

电 池 材 料 与 应 用 系 列

先进电动汽车技术

陈全世 主 编
朱家璿 田光宇 副主编

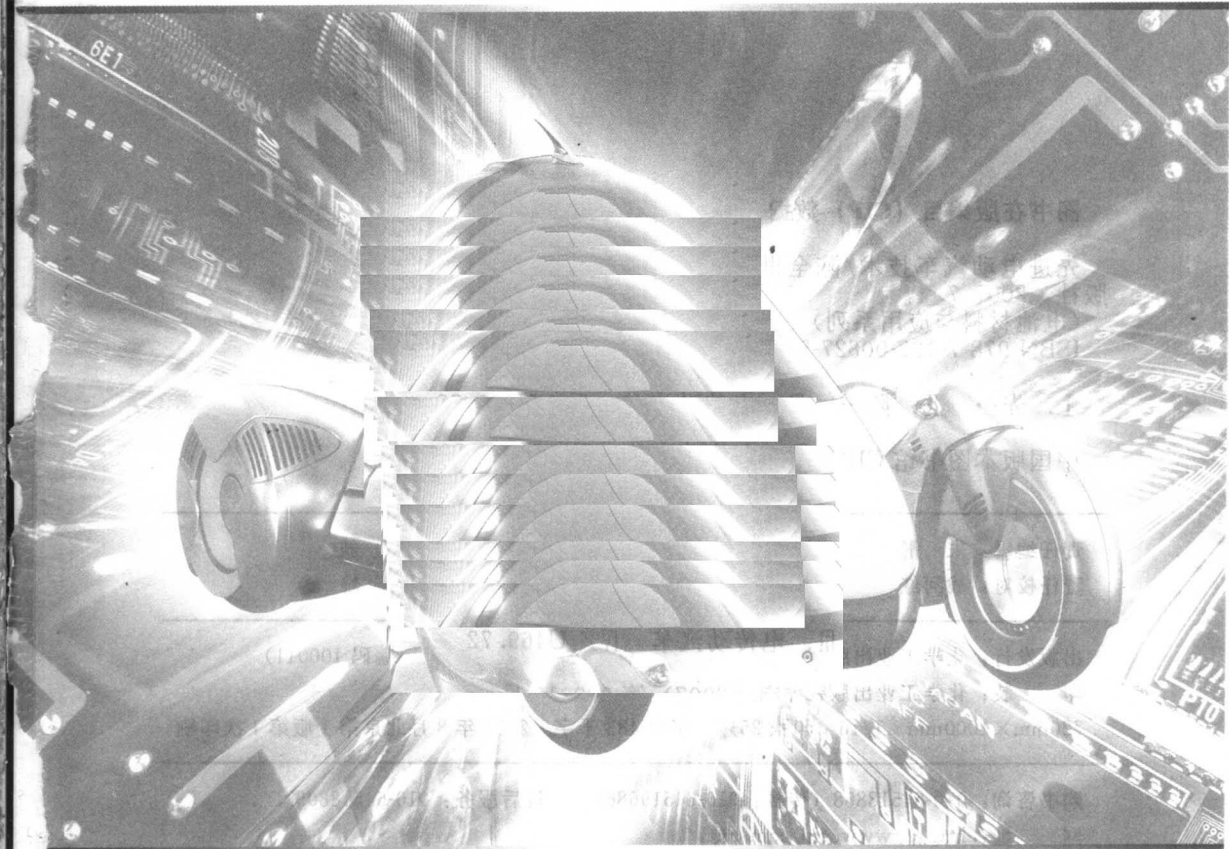


化学工业出版社

电池材料与应用系列

先进电动汽车技术

陈全世 主 编
朱家琰 田光宇 副主编



化学工业出版社

北京·

·北 京·

本书是作者所在研究团队十多年来从事纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池汽车的成果与经验总结,是一本理论性较强,而又紧密结合研究工作实践的专著,书中收集了世界主要电动汽车研制单位所研制样机的技术路线、结构特点、性能参数以及最新研究成果等。

本书可作为从事电动汽车相关领域工程技术人员、管理人员和科研人员参考,也可作为高等学校车辆工程专业本科生和研究生的选修课教材,还可作为机械、电机、材料等专业本科生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

先进电动汽车技术/陈全世主编. —北京:化学工业出版社, 2007.7

(电池材料与应用系列)

ISBN 978-7-122-00827-5

I. 先… II. 陈… III. 电传动汽车 IV. U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 099015 号

责任编辑:朱 彤

文字编辑:陈 喆

责任校对:战河红

装帧设计:潘 峰

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:化学工业出版社印刷厂

720mm×1000mm 1/16 印张25½ 字数483千字 2007年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.80 元

版权所有 违者必究

前 言

汽车在全球保有量的不断增加使人类面临能源短缺、全球变暖、空气质量水平下降等诸多挑战,同时也推动汽车自身技术的发展,为此汽车工程师正在不断研究降低油耗的方法,寻求各种代用燃料以及开发不用或少用汽油的新型车辆;越来越多的人士已认识到各种类型电动汽车和燃料电池汽车是实现清洁汽车的解决方案,全世界的汽车业界也正在为此努力并投入巨大的资金和人力。

本书所论述的先进电动汽车绝不是一百多年前的陈旧电动汽车,或电瓶车技术的重复,它是20世纪末直到目前研究开发出的集机械、电子、汽车、电机、智能控制、化学电源、计算机、新材料等科学领域和工程技术中最新成果于一身,是多种高新技术凝聚的结果。先进电动汽车包括以车载储能装置(包括各种蓄电池、超级电容等)为动力源的纯电动汽车;以电驱动系统(包括车载储能装置和电机)与传统内燃机(包括微型涡轮增压发动机、斯特林发动机等热机)混合的混合动力电动汽车(Hybrid Electric Vehicle, HEV);以氢燃料电池(Fuel Cell)为动力源的燃料电池电动汽车(FCEV)。

电动汽车的最大特点是在行驶过程中很少甚至没有排放污染,热辐射低,噪声低且环境友好。电动汽车可应用多种能源,能节省甚至不消耗汽油或柴油,解决汽车的能源需求问题。毫无疑问,电动汽车是一种节能、环保、可持续发展的新型交通工具,具有广阔的发展前景。

本书主要内容是作者所在的科研团队——清华大学电动车研究室,在国家“八五”~“十五”计划期间的十几年内所承担的国家电动汽车重大项目研究基础上,取得的电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车研究工作的体会和成果。编者力图通过本书将多年的各种研究实践和心得,与有志于从事和希望深入了解先进电动汽车技术的人士进行交流,并希望无保留地与广大读者分享,以推动我国先进电动汽车的技术进步。

本书主要介绍电动汽车的基本构成;关键部件,包括电机及其控制系统、蓄电池、超级电容、氢燃料电池的最新技术;共性技术,电动汽车的高低压电路、整车控制系统、充电站及制氢加氢系统等方面研究进展和发展趋势;3种类型的电动汽车,纯电动汽车、混合动力电动汽车、氢燃料电池电动汽车的结构特点和适用范围;最后介绍了有关电动汽车的标准、法规及相关规范。

本书共分14章。第1、7章由朱家珏编写,第2章由仇斌编写,第3章由宋

建国编写,第4章由林成涛、韩晓东编写,第5章由陈勇编写,第6章由常秋英编写,第8章由黄勇编写,第9、10章由朱家珏、陈全世编写,第11章由陈全世编写,第12章由田光宇编写,第13章的13.1~13.5由钱良国编写,第14章由施双蓉编写,其余章节由陈全世编写并担任本书主编。朱家珏、田光宇担任本书副主编。瞿文龙教授对第3章进行了认真审阅,并提出宝贵意见;谢起成教授和博士后江发潮、晏伟光、王健、陈树勇对全书的内容进行系统审阅,提供了有价值的资料,并对插图和参考文献进行核对和补充。清华大学电动车研究室的博士研究生朱元、齐占宁,硕士研究生孙鸿航、李宗华、陈昊、赵立安、张涵、彭涛、李海晨、管华、熊建、梁伟铭、刘国权、黄文华、付正阳、王波、傅春江、项晓波、周伟波、李佳、吴临政、曾帆、周强、张宾、裴晟、赵广平等为本书的写作提供了有价值的资料和热情帮助,在此谨表示衷心感谢。本书的诞生也是清华大学电动车研究室集体努力的结果。

由于电动汽车技术是近十多年来迅速发展的新技术,许多关键技术问题正在研究和解决中,同时由于作者知识和水平所限,不足之处在所难免,敬请广大专家和读者批评指正。

编 者
2007年3月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 汽车百年回顾	1
1.2 能源安全和环境保护	7
1.3 美国政府的 PNGV 计划	10
1.4 汽车工业和技术的未来发展方向	17
1.5 从化石燃料时代向氢能和可再生能源时代过渡	18
参考文献	20
第 2 章 整车行驶工况与性能匹配	22
2.1 汽车行驶工况概述	22
2.2 国外汽车行驶工况介绍	23
2.2.1 美国行驶工况	23
2.2.2 欧洲行驶工况	26
2.2.3 日本行驶工况	28
2.3 我国行驶工况的发展状况	28
2.4 行驶工况的特征分析	30
2.5 汽车行驶工况开发方法	32
2.5.1 开发规划	32
2.5.2 数据的获取	33
2.5.3 数据的分析与处理	34
2.5.4 工况的解析与合成	35
2.5.5 工况的验证	35
2.6 行驶工况在整车性能分析和匹配研究中的应用	36
2.6.1 确定动力性能指标	36
2.6.2 整车参数匹配与仿真	37
2.6.3 整车能量消耗和排放试验	39
参考文献	39
第 3 章 电动汽车驱动电机及其控制系统	41
3.1 概述	41
3.2 直流电机驱动系统	41
3.2.1 直流电机工作原理	41

3.2.2	直流电机数学方程	43
3.2.3	直流电机机械特性分析	44
3.2.4	直流电机控制器原理	46
3.2.5	直流电机驱动系统的特点	47
3.3	交流感应电机驱动系统	47
3.3.1	交流感应电机工作原理	47
3.3.2	基于感应电机稳态模型的变压变频调速	49
3.3.3	交流感应电机矢量控制算法	51
3.3.4	交流感应电机直接转矩控制算法	54
3.3.5	交流感应电机驱动系统特点	55
3.4	交流永磁电机驱动系统	55
3.4.1	交流同步电机工作原理	56
3.4.2	永磁同步电机数学模型及控制系统	57
3.4.3	无刷直流电机工作原理	58
3.4.4	无刷直流电机数学模型及控制系统	59
3.4.5	交流永磁电机驱动系统特点	61
3.5	开关磁阻电机	61
3.5.1	开关磁阻电机工作原理	61
3.5.2	开关磁阻电机的数学模型	62
3.5.3	电动汽车 SR 电机控制系统	63
3.5.4	开关磁阻电机驱动系统的特点	64
3.6	电机驱动系统总结	64
	参考文献	65
第 4 章	动力电池系统	67
4.1	概述	67
4.2	动力电池的基本术语	69
4.3	电动车辆对电池性能的要求	70
4.3.1	纯电动汽车电池的工作要求	70
4.3.2	混合动力汽车对电池的工作要求	71
4.3.3	可外接充电式混合动力汽车 (PHEV) 对电池的工作要求	71
4.3.4	电动车用电池的具体指标要求举例	72
4.4	电动车用电池的主要种类及特点	74
4.4.1	铅酸电池	74
4.4.2	镍氢电池	75
4.4.3	锂离子电池	77
4.4.4	ZEBRA 电池	80

4.5 电池测试方法	82
4.5.1 单体、模块与电池组	82
4.5.2 电动汽车动力电池国内标准	83
4.5.3 国外动力电池的试验方法	83
4.6 电池管理系统	85
4.6.1 电池管理系统概述	85
4.6.2 电动汽车电池管理系统举例	86
4.7 电动车用电池管理的关键技术	87
4.7.1 电池模型应用	87
4.7.2 SOC 估计	92
4.7.3 电池组热管理	95
4.8 动力电池技术前景展望	99
参考文献	100
第5章 超级电容与飞轮储能装置	104
5.1 超级电容的研究现状	104
5.2 超级电容的储能机理及分类	105
5.2.1 超级电容的储能机理	105
5.2.2 超级电容的分类	107
5.3 碳镍体系超级电容	109
5.3.1 充电过程	109
5.3.2 放电过程	110
5.4 超级电容的模型	110
5.4.1 超级电容的理论模型	110
5.4.2 超级电容等效电路模型	113
5.5 超级电容在电动汽车上的应用	115
5.5.1 超级电容与动力电池的比较	115
5.5.2 超级电容组的电压均衡问题	116
5.5.3 超级电容在车辆上的应用	118
5.6 飞轮储能装置	119
5.6.1 飞轮储能装置的结构及原理	119
5.6.2 飞轮储能装置与其他储能装置的比较	122
5.6.3 飞轮储能装置发展现状	123
5.6.4 飞轮储能装置关键技术	125
参考文献	126
第6章 质子交换膜燃料电池	128
6.1 燃料电池概述	128

6.1.1	燃料电池的分类	128
6.1.2	车用燃料电池及其关键技术	130
6.1.3	燃料电池的性能指标	132
6.2	质子交换膜燃料电池的工作原理	134
6.3	膜电极	135
6.3.1	聚合物电解质膜	136
6.3.2	电催化剂	140
6.4	双极板	142
6.5	燃料电池的水管理和热管理	145
6.5.1	燃料电池的水管理	145
6.5.2	燃料电池的热管理	149
6.6	增压式燃料电池和常压式燃料电池	150
6.6.1	增压式燃料电池	151
6.6.2	常压式燃料电池	153
6.7	燃料电池的相关计算	155
6.7.1	燃料电池单体的电压及效率的计算	155
6.7.2	空气流量计算	159
6.7.3	氢气流量	160
6.7.4	水的生成量计算	160
	参考文献	161
第7章	电动转向、制动及其他电动化辅助系统	162
7.1	电动助力转向系统	162
7.1.1	电动助力转向系统概述	162
7.1.2	电动助力转向系统的分类	163
7.2	用于电动车辆的气压制动系统	170
7.2.1	电动车辆的空气压缩机控制回路	170
7.2.2	电动制动空气压缩机	172
7.3	电动制动器 (EMB)	174
	参考文献	176
第8章	电动汽车的电气系统	178
8.1	电气系统概述	178
8.1.1	低压电气的控制逻辑	178
8.1.2	高压电气系统	179
8.2	电源变换器	180
8.2.1	电动汽车中的电源变换器	180
8.2.2	降压变换器	181

8.2.3	升压变换器	182
8.2.4	双向电源变换器	183
8.3	电气系统的电磁兼容性	186
8.3.1	电磁兼容概述	187
8.3.2	电磁噪声的分析	187
8.3.3	电磁噪声的传播	189
8.3.4	减少电磁干扰的主要措施	191
8.4	电动汽车的电气安全技术	197
8.4.1	电气绝缘检测的一般方法	197
8.4.2	电动汽车电气绝缘性能的描述	198
8.4.3	绝缘电阻检测原理	198
	参考文献	199
第9章	纯电动车辆	200
9.1	纯电动车辆概述	200
9.2	美国的电动汽车计划和通用汽车公司的纯电动轿车 EV-1	201
9.3	美国 TESLA Motors 公司的纯电动跑车 Tesla Roadster	206
9.4	法国的电动汽车发展历程和标致-雪铁龙集团的纯电动轿车	207
9.5	日本的纯电动汽车研发概况	209
9.6	中国的纯电动汽车和电动汽车示范基地	209
9.7	小型电动车和电动工程车	210
9.7.1	小型电动车介绍	210
9.7.2	小型电动车的一般结构	215
9.7.3	四轮小电动车的安全设计标准	219
	参考文献	219
第10章	混合动力电动汽车	221
10.1	混合动力电动汽车概述	221
10.2	传统内燃机车辆的能量利用情况	223
10.3	混合动力驱动系统的节能潜力	225
10.4	混合动力汽车的排放问题	227
10.5	混合动力电动车的分类	227
10.5.1	串联混合动力系统	230
10.5.2	并联混合动力系统	231
10.5.3	混联式混合动力电动车	236
10.6	混合动力电动车的能量管理与控制策略	240
10.6.1	串联式混合动力系统的工作模式	241
10.6.2	并联式混合动力系统的工作模式	241

10.6.3	混合动力系统的能量管理策略	242
10.7	可外接充电式混合动力汽车 (PHEV)	243
10.7.1	PHEV 的发展背景	243
10.7.2	PHEV 的工作模式	244
10.7.3	PHEV 的研发现状	245
10.7.4	当前 PHEV 研究的主要问题	250
10.8	不同类型混合动力车与传统汽油车总效率的比较	252
	参考文献	253
第 11 章	燃料电池汽车	255
11.1	燃料电池汽车的基本结构	255
11.2	燃料电池汽车动力系统的参数匹配方法	257
11.2.1	理想的动力驱动系统的参数优化匹配方法	258
11.2.2	实用的动力驱动系统的参数优化匹配方法	260
11.2.3	整车参数、动力性指标与目标工况	261
11.3	燃料电池汽车燃料经济性的计算	262
11.3.1	燃料电池系统氢气消耗量的计量方法	262
11.3.2	蓄电池等效氢气消耗量的折算	265
11.4	燃料电池汽车动力驱动系统的参数匹配举例	267
11.4.1	车辆行驶需求功率及功率谱分析	268
11.4.2	驱动电机参数的选择	272
11.5	传动系速比的选择	275
11.5.1	传动系最小传动比的选择	276
11.5.2	传动系最大传动比的选择	276
11.5.3	固定速比齿轮传动系的传动比选择	278
11.6	动力源参数匹配与系统构型分析	279
11.6.1	双动力源之间的基本能量分配策略	279
11.6.2	“FC+B ₂ DC/DC (功率混合型)”构型的能量分配策略	280
11.6.3	“FC ₂ DC/DC+B (能量混合型)”构型的能量分配策略	283
11.6.4	燃料电池系统的特性参数	283
11.6.5	蓄电池系统的参数选择	284
11.7	国外燃料电池汽车的研究进展	286
11.7.1	美国通用汽车公司	286
11.7.2	美国福特汽车公司	289
11.7.3	加拿大巴拉德动力系统	290
11.7.4	戴姆勒-奔驰汽车公司	290
11.7.5	日本丰田汽车公司	294

11.7.6 日本本田汽车公司	296
参考文献	298
第 12 章 整车控制与系统仿真	300
12.1 整车控制系统及其功能分析	300
12.1.1 控制对象	300
12.1.2 整车控制系统结构	302
12.1.3 整车控制器功能	303
12.2 整车控制器开发	304
12.2.1 开发模式	304
12.2.2 硬件在环开发系统	307
12.2.3 仿真模型	310
12.2.4 快速控制器原型	317
12.3 能量管理策略及其优化	320
12.3.1 混动式混合动力系统	320
12.3.2 燃料电池串联式系统	323
12.4 整车通信系统	326
12.4.1 CAN 总线及其应用	327
12.4.2 TTCAN 协议及通信实时性分析	329
12.4.3 FlexRay 总线及其应用	334
12.5 整车容错控制系统	337
12.5.1 容错单元及容错控制系统	338
12.5.2 容错的 CAN 通信系统	341
参考文献	344
第 13 章 充电装置与氢系统基础设施	345
13.1 充电装置与电动汽车	345
13.1.1 充电装置与电动汽车及电池系统的安全性	345
13.1.2 充电装置与电池组使用寿命和电动汽车的运行成本	346
13.1.3 充电装置和纯电动汽车的能耗指标	347
13.1.4 充电设备与运行管理成本	348
13.2 电动汽车充电装置的分类	348
13.3 电动汽车充电技术和充电装置研究的进展	352
13.3.1 电动汽车充电技术研究取得的成果	352
13.3.2 电动汽车充电装置系统集成技术新进展	356
13.3.3 非接触电力传输充电装置研究的最新进展	358
13.4 电动汽车充电站的构架方案	358
13.5 电动汽车充电装置的展望	364

13.6	燃料电池汽车和氢燃料	364
13.6.1	燃料电池和氢燃料	364
13.6.2	氢的基本性质	365
13.7	氢燃料的制取	366
13.7.1	电解水制氢	367
13.7.2	天然气蒸汽重整制氢	368
13.7.3	来自焦化厂、氯碱工厂或石油精炼厂的副产品氢	369
13.7.4	集中与分布制氢的氢成本比较	370
13.8	加氢站构成与系统方案	370
13.8.1	加氢站组成	371
13.8.2	加氢站系统类型	372
13.8.3	加氢机	373
13.8.4	加氢站建设成本	374
13.8.5	全球主要燃料电池大客车示范项目的加氢站	375
13.9	氢安全	381
	参考文献	382
第 14 章	标准与法规	385
14.1	我国电动汽车标准法规的现状	385
14.2	国外电动车辆标准化组织及所制定的标准简介	388
14.2.1	国际标准化组织	388
14.2.2	国际电工委员会	389
14.2.3	欧洲标准化技术委员会/电驱动道路车辆技术委员会	391
14.2.4	联合国世界车辆法规协调论坛	391
14.2.5	美国汽车工程师学会	392
14.2.6	美国电动运输协会标准	393
14.2.7	日本电动车辆协会	393
	参考文献	394

第 1 章

概 述

1.1 汽车百年回顾

一个多世纪之前，德国人卡尔·奔驰（Karl Benz）在 1886 年制造的机动三轮车（图 1-1），比较符合近代汽车的特征，卡尔·奔驰在当时流行的机动三轮车座位后面，设置了一个车架，通过此车架，将排量 984mL、0.9 马力（1 马力 = 735.499W）（400r/min）、水平布置的四冲程单缸水冷汽油机置于后轴之上，采用带与链传动来驱动后轮（图 1-2），最高车速为 15km/h。同时，这辆车是第一个装有差速器的车。车辆转向是通过连接在齿轮齿条上的一根操纵杆控制单前轮转动来实现的（图 1-1）。

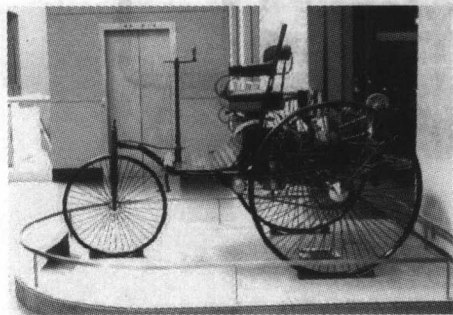


图 1-1 卡尔·奔驰发明的第一辆汽车

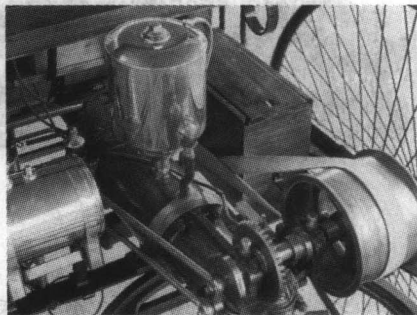


图 1-2 卡尔·奔驰第一辆汽车的驱动系统

美国福特汽车公司创始人亨利·福特（Henry Ford）在 1863 年出生于美国迪尔伯恩市（Dearborn）附近的一个农场。1896 年，亨利·福特在底特律（Detroit）家中的棚屋内，完成了他的第一部四轮汽车，并于深夜试车成功。

1903 年福特汽车公司正式成立，并卖出福特汽车公司第一部汽车——A 型车。1908 年福特推出 T 型车，见图 1-3，这是一款价格能为大众承受的车型并最早开始大量生产。世界汽车工业革命就此开始。

T 型车采用直列四缸水冷汽油机，排量为 2896mL，功率在 1600r/min 时为 20 马力，它有两个前进挡和一个倒挡，所采用的行星式传动系统与发动机连接成一个整体结构（图 1-4），这是福特公司的专利。图 1-5 为不带车身的 T 型车底盘。

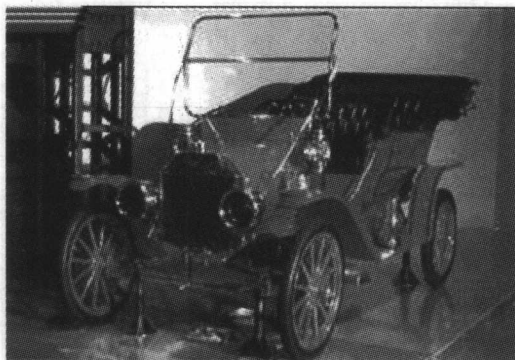


图 1-3 亨利·福特的 T 型车

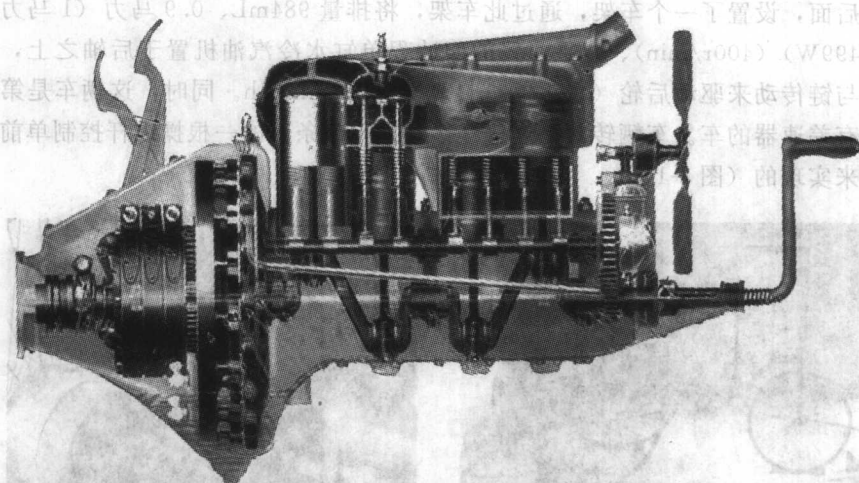


图 1-4 T 型车所采用的行星式传动系统

1913 年，福特汽车公司又开发出了世界上第一条汽车装配流水线（图 1-6）。据统计，在福特的汽车制造厂内，移民工人来自世界各地，使用的语言有 30 多种，生产中彼此难于沟通与协作。但是，流水线生产与零件互换性技术的采用，在管理者和工程师的安排下，使得大批量、低成本生产汽车成为可能，并创造了可观的利润。1914 年 1 月 5 日，福特公司宣布向工人支付 8 小时 5 美元的工资，这是当时 9 小时工作制工资的两倍，使美国汽车工人的生活发生了巨大变化。1915 年，第 100 万辆福特 T 型车下线。1927 年，亨利·福特和艾德塞尔·福特亲自将第 1500 万辆 T 型车开下装配线，正式结束了 T 型车的生产。T 型车全球总产量为 15458781 辆，T 型汽车的问世和流水线大规模生产，使汽车的价格直线下降。到了 1918 年，福特汽车公

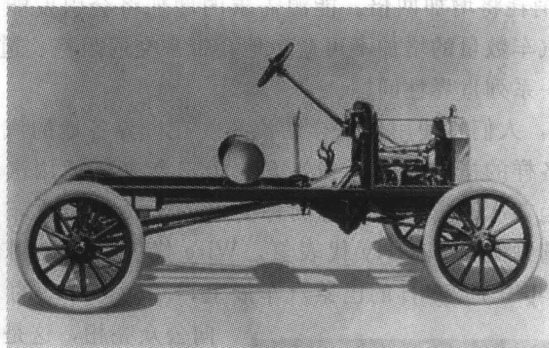


图 1-5 不带车身的 T 型车底盘

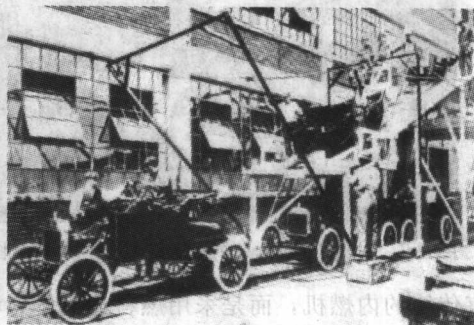
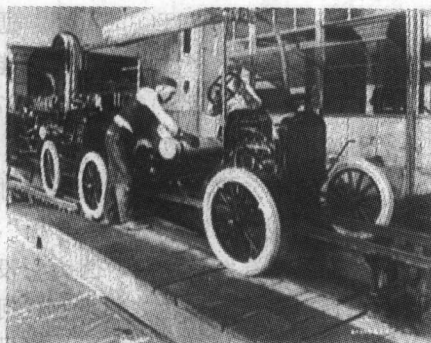


图 1-6 福特汽车公司开发的世界上第一条汽车装配流水线

公司的汽车产量已占到美国汽车产量的一半，福特 T 型汽车的售价也降到 260 美元一辆，本厂工人两个月的工资就能买得起，从而把汽车从富人的玩物变成了大众也能享用的个人交通工具。汽车的大规模生产和普及引发了社会生产和生活方式的变革，创造了很多的就业机会。汽车工业的发展极大地促进了社会经济的发展，在不到 100 年的时间里，汽车已成为人们生活中不可缺少的部分，它缩短了社会整体的空间和时间距离，扩大了人们的生活范围，加快了生活节奏。

一百多年来，汽车的结构不断改进，性能不断提高，保有量也不断增加。现在世界汽车保有量达 7.5 亿辆，其中美国 2 亿多辆、日本 7000 万辆、欧洲 2 亿多辆。中国汽车的保有量处在快速增长阶段，轿车已开始进入家庭。中国汽车保有量从 1978 年不足百万辆到 2001 年的 1610 万辆，以年均 13.5% 的速度增长，截至 2006 年年底，中国私人汽车保有量接近 2200 万辆。目前，中国汽车保有量每千人不到 30 辆，与世界平均每千人 120 辆相差甚远。中国汽车市场发展潜力巨大。

美国布什政府前能源部长亚伯拉罕指出，据能源信息部门估计，未来 25~

35 年内全球石油消耗将增加两倍。能源需求的增加将会引发能源安全和国家安全问题。同时,汽车数量的增加不可避免地会带来交通阻塞、道路拥挤、空气污染、能源紧张等一系列世界性问题。

进入 21 世纪,人们将使用什么样的汽车?在世界各地的汽车展览会上,人们从推出的各种各样的概念车上寻找答案。2002 年初,通用汽车公司在底特律北美国际汽车展上首次透露正在考虑的称为 Hy-Wire 的概念车(是指用“氢和导线”来驱动和驾驶的汽车,Hy 代表氢,Wire 代表传输控制信号的导线),8 个月后,在 2002 年 9 月 26 日的巴黎汽车展上,一辆可开动的 Hy-Wire 概念车

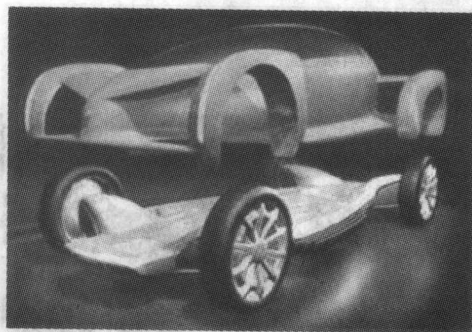


图 1-7 AUTO-nomy 的底盘和车身结构示意图

向公众亮相,这是一辆将氢燃料电池和控制信号导线传输技术结合在一起的革命性设计的概念车,它还有一个名字“**AUTO-nomy**”。通用公司展示的革命性设计,很可能就是未来将要使用的汽车。图 1-7 给出该车设计的大致概念。

这辆车分为车身和底盘两大部分,底盘设计类似“四轮滑板”,车身头部没有发动机舱,因为它没有传统的内燃机,而是采用燃料电池作为动力源,所以车身与底盘之间没有任何机械杆件和液压管路连接。上部车身内没有油门、离合器、制动器等踏板,也没有传统的方向盘,只有一个看上去像飞机上的驾驶部件。开车人驾驶车辆的所有动作均被转变为数字式电信号,然后通过导线传入“四轮滑板”上的控制部件,实现对车辆的转向、制动、加速等各种驾驶动作。开这种车就像开飞机一样,驾驶员轻松操作符合人体工程学设计的“手把”,就可使车辆加速、行进、制动、停车和转向。

从图 1-8 中可以看到车内前半部的布置情况,在操纵部件上还有一只



图 1-8 AUTO-nomy 的驾驶操纵系统