

学校编码: 10384

密级 \_\_\_\_\_

学号: 33320131151754

廈門大學

硕士学位论文

循环经济视角下的汽车动力系统  
生命周期评价研究

Research on life cycle assessment of automobile power  
system in perspective of circular economy

陈雯雯

指导教师姓名: 彭荔红 教授  
郁昂 助理教授

专业名称: 环境管理

论文提交日期: 2016年5月

论文答辩时间: 2016年5月

2016年5月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目录

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| 摘要.....                              | I         |
| Abstract.....                        | III       |
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                | <b>1</b>  |
| 1.1 选题背景.....                        | 1         |
| 1.2 国内外电动汽车及其动力电池发展现状.....           | 3         |
| 1.2.1 国外发展现状 .....                   | 4         |
| 1.2.2 中国发展现状 .....                   | 7         |
| 1.3 研究目的和意义 .....                    | 10        |
| 1.4 研究内容与技术路线.....                   | 10        |
| 1.4.1 研究内容.....                      | 10        |
| 1.4.2 技术路线.....                      | 11        |
| <b>第 2 章 循环经济理论与生命周期评价方法综述</b> ..... | <b>13</b> |
| 2.1 循环经济理论综述.....                    | 13        |
| 2.1.1 循环经济概念及内涵.....                 | 13        |
| 2.1.2 循环经济实践进展 .....                 | 14        |
| 2.1.3 汽车产业循环经济综述.....                | 15        |
| 2.2 生命周期评价方法综述.....                  | 17        |
| 2.2.1 生命周期评价基本内涵.....                | 17        |
| 2.2.2 生命周期评价基本框架.....                | 17        |
| 2.2.3 生命周期评价研究进展.....                | 19        |
| 2.3 汽车领域生命周期评价研究进展 .....             | 20        |
| <b>第 3 章 生命周期评价模型建立</b> .....        | <b>22</b> |
| 3.1 研究对象的选取 .....                    | 22        |

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| 3.2 汽车动力系统生命周期评价模型 .....          | 24        |
| 3.2.1 研究目标与范围 .....               | 24        |
| 3.2.2 清单分析 .....                  | 27        |
| 3.2.3 影响评价 .....                  | 27        |
| 3.2.4 结果解释 .....                  | 30        |
| <b>第 4 章 汽车动力系统生命周期清单分析 .....</b> | <b>31</b> |
| 4.1 动力系统原材料生产阶段 .....             | 31        |
| 4.1.1 燃油汽车 .....                  | 31        |
| 4.1.2 纯电动汽车 .....                 | 31        |
| 4.2 动力系统生产制造阶段 .....              | 34        |
| 4.2.1 燃油汽车 .....                  | 34        |
| 4.2.2 纯电动汽车 .....                 | 34        |
| 4.3 动力系统运输阶段 .....                | 36        |
| 4.4 动力系统使用阶段 .....                | 36        |
| 4.5 动力系统报废回收阶段 .....              | 38        |
| 4.5.1 燃油汽车 .....                  | 38        |
| 4.5.2 电动汽车 .....                  | 39        |
| <b>第 5 章 汽车动力系统生命周期影响评价 .....</b> | <b>42</b> |
| 5.1 生命周期评价结果 .....                | 42        |
| 5.1.1 分类与特征化 .....                | 42        |
| 5.1.2 归一化与量化 .....                | 43        |
| 5.2 生命周期结果解释 .....                | 44        |
| 5.2.1 环境影响对比分析 .....              | 45        |
| 5.2.2 矿产资源耗竭潜值对比分析 .....          | 49        |
| 5.2.3 大气特征排放物质指标对比分析 .....        | 50        |
| <b>第 6 章 敏感性分析与改进建议 .....</b>     | <b>54</b> |

---

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| 6.1 敏感性分析.....            | 54        |
| 6.1.1 电力结构.....           | 54        |
| 6.1.2 电池能量密度.....         | 57        |
| 6.2 改进建议.....             | 59        |
| 6.2.1 能源结构调整.....         | 60        |
| 6.2.2 政策引导.....           | 60        |
| 6.2.3 产业技术创新.....         | 61        |
| 6.2.4 企业循环经济发展.....       | 61        |
| <b>第 7 章 研究结论与展望.....</b> | <b>64</b> |
| 7.1 研究结论.....             | 64        |
| 7.2 特色与创新.....            | 65        |
| 7.3 不足与展望.....            | 65        |
| 参考文献.....                 | 66        |
| 附录：研究生阶段科研情况.....         | 73        |
| 致谢.....                   | 74        |

|                                                                                            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Abstract (in Chinese)</b> .....                                                         | <b>I</b>   |
| <b>Abstract (in English)</b> .....                                                         | <b>III</b> |
| <b>Chapter 1 Introduction</b> .....                                                        | <b>1</b>   |
| <b>1.1 Background</b> .....                                                                | <b>1</b>   |
| <b>1.2 International development status of electric vehicle and its power battery</b> .3   |            |
| 1.2.1 Abroad development status .....                                                      | 4          |
| 1.2.2 Development status in China .....                                                    | 7          |
| <b>1.3 Purpose and significance of the research</b> .....                                  | <b>10</b>  |
| <b>1.4 Research content and technicle route</b> .....                                      | <b>10</b>  |
| 1.4.1 Research content .....                                                               | 10         |
| 1.4.2 Technicle route .....                                                                | 11         |
| <b>Chapter 2 Review of circular economy theory and life cycle assessment methods</b> ..... | <b>13</b>  |
| <b>2.1 Review of circular economy theory</b> .....                                         | <b>13</b>  |
| 2.1.1 Concepts and connotation of circular economy .....                                   | 13         |
| 2.1.2 Practice progress of cycle economy .....                                             | 14         |
| 2.1.3 Review of automobile industrial circular economy .....                               | 16         |
| <b>2.2 Review of life cycle assessment methods</b> .....                                   | <b>17</b>  |
| 2.2.1 Basic connotation of life cycle assessment .....                                     | 17         |
| 2.2.2 Framework of life cycle assessment .....                                             | 17         |
| 2.2.3 Research progress of life cycle assessment.....                                      | 19         |
| <b>2.3 Research progress of life cycle assessment in automotive field</b> .....            | <b>20</b>  |
| <b>Chapter 3 Establishment of life cycle assessment model</b> .....                        | <b>22</b>  |
| <b>3.1 Selection of research object</b> .....                                              | <b>22</b>  |
| <b>3.2 Life cycle assessment model of automobile power system</b> .....                    | <b>24</b>  |
| 3.2.1 Objective and scope of research .....                                                | 24         |
| 3.2.2 Inventory analysis .....                                                             | 27         |
| 3.2.3 Impact assessment .....                                                              | 27         |
| 3.2.4 Result interpretation .....                                                          | 30         |
| <b>Chapter 4 Life cycle inventory analysis of automobile power system</b>                  |            |

---

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| .....                                                                        | <b>31</b> |
| <b>4.1 Production phase of raw material for power system .....</b>           | <b>31</b> |
| 4.1.1 Fuel vehicles .....                                                    | 31        |
| 4.1.2 Battery electric vehicles .....                                        | 31        |
| <b>4.2 Production phase of power system .....</b>                            | <b>34</b> |
| 4.2.1 Fuel vehicles .....                                                    | 34        |
| 4.2.2 Battery electric vehicles .....                                        | 34        |
| <b>4.3 Transportation phase of power system .....</b>                        | <b>36</b> |
| <b>4.4 Use phase of power system.....</b>                                    | <b>36</b> |
| <b>4.5 Recovery phase of power system .....</b>                              | <b>38</b> |
| 4.5.1 Fuel vehicles .....                                                    | 38        |
| 4.5.2 Electric vehicles .....                                                | 39        |
| <b>Chapter 5 Life cycle impact assessment of automobile power system</b>     |           |
| .....                                                                        | <b>42</b> |
| <b>5.1 Results of life cycle assessment.....</b>                             | <b>42</b> |
| 5.1.1 Classification and characterization .....                              | 42        |
| 5.1.2 Normalization and quantification .....                                 | 43        |
| <b>5.2 Result interpretation of life cycle.....</b>                          | <b>44</b> |
| 5.2.1 Comparative analysis of environmental impact.....                      | 45        |
| 5.2.2 Comparative analysis of depletion potential of mineral resources ..... | 49        |
| 5.2.3 Comparative analysis of atmospheric emission index.....                | 50        |
| <b>Chapter 6 Sensitivity analysis and improvement suggestions .....</b>      | <b>54</b> |
| <b>6.1 Sensitivity analysis .....</b>                                        | <b>54</b> |
| 6.1.1 Electricity structure.....                                             | 54        |
| 6.1.2 Battery energy density .....                                           | 57        |
| <b>6.2 Improvements suggestions .....</b>                                    | <b>59</b> |
| 6.2.1 Adjustment of energy structure .....                                   | 60        |
| 6.2.2 Policy guidance .....                                                  | 60        |
| 6.2.3 Industrial technology innovation .....                                 | 61        |
| 6.2.4 Enterprise circular economy development .....                          | 61        |
| <b>Chapter 7 Conclusion and Expectation .....</b>                            | <b>64</b> |
| <b>7.1 Conclusion .....</b>                                                  | <b>64</b> |



|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>7.2 Characteristics and innovation .....</b> | <b>65</b> |
| <b>7.3 Deficiency and prospects .....</b>       | <b>65</b> |
| <b>References .....</b>                         | <b>66</b> |
| <b>Appendix .....</b>                           | <b>73</b> |
| <b>Acknowledgements .....</b>                   | <b>74</b> |

厦门大学博硕士论文摘要库

## 摘要

随着汽车保有量的快速增长，中国石油对外依存度持续攀升，这给中国的能源安全、交通安全等问题带来更大挑战的同时也增加了环境污染，特别是大气污染。在未来市场的需求和全球对于环境要求不断提升的压力下，电动汽车以其显著的节能减排优势，受到政府青睐。政府高度重视电动汽车的推广应用，连续出台一系列政策进行大力扶持。然而目前对于电动汽车的节能减排优势国际上尚存在争议，特别是在中国这样以火电为主的电力结构背景下，推广使用电动汽车能否实现真正的节能减排效益还有待研究明确。

本文基于循环经济视角，采用生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法，选取三种不同动力系统，分别是燃油汽车动力系统，配套磷酸铁锂动力电池的纯电动汽车动力系统和配套镍钴锰酸锂电池的纯电动汽车动力系统为研究对象，建立基于国内知名动力电池企业实际生产数据的汽车动力系统 LCA 模型，研究评价电动汽车动力系统全生命周期的资源环境影响，并分析相关敏感性因素，最后分别从能源结构调整、政策引导、产业技术创新和企业循环经济发展等角度提出对策建议。

结果表明：电动汽车动力系统的全生命周期无论是矿产资源耗竭或是环境排放综合值均大于燃油汽车动力系统。全球变暖潜值对燃油汽车、磷酸铁锂电动汽车、镍钴锰酸锂电动汽车动力系统生命周期环境影响综合值的贡献值分别达到 63.01%、46.42%和 70.46%。本文选取不同环境影响类型中的大气特征排放物质指标（主要包括  $PM_{2.5-10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$ 、 $CO_2$ 、 $CO$  和  $VOC$ ）进行城市大气环境污染源分析。在《重点区域大气污染防治“十二五”规划》节能减排约束性指标条件下，除  $NO_x$  和  $VOC$  外，其余主要大气特征排放物质的排放量均低于燃油汽车动力系统。以  $CO_2$  为例，磷酸铁锂动力系统和镍钴锰酸锂动力系统分别比燃油动力系统减少排放 435kg 和 940.5kg。对此，燃油汽车运行使用过程中排放的尾气才是城市大气环境污染的主要贡献者。

选择电力结构和电池能量密度进行敏感性分析。电力结构方面与目前省际能源效率排名全国第一的福建省进行对比，结果表明电力结构的优化有助于改善动力系统全生命周期的环境影响。电池能量密度方面对其进行了情景分析，

对比能量密度为 180Wh/kg 和 300Wh/kg 的动力电池,结果证明随着能量密度的提高,电动汽车动力系统全生命周期的环境影响降低。

最后,在结果分析的基础上,本文提出以下改进建议:(1)优化国内能源结构增加清洁电力的比例;(2)区别对待地方保护政策,目前应优先在南方推广电动汽车;(3)提高动力电池能量密度,减小动力电池质量、改进废旧汽车零部件的回收工艺和改变动力电池回收方式,建立梯次回收产业链;(4)积极探索动力电池企业的循环经济发展模式,构建循环型生态型动力电池企业。

关键词:循环经济;生命周期评价;动力系统;环境影响;节能减排

## **Abstract**

With the rapid growth of vehicle population, oil external dependence of China was keeping rising, which brought greater challenges to energy security, traffic security as well as environmental pollution, especially air pollution.

Under the pressure of global demand for the environment, the electric vehicles with its significant energy saving and emission reduction advantages, had been drawing attentions by governments. Government attached great importance to the development and application of electric vehicles, issued a series of policies to support the electric vehicles. However, to energy saving and emission reduction of electric vehicles, there were still a lot of controversies. Especially in China, the electricity structure was dominated by coal-fire power, whether electric vehicle could achieve real energy saving and emission reduction remains to confirm.

This study based on circular economy theory and life cycle assessment method (LCA), selected three different power systems as research objects. They were fuel automobile power system, electric vehicle power system with lithium-iron ferrous phosphate battery (LFP) and electric vehicle power system with nickel cobalt manganese lithium battery (NCM). In addition, the actual production data of well-known domestic power battery enterprise was adopted to establish vehicle power system LCA model, to evaluate the whole life cycle of resource and environmental impact and to analyse sensitivity factors, thus measures and suggestions were put forward from the perspective of energy structure adjustment, policy guidance, industry technology innovation and enterprise circular economy development.

The results showed that no matter the mineral resources exhaustion of electric vehicle power system or the environmental emission, were more than fuel vehicle power system. Global warming potential value of fuel vehicles, LFP electric vehicles, NCM electric vehicles power system respectively contributed 63.01%, 46.42% and 70.46% to the life cycle environmental impact. In this study, the

atmospheric emission index (including  $PM_{2.5-10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  and  $VOC$ ) of different environmental impact types were selected to analyse the pollution source of atmospheric environment. Under energy saving and emission reduction binding targets of “12<sup>th</sup> Five-Year” Planning of Air Pollution Prevention and Control, in addition to  $NO_x$  and  $VOC$ , emissions of the rest atmospheric characteristics of electric vehicle power system were lower than the fuel vehicle. Taking  $CO_2$  as an example, LFP electric power system and NCM electric power system were reduced by 435kg and 940.5kg than the fuel power system respectively. As a result, the main contributor of urban air pollution was the fuel vehicle emissions.

Power structure and battery energy density were selected to analyse sensitivity. The result of contrast with Fujian province, the current energy efficiency ranked first in China, proved that the optimization of electric power structure was helpful to improve the environmental impact of the whole life cycle of the power system. The comparative analysis of battery energy density was under the two scenarios, one was 180Wh/kg and the other was 300Wh/kg. The result showed that with the increase of the energy density, the environmental impact of the whole life cycle of electric vehicle power system was reduced.

Based on the results of the analysis, this study put forward the following suggestions: (1) optimizing the energy structure and increasing the proportion of clean electricity; (2) the south of China should be given priority to promote electric vehicles; (3) improving battery energy density, reducing the battery quality, improving recycling technology of waste automotive parts and the way of battery recovery, building echelon recycling industry chain; (4) exploring the mode of circular economy of power battery enterprise, building circular and ecological enterprise.

**Key Words:** Circular economy; Life cycle assessment; Power system; Environmental impact; Energy conservation and emission reduction

## 第1章 绪论

### 1.1 选题背景

伴随中国工业化、城市化、现代化进度的加快，汽车的需求空间将进一步增加。根据《国民经济和社会发展统计公报》资料显示，汽车保有量持续增长，截至2015年底，全国民用汽车保有量达到17228万辆，比上年末增长11.5%，如图1-1所示。

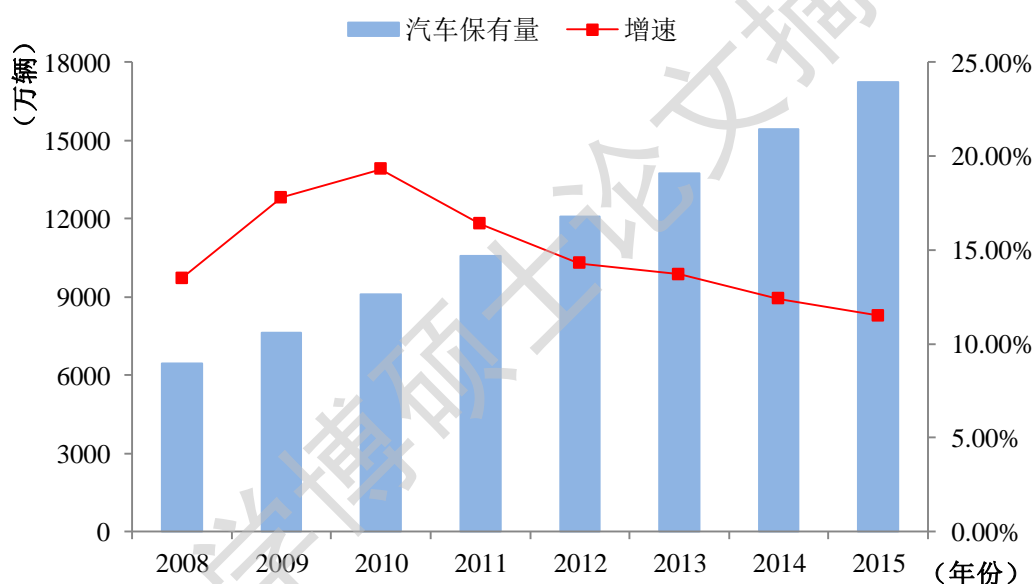


图 1-1 2008-2015 年中国民用汽车保有量及其增速

**Fig. 1-1 Total number of civil automobile and its growth rate in China during 2008 to 2015**

汽车保有量的快速增长带来能源的过度消耗，据中国石油经济技术研究院发布的《国内外油气行业发展报告》显示，自2008年中国石油对外依存度首次超过50%以来，截至2015年底，中国石油对外依存度已突破60%，如图1-2所示。随着汽车保有量的持续增长，中国的能源安全、环境污染、交通安全等问题将面临更大的挑战。

现有的燃油发动机系统具有能耗高、噪声大、排放差等特点，部分专用车采用柴油发动机产生的细微颗粒物排放，更是城市雾霾的重要来源之一。根据《2015年中国机动车污染防治年报》显示，机动车污染已成为中国空气污染的重要来源，汽车是污染物总量的主要贡献者，其排放的 $\text{NO}_x$ 和PM超过90%，HC和CO超过80%。

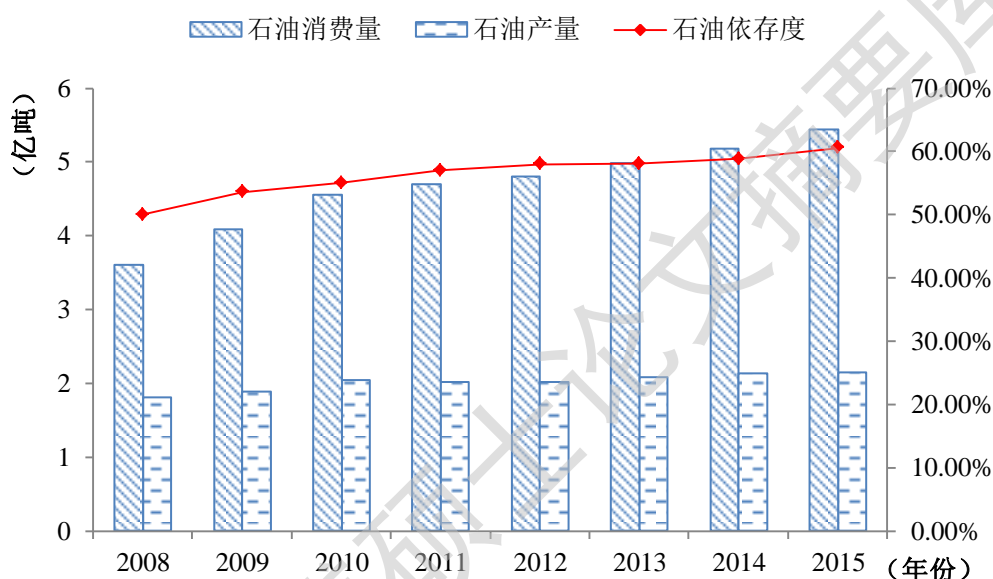


图 1-2 2008-2015 年中国石油消费量、产量及对外依存度

**Fig. 1-2 Total oil consumption, production and external dependency in China during 2008 to 2015**

在未来市场的需求和全球对于环境要求不断提升的压力下，电动汽车以其显著的节能减排优势，受到政府青睐。中国政府出台了一系列对电动汽车的激励政策，加上一线城市纷纷取消电动汽车限行限购，电动汽车产销量可谓是逐月激增。根据工业和信息化部发布的数据显示：2015年中国新能源汽车的产量及销量分别达到34万辆和33万辆，分别对应334%及343%的按年增长率。国务院《节能与新能源汽车产业发展规划》（2012-2020年）指出“到2020年，纯电动汽车和插电式混合动力汽车生产能力达200万辆，累计产销量超过500万辆”，明确未来中国汽车产业的发展方向和目标是加快培育和发展节能与新能

源汽车产业，促进汽车产业转型升级。2015年5月发布的《中国制造2025》更是提出要大力推动节能与新能源汽车领域突破发展，掌握汽车低碳化、信息化、智能化核心技术，形成从关键零部件到整车的完整工业体系和创新体系。“十三五”能源战略路线图表明，中国能源对内发展重点将从规模扩张保供转向系统优化。

### 1.2 国内外电动汽车及其动力电池发展现状

电动汽车凭借其高效节能、低排放优势，成为未来汽车工业发展的方向。自21世纪以来，特别是2008年以后，受到金融危机的影响、国际油价的震荡和节能减排的压力，全世界的汽车产业已经进入全面的能源转型时期，发展电动汽车在国际上取得了高度共识（梁俊，2011）。很多国家陆续将发展电动汽车上升为国家战略，并出台了一系列政策措施支持电动汽车产业发展和市场推广。近年来，电动汽车产业发展和市场推广取得阶段性成果。

动力电池是新能源汽车的核心零部件，是指具有较大输出功率和电能容量，可配置电动汽车、电动自行车、电动设备及工具驱动电源的电池，通常也包括军事（潜艇，高级智能机器人等）及企事业单位使用的通讯指挥系统的常备电源、蓄能电池设备等（历海艳等，2005）。国内外当前研究开发的动力电池主要包括铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池、燃料电池等动力电池。目前燃料电池存在氢的运输储存和成本高的问题，在中国仍然处于研发阶段，只有少数发达国家商业化生产（Tie 和 Tan，2013）。基于李怡霞（2012）的研究，几种不同类型电池的性能如表 1-1 所示。



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.