

★ ★ ★ ★ ★  
★ “十三五” ★

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程  
制造强国建设

新能源汽车关键技术研究丛书

## Supercapacitor System Management Techniques and Applications

# 面向电动车辆的 超级电容系统应用技术

张雷 王震坡 著

# 面向电动车辆的超级电容 系统应用技术

Supercapacitor System  
Management Techniques and  
Applications

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目 (CIP) 数据

面向电动车辆的超级电容系统应用技术 / 张雷, 王震坡著. —北京: 北京理工大学出版社, 2020.6

ISBN 978-7-5682-6988-9

I. ①面… II. ①张…②王… III. ①电动汽车-电容器-研究  
IV. ①U469.720.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 080189 号

---

---

出版 / 北京理工大学出版社有限责任公司  
社址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号  
邮编 / 100081  
电话 / (010) 68914775 (总编室)  
(010) 82562903 (教材售后服务热线)  
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网址 / <http://www.bitpress.com.cn>  
经销 / 全国各地新华书店  
印刷 / 固安县铭成印刷有限公司  
开本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16  
印张 / 13.25  
彩插 / 2  
字数 / 248 千字  
版次 / 2020 年 6 月第 1 版 2020 年 6 月第 1 次印刷  
定价 / 68.00 元

责任编辑 / 王美丽  
文案编辑 / 孟祥雪  
责任校对 / 周瑞红  
责任印制 / 王美丽

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# 《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈  因	郑立新	马向晖	高云虎	金  鑫
李  巍	高延敏	何  琼	刁石京	谢少锋
闻  库	韩  夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘  多	尹丽波	赵  波	卢  山
徐惠彬	赵长禄	周  玉	姚  郁	张  炜
聂  宏	付梦印	季仲华		



## 专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于 全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王 越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、  
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家  
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原  
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



- 屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐 “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成 中国工程院院士
- 闻雪友 中国工程院院士
- 徐德民 中国工程院院士
- 唐长红 中国工程院院士
- 黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥 中国工程院院士
- 黄 维 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授



# 前 言

为应对全球能源短缺与环境污染的挑战，发展以电动车辆为代表的新能源汽车已经成为世界各国的普遍共识。与传统内燃机汽车相比，电动车辆具有清洁、高效、布置灵活和易操控等优点。作为电动车辆的关键部件之一，车载电源系统直接影响车辆的动力性、等效燃油经济性和制造成本。然而，单一车载电源包括应用广泛的锂离子动力电池，无法同时满足电动车辆高能量密度和高功率密度的要求。与此同时，超级电容器具有功率密度高、内阻小、工作温度范围宽以及循环寿命极长等优点，与燃料电池、动力电池等高能量密度、低功率密度电源具有极强的互补性。以锂离子动力电池与超级电容构成的复合电源系统，能够充分利用两种储能系统的优点，解决锂离子动力电池的功率困扰问题和超级电容的能量困扰问题，展现出良好的应用前景。为了保证超级电容系统在复杂多变的车辆运行环境下安全、可靠和高效地运行，开发面向电动车辆应用的建模、参数辨识以及状态估计等超级电容系统应用技术尤为迫切。

本书呈现了作者在超级电容系统领域研究工作的成果，内容主要包括：超级电容器的应用场景，超级电容器工作原理、构造及材料，超级电容系统建模技术，超级电容系统参数估计与状态估计方法，以及电池—超级电容复合电源系统设计等。

本书的出版得到了北京理工大学优秀博士学位论文出版项目基金的资助，在此表示衷心感谢。

本书内容涉及较广，由于作者的学识和水平有限，书中难免存在不足之处，望读者批评指正。

编 者

2020 年 5 月于北京



# 目 录

第 1 章 新能源汽车发展概述	001
1.1 新能源成为汽车工业发展的趋势之一	002
1.1.1 能源危机	002
1.1.2 环境污染	003
1.1.3 新能源汽车的优势	005
1.2 电动汽车分类	008
1.3 新能源汽车发展现状与趋势	013
1.3.1 国内外发展概况	014
1.3.2 纯电动汽车发展现状	015
1.3.3 混合动力电动汽车发展现状	018
1.3.4 插电式混合动力电动汽车发展现状	020
1.3.5 燃料电池电动汽车发展现状	022
1.4 新能源汽车常用电源系统	024
第 2 章 超级电容器技术概述	027
2.1 概述	028
2.2 超级电容器的优势	029
2.3 主要应用领域	030
2.3.1 交通运输业	031
2.3.2 工业领域	034
2.3.3 可再生能源	038



2.3.4	军事领域 .....	039
2.4	超级电容器技术特性 .....	040
2.4.1	技术特性 .....	040
2.4.2	优缺点 .....	042
2.5	超级电容器的分类 .....	044
2.5.1	双电层电容器 .....	044
2.5.2	赝电容器 .....	045
2.6	工艺流程 .....	046
2.7	使用注意事项 .....	046
2.8	超级电容器电动车应用中面临的问题 .....	047
<b>第3章</b>	<b>超级电容器与电池 .....</b>	<b>049</b>
3.1	电能的存储机理 .....	050
3.1.1	能量的存储形式 .....	050
3.1.2	电容器和电池的储能模式 .....	051
3.1.3	法拉第与非法拉第过程 .....	051
3.2	超级电容器与电池的运行机理 .....	052
3.2.1	超级电容器的运行机理 .....	052
3.2.2	超级电容器的基本结构 .....	053
3.2.3	电池的基本工作原理 .....	054
3.2.4	电池的基本构成 .....	055
3.3	超级电容器与电池的类型 .....	056
3.3.1	可区分的体系 .....	056
3.3.2	超级电容器与电池的设计与等效电路模型 .....	059
3.4	电荷存储密度的区别 .....	062
3.4.1	每个原子或分子的电荷密度 .....	062
3.4.2	可获得能量密度比较 .....	062
3.5	充放电特性比较 .....	063
3.5.1	超级电容器充放电特性 .....	063
3.5.2	电池充放电特性 .....	067
3.5.3	超级电容器与电池的充电曲线比较 .....	072
3.5.4	基于循环伏安法的超级电容器和电池单元充放电 行为比较 .....	074
3.5.5	非理想极化电容器电极的充电过程 .....	076



3.6	性能和技术应用比较 .....	077
3.6.1	性能比较 .....	077
3.6.2	技术应用比较 .....	078
3.7	电化学电容器与电池性能的总体比较 .....	079
<b>第 4 章</b>	<b>超级电容系统关键技术概述 .....</b>	<b>083</b>
4.1	超级电容器电极材料及制造工艺 .....	084
4.1.1	用于电化学电容器的碳材料 .....	084
4.1.2	碳材料的表面性质和官能度 .....	088
4.1.3	碳材料的双层电容 .....	093
4.1.4	用于电容器碳材料的热处理和化学处理 .....	095
4.2	用于电化学电容器的金属氧化物 .....	099
4.2.1	氧化钌的制备 .....	100
4.2.2	$\text{RuO}_2$ 的状态和化学构造 .....	103
4.2.3	$\text{RuO}_2$ 的充放电机理 .....	106
4.3	导电聚合物的研究情况 .....	107
4.4	超级电容电解液及其稳定性 .....	108
4.4.1	水性电解液 .....	108
4.4.2	有机电解液 .....	109
4.4.3	凝胶电解液 .....	111
4.4.4	固体电解液 .....	111
<b>第 5 章</b>	<b>超级电容系统建模方法 .....</b>	<b>113</b>
5.1	超级电容系统建模的国内外发展现状 .....	114
5.2	超级电容系统建模的难点 .....	117
5.3	超级电容器双电层模型 .....	118
5.3.1	Helmholtz 双电层模型 .....	118
5.3.2	Gouy - Chapman 双电层模型 .....	119
5.3.3	Stern - Grahame 双电层模型 .....	120
5.4	超级电容等效电路模型对比研究 .....	120
5.4.1	模型结构 .....	121
5.4.2	最优模型参数估计 .....	123
5.4.3	模型对比 .....	124
5.5	超级电容器的扩展模型 .....	128



第 6 章 超级电容系统状态估计方法 .....	131
6.1 超级电容系统状态估计的意义 .....	132
6.2 超级电容 SOC 估计国内外发展现状 .....	133
6.3 超级电容系统状态估计的难点 .....	134
6.4 超级电容系统状态估计方法 .....	134
6.4.1 基于卡尔曼滤波器的在线模型参数估计方法 .....	134
6.4.2 基于 $H_{\infty}$ 状态观测器的超级电容 SOC 估计器 .....	142
6.4.3 基于分数阶模型的超级电容系统建模与状态估计 .....	147
6.5 超级电容系统的老化特征与寿命测试 .....	155
6.5.1 超级电容系统的老化特征 .....	155
6.5.2 超级电容系统的老化影响因素 .....	156
6.5.3 超级电容器的寿命测试方法 .....	157
6.6 超级电容器的寿命预测 .....	159
6.6.1 基于推断法和阿伦尼乌斯方程的寿命预测模型 .....	159
6.6.2 基于试验测试的电容器老化寿命研究 .....	163
6.7 现有超级电容器寿命老化研究的不足与探讨 .....	170
第 7 章 电动车辆用复合电源系统设计与能量管理技术 .....	173
7.1 电动车辆用复合电源发展背景 .....	174
7.2 电动车辆用复合电源国内外发展现状 .....	175
7.3 复合电源系统构型与建模 .....	177
7.3.1 复合电源系统构型 .....	177
7.3.2 动力电池组模型 .....	179
7.3.3 超级电容组模型 .....	180
7.4 基于多目标优化的复合电源优化设计 .....	182
7.5 超级电容组管理技术 .....	186
7.6 复合电源能量管理策略现状及存在问题 .....	187
7.7 基于小波变换的复合电源能量管理策略 .....	188
参考文献 .....	191



## 第1章

# 新能源汽车发展概述

**面** 对日益严重的环境污染和能源短缺问题，人们对可持续发展理念的理解日益深刻。作为交通领域节能、减排与污染防治的有效措施，发展以电动汽车为主的新能源汽车，成为汽车工业的重要发展方向之一，受到世界各国的日益重视。新能源汽车是我国七大战略性新兴产业之一，也是“中国制造 2025”十大重点推动领域之一。纵观汽车百年发展史，电动汽车的发展历经三起三伏，现已在全球范围内进入产业化和商业推广阶段。

本章重点对新能源汽车发展现状、分类以及动力电池技术进行概述。



## | 1.1 新能源成为汽车工业发展的趋势之一 |

### 1.1.1 能源危机

一次能源主要包括石油、天然气、煤炭等，传统内燃机汽车的燃料主要是由石油提炼出的汽油和柴油。地球上的石油资源是有限的，据 2017 年 7 月发布的《BP 世界能源统计》显示，截至 2016 年年底，全球已探明的石油储量为 17 067 亿桶，以 2016 年的开采速度计算，可供开采 50.6 年。当前交通领域的石油需求增长约占其总需求增长的 2/3（100 万桶/日）。到 2020 年，交通领域的石油消耗量将占全球石油总消耗量的 62%以上，届时全球石油供需将出现缺口。

我国石油资源相对匮乏，截至 2012 年年底，已探明石油储量约为 173 亿桶，仅占全球石油总储量的 1%。但我国又是能源消费大国，2003—2013 年，石油消耗量年均增长率超过 5%，年消耗量仅次于美国，位居世界第二。我国石油供给难以自给自足，长期依赖于进口。近年来，石油进口量年均增长率约 6%，2009 年我国石油对外依存度首次突破 50%的国际公认警戒线，2015 年又突破了 60%大关。2020 年我国石油年消耗量将达 6 亿吨。随着汽车保有量的持续快速增加，预计到 2030 年我国石油对外依存度将突破 80%。图 1-1 所示为



2000—2018 年我国石油对外依存度变化趋势。

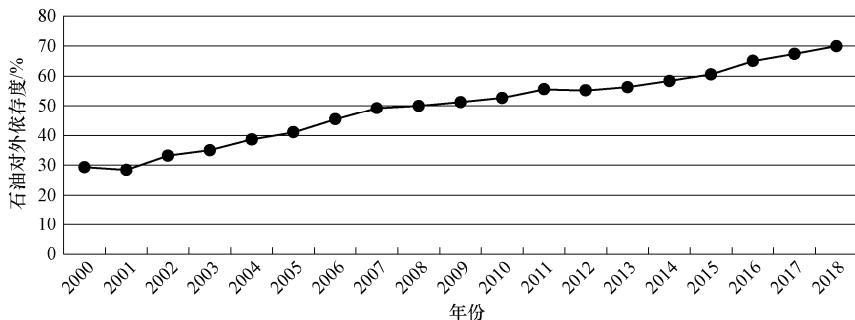


图 1-1 2000—2018 年我国石油对外依存度变化趋势

交通领域是石油消耗的主要领域之一，随着汽车保有量逐年增加，我国面临的能源安全形势日益严峻。自 2009 年起，我国汽车产销量连续多年居于全球首位，成为世界第一大生产国和销售市场，2008—2018 年我国汽车产销量和保有量变化趋势分别如图 1-2 和图 1-3 所示。截至 2017 年年底，我国汽车保有量达到 2.17 亿辆，预计到 2020 年，我国汽车保有量将达到 2.5 亿辆，年均消耗成品油约 4 亿吨。伴随着汽车保有量的持续快速增长，汽车的石油消耗量占我国石油总消耗量的比例也在不断攀升，成为我国石油消耗量增长的主要原因之一。因此，发展和推广以电动汽车为代表的新能源汽车，有利于缓解能源供应面临的压力，保障能源安全。

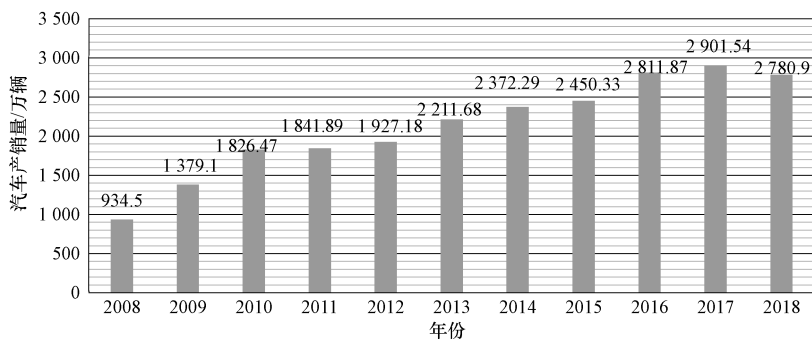


图 1-2 2008—2018 年我国汽车产销量变化趋势

## 1.1.2 环境污染

石油的大量消耗导致温室气体过量排放。二氧化碳（ $\text{CO}_2$ ）是地球的主要温室气体，也是造成全球气候变化的主要原因，而化石燃料的燃烧则是  $\text{CO}_2$  排



放的主要来源。1990 年全球汽车二氧化碳总排放量约 29 亿吨，据权威机构预计，2020 年汽车二氧化碳总排放量将增加至 60 亿吨，交通车辆排放的污染占全球大气污染的 42%。从城市管理者的角度出发，减轻城市大气污染的首要任务是优化路网布局，减少城市中心区域的车流密度，进而减少有害气体排放。

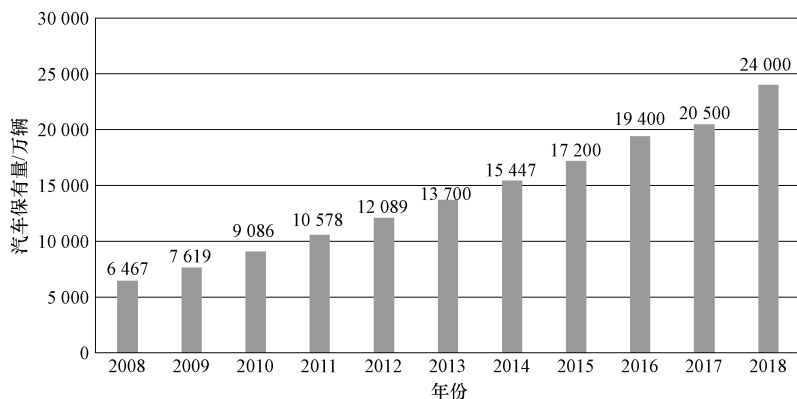


图 1-3 2008—2018 年我国汽车保有量变化趋势

为了减小汽车尾气排放对全球气候变暖的影响，世界各国汽车尾气排放法规日益严苛。2013 年 6 月，欧盟各成员国达成一项协议，要求 2015 年欧洲主要汽车厂商所生产新车的平均二氧化碳排放低于 130 g/km，并在 2020 年 12 月降低至 95 g/km 之内。2017 年 10 月，来自卢森堡、奥地利、比利时、荷兰、葡萄牙、爱尔兰和斯洛文尼亚等国的交通与环保部联合签署文件，呼吁欧盟委员会出台更为严苛的二氧化碳排放法规，进一步收紧 2021 年以后的二氧化碳排放标准。通过制定新的 CO<sub>2</sub> 排放标准，达到 2030 年将温室气体排放量在 2015 年基础上减少 40% 的目标。美国制定的燃油经济性与尾气排放目标是，到 2025 年在售汽车平均二氧化碳排放量需达到 101 g/km。日本制定的燃油经济性与尾气排放目标是，到 2020 年在售汽车平均二氧化碳排放量需达到 115 g/km。2015 年，我国实施的燃油经济性与尾气排放法规规定，汽车排放标准折算成二氧化碳的排放量应不高于 161 g/km。

目前，欧、美、日三大体系是国际通行的主要汽车排放标准，其中以欧洲标准的应用最为广泛。2014 年 9 月，我国开始实施欧 VI 标准，标准规定柴油轿车的氮氧化物（NO<sub>x</sub>）排放量不应超过 80 mg/100 km。与欧 V 标准相比，欧 VI 标准对人体健康的益处将增加 60%~90%。2010 年 9 月，厢式货车等实施欧 V 标准，厢式货车的氮氧化物排放量不应超过 280 mg/100 km；2015 年 9



月起实施的欧Ⅵ标准规定，新款厢式货车的氮氧化物排放量不应超过125 mg/100 km。

近几年，雾霾成为我国北方地区空气污染的主要表现形式，严重威胁着公众健康。为了应对雾霾，我国政府相继出台了各项规章制度和应对措施。2013年，中国环境科学研究院的研究报告显示，汽车尾气是形成北京雾霾天气的主要污染物PM<sub>2.5</sub>的主要来源，贡献率高达22.2%。因此，有效解决机动车尾气排放问题，积极促进汽车的节能减排，是治理雾霾天气的重要举措，具体包括：第一，加强对高污染的大中重型客货运输车辆的管理，对不符合排放标准的机动车实行严格的淘汰机制；第二，提高供给燃油的品质；第三，促进城市智能交通发展，以缓解城市交通拥堵状况；第四，推广和倡导清洁能源汽车的使用。2017年，国务院将“坚决打好蓝天保卫战”写入政府报告。

### 1.1.3 新能源汽车的优势

电动汽车以电能作为动力源，使用电机驱动车辆行驶，具有传动效率高、制动能量回收能力强、零排放等优点，而电能的来源比较广泛，如风能、太阳能、核能等清洁能源。电动汽车与清洁能源的协同发展，有助于国家能源结构优化，改善电力系统峰谷负荷平衡，减少污染物排放，同时，由于城市区域废热排放减少，有利于减轻城市“热岛效应”。

#### 1. 电动汽车与能源

通过发展电动汽车技术和推广电动汽车应用，能够有效改善国家能源结构，减轻对石油资源的依赖。电动汽车的能量利用效率高于传统燃油汽车，据估算，原油经过炼油厂提炼，获得汽、柴油并用于燃油汽车驱动时，仅有12%左右的能量被有效利用。对于电动汽车，以重油燃烧发电为例，其能量转换过程如图1-4所示，从图中可以看出，电动汽车的能源利用率达到20%左右。作为二次能源，电能的来源多种多样，主要包括煤炭、太阳能、风能、地热、核能和水力等（见图1-5），因此，电动汽车的推广应用对于改变我国能源结构、减少对石油资源的依赖具有重要意义。

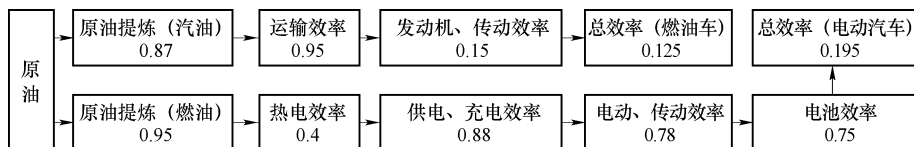


图 1-4 传统汽车与电动汽车能量转换效率比较