

便携式产品的“心脏”及其护理

--锂离子电池原理及充电管理的设计探讨



Texas Instruments 张洪为

➤ Speaker :
张洪为

➤ Title :
**Senior Marketing Engineer,
High Performance Analog
Asia Marketing Development**

Texas Instruments
德州仪器



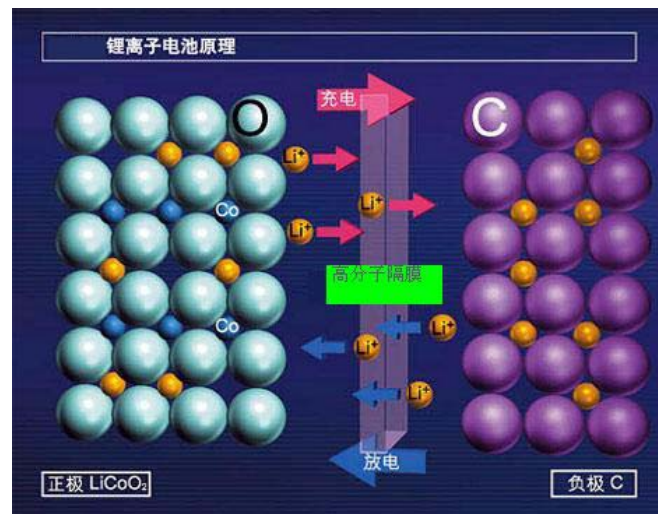
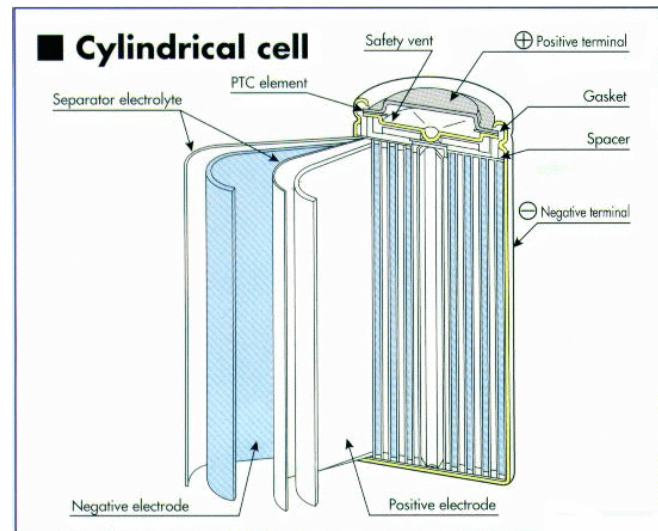
锂离子电池的“前世今生”

- ◆ 锂是锂离子电池的核心，它是最轻的金属元素，金属锂的比重只有水的一半，铝是较轻的金属，锂的比重只有铝的五分之一。
- ◆ 锂的电负性是所有金属中最负的，锂离子的还原电位高达-3V。根据计算，1克锂转化为锂离子时所能得到的电荷数为3860mAh，加之它的大于3V的工作电压，锂作为电池的负极材料当之无愧轻量级的大力士。
- ◆ 锂离子电池的前世
 - ◆ 早期负极为金属锂的“锂电池”，但金属锂的化学活性太大，充电时产生的枝晶会使电池短路，目前尚未真正解决其安全问题。经过长期的探索、研究，发现锂可与许多金属形成合金，其活性要小许多，更奇妙的是锂可以在许多层状结构的物质中可逆地嵌入和脱出。锂以这些材料为载体就安全多了。嵌锂化合物的发现和应用奠定了锂离子电池的技术基础。
- ◆ 锂离子电池的今生
 - ◆ 由正极、负极、电解质、隔膜组成。
- ◆ 锂离子电池的“来世”
 - ◆ 发展新的正负极材料，如部分动力电池：负极LiC+正极LiMn₂O₄
 - ◆ 锂聚合物电池。在正、负电极粘结剂、电解质三者中任何一种使用高分子聚合物的锂离子电池就可以成为锂聚合物电池。现在常见的是使用高分子胶体取代常规液体电解质的锂聚合物电池。

锂离子电池的电化学原理

Behind Your Designs

- ◆ 正极反应: $\text{LiCoO}_2 \xrightleftharpoons[\text{放电}]{\text{充电}} x\text{Li}^+ + x\text{e}^- + \text{Li}_{(1-x)}\text{CoO}_2$
- ◆ 负极反应: $6\text{C} + x\text{e}^- + x\text{Li}^+ \xrightleftharpoons[\text{放电}]{\text{充电}} \text{Li}_x\text{C}_6$
- ◆ 电解液: LiPF_6 (氟磷酸锂) + EC (碳酸乙烯酯) + DMC (碳酸二甲酯)
- ◆ 充电时锂离子从正极层状物的晶格间脱出, 通过电解液迁移到层状负极表面后嵌入到石墨材料晶格中, 同时剩余电子从外电路到达负极。放电则相反, 锂离子从石墨晶格中脱出回到正极氧化物晶格中。
 - ◆ 在充放电时锂离子在电池正负极中往返的嵌入——脱出, 正像摇椅子一样在正负极中摇来摇去, 故有人将锂离子电池形象的称为“摇椅电池”
 - ◆ 由于 Li_xC 非常活泼, 可以和水发生反应。故电解质选用可溶于有机溶剂的锂盐, 但这也留下一个缺点: 内阻相对于镍镉、镍氢电池要大的多



锂离子电池原理示意图

Dec 2004

负极枝晶效应 (Lithium Dendrites)

- ◆ 在充电的过程中， Li^+ 从正极 LiCoO_2 中脱出，进入电解液，在充电器附加的外电场作用下向负极移动，依次进入石墨或焦炭C组成的负极，在那儿形成LiC化合物。如果充电速度过快，会使得 Li^+ 来不及进入负极栅格，在负极附近的电解液中就会聚集 Li^+ ，这些靠近碳C负极的 Li^+ 很可能从负极俘获一个电子成为金属Li。持续的金属锂生成会在负极附近堆积、长大成树枝状的晶体，俗称枝晶
- ◆ 另一种情形，随着负极的充满程度越高，LiC晶格留下的空格越少，从正极移动过来的 Li^+ 找到空格的机会就困难，时间就越长。如果充电速度不变的话，一样可能在负极表面形成局部的 Li^+ 堆积。因此，在充电的后半段必须逐步缩小充电电流
- ◆ 枝晶的长大会刺破正负级之间的隔膜，形成短路。可以想象，充电的速度越快越危险，充电终止的电压越高也就越危险，充电的时间越长也越危险。

锂电池的使用和保护

- 由前所述，锂离子电池的电压过高或者过低都会造成严重问题
- 根据实际使用情况，划分了锂离子电池电压的几个区域。
不同的电芯制造商虽有区别但区别不大。

방방=====

방방高压危险区

방방-----保护线路过充保护电压 (4.275~4.35V)

방방高压警戒区

방방-----锂离子电池充电限制电压4.20V

방방正常使用区

방방-----锂离子电池放电终止电压 (2.75~3.00V)

방방低压警戒区

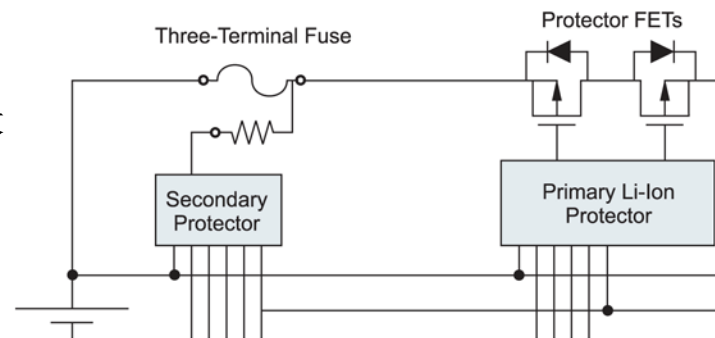
방방-----保护线路过放保护电压 (2.3~2.5V)

방방低压危险区

방방=====

锂电池的保护电路（待续）

- 如图可见典型的锂离子电池的保护电路
 - 一次保护：提供过压、欠压、过流等可恢复通断管理
 - 由于外部MOSFET的温度不能提供给保护IC，而且导通电阻的大小有很大的离散性，使得过流和短路检测的精度受到限制
 - 二次保护：提供不可恢复的过压或过温度关断
- 一次保护IC+MOSFET可以实现功能：
 1. 过充保护。当电芯的电压超过设定值时，保护IC切断右边的MOSFET，电芯电压回归到允许的电压，MOSFET恢复导通
 - 典型过充检测电压： $4.275V \pm 0.025V$ ，电芯电压一超过这个值，就触发过充保护
 - 典型过充释放电压： $4.175V \pm 0.030V$ ，处于过充保护的电芯电压只有降到这个值时才会停止保护
 2. 过放保护。当电芯的电压低于设定值时，由保护IC切断左边的MOSFET，等电芯电压回归到允许的电压时，恢复MOSFET的导通
 - 典型过放检测电压： $2.3V \pm 0.08V$
 - 典型过放释放电压： $2.4V$
 3. 过流保护。当工作电流超出设定值时，保护IC切断MOSFET管。等工作电流回归到允许的电压，MOSFET恢复导通。保护IC判断电流流过MOSFET而产生的压降，用这个电压除以MOSFET的导通阻抗就可以近似得到过流保护的电流，一般在 $3 \sim 10A$ 左右
 4. 短路。这个功能是过流保护的扩展，当保护IC检测出电流大于设定阈值之，立即切断回路，瞬态短路后电池的输出正负极的电压为零，而实际电芯的电压还是正常的，对电池进行充电就可以解除此保护
- 二次保护IC
 - 在一些安全要求严格的场合，为确保安全，在一次保护的基础上加装二次保护，在电池异常出现的时候可以烧毁保险丝，永久性阻止异常电池继续使用，防止问题进一步扩大
 - 代表产品有bq29400



锂电池的储藏和运输

- ◆ 锂离子电池的储藏会导致容量下降
 - ◆ 高电压会加速正负极集流金属板的被侵蚀和电解质的分解
 - ◆ 长时间处于放电状态导致电极保护层分解，导致容量下降
- ◆ 容量下降和储藏温度、荷电状况的关系

存储12个月	40%荷电状态 (State of Charge)	100%荷电状态 (State of Charge)
0°C	98%	94%
25°C	96%	80%
40°C	85%	65%
60°C	75%	60%

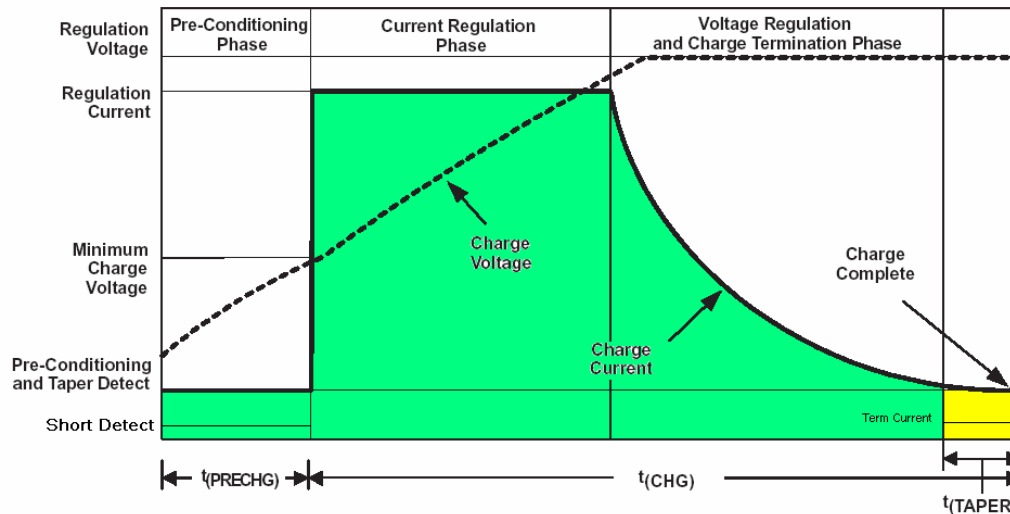
- ◆ 推荐的储藏温度
 - ◆ 荷电水平是40%，温度低于15度或更低

锂离子电池的激活

- ◆ 激活就是让尽可能多的电极材料参加反应。对用户来讲，锂离子电池不需要激活
- ◆ 正常锂离子电池的生产工序：
 - ◆ 锂离子电池壳灌输电解液
 - ◆ 封口
 - ◆ 化成
 - ◆ 恒压充电, 然后放电, 进行几个循环, 使电极充分浸润电解液, 充分活化, 以容量达到要求为止, 这就是激活。
 - ◆ 分容, 就是测试电池的容量选取不同性能(容量)的电池进行归类, 划分电池的等级, 进行容量匹配等。
- ◆ 出厂的锂离子电池到用户手上已经是激活过的了

锂离子电池充电的几个基本原则

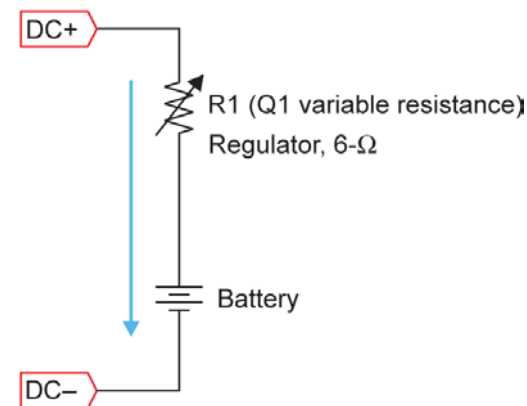
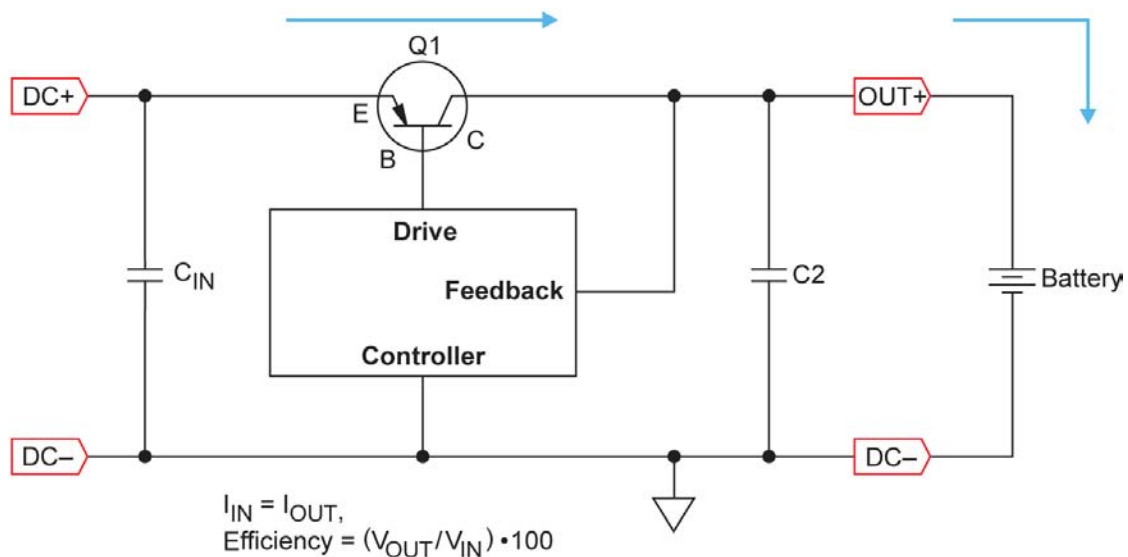
- ◆ 电流必须
 - ◆ 瞬时值 $<5C$
 - ◆ 平均值 $<1.2C$
 - ◆ 以上值和电极表面积、电解质、温度有关，不同制造商略有不同
- ◆ 充电电压都不能超过4.275，考虑到制造误差和温度漂移，一般充电电压设定不超过4.2V
- ◆ 充电终止后不能接受涓流充电
 - ◆ 电压到达4.2V后充电必须在几个小时内完成，不能任意延长。这也是为什么TI, Intersil等充电芯片制造商要在芯片内内置安全定时器，确保在一定时间后切断充电
- ◆ 违背上述原则都将产生“枝晶效应”，长期反复地违背这些规则，将会对电池的寿命产生极大的影响，甚至有安全问题
 - ◆ 据不完全统计，美国每年有70起手机锂离子电池的爆炸事故



左图就是一个典型的充电示意图，实线代表电流变化，虚线代表电压变化

◆ 设计考量

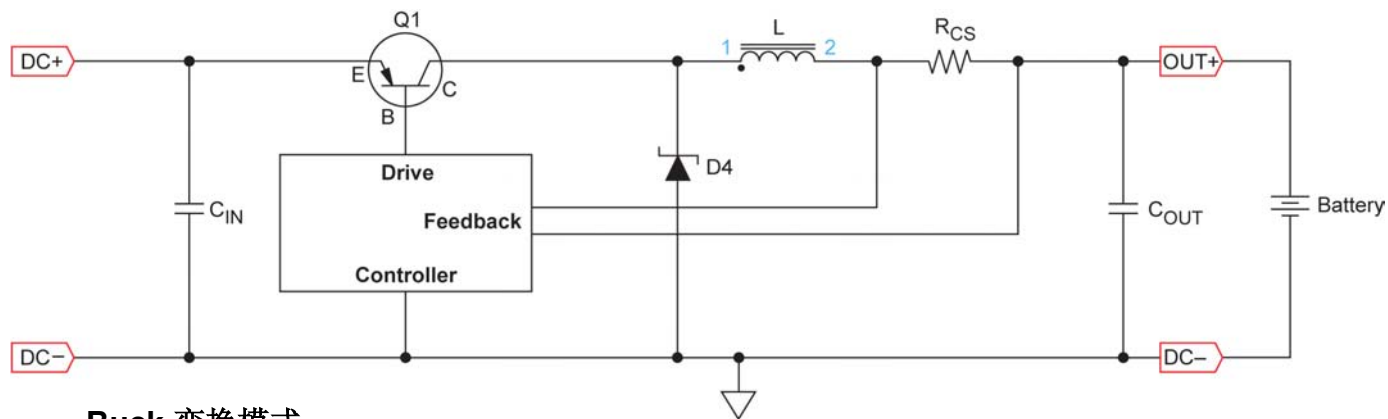
- ◆ 简单，很少的元件数
- ◆ 小功率时的成本很低
- ◆ 低噪声
- ◆ 充电的效率通常较低，多电芯、高Adapter电压时的散热存在问题
 - ◆ 如果待充电的电池电压在3.0~4.1V之间，Adapter的输出电压为5V，那么线性充电的效率就在60%~82%之间
 - ◆ 如果充电电流1A为例，充电器上的热耗散在2W~0.8W之间。而对于便携设备来讲，2W是一个非常可观的数字，结构设计师往往无法处理



◆ 设计考量

- ◆ 比线性方式更复杂
 - ◆ 多了2个器件L, D4
- ◆ 效率更高, 在大功率的时候成本反而有吸引力——不需要特别的考虑散热措施
 - ◆ 通常, 一个设计良好的PWM充电电路在快速充电的效率在80%~95%之间, 热量耗散只有线性充电的30%~60%
 - ◆ 在下图中D4起续流作用, 把它改成MOSFET就变成了同步整流的PWM变换, 单节电芯效率可以提高大约4~8%, 双节电芯2~4%, 但对3~4节的锂电池来讲变化不大。典型芯片有TI的bq24103, 内置了高端的整流MOSFET和低端的续流MOSFET, 极大的简化了电路, 最高效率可达95%

◆ 典型芯片: bq2000, bq24103, bq24703



Buck 变换模式

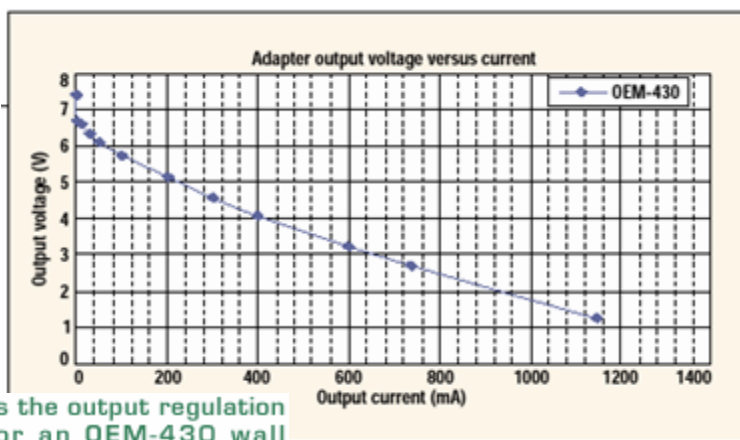
◆设计考量:

- 和线性一样简单、安全、低成本
- 具有和PWM一样的低发热优点

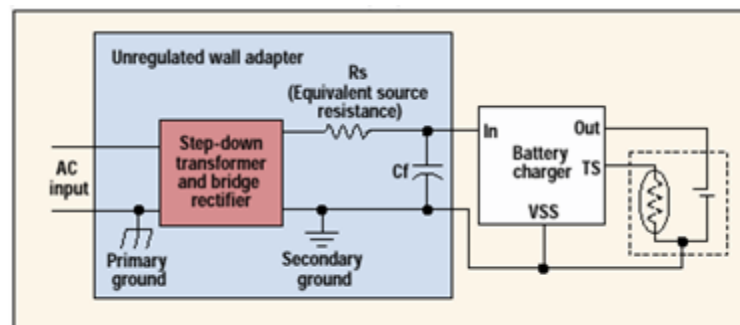
◆缺点:

- ◆需要一个输出电压随输出电流增大而下降的Adapter

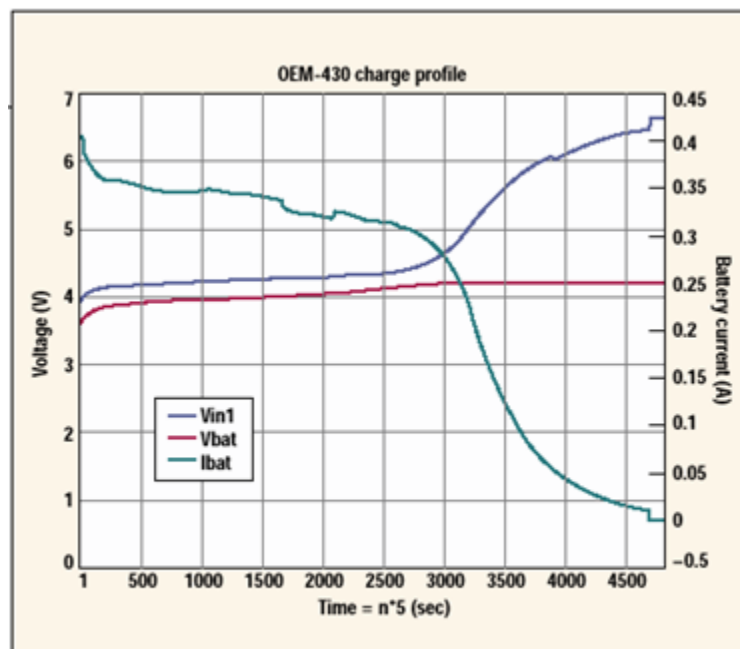
◆典型芯片: bq24202



3. This is the output regulation curve for an OEM-430 wall transformer.



1. This block diagram shows a charger using current-limited source.

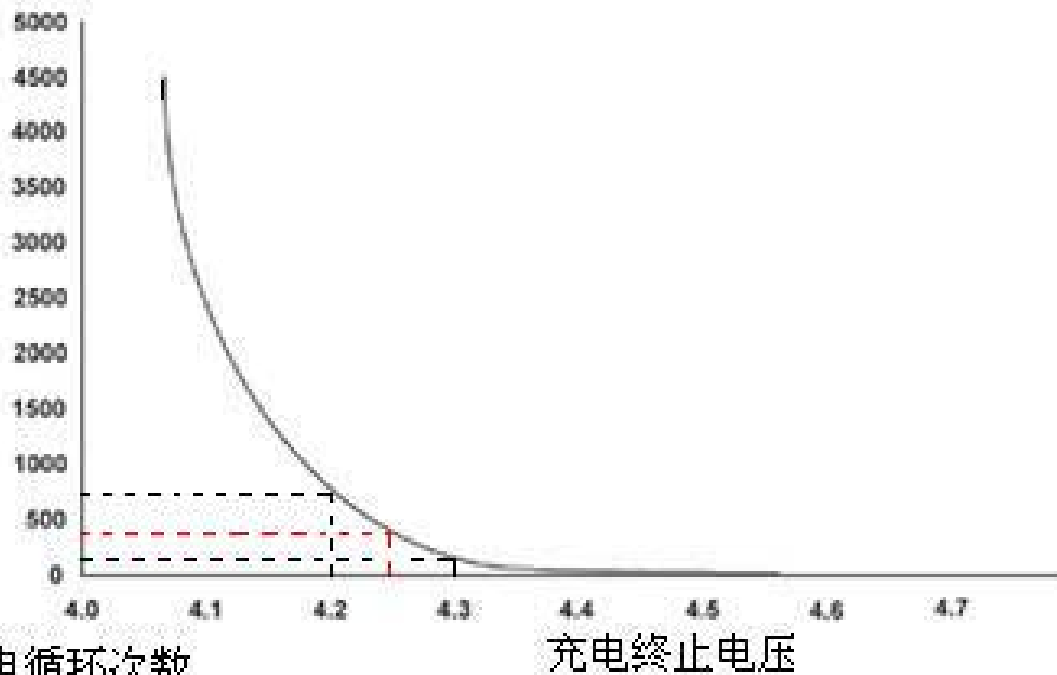


4. The current and voltage profile are depicted here. The maximum power dissipation in the charge controller is under 150 mW.

充电方法的选择

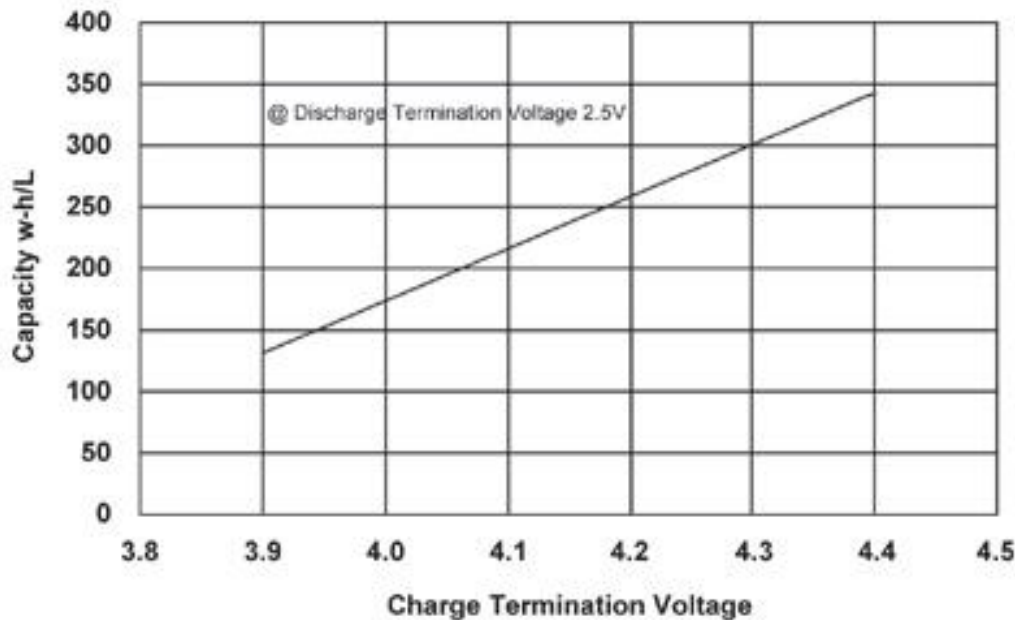
- ◆ 在小电流或低压差时首选线性恒流恒压法
 - ◆ 简单
 - ◆ 低成本
 - ◆ 如手机、MP3
- ◆ 在大电流或高压差时首选PWM恒流恒压法
 - ◆ 高效率
 - ◆ 快速充电
 - ◆ 如笔记本电脑、便携式DVD等
- ◆ 在电流较大，受到成本、空间或发热的限制，可以考虑选用限流恒压法
 - ◆ 兼有线性法和PWM法的优点：简单、低成本、低散热
 - ◆ 要求Adapter输出电压随电流的增加而下降，实质上是电源内阻效应的正面应用，很容易实现

充电终止电压对电芯寿命的影响



- ◆ 充电终止电压越高，电池的寿命越短
- ◆ 4.2V是这种函数关系的拐点
- ◆ 在4.2V附近，1%的电压误差将会导致寿命变化1/3，因此常规1%的终止电压精度其实是不够的。TI的绝大部分充电产品承诺0.5%的精度
- ◆ 企图依靠锂电保护电路而不使用专用充电芯片的做法是不能成立的。在图中可以看出，如果终止电压设在4.3V，寿命将只有150次左右，只有正常寿命的1/3不到

充电终止电压对容量的影响

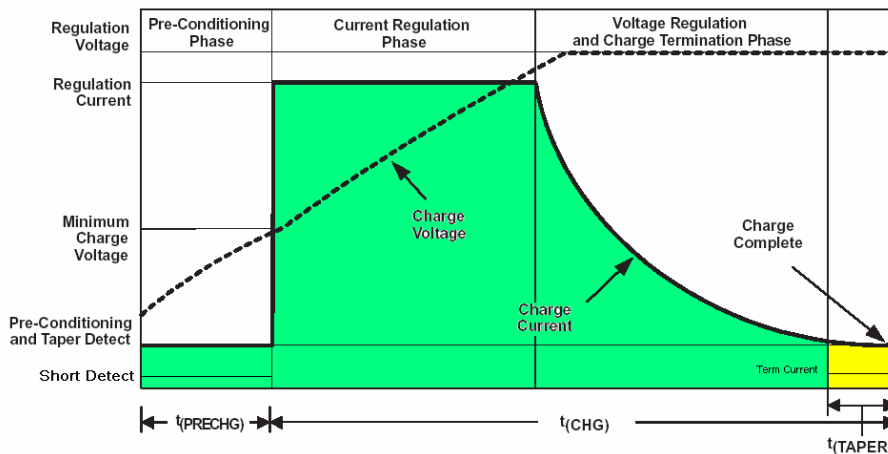


充电终止电压对容量的影响

- ◆ 1%的终止电压变化，将使容量改变8%
- ◆ 过充电会使得容量看起来更大，欠充电会使容量得不到充分的利用
- ◆ 由此可见，终止电压精度对于充电器是至关重要的参数。TI的绝大多数充电器电压精度均保证为0.5%，从而可以使电池的容量得到大约4%的改善

充电终止算法及检测

- ◆ 基于锂离子电池的结构特性，绝对的100%充电完成将耗费很长的时间，实际上是“不可能完成的任务”。
- ◆ 在前面的终止充电电压和容量的关系图上可以看出，“没有最满，只有更满”
- ◆ 所有充电终止判断都是基于容量利用程度、充电时间、使用寿命以及安全程度之间的权衡
- ◆ 因此, 在工业界现在普遍使用“同时”满足下面的条件来判断充电饱和终止：
 - 电压到达4.2V/cell—便携设备；
 - 电压到达4.1V/cell—大功率储备电池
 - 电流小于1/20 容量
 - 在要求快速场合可以设定为电流 < 1/10 容量
- ◆ TI使用一种叫“渐停计时器”（Taper Timer）的技术来实现最大化充电和最快化充电的平衡，可以比一般充电终止要多充3~5%的电，充电时间延长不超过30分钟



黄色区域即为多充的部分

充电器的热管理

- ◆ 充电器本身是一个能量输出装置，发热是不可避免的
- ◆ 对于线性恒流恒压法来讲，电池在3V附近的时候，整个充电器的效率极低，很可能低于50%，必须通盘考虑在各种情况下的散热情况
 - ◆ 最大输入电压和最小电池电压同时发生时的热耗散在额定范围内
 - ◆ 根据最大热耗散以及充电芯片给出的热阻系数计算最大温升，再根据工作环境温度，计算最大可能结温，确保符合芯片限制。
 - ◆ 选择在电压低于某一值如2.9V时首先进入小电流预充电模式，既可以延长电池寿命，也可以减少热耗散
- ◆ 对于PWM恒流恒压法，在电池电压3~4.2V的范围内均可以保持相当高的效率，而且输入电压在一定范围内变化对效率也影响不大
 - ◆ MOSFET外置电路必须计算电路的转换效率，估计最大热耗散，确保所选MOSFET的封装、性能符合要求
 - ◆ MOSFET内置的电路，要像线性电路那样计算各种情况下的最大温升

充电器的硬件考虑以及布线原则

◆ 输入电容

- ◆ 充电芯片内置的电压基准需要工作在稳定状态下，输入电容可以显著降低噪声幅度
- ◆ 充电器接口通常暴露在设备外，容易遭到静电的攻击，电容可以大幅降低、缓解这种攻击
- ◆ 充电芯片本身是Analog芯片，但内部仍有定时器等。负脉冲的EMI可能使芯片复位，输入电容可以抵抗EMI
- ◆ 输入电容还可以使PWM电路产生的噪声不传递到外电网
- ◆ 足够大的输入电容可以消除上电时的冲击电压（见后文的AC Adapter插入时的瞬态响应）
- ◆ 太大的输入电容可能产生无法承受的上电冲击电流

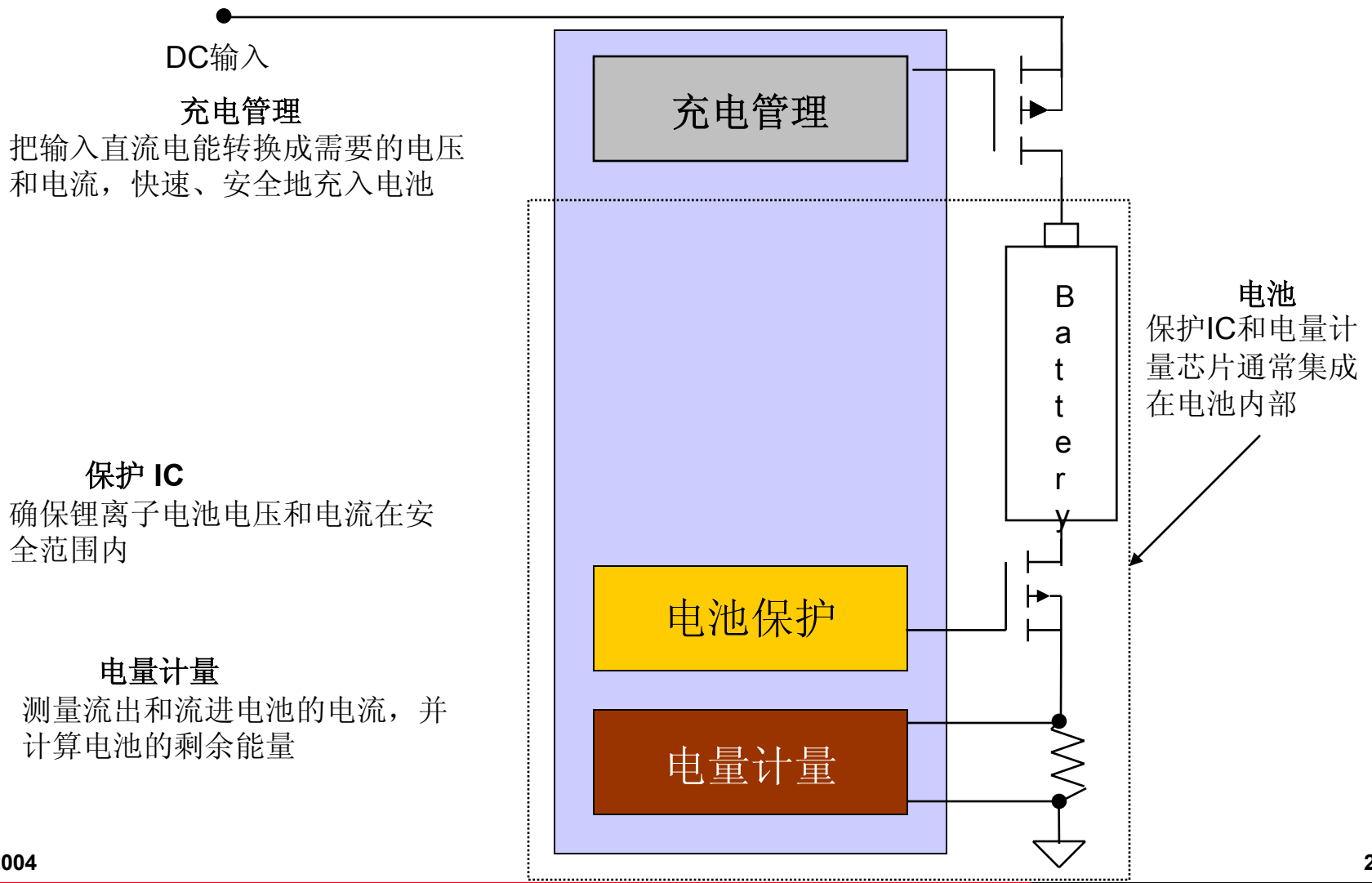
◆ 输出电容

- ◆ 输出电容可以降低电池上纹波对各种充电判断的影响
- ◆ 输出电容是充电芯片内部误差放大器环路稳定的要求

◆ 布线原则

- ◆ 除了一般布线规则外，在电路的“接地”中区分大电流回路和小电流回路是一个简单、易行、有效的方法
- ◆ 开尔文连接
 - ◆ 在充电控制中，电池电压是一个重要参数，要求直接从电芯上引线，即开尔文连接
 - ◆ 如果不这样做的话，充电电流在引线上的压降将干扰判断

各类电池管理器件的关系



◆ 直接连接法

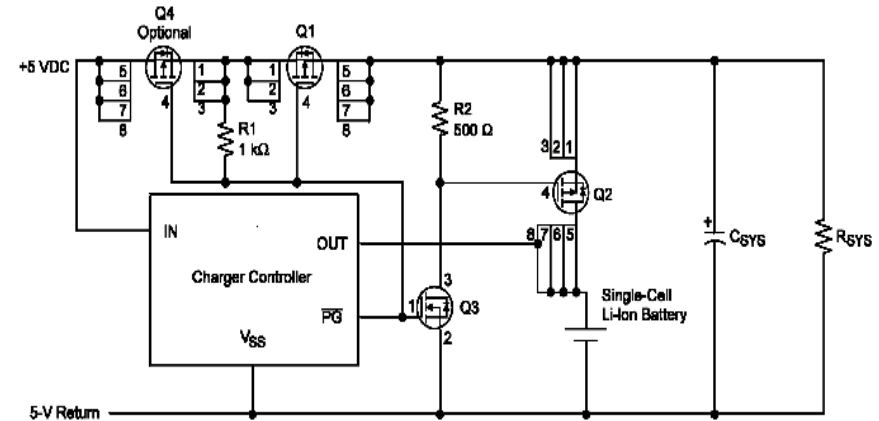
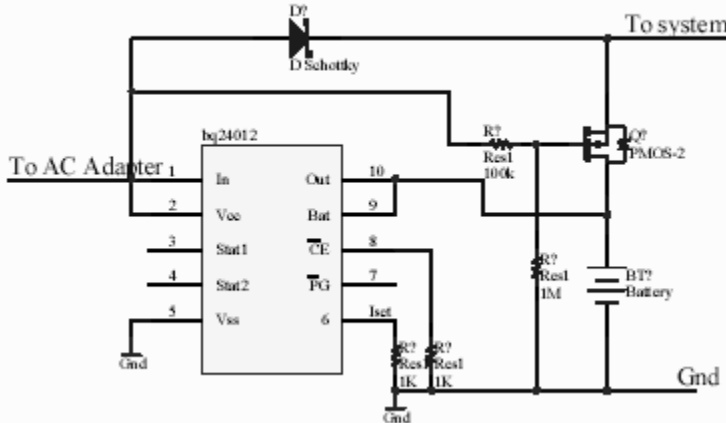
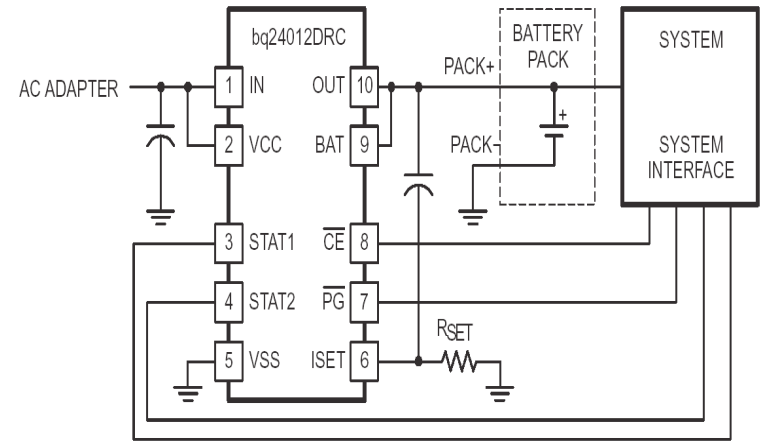
- ◆ 最简单、常见的连接方式
- ◆ 系统消耗电流影响充电终止判断

◆ 双MOSFET切换法

- ◆ 最可靠切换方法
- ◆ 成本最高，导通功耗小
- ◆ 系统状况不影响充电

◆ 单MOSFET，单肖特基二极管

- ◆ 成本适中，功耗略大
- ◆ 系统状况不影响充电
- ◆ 外接电容可能影响内外切换



充电器、电池、负载、Adapter之间的拓扑关系

◆ 现行连接方法的缺点

- ◆ 直接连接法会影响充电终止判断
- ◆ 双MOSFET切换法在系统电流超出Adapter的供应能力时难以用电池接续
- ◆ 单MOSFET, 单肖特基二极管又在外接大电容时切换有瞬间掉电的担心
- ◆ 全部3种方案中, adapter的噪声都会引入系统, 造成RF灵敏度下降或AV信号等劣化

◆ TI的解决方案: bq24032系列

- ◆ 充电时电池和负载完全隔离
- ◆ AC adapter和USB口的充电可以设定优先权
- ◆ 任一输入电压低于某一设定值时, 可以自动减小充电电流, 如果电压进一步降低, 可以自动打开Q2救续, 适应动态范围较大的系统供电需求
- ◆ Q1, Q3均有稳压功能, 从而隔绝外部噪声进入系统

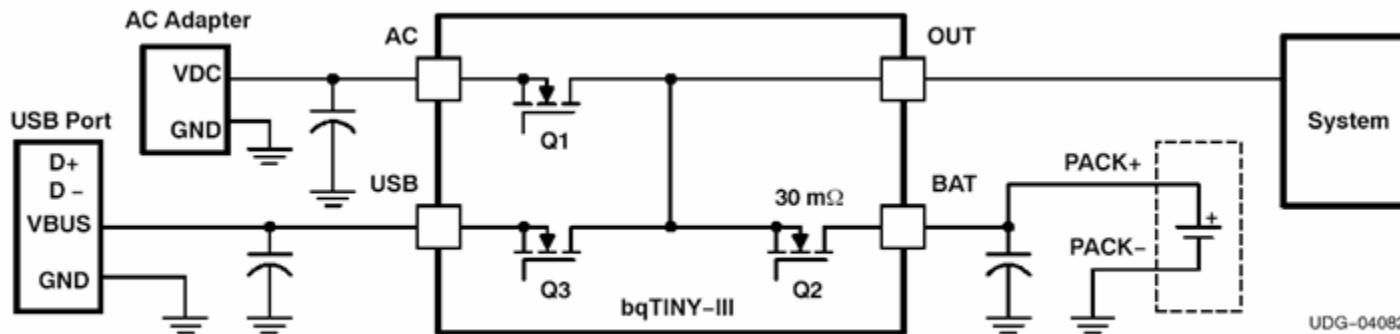
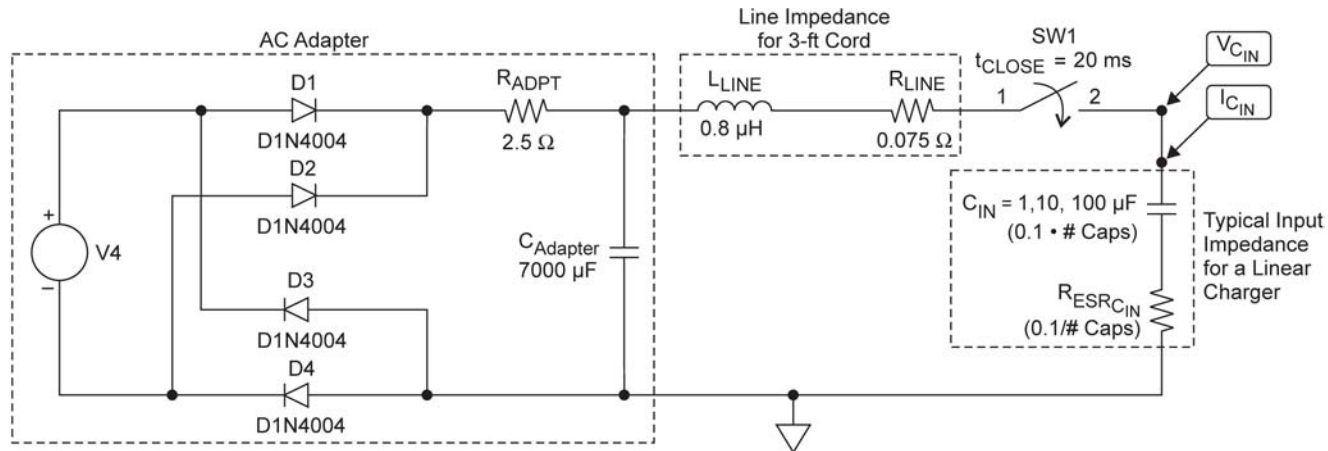


Figure 4. Power Path Management

AC Adapter插入时的瞬态响应（待续）

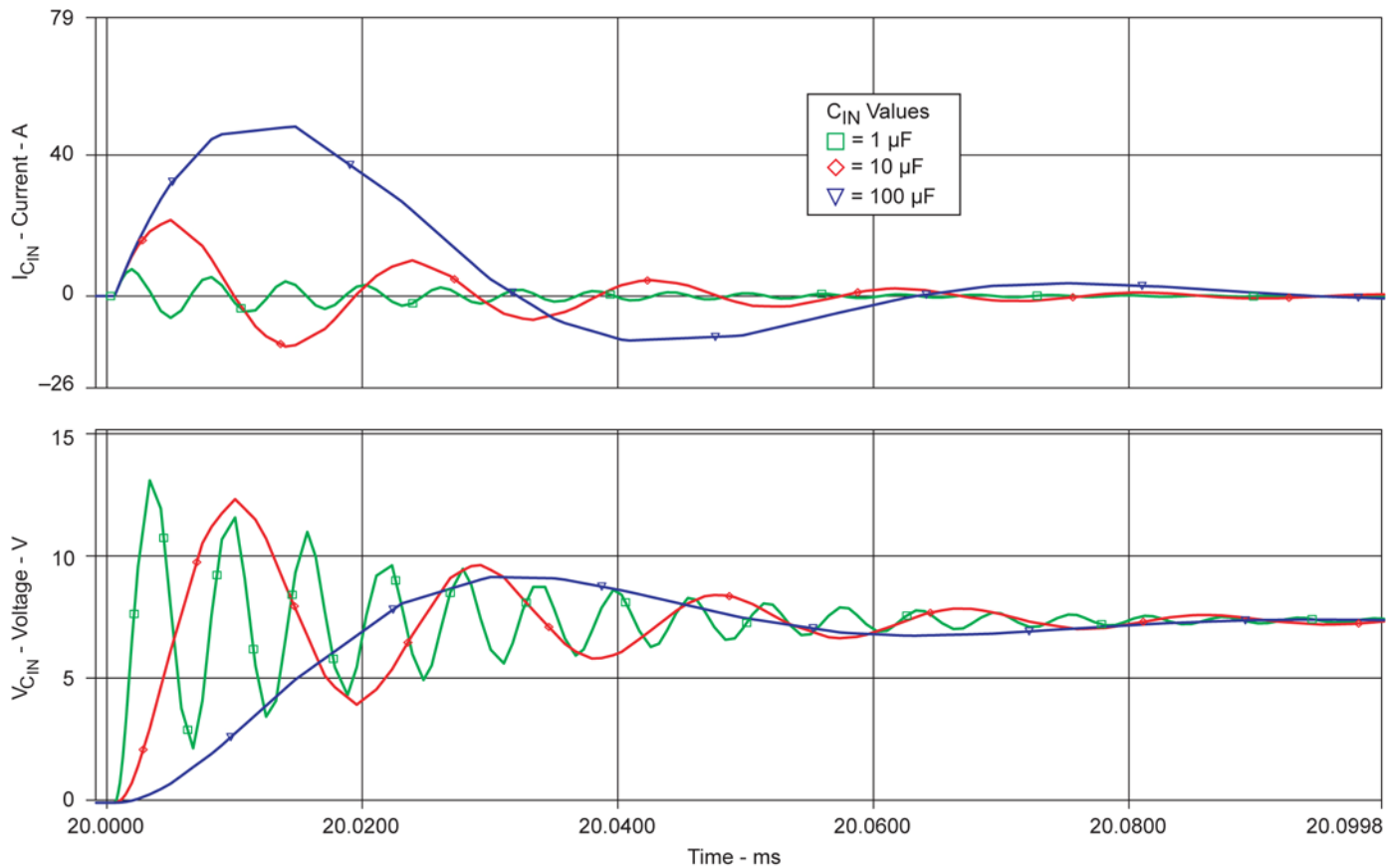


Adapter (120 VAC to 5 VDC unregulated) is plugged into wall source and then hot plugged into charger's input capacitance.

Note that a DC source is used to represent the voltage at the peak of an AC waveform.
The adapter's output capacitor will be charged to this peak value prior to hot plugging into the charger circuit.
C1 will stay charged to its full value during this time of interest (80 μs).

如图，这是一个AC Adapter以及充电电路输入部分的等效示意图。
 ◦ L_{line} , C_{in} , R_{esr} , R_{line} 构成串联谐振系统。下一页展示了Pspice模拟的结果

AC Adapter插入时的瞬态响应

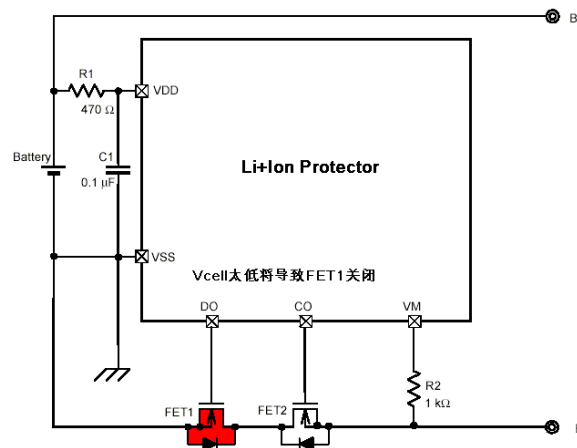
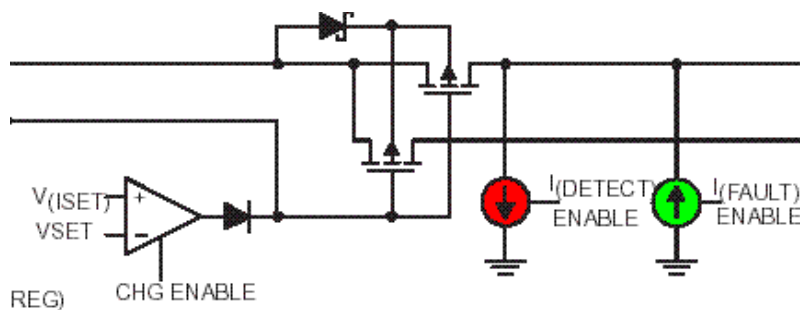


电池充不进电

◆ 问：有的手机的电池用到自动关机，没有及时充电，电池仍然放置在手机上。等过了一段时间，比如10天半个月，想起来充电的时候，怎么也充不进去，这是什么原因？

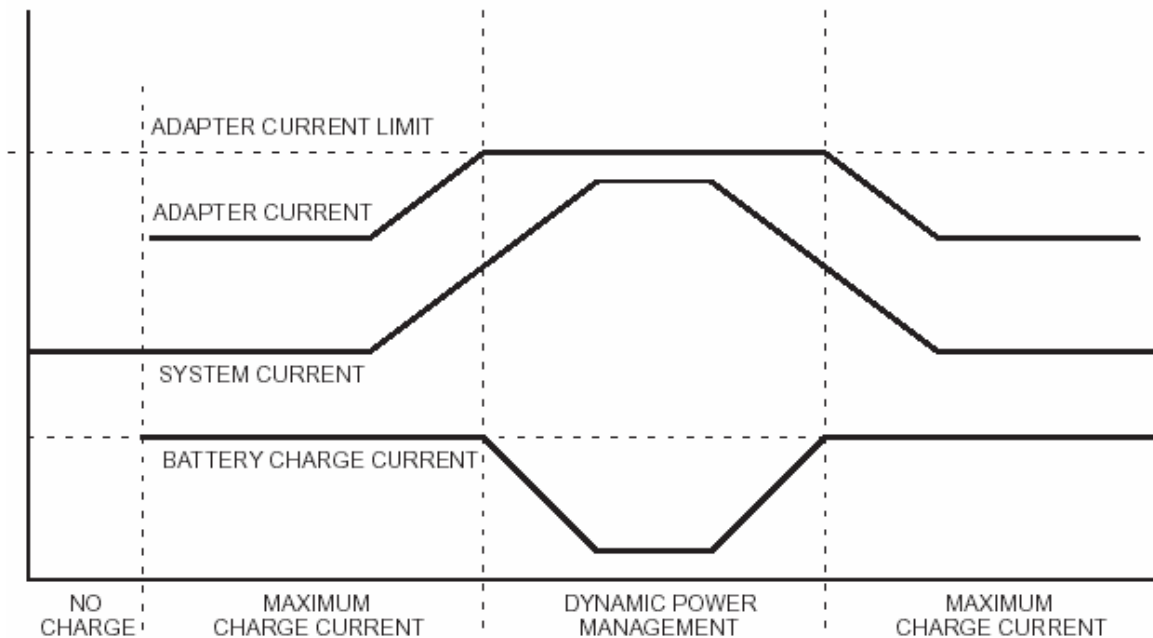
答：造成这个现象的原因是电池电压过低。电池的电压随电量的流失，在低压警戒区会迅速的降低。即使从手机中取下，电池每天0.2%/天@25C°的自放电依旧，电池内的锂电保护电路也会消耗6uA左右。电池放在手机上，手机内漏电流更是加速了这个过程，许多手机的漏电流高达100uA)。一旦电池电压低于锂电保护IC设定的一个阈值，常常在2.3~2.7V之间，锂电保护芯片会关闭放电MOS管。而许多手机的充电控制往往有所谓“短路检测”，如果电压太低，如低于2V，则拒绝充电。在右下图中，一旦FET1关闭，B+、B-之间的电压就接近0，这就形成了即使电芯的电压超过2V也不能充电的窘境

- ◆ 从消费者的眼光来看，这是产品的品质问题；
- ◆ 从制造商的眼光来看，多一事不如少一事，所以大部分充电芯片制造商现在取消了输出短路检测；
- ◆ 从工程师的眼光来看，短路检测是必需的，简单的取消检测未免有鸵鸟之嫌，但直接检测端电压就太愚蠢。在TI的bq24012产品中就采用了2个电流源，一个是充电源，一个是放电源。如果电压检测端检测到了一个低于1.4V的电池电压值，它会用900uA的充电电流源充875ms，然后再用4mA的放电电流源放电125ms，这样绝大多数的“沉睡电池”就会被唤醒



动态电流分配

- ◆ 什么叫动态电流分配？
 - ◆ $I_{charge} = I_{adapter} - I_{system}$
 - ◆ 最大化利用AC adapter的功率，降低Adapter的成本
 - ◆ 减少充电时间，防止Adapter的过热
- ◆ 典型芯片： bq24703



充电一直不停

◆ 为什么充电一直不停？

- ◆ 如果把系统负载和电池一起接在充电芯片的输出端，就可能出现这种情况
- ◆ 即使一次充电完成后，充电芯片停止工作，系统直接从电池获得能源继续工作，几十分钟后重新充电开始
- ◆ 有时候一夜可能重复这种过程几十次，发生充电了一夜之后，早上起来还在充电的现象
- ◆ 更糟糕的是，一些充电管理芯片的自动重充电阈值设定在4.05V左右，这样一夜充电后可能只能充到85%！

- ◆ 什么叫高端保护？
- ◆ 在某些输入电压超过或接近20V的时候，在U2, U3上的GS或GD间可能出现20V的电压，这已经接近大部分低 R_{ds} MOSFET的耐压上限，因此必须采取措施使得驱动电压不超过10V
- ◆ 在下图中，bq24703有一个专门的管脚 V_{HSP} 提供高端MOSFET的驱动电压

