

学校编码: 10384  
学号: 200430003

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

锂电池充电器芯片的研究与设计

Research Design of Lithium-ion Battery Charger IC

王 磊

指导教师姓名: 邢建力教授  
专 业 名 称: 电路与系统  
论文提交日期: 2007 年 5 月  
论文答辩时间: 2007 年 5 月  
学位授予日期: 2007 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_  
评 阅 人: \_\_\_\_\_

2007 年 5 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密（ ），在年解密后适用本授权书。
2. 不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：                      日期：                      年                      月                      日

导师签名：                      日期：                      年                      月                      日

## 摘要

随着便携式电子产品的高速发展以及可充电电池市场的不断增大,研究如何充分适应电池特性,最大可能延长电池寿命,并且符合电子设备充电单元小型化的发展趋势,具有较高效率、安全快速的充电器芯片,具有十分重要的意义。

本文从锂电池化学特性与工作原理入手,通过对可充电电池特性认识以及常用充电方法的研究,分析了充电过程及充电方法对锂电池性能的影响,并在此基础上完成了一款锂离子电池线性充电器芯片的设计。该锂电池充电器芯片采用了恒流恒压(CC/CV)线性充电方式,能够提供高达1A的可编程充电电流,为充分保护电池,将充电过程细分为三个阶段:涓流预充电、恒流充电和恒压充电。先检测待充电电池电压,对过放电电池在充电初期采用涓流对电池进行激活处理;然后采用较大的恒定电流对电池充电,实现快速充电的目的;充电后期采用恒压浮充,确保电池充满。这种充电方式具有充电时间短,充电效率高的优点。芯片内部检测电路通过检测锂电池的电压和电流,确定锂电池应该进行的充电阶段。

本文设计的充电器芯片面向单节锂电池,除了具有完善的充电算法外,提供了基于可设置时间和可设置电流的充电终止方案。芯片内部使用专门的带隙基准电压源以及基准电流源,高电源抑制以及出色的温度特性保证了浮充电压精度。由于对芯片整体电路的设计采用了内部MOSFET架构,无须使用外部检测电阻器或外部隔离二极管,因此基本充电器电路仅需要两个外部元件,简化了芯片应用,热调整功能可自动调节充电电流,以便在大功率工作或高环境温度条件下对芯片温度加以限制。对应于每一项技术或功能,文章介绍了各个电路模块的结构和工作原理。

最后,文章基于0.5 $\mu\text{m}$ 的CMOS N阱工艺库对重点模块电路以及整体电路做了HSPICE仿真,验证了设计的可行性。

关键词: 锂离子电池; 充电器; 电池管理

## Abstract

As the development of portable apparatus and secondary built-in battery has been proliferating rapidly in recent years, it is significant and necessary to give a research on design of safe reliable, fast and high efficient charger which is suitable to battery characteristic, able to extend the battery life and in accord with miniaturization of charging unit.

In this thesis, the chemic structure, performance and charging method of lithium-ion battery are studied. And different impacts on the performance of battery via different charging ways and process are analyzed in detail, based on which, an linear charger IC for Li-ion battery is designed. Using the constant current/constant voltage algorithm, the charger can deliver up to 1A of programmable charge current. The charging mode includes the three charging stages: the trickle charging, large constant current charging and constant voltage charging. The trickle charging uses small current at the initial of charging cycle to fix and protect the over-discharged battery; after which, the battery will be charged by large constant current to realize the fast charging; finally, the constant voltage charging is adopted to guarantee that the battery is charged to its full capacity. The advantages of this charging algorithm are shorter charging time and higher efficiency. The charger IC monitors the voltage and current in battery to confirm the charging stage.

The charger IC discussed in this thesis, is designed to charge single cell lithium-ion batteries. Besides its excellent charging algorithm, both programmable time and programmable current based terminating schemes are available. A bandgap voltage reference and a current reference used in the charger are described, which has such high supply-voltage rejection ratio and good temperature characteristic that guarantees final float voltage accuracy. No external sense resistor or external blocking diode is required for charging due to the internal MOSFET architecture. Thus, the basic charger circuit requires only two external components, which simplifies the application. Internal thermal feedback regulates the charge current to maintain a constant die temperature during high power operation or high ambient temperature conditions. The structure and principle of each circuit module also are presented.

The circuit is simulated via HSPICE based on 0.5um N well CMOS process, whose results demonstrate the excellent performance of the Li battery charger IC described in this thesis.

**Key Words:** Li-ion battery; Charger; Battery management.

## 目录

<b>1 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 锂离子电池特性与充电器 .....	1
1.2 论文的组织结构及所做工作 .....	3
<b>2 锂离子电池充电芯片的系统分析与设计</b> .....	<b>5</b>
2.1 锂离子电池工作原理 .....	5
2.2 锂电池的电特性以及充电方式 .....	6
2.3 充电芯片的整体结构设计 .....	12
<b>3 具体电路的设计实现及仿真</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1 基准电压源电路</b> .....	<b>19</b>
3.1.1 带隙基准电压的基本原理 .....	20
3.1.2 带隙基准电路的设计考虑 .....	21
3.1.3 带隙基准电压源实现电路 .....	22
<b>3.2 基准电流分配电路</b> .....	<b>27</b>
3.2.1 与温度无关的基准电流实现方法 .....	27
3.2.2 基准电流源实现电路及仿真 .....	30
<b>3.3 欠压闭锁电路</b> .....	<b>31</b>
3.3.1 电源欠压闭锁电路 .....	31
3.3.2 电源与电池电压比较闭锁电路 .....	34
<b>3.4 充电模式选择控制电路</b> .....	<b>37</b>
3.4.1 涓流/恒流充电模式选择比较器 .....	37
3.4.2 涓流/恒流充电控制电路 .....	40
<b>3.5 快速充电电路实现</b> .....	<b>42</b>
3.5.1 恒流/恒压充电原理 .....	42
3.5.2 运算放大器设计实现 .....	43
<b>3.6 充电终止检测电路实现</b> .....	<b>47</b>
3.6.1 电流采样匹配电路 .....	47
3.6.2 最小电流终止检测电路 .....	48
<b>3.7 温度保护电路</b> .....	<b>50</b>
3.7.1 热限制保护电路的实现 .....	51
3.7.2 具有迟滞功能的温度保护电路设计 .....	52
<b>4 芯片整体电路仿真及应用电路</b> .....	<b>55</b>
4.1 整体功能仿真 .....	55
4.2 典型应用电路 .....	57
<b>5 结论与展望</b> .....	<b>61</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>63</b>

致谢.....65

附录.....66

厦门大学博硕士论文摘要库

## Contents

<b>1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1 Characteristics of lithium-ion batteries and Chargers.....	1
1.2 Structure and goals of this article.....	3
<b>2 Systems analysis and design of the whole charger IC .....</b>	<b>5</b>
2.1 Principles of lithium-ion batteries .....	5
2.2 Electrical characteristics and charging methods .....	6
2.3 The whole charger IC's structural design .....	12
<b>3 Specific circuits design and simulation.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Bandgap voltage reference circuits.....</b>	<b>19</b>
3.1.1 Principles of Bandgap voltage reference .....	20
3.1.2 Design points of Bandgap voltage reference .....	21
3.1.3 Bandgap voltage reference circuits design .....	22
<b>3.2 Reference current and supply distribution.....</b>	<b>27</b>
3.2.1 Current reference with low temperature coefficient .....	27
3.2.2 Current reference circuit design and simulation .....	30
<b>3.3 Undervoltage protection exclusive circuit.....</b>	<b>31</b>
3.3.1 Protection circuit for power supply.....	31
3.3.2 Protection circuit for power vs. battery voltage.....	34
<b>3.4 Charging mode selection and control circuits .....</b>	<b>37</b>
3.4.1 Comparator for Trickle/constant-current charging technology.....	37
3.4.2 Control circuit of Trickle/constant-current charging mode .....	40
<b>3.5 Quick charging circuit design .....</b>	<b>42</b>
3.5.1 Constant-current/ constant voltage charging principle .....	42
3.5.2 Design of operational amplifier .....	43
<b>3.6 Detection circuit and charge termination technology.....</b>	<b>47</b>
3.6.1 Matching circuit to sample current .....	47
3.6.2 Charge current termination technology .....	48
<b>3.7 Protection circuit to prevent excess temperature.....</b>	<b>50</b>
3.7.1 Thermal limit protection circuit .....	51
3.7.2 Design of thermal protect with “temperature delay” .....	52
<b>4 Simulation of the whole circuit and the IC's typical applications ..</b>	<b>55</b>
4.1 Simulation of the IC's function.....	55
4.2 Typical applications .....	57
<b>5 Conclusion and expectation .....</b>	<b>61</b>
<b>References.....</b>	<b>63</b>



<b>Tribute.....</b>	<b>65</b>
<b>Appendix.....</b>	<b>66</b>

厦门大学博硕士论文摘要库

## 1 绪论

### 1.1 锂离子电池特性与充电器

电池是十九世纪人类最伟大的发明之一，是人类社会必不可少的便捷能源。从铅酸电池、氧化银电池，到后来的镍镉电池以及锌锰电池等，电池理论与技术，经历了一个多世纪的快速发展时期。随着人们环保意识的日益增加，铅、镉等有毒金属的使用日益受到限制，因此需要寻找新的可代替传统铅酸电池和镍-镉电池的可充电电池，另外，随着电子产品技术的不断发展，便携式应用对电池更提出了许多独特要求：电池必须具有高能量密度，以为便携式应用提供源源不断的能量(突发或连续模式)；电池重量要轻，占位面积要小；电池应能够安全地使用和防止可能的滥用，并具有无限期的闲置使用寿命；最后，电池应该具有极低的成本[1]。由于锂离子或锂聚合物电池能满足大多数上述要求，因此它们已经成为当前便携式应用的首选电池。

锂离子电池与其他可充电电池相比，主要有以下优点[2][3][4]：

一，工作电压高。通常单节锂离子电池的电压为 3.7 V。单体电池即可为 3 V 的逻辑电路供电。对于要求较高供电电压的电子设备，电池组所需串联电池数也可大大减少。

二，体积小、重量轻、比能量高。通常锂离子电池的比能量可达镍镉电池的 2 倍以上，与同容量镍氢电池相比，体积可减少 30%，重量可降低 50%，有利于便携式电子设备小型轻量化。

三，寿命长。锂离子电池采用碳负极，在充放电过程中，碳负极不会生成金属锂，从而可以避免电池因内部金属锂短路而损坏。目前，锂离子电池的寿命可达 1200 次以上，远远高于各类电池。

四，安全快速充电。锂离子电池与金属锂电池不同，它的负极用特殊的碳电极代替金属锂电极，因此允许快速充电。采用 1C 充电速率，可在两小时内充足电，而且安全性能大大提高。

五，允许温度范围宽。锂离子电池具有优良的高低温放电性能，可在-20~+60

°C之间工作。高温放电性能优于其它各类电池。

此外，锂离子电池还具有自放电电流小、无记忆效应和无环境污染等优点，综合性能优于铅酸、镍镉、镍氢和金属锂电池[5]。表 1-1 给出了几种可充电电池的性能比较。

表 1-1 镍镉——镍氢——锂离子电池性能比较

种类内容	镍镉电池	镍氢电池	锂离子电池
容量	低	中	高
待机时间	短	中	长
重量	重	重	轻
单个电池电压 V	1.2	1.2	3.6
记忆效应	有	稍不明显	无
充 / 放电次数	约 500	>500	约 1000
污染性	有	少	极小
重复使用可靠度	一般	好	很好
价位	可以接受	可以接受	偏高
安全性	好	好	好

自 90 年代日本索尼公司开发成功以来，锂离子电池迅速向产业化发展，并在移动电话、摄像机、笔记本电脑等便模式电器上大量应用，世界锂离子电池的生产曾一度被日本人垄断。美国和欧洲国家曾经也投巨资从事锂离子电池的研究和生产，终因竞争不过日本而被迫放弃。目前在锂离子电池的研究、开发行列中走在前列的大公司有索尼、三洋、东芝、三菱、富士通、日产、TDK、佳能、永备、贝尔、富士、松下、日本电报电话、三星等。便携式电子产品是此类小型二次电池的主要市场，如手机、笔记本电脑、微型摄像机、IC 卡、电子翻译器、汽车电话等，另外，其他一些重要的领域，如电动交通工具、航空航天、军事等领域也正在渗透。目前，全球袖珍式计算机销量已突破 7000 万台，移动通讯器件从 2002 年的 2 亿件发展到 2005 年底的 14 亿件，其它移动电器如数码相

机等仅我国就有超过 500 万的用户，由此可见小型二次电池市场前景十分可观。据统计，各系列电池 2005 年的市场占有率情况，镉镍电池市场份额将从 2000 年的 74% 下降到 46%，氢镍电池市场份额从 2000 年的 21% 上升到 31%，锂离子电池从 5% 上升到 18.9%。这说明尽管目前锂离子电池的绝对消费量有限，但其潜在市场需求非常巨大。

锂离子电池同样也存在其诸多不足之处[6]，比如它对充电器的要求比较苛刻，对保护电路的要求较高。一般说来，其要求的充电方式是恒流恒压方式，为有效利用电池容量，需将锂离子电池充电至最大电压，但是过压充电会造成电池损坏，这就要求较高的控制精度（精度高于 1%）。另外，对于电压过低的电池需要进行预充、充电终止检测，除电压检测外，还需采用其他的辅助方法作为防止过充的后备措施，如检测电池温度、限定充电时间，为电池提供附加保护。由此可见实现安全高效的充电控制成为锂离子电池推广应用的瓶颈。

目前，电池的充电解决方案很多，在设计充电器时应大致从以下角度考虑：  
1、充电架构：根据功率需求，选定使用开关型或线性充电器。手机产品以嵌入线性充电器为主。  
2、热设计：无论所选是那种充电架构，都要考虑到发热问题。例如在非常小的空间内，高效率的开关型或对热有特别控制的线性充电器必定可大大提升产品的性能。  
3、简单小巧：简单的电路可以造就小巧的方案。对于开关型充电器，如果能找到更小巧的外围器件方案(假设效能不变)，那必然对产品有利。线性充电器如果能把控制管整合在单个充电控制芯片内，是小型化的一种理想设计[7]。

## 1.2 论文的组织结构及所做工作

本论文重点论述了锂离子电池线性充电控制芯片的具体设计过程。首先通过对可充电电池特性认识以及常用充电方法的研究，分析了充电过程及充电方法对锂电池性能的影响，并在此基础上完成了一款锂离子电池线性充电控制芯片。随着便携式电子产品的高速发展以及可充电电池市场的不断增大，研究如何充分适应电池特性，最大可能延长电池寿命，并且符合电子设备充电单元小型化的发展趋势，具有较高效率、安全快速的充电控制芯片，具有十分重要的意义。

论文从第二部分开始讲述锂离子电池充电芯片的系统分析与设计。从锂电池

化学特性与工作原理入手，通过对目前常用的几种充电方式进行对比分析，选择了线性充电控制模式，接下来给出了整体电路的原理结构图，简单阐述了设计规格与目标功能实现。

论文第三部分是芯片的具体电路实现。根据上一部分系统级设计的要求，详细设计了芯片每一部分的具体电路，着重讨论完成了模拟部分基准电源电路、电压选择电路、欠压闭锁电路、温度保护电路、滞回比较器、运算放大器等模块的设计与仿真，本充电器芯片设计的数字逻辑部分由主要其他工作人员完成，因此本论文并没有给出数字逻辑部分的具体实现电路。

接下来是芯片整体电路功能仿真以及典型应用电路。论文的最后给出了整个设计的总结以及充电器芯片设计领域尚需要进一步深入研究的相关工作等。

电路设计当中应用的模拟仿真平台：在SUN软件连接的工作站上，用Cadence软件输入原理图，并用HSPICE软件进行模拟仿真，而后用Avant波形浏览器查看输出波形，完成了电路仿真工作。

## 2 锂离子电池充电芯片的系统分析与设计

### 2.1 锂离子电池工作原理

锂离子电池目前有液态锂离子电池 (LIB) 和聚合物锂离子电池 (PLIB) 两类。其中, 液态锂离子电池是指以  $\text{Li}^+$  嵌入化合物为正负极的二次电池。正极采用锂离子化合物锂钴氧化物 ( $\text{LiCoO}_2$ ), 锂镍氧化物 ( $\text{LiNiO}_2$ ) 或锂锰氧化物 ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), 负极采用锂-碳层间化合物  $\text{Li}_x\text{C}_6$  电解质为溶解有锂  $\text{LiPF}_6$ ,  $\text{LiAsF}_6$  等有机溶剂。聚合物锂电池的正极和负极与液态锂离子电池相同。只是原来得液态电解质改为含有锂盐的凝胶聚合物电解质, 而目前主要开发的就是这种。

对于锂离子电池, 使用不同的活性材料, 包括电池的正极材料, 负极材料和电解质, 电池的性能特性也会有所区别。负极材料中, 目前常用的有焦炭和石墨。其中, 石墨由于低成本、低电压 (可以得到高的电池电压)、高容量和高可恢复的优点, 被广泛采用。正极材料中, 主要以锂金属氧化物为主。目前常用的有锂钴氧化物 ( $\text{LiCoO}_2$ )、锂镍氧化物 ( $\text{LiNiO}_2$ )、锂锰氧化物 ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) 以及纳米锰氧化物。其中, 锂钴氧化物具有电压高、放电平稳、适合大电流放电、比能量高、循环性好的优点, 并且生产工艺简单、电化学性质稳定, 其作为锂离子电池的正极材料, 适合锂离子的嵌入和脱出。锂镍氧化物自放电率低, 没有环境污染, 对电解液的要求较低, 与锂钴氧化物相比, 具有一定的优势。锂锰氧化物优点是稳定性好, 无污染, 工作电压高、成本低廉。锂离子电池中的电解质使用有机溶剂作为锂离子的传输介质。锂离子电池对电解质溶剂的要求是: 高导电性、高分解电压、无污染、安全。通常用锂盐作为有机溶液。目前使用的锂盐主要有  $\text{LiClO}_4$ 、 $\text{LiAsF}_6$ 、 $\text{LiPF}_6$  等 [8]。

当锂离子电池工作时, 它的电化学表达式为



正极反应:  $\text{LiMO}_2 = \text{Li}_{1-x}\text{MO}_2 + x\text{Li}^+ + xe^-$  或  $\text{Li}_{1+y}\text{Mn}_2\text{O}_4 = \text{Li}_{1+y-x}\text{Mn}_2\text{O}_4 + \text{Li}_x\text{C}_n$

负极反应:  $n\text{C} + x\text{Li}^+ + xe^- = \text{Li}_x\text{C}_n$

(式中 M 为 Co, Ni, Fe, W 等; 正极化合物有:  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiFeO}_2$ ,

LiWO<sub>2</sub>等，负极化合物有Li<sub>x</sub>C<sub>6</sub>，TiS<sub>2</sub>，WO<sub>3</sub>，NbS<sub>2</sub>，V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等)

锂离子电池实际上是一种锂离子浓差电池，正负两极由两种锂离子嵌入化合物组成。如图2-1，充电时，Li<sup>+</sup>从正极脱嵌经过电解质嵌入负极，负极处于富锂态，正极处于贫锂态，同时电子的补偿电荷从外电路供给到碳负极，保证负极的电荷平衡，放电时则相反，Li<sup>+</sup>从负极脱嵌，经电解质嵌入正极（这种循环被形象的称为摇椅式机制）。在正常的充放电情况下，锂离子在层状结构的碳材料和层状结构氧化物层间嵌入嵌出，因为过渡金属氧化物LiCoO<sub>2</sub>，LiNiO<sub>2</sub>中低自旋配合物多，晶格体积小，在锂离子嵌入脱嵌时，晶格膨胀收缩性小，结晶结构稳定，因此循环性能好，而且充放电过程中，负极材料化学结构基本不变，因此从充放电反应的可逆性看锂离子电池反应是一种理想的可逆过程[9]。

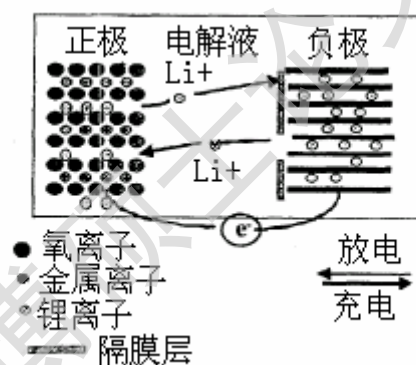


图2-1 锂离子电池结构示意图

## 2.2 锂电池的电特性以及充电方式

### 锂离子电池的充放电特性

根据锂离子电池本身的结构特征，其充放电有着与镍基材料化学电池完全不同的充放电特性[10]。它的充电过程一般采用恒流转恒压的充电模式。充电开始为恒流充电阶段：电池的电压较低，充电的电流基本不变，充电的速率一般为1C(C=充电电流/电池容量)，对于500mAh的电池即为500mA的充电电流。随着充电的继续进行，电池的电压逐渐上升。当单体电池的电压升到4.2V时，充电器立即转入恒压充电：恒压充电时，单体锂离子电池的充电电压必须严格保持在4.2V±50mV，若充电电压超过4.5V可能造成锂离子电池的永久性破坏。此阶

段为恒压充电阶段，充电电流下降较快，温度上升，最后当电流下降到某一范围，进入涓流充电阶段：涓流充电也称维护充电，在维护充电状态下，充电器以某一充电速率给电池继续补充电荷，最后使电池处于充足状态。用这种方法，第一个小时可充入电池额定容量的 80%，两小时后电池即可充到额定容量。电池充电终止的检测方法是判断充电电流，当充电电流降到某一定值时终止充电。例如充电电流降到 80mA(典型值为起始充电电流的 10%左右)时终止充电，也可以在检测到电池电压达到 4.2 V 时启动定时器，在一定的延时后终止充电。锂离子电池典型充电特性曲线如图 2-2。

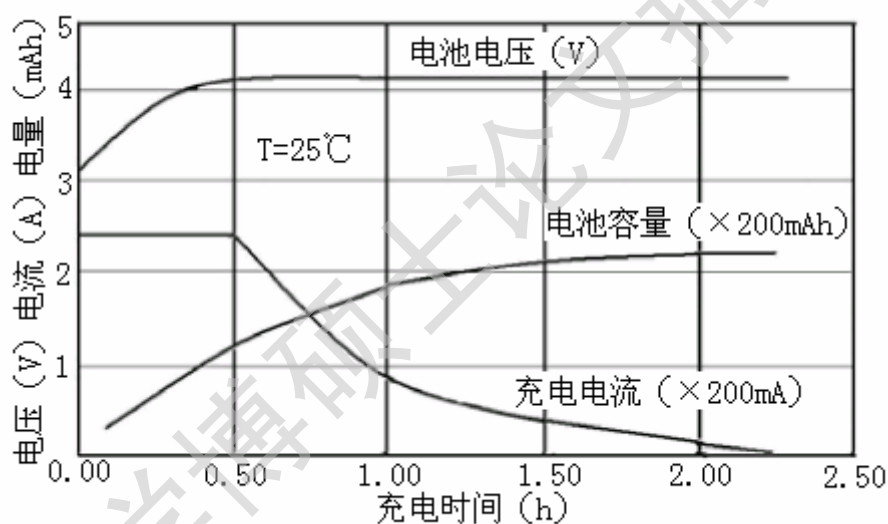


图 2-2 锂电池充电特性曲线示意图

锂离子电池的放电特性比较简单，如图 2-3 所示。一般，锂离子电池放电起始电压为 4.2V，放电终止电压约为 2.5V，放电终止时，电池电压不得低于 2.2V，否则将造成电池的永久性损坏。此外锂离子电池的放电电流也不应过大，放电电流一般不应超过 3C，否则也会严重影响电池寿命与使用质量。需强调的一点是，不同的放电速率放出锂离子电池额定容量的程度也不同，如 0.2C(100mA)的放电速率，可放出全部额定容量，而采用 1C(500mA)的放电速率，只能放出额定容量的 90%。锂离子电池的一个特点是比较容易显示剩余电量，因为其工作电压随时间徐徐下降，而镍镉电池镍氢电池则保持一定的电压值，直到放电末期，电压才急速下降[11][12]。因此锂离子电池放电过程，可通过对照放电特性曲线图，测



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts 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.

厦门大学博硕士论文摘要库