产量	保有量	汽油	柴油	合计	
美国	977.2	18 726	30 821.7	6 820.9	37 642.6	2.01
日本	1 348.7	5 509.4	3 351.8	2 949.9	6 301.7	1.15
德国	464.7	3 762.3	2 663.9	1 539.5	4 203.4	1.12
法国	376.9	2 775.8	1 826.0	1 694.8	3 520.8	1.27
英国	146.1	2 577.1	2 392.3	1 011.8	3 404.1	1.32
意大利	198.9	2 350.0	1 271.5	1 675.3	2 946.8	1.25
合计	3 512.5	35 700.6	42 327.2	15 692.2	58 019.4	1.63

汽车用能源必须换代，寻找新能源，汽车的发展才有前途，世界各国政府和科技工作者都在探索新的途径。

### 2.2.1 改进汽车的燃油经济性，采取多种节油措施降低汽车油耗

美国 1982 年新生产的轿车的油耗率比 1973 年生产的轿车降低了一半。世界轿车市场上出现许多轿车如 Honda, Civic, Ford 等微型轿车，在美国环保局多工况循环试验中，都能达到每百公里油耗 4.7 升左右。德国 1995 年率先提出开发百公里油耗为 3 升的车型。雪铁龙 AXECO 车的油耗已降

到 3.43L/100km。丰田概念车 AXV - N 的油耗达 2L/100km。因此,有人预计,采用新的节油技术后,到 2000 年轿车的平均油耗将比 1985 年生产的轿车降低 25% 以上。

### 2.2.2 采用新型燃料

采用替代石油产品的新型燃料,如天然气、合成燃油、氢气等,研究工作取得某些进展。但要大量用于汽车,还有一些技术难题需要解决。

### 2.2.3 采用其它能源,如太阳能汽车和电动汽车

实际上在 19 世纪末,电动汽车曾以无污染、易起动、低噪音、易操纵的优点受到人们的赞许。由于汽油的能量密度大约是蓄电池的 220~300 倍,特别具有讽刺意味的是,当时内燃机难于起动的缺点,由于起动电机的发明而得到改善,燃油机汽车逐渐取代了由蓄电池提供能源的电动汽车。今天,用最新的汽车技术、电子技术、控制技术、计算机技术等高新技术改进后的电动汽车已今非昔比,在能源和环境问题倍受人们关注的时代,受到人们的青睐是历史的必然。

## 2.3 全球的环境概况

科学与技术的进步,工业和交通的现代化,使能源消耗迅速增加,也使人们的生活更加方便和舒适。同时,工业废物与排放物严重地污染了人们生活的自然环境,反过来威胁着人类的生存。在工业与交通集中的地方,环境的污染尤为突出,交通运输工具是最主要的污染的排放源,表 1-2 为 1970 年美国污染物的比例,表 1-3 为日本东京排放物的比例,表 1-4 为 1980 年各工业发达国家有害气体的排放量。目前,西欧国家每年由交通车辆排放出 CO 高达 2.16 亿吨,许多国家的调查与统计证实,汽车是当今大气污染的最大污染源,随着