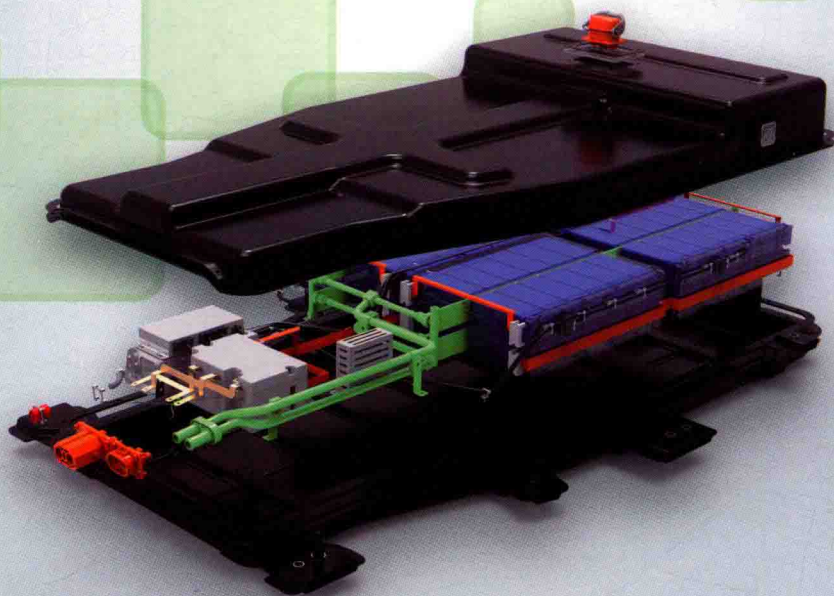


Design and Manufacturing
Technology of Battery Pack
for Electric Vehicle

电动汽车 动力电池系统 设计与制造技术

王芳 夏军 等著



张外借



科学出版社

电动汽车动力电池系统 设计与制造技术

王芳 夏军等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书内容立足于我国电动汽车产业的实际情况,从多个角度对动力电池系统的设计与制造进行了系统化的梳理和论述,可以用于指导企事业单位的方案论证、产品开发、技术研究、生产制造和售后服务等工作。全书共8章,包括动力电池系统技术发展综述、总体方案设计(系统设计)、结构与电连接设计、电池管理系统(BMS)设计、热管理设计、结构仿真分析、试验验证,以及生产制造技术,可以为读者提供丰富的工程实践参考。

图书在版编目(CIP)数据

电动汽车动力电池系统设计与制造技术/王芳,夏军等著.—北京:科学出版社,2017.8

ISBN 978-7-03-054120-8

I. ①电… II. ①王… ②夏… III. ①电动汽车-蓄电池-系统设计
②电动汽车-蓄电池-制造 IV. ①U469.702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 184497 号

责任编辑:朱 丽 杨新政 / 责任校对:韩 杨
责任印制:肖 兴 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年8月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年8月第一次印刷 印张:24 1/4

字数:470 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 Foreword

改革开放以来，经过持续 30 年的经济增长，我国的经济总量已经跃居世界第二，成为具有国际影响力的大国。但是，经济的快速增长，给自然资源和生态环境带来了巨大压力。如何根据我国的能源资源情况，改变经济发展模式，降低单位国内生产总值（GDP）能耗，提高可再生能源的比例，是我们迫切需要解决的问题。我国是缺油的国家，根据中国工程院咨询报告《中国可持续发展油气资源战略研究（2020—2050）》估计，“我国已探明的石油储量不到世界的 2%，剩余可采储量约为 50 亿吨，若每年产量维持在 1.7 亿~1.8 亿吨，仅能再采 30 年”。“预计到 2050 年，我国汽车保有量为 2.5 亿辆，汽车用油量约为 2.5 亿~2.8 亿吨，占石油总需求的 40%~45%”。最近的数据显示，我国目前汽车保有量已达到 2 亿辆。中长期我国汽车年产销量估计在 4000 万辆左右。2016 年，我国进口原油 3.8 亿吨，石油对外依存度已达 65.5%，能源安全令人忧虑。另一方面，“温室气体排放总量持续攀升，全球 CO₂ 排放中，25% 来自汽车。汽车排放污染已经成为我国城市大气污染的主要来源”，现在我国 CO₂ 排放量已居世界第一。我国已批准加入《巴黎气候变化协定》，成为第 23 个完成了批准协定的缔约方。一方面要实现经济发展，另一方面要控制 CO₂ 的总体排放量，要不断地降低化石能源的占比，逐步摆脱对煤炭、石油、天然气等石化资源的依赖。推动能源结构从化石能源为主向非化石能源为主转变。

作为能源消耗大户和温室气体排放大户的汽车产业，如何满足汽车对石油日益增长的需求？如何为降低 CO₂ 排放做出贡献？中国工程院咨询报告《中国石油需求的远景展望与替代战略研究》给出了明确的答案：“在各种替代石油方案中，只有电替代方案才能既实现汽车能源多元化，又能消除汽车对环境的污染。大力发展电动汽车，既是保证我国能源安全的战略措施，也是我国汽车工业实现跨越式发展的重大机遇”。

2001 年，我国启动了新能源汽车专项，明确提出纯电驱动是国家战略。在国家多项产业政策的扶持下，我国新能源汽车产业走上了快速发展的道路，逐渐超越其他国家，成为全球新能源汽车产销第一大国。

在新能源汽车专项启动会上，时任科学技术部长的徐冠华院士指出：电动汽

车的关键是电池，电池的关键是成本和安全。大家很快达成共识，电动汽车的动力电池就是锂电池。我国在 1987 年启动的第一个“863”计划就把锂电池列为重点项目，为锂电池产业提供了知识储备、技术储备和人才储备，为电动汽车的发展奠定了基础。

动力电池系统 [含电芯和电池管理系统 (BMS)] 是电动汽车的核心部件，决定了整车的续驶里程、成本、使用寿命、安全性等关键指标。如果这个核心部件做不好，整车的性能就无从谈起，我国政府的新能源汽车发展目标也就很难实现。

目前大量的基础研究集中在电池新材料和单体电池的改性研究上，这是电动汽车得到突破性进展的基础。然而在电动汽车上应用的不是单体电池，而是由大量单体电池组成模块，再由若干模块组成的电池系统。电动汽车的性能并不是简单地由单体电池决定，而是在很大程度上由电池组的性能和参数所决定的。因此从电动汽车的性能需求出发，直接需要匹配的是电池组的参数。单体电池通过串联来获得高压，并联来获得高容量的电池组，从而出现了若干单体并联，上百单体串联的单体网络结构。电池组能量密度，耐久性和安全性等性能相比单体电池都会有一定程度的下降。电池组表现的行为已无法通过相似原理用单体电池的行为去衡量。

电池系统是电动汽车的动力源。它需要监控和记录单体电池的状态，包括各单体电池的电压、温度、荷电状态 (SOC)、健康状态 (SOH) 和功能状态 (SOF)。同时电池系统还应保证单体电池的合适工作环境 (如温度) 并防止单体电池滥用行为的发生 (过充、过放、过流等)。更智能的电池系统需要及时发现单体电池可能存在的安全问题并提供解决方案，缓减单体间的差异，提高电池组的使用寿命。电池系统应具有尽可能小的体积和质量，从而保证所选用单体电池在能量密度上的优势得到充分发挥。电池系统还应能提供电池组适时的状态信息，为电动汽车驾驶人员提供决策依据。

电池系统的构成包括：①外壳：为电池系统中其他部件提供安装空间，并减少电动汽车环境对其他部件的冲击，在电动汽车发生碰撞等安全问题时能保护其中的零部件。②串并联电池组：由单体电池通过连接片等串并联构成，所有的其他部件都是保证其正常工作或优化其工作。③电池管理系统 (BMS)：广义的电池管理系统还包括安全系统、热管理和充电管理；狭义的电池管理系统主要功能包括监测和估算单体电池状态，与外部设备通信，保证单体电池的安全运行条件，实现电池组的部分修复功能。④安全系统：具有两部分功能，一是对电池本身安全问题的检测与防护，包括电池内短路、漏液、失火的检测，报警与隔离；二是对来自外部危害的防护，包括碰撞穿刺防护、高温隔离和防水处理等。⑤热管理：一个好的电池热管理系统需要保证电池组处于正常的工作温度范围内，既能保

证电池组在低温的环境中工作，也要保证电池组有足够的散热能力。更重要的是要保证单体间工作温度的一致性。⑥充电系统：充电倍率和充电时间上的选择多样性可以使电池组的寿命或充电电价得以优化。

当前对电池组系统应开展更深入的研发，不仅需要大量的资金投入，更需要多学科专家参与，进行大量的工程实践。本书作者为工作在产学研一线的学者和专家，他们结合自己的工作和科研经验，系统地总结和论述了动力电池系统的开发流程和工程经验，推动了技术的融合，加快了知识的普及和提高，必将为性能优异的动力电池组设计和生产做出贡献。

可以相信，随着更多的专家学者将新能源汽车的相关知识加以归纳、总结和共享，我国的新能源汽车产业一定会取得更加辉煌的成就。



2017年7月

前言 Preface

得益于政府产业政策的扶持和全球最大汽车市场的支撑，我国的新能源汽车产业在“十二五”期间取得了爆发式的增长，一跃成为全球新能源汽车产销量第一的国家，走在了世界的前列。这一良好的势头延续到了“十三五”期间，2016年我国新能源汽车的产销量均超过了50万辆，市场渗透率已经超过了1%，继续领跑全球新能源汽车市场。

我国新能源汽车产业所取得的成绩是值得肯定的，是政府、高校、科研院所、企事业单位、用户共同推动的结果，成绩的背后是广大从业人员的辛勤付出与汗水。我们不仅在产销量数据上取得了良好的成绩，在产品和技术层面也取得了明显的突破，完成了“三纵三横”的产业布局，技术类型涵盖混合动力、插电式混合动力、纯电动、燃料电池，产品形态涵盖乘用车、商用车、专用车、微型车，并初步掌握了电池、电机、电控、整车等领域的核心技术。

我们要看到，我国新能源汽车产业的发展，并不是完全市场化的结果，“十二五”期间所取得的成果，主要的功劳还是政府的产业扶持政策，尤其是补贴政策。这一阶段的产业政策，引领作用是非常明显的，客观上加速了技术的突破、产品的丰富和市场的形成。“十三五”期间，我国新能源汽车产业将进入无人区，往前看，成功的经验和模式几乎没有，必须依赖于自我探索、自我积累、自我突破，不断完善和丰富产业生态。我国新能源汽车产业的发展，将逐步由政策引导向市场自我调节过渡，在新的发展阶段，政策的作用和影响将逐渐淡化，市场自我调节机制将建立起来，产品和技术将成为决定新能源汽车未来的关键所在。2020年以后，随着补贴政策完全退出，技术成熟度和产品竞争力将成为用户选择新能源汽车的首要因素。

在整车层面，整车企业需要开发出消费者认可的车型，在续驶里程、使用寿命、可靠性、安全性、快速充电、销售价格等方面，让用户切实地感受到新能源汽车的好处。在零部件层面，“大三电”和“小三电”仍然是长期技术攻关的方向，电力传动、“三电”集成、动力总成等也是重点研究方向，没有成熟的零部件技术，就没有成熟可靠的新能源汽车产品，新能源汽车的普及也就无从谈起。

动力电池系统是电动汽车的核心部件，是电动汽车的动力源，对新能源汽车

的发展有重要的影响。2012年6月28日，国务院颁布的《节能与新能源汽车产业发展规划（2012—2020年）》文件，2016年10月26日，中国汽车工程学会发布的《节能与新能源汽车技术路线图》，以及2017年3月1日，工业和信息化部、国家发展和改革委员会、科学技术部以及财政部四部委发布的《促进汽车动力电池产业发展行动方案》，均对动力电池系统的技术指标提出明确而具体的要求。如《促进汽车动力电池产业发展行动方案》中明确提出，2020年，动力电池系统的能量密度要大于260 Wh/kg，成本要小于1元/Wh，使用环境温度达到-30~55℃，充电倍率达到3C。相对于当前的技术水平而言，这是一个非常大的挑战，也是电动汽车大规模推广和普及的瓶颈所在。

为了更好地推动我国新能源汽车产业的健康发展，提高产品成熟度，加快新能源汽车的普及速度，科学出版社联合中国汽车技术研究中心、杭州捷能科技有限公司等单位的专家，编写出版《电动汽车动力电池系统设计与制造技术》一书。本书是继《电动汽车动力电池系统安全分析与设计》出版后，电动汽车系统丛书的第二部专著，汇聚了行业前沿的技术创新和工程实践，集合了大量的产品案例，全面地论述动力电池系统的设计与制造技术。

本书内容立足于我国电动汽车产业的实际情况，从多个角度对动力电池系统的设计与制造进行了系统化的梳理和论述，可以用于指导企事业单位的方案论证、产品开发、技术研究、生产制造和售后服务等工作。全书共8章，包括动力电池系统技术发展综述、总体方案设计（系统设计）、结构与电连接设计、电池管理系统（BMS）设计、热管理设计、结构仿真分析、试验验证，以及生产制造技术，可以为读者提供丰富的工程实践参考。

本书由王芳和夏军负责统筹规划和整理，第1章由夏军负责编写，第2章由孙世强负责编写，第3章由陈敏负责编写，第4章由谭晓军负责编写，第5章由蒋碧文负责编写，第6章由刘勇负责编写，第7章由王芳、刘仕强、林春景负责编写，第8章由黄昌明、武文华、李静等负责编写，福建星云电子股份有限公司、上海昭宏自动化机械有限公司也参与了部分编写工作。限于编者和各位作者的能力，本书的内容并不能涵盖与动力电池系统相关的所有知识，希望广大读者，能够向出版社和编委会积极反馈建设性的意见，也希望有更多的专家和学者参与到本书的再版工作中来，一起推动本书的修改和完善。

本书的筹备、编写和出版，得到了以下单位和公司的大力支持，在此一并表示感谢：

中国汽车技术研究中心

杭州捷能科技有限公司

微宏动力系统（湖州）有限公司

福建星云电子股份有限公司
湖北德普电气股份有限公司
大族激光新能源装备事业部
深圳市瑞能实业股份有限公司

对于本书出版和发行给予大力支持的行业同仁，编者在此表示诚挚的谢意。凝聚行业同仁的智慧，加快知识的普及，提升行业整体技术水平，共同推动新能源汽车产业的健康发展，是我们义不容辞的责任。

王 芳 夏 军

2017年7月

目录 Contents

第 1 章 电动汽车动力电池系统技术发展综述	1
1.1 电动汽车发展史	2
1.1.1 电动汽车的第一个黄金时代	2
1.1.2 电动汽车的第二个黄金时代	2
1.1.3 电动汽车的第三个黄金时代	4
1.2 电动汽车 Pack 产品分类	5
1.2.1 动力储能电池的分类	6
1.2.2 动力电池系统的功能分类	10
1.2.3 动力电池系统在整车的安装位置	19
1.3 电动汽车 Pack 的关键技术	23
1.3.1 系统集成技术	24
1.3.2 电芯设计及选型	25
1.3.3 结构设计技术	27
1.3.4 电池包电子电气设计	28
1.3.5 电池包热设计	29
1.3.6 电池包安全设计	30
1.3.7 电池包仿真分析技术	32
1.3.8 电池包工艺设计	32
1.4 我国电动汽车 Pack 技术发展趋势	33
1.4.1 我国新能源汽车的发展阶段	33
1.4.2 我国政府制定的 2020 年关键技术指标	34
1.4.3 技术挑战及发展趋势	35
参考文献	38
第 2 章 动力电池系统总体方案设计	41
2.1 动力电池系统总体方案设计概述	42
2.1.1 动力电池系统总体方案设计流程	42
2.1.2 动力电池系统的总体需求分析	43

2.1.3	动力电池系统的基本性能参数	47
2.1.4	动力电池系统产品参数匹配性分析	48
2.2	单体电池的选型与设计	51
2.2.1	单体电池的选型与设计概述	51
2.2.2	单体电池的选型依据	51
2.2.3	单体电池容量选型设计	52
2.2.4	单体电池选型和容量设计示例	53
2.3	机械结构概念设计	57
2.3.1	机械结构总体设计概述	57
2.3.2	机械结构设计要求	58
2.3.3	电池包在整车上的布置	62
2.3.4	电池包总体布置方案设计	67
2.3.5	电池箱体和电池模组概念方案设计	69
2.4	电池管理系统概念设计	71
2.4.1	电池管理系统设计概述	71
2.4.2	电池管理系统基本功能	71
2.4.3	电池管理系统设计要求	72
2.4.4	电池管理系统概念设计方案	76
2.5	高压电气系统设计	77
2.5.1	高压电气系统设计概述	77
2.5.2	高压电气系统设计要求	78
2.5.3	高压电气系统概念设计方案	81
2.6	热管理系统设计	84
2.6.1	锂离子动力电池的温度特性	84
2.6.2	热管理系统设计概述	85
2.6.3	热管理系统基本功能	86
2.6.4	热管理系统设计要求	86
2.6.5	热管理系统概念设计方案	86
	参考文献	90
第3章	动力电池系统结构与电连接设计	93
3.1	电池系统结构设计概述	94
3.2	模组结构设计	95
3.2.1	需求边界	95
3.2.2	模组的固定与连接	98

3.2.3	模组电连接设计	103
3.2.4	模组安全设计	107
3.2.5	模组尺寸标准化	108
3.3	电箱结构设计	109
3.3.1	需求边界	110
3.3.2	整体排布设计	110
3.3.3	详细设计	112
3.3.4	电连接设计	116
3.3.5	电箱安全设计	119
3.4	高压箱结构设计	123
3.5	轻量化设计	125
3.5.1	新的成组方式	126
3.5.2	新型材料的应用	128
3.5.3	极限设计	129
3.6	IP 防护设计	131
3.6.1	接触防护	131
3.6.2	防水防尘	132
	参考文献	138
第 4 章	动力电池管理系统 (BMS) 设计	139
4.1	BMS 的功能及其重要性	140
4.1.1	BMS 的角色定位	140
4.1.2	BMS 的主要功能	141
4.2	BMS 的硬件开发要点	146
4.2.1	拓扑结构的选择	146
4.2.2	电压、电流、温度采集电路的设计要点	150
4.2.3	BMS 中两个关键硬件模块的设计	154
4.2.4	BMS 的抗干扰设计	158
4.2.5	面向提高可靠性的冗余设计	161
4.3	BMS 的软件开发要点	162
4.3.1	SOC 相关的概念	162
4.3.2	电池荷电状态 (SOC) 估算	164
4.3.3	电池健康状态 (SOH) 评估	167
4.3.4	SOF 的估算	170
4.4	BMS 的测试与验证	172

4.4.1	一些值得讨论的问题	172
4.4.2	在产品的设计、制造的不同阶段对 BMS 的验证	173
4.4.3	用于 BMS 验证的电池模拟器	174
	参考文献	177
第 5 章	动力电池系统热管理设计	179
5.1	热管理系统设计概述	180
5.1.1	热管理系统的“V”模型开发模式	180
5.1.2	仿真分析的应用	182
5.1.3	实验验证	189
5.2	冷却系统设计	190
5.2.1	冷却方式的选择	191
5.2.2	自然冷却系统	191
5.2.3	强制风冷系统	193
5.2.4	液冷系统	197
5.2.5	直冷系统	212
5.3	加热系统设计	214
5.3.1	设计需求	214
5.3.2	电加热膜设计	216
5.3.3	PTC 加热设计	218
5.3.4	液热设计	220
5.4	保温系统设计	222
5.4.1	保温设计概述	222
5.4.2	模组保温设计	222
5.4.3	箱体保温设计	223
5.5	热管的应用	224
5.5.1	热管简介	224
5.5.2	热管在热管理系统中的应用	225
5.5.3	热管应用注意事项	225
	参考文献	226
第 6 章	动力电池系统结构仿真分析	227
6.1	电池系统结构优化	228
6.1.1	结构拓扑优化	228
6.1.2	电池壳体结构形貌优化	230
6.1.3	其他优化方法简介	231

6.2 动力电池系统结构强度仿真	232
6.2.1 弹性变形体的基本假设	232
6.2.2 应力应变基本概念及关系	232
6.2.3 材料模型	235
6.2.4 冲击分析	236
6.2.5 挤压仿真分析	240
6.3 动力电池系统振动疲劳仿真	242
6.3.1 疲劳理论介绍	242
6.3.2 基于极限拉伸强度的 $S-N$ 曲线估算	245
6.3.3 结构振动疲劳寿命估算	250
6.3.4 随机振动案例解析	255
6.4 制造工艺仿真	259
6.4.1 冲压成型仿真	260
6.4.2 超声波焊接仿真	262
6.4.3 搅拌摩擦焊接	263
6.4.4 模流分析	269
参考文献	272
第7章 动力电池系统开发性试验验证	275
7.1 电池单体测评	276
7.1.1 出厂参数	277
7.1.2 温度和倍率充电性能	277
7.1.3 温度和倍率放电性能	279
7.1.4 恒功率特性	280
7.1.5 脉冲功率特性	281
7.1.6 能量效率	282
7.1.7 荷电保持能力	283
7.1.8 产热特性	284
7.1.9 老化特性	285
7.1.10 安全性测试	287
7.2 动力电池系统开发性验证	289
7.2.1 系统功能	289
7.2.2 系统壳体防护功能	292
7.2.3 电性能	295
7.2.4 可靠性	304

7.2.5	安全性	311
7.2.6	热管理系统开发性试验验证方法	316
7.2.7	EMC 开发性试验验证方法	317
	参考文献	321
第 8 章	动力电池系统制造技术概述	323
8.1	概述	324
8.2	模组结构和工艺介绍	324
8.2.1	圆柱电芯模组结构和工艺介绍	325
8.2.2	方形电芯模组结构和工艺介绍	329
8.2.3	软包电芯模组结构和工艺介绍	331
8.3	关键工艺介绍	334
8.3.1	电芯分选	334
8.3.2	电阻焊接	335
8.3.3	键合焊接	340
8.3.4	激光焊接	343
8.3.5	打胶工艺	346
8.3.6	Pack 总装紧固	348
8.3.7	线束装配	350
8.3.8	气密性检测	351
8.4	生产过程控制	352
8.5	下线测试 (EOL)	359
8.5.1	下线测试 (EOL) 作用	359
8.5.2	下线测试 (EOL) 检测功能需求分析	359
8.6	模组及 Pack 信息/自动化	363
8.6.1	动力电池模组与 Pack 产线的自动化	363
8.6.2	动力电池模组与 Pack 产线的信息化	365
8.6.3	动力电池模组与 Pack 产线的智能化	367
8.6.4	本章小结	370
	参考文献	370
	缩略语	371

01

电动汽车动力电池系统技术发展 综述

1.1 电动汽车发展史

1.1.1 电动汽车的第一个黄金时代

世界上第一辆内燃机汽车诞生于 1886 年，而在此之前，电动汽车就已经出现在大街上了。1873 年，英国人 Robert Davidson 首次在马车的基础上制造出一辆电动三轮车，它由铁锌电池（一次电池）提供电力，由电机驱动，比内燃机汽车的出现时间早了 13 年。早期的电动三轮车如图 1-1 所示。

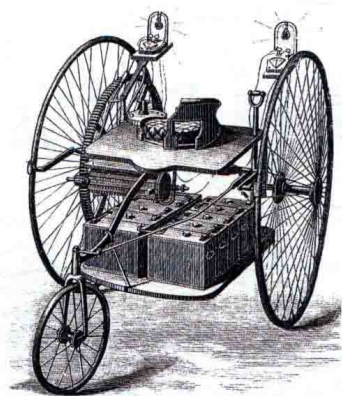


图 1-1 早期电动三轮车

1890 年，美国依阿华州诞生了第一辆四轮电动汽车，时速高达 23km/h，创造了当时汽车行驶速度的世界纪录。

随着铅酸电池技术的不断发展，电动汽车产品也得到了更快的普及。1912 年，美国已大量生产电动汽车，到了 1915 年，美国的电动汽车年产量超过 5000 辆，保有量达到了 5 万辆。

19 世纪末 20 世纪初，电动汽车在性能方面超越了同时代的其他类型汽车。电动汽车在早期的汽车领域中占有举足轻重的位置，这一时期可以称之为电动汽车的第一个“黄金时代”。电动汽车作为汽车工业的先锋，一度成为市场的主流。

20 世纪 20 年代初，在美国的汽车保有量中，蒸汽汽车占 40%，电动汽车占 38%，而内燃机作动力的汽车仅占 22%。可以想象，电动汽车是多么受用户欢迎。

但是，随着石油的大规模开采和提炼、内燃机技术和动力传动技术的进步，以及 1912 年美国工程师 Charles Kettering 发明了启动机，内燃机汽车在低成本、长里程、高便利性的等方面优势逐渐凸显出来，从而取代了蒸汽机汽车和电动汽车，成为市场的主流。

1.1.2 电动汽车的第二个黄金时代

第二次世界大战之后，全球经济进入高速发展阶段，欧美传统资本主义强国以及东亚、东南亚、南美等区域的强劲经济增长，带动了全球不可再生资源消耗量的急剧增加，加速了人类对生存环境的破坏，造成了严重的空气、水、土壤污染，导致了全球性的三大危机：资源短缺、环境污染、生态破坏。

汽车排出的废气在日光作用下，形成以臭氧为主的光化学烟雾。这种烟雾中