

最大化延长即使具有老化电池的汽车电池组运行时间

Maximize the run time in automotive battery stacks even as cells age

作者 / Samuel Nork 凌力尔特公司（现隶属于Analog Devices公司）波士顿设计中心总监

Tony Armstrong 凌力尔特公司（现隶属于Analog Devices公司）电源产品部产品市场总监

摘要：本文介绍了延长具有老化电池的汽车电池组运行时间的相关方法，以及凌力尔特公司专门为满足高性能有源平衡需求的新产品LTC3300-2。

关键词：电池组；运行时间；LTC3300-2

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5517.2017.6.008

引言

由串联、高能量密度、高峰值功率锂聚合物或锂铁磷酸（ LiFePO_4 ）电池组成的大型电池组被普遍应用于全电动（EV或者BEV）、混合燃气/电动汽车（HEV和插电式混合动力汽车或PHEV）储能系统（ESS）中。据预测，电动汽车市场对大规模串联/并联电池组的需求将越来越大。2016年全球PHEV销量为77.5万台，预计2017年将达到113万台。然而，虽然对高容量电池的需求日益增长，电池价格依然很高，是EV或PHEV中价格最高的组件，能行驶几百公里的电池价格基本都超过10000美元。对付高成本的策略可以是通过使用低成本/翻新电池来减轻成本压力，但随之而来的问题是，这类电池会有较大的容量不匹配问题，这会减少可使用时间或缩短一次充电后的行驶距离。即使是成本更高、质量更好的电池也会老化，而不断地重复使用会导致电池失配。有两种方式可以提高不匹配电池的电池组的容量，第一种方式是一开始就采用比较大的电池，这种做法非常不符合

成本效益；第二种方式是主动平衡，这种新技术可以恢复电池组的电池容量，而且正日渐普及。

串联连接的所有电池需要保持平衡

平衡的电池是指一个电池组中的每节电池都具备相同的电荷状态（SoC）。SoC是指个别电池随着充电和放电，相对于其最大容量的剩余容量。例如，一个剩余容量为5A-hr的10A-hr电池具有50%的SoC。所有电池都需要保持在某个SoC范围之内，以避免受损或寿命缩短。应用的不同可容许的SoC最小值和最大值也会不同。在最重视电池运行时间的应用中，所有电池都可以在20%的SoC最小值和100%的最大值（满充电状态）之间工作。而就要求电池寿命最长的应用而言，可能将SoC范围限制在30%最小值和70%最大值之间。在电动型汽车和电网存储系统中，这些数值是典型的SoC限制，电动型汽车和电网存储系统使用非常大和非常昂贵的电池，更换费用极高。电池管理系统（BMS）的主要作用是，仔细监视电池组中

热门技术

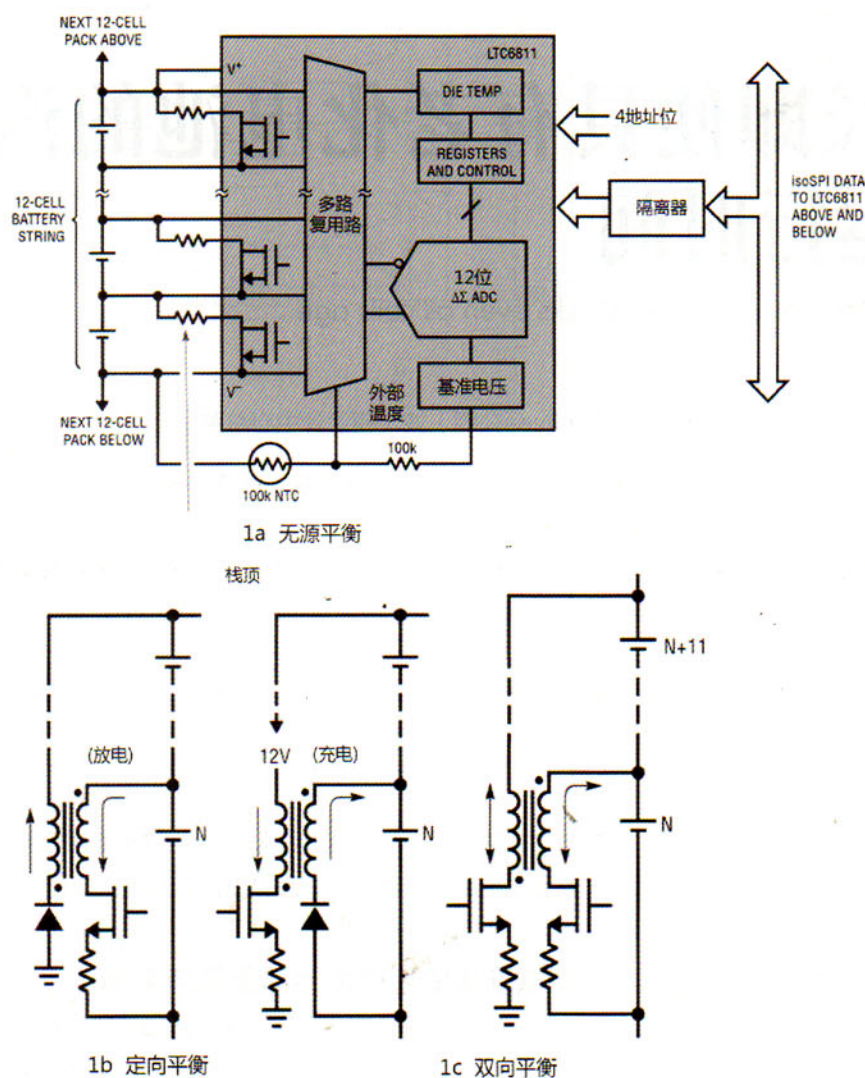


图1 典型的电池平衡拓扑

的所有电池，确保每一节电池的充电或放电都不超出该应用充电状态限制的最小值和最大值。

采用串联/并联电池阵列时，并联连接电池会相互自动平衡，这种假定一般来说是对的。也就是说，随着时间的推移，只要电池接线端子之间存在传导通路，那么在并联连接的电池之间，电荷状态就会自动平衡。串联连接电池的电荷状态会随着时间的变化而分化，这种假定也是对的，这么说有几个原因。由于电池组各处温度变化率的不同，或者电池之间阻抗不同、自放电速率或加载的不同，SoC会逐步发生变化。

尽管电池组的充电和放电流往往使电池之间的这些差异显得不那么重要，但是累积起来的失配会越来越大，除非对电池进行周期性的平衡。之所以要实现串联连接电池的电荷平衡，最基本的原因就是补偿各节电池SoC的逐步变化。通常，在一个各节电池具有严密匹配的容量的电池组中，运用被动或耗散电荷平衡方案足以使SoC重新达到平衡。

如图1a所示，无源平衡简单而且成本低廉。不过，无源平衡速度非常慢，在电池组内部产生热量，而平衡是通过降低所有电池的余留容量，以与电池组中SoC值最低的电池相匹配。由于另一个常见的容量失配，无源平衡还缺乏有效应对SoC误差的能力。随着电池组的老化，所有电池的容量都会减小，而且电池容量减小的速率往往是不同的，原因与

之前所述类似。因为流进和流出所有串联电池的电池组电流是相等的，所以电池组的可用容量由电池组中容量最小的电池决定。只有采用有源平衡方法（如图1b和1c中所示的方法）才能向电池组各处重新分配电荷，以及补偿由于不同电池之间的失配而丢失的容量。

电池之间的失配能大幅度地缩短运行时间

电池之间无论是容量还是SoC之间的失配都可能

表1 由于电池之间的失配而导致电池组容量损失的例子

电池编号	开始值		放电后		充电后	
	容量 (A-hrs)	SoC (%)	容量 (A-hrs)	SoC (%)	容量 (A-hrs)	SoC (%)
1	110	100	47	43	77	70
2	100	100	37	37	67	67
3	100	100	37	37	67	67
4	100	100	37	37	67	67
5	100	100	37	37	67	67
6	100	100	37	37	67	67
7	100	100	37	37	67	67
8	100	100	37	37	67	67
9	100	100	37	37	67	67
10	90	100	27	30	57	63
堆栈容量	1000		370		670	

可用堆栈容量: $670\text{A-hrs} - 370\text{A-hrs} = 300\text{A-hrs}$
(75%效率的400A-hrs电池理论最大容量 - 损耗100A-hrs损耗)

严重缩短电池组的可用容量, 除非这些电池是平衡的。要最大限度地提高电池组的容量, 就要确保在电池组充电和放电时电池都是平衡的。

在表1所示的例子中, 电池组由10节电池串联组成, 每节电池的容量均为100A-hr (标称值), 容量最小的电池与容量最大的电池之间的容量误差为 $\pm 10\%$, 对该电池组充电或放电, 直至达到预定的SoC限制为止。如果SoC值限制在30%至70%之间, 而且没有进行容量平衡, 那么, 在一个完整的充电/放电周期后, 相对于这些电池的理论可用容量, 可用电池组容量降低了25%。在电池组充电阶段, 无源平衡从理论上可以让每节电池的SoC相同, 但是在放电时, 无法防止第10节电池在其他电池之前达到其30%的SoC值。即使在电池组充电时采用无源平衡, 在电池组放电时也会显著丢失容量 (容量不可用)。只有有源平衡解决方案才能实现容量恢复, 有源平衡解决方案在电池组放电时从SoC值较高的电池向SoC值较低的电池重新分配电荷。

表2说明了怎样采用理想的有源平衡, 使由于电池之间的失配而丢失的容量得到100%的恢复。在稳定状态使用时, 当电池组从70%SoC的“满”再充电状态放电时, 实际上必须从第1号电池 (容量最高的电池) 取出所存储的电荷, 将其转移到第10号电池 (容量最低的电池), 否则, 第10号电池会在其他电池之前达到其30%的最低SoC点, 而且电池组放电必须停止, 以防止进一步缩短寿命。类似地, 在充电阶

表2 用理想有源平衡实现容量恢复

电池编号	开始值		放电后		充电后	
	容量 (A-hrs)	SoC (%)	容量 (A-hrs)	SoC (%)	容量 (A-hrs)	SoC (%)
1	110	100	33	30	77	70
2	100	100	30	30	70	70
3	100	100	30	30	70	70
4	100	100	30	30	70	70
5	100	100	30	30	70	70
6	100	100	30	30	70	70
7	100	100	30	30	70	70
8	100	100	30	30	70	70
9	100	100	30	30	70	70
10	90	100	27	30	63	70
堆栈容量	1000		300		700	

可用堆栈容量: $700\text{A-hrs} - 300\text{A-hrs} = 400\text{A-hrs}$
(100%效率的400A-hrs电池理论容量)

段, 电荷必须从第10号电池移走, 并重新分配给第1号电池, 否则第10号电池会首先达到其70%的SoC上限, 而且充电必须停止。在电池组工作寿命期的某时间点上, 电池老化的差异将不可避免地导致电池之间的容量失配。只有有源平衡解决方案才能实现容量恢复, 这种解决方案按照需要, 从SoC值高的电池向SoC值低的电池重新分配电荷。要在电池组的寿命期内实现最大的电池组容量, 就需要采用有源平衡解决方案, 以高效率地给每节电池充电和放电, 在电池组各处保持SoC平衡。

高效率双向平衡提供最强的容量恢复能力

LTC3300-2 (见图2) 是专门为满足高性能有源平衡的需求而设计的新产品。LTC3300-2是一款高效率、双向有源平衡控制IC, 是高性能BMS的关键组件。每个IC都能同时平衡多达6节串联连接的锂离子电池 (Li-Ion) 或铁锂磷酸电池。

SoC平衡通过在一节选定的电池和一个由多达12节或更多节相邻电池构成的子电池组之间重新分配电荷来实现。平衡决策和平衡算法必须由单独的监视器件以及控制LTC3300-2的系统处理器来应对。电荷从一个指定电池重新分配给由12节或更多相邻电池组成的电池组, 以给该电池放电。类似地, 从12节或更多相邻电池组成的电池组将电荷转移给一个指定的电池, 以给该电池充电。所有平衡器可能同时在任一方向上工作, 以最大限度地缩短电池组的平衡时间。

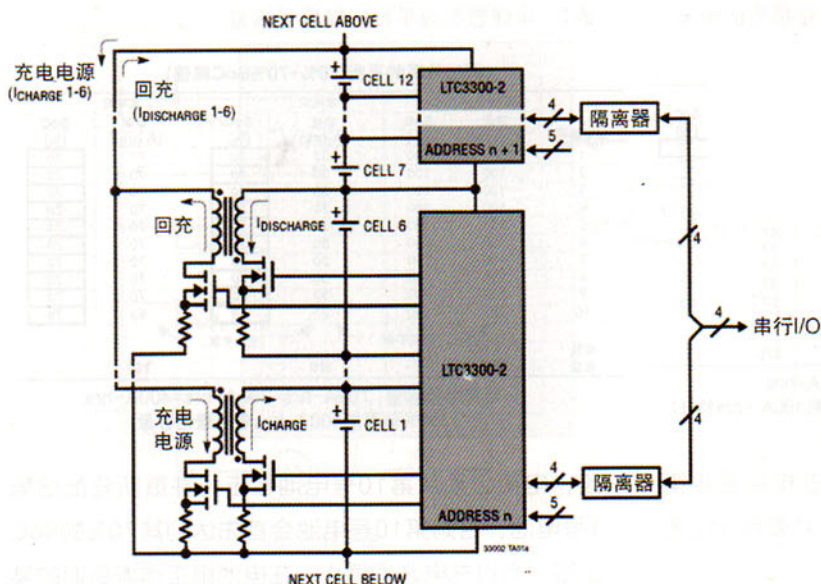


图2 LTC3300-2高效率双向多节电池有源平衡器

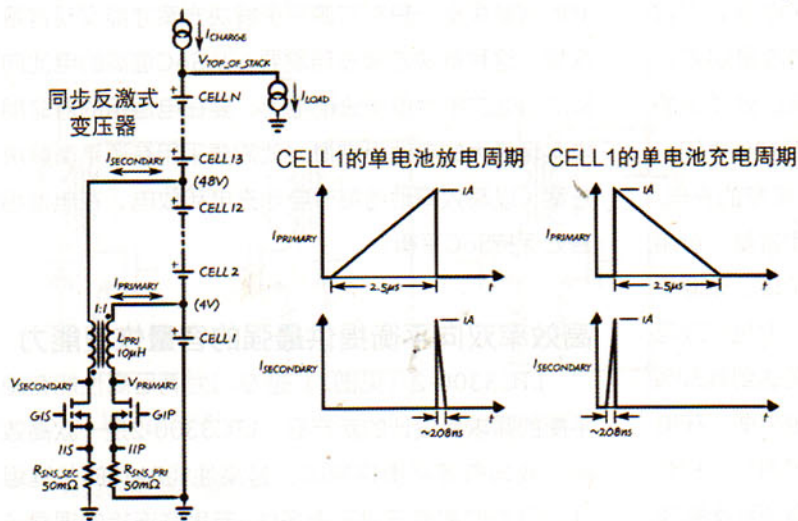


图3 LTC3300-2的电源级性能

LTC3300-2具有一个兼容SPI总线的串行端口。器件可以使用数字隔离器进行并联连接。多个器件由A0至A4引脚确定的器件地址唯一标识。在LTC3300-2上，CSBI、SCKI、SDI和SDO四个引脚组成串行接口。另外，SDO和SDI引脚可以连接在一起，以形成单个双向端口。器件地址由五个地址引脚（A0至A4）进行设置。所有串行通信相关引脚都是电压模式，参考电压为VREG和V-电源。

LTC3300-2中的每个平衡器都采用非隔离的边界模式同步反激式电源级, 以实现对每一节电池的高效率充电和放电。6个平衡器中的每一个都需要自己的变压器。每个变压器的主端跨接在接受平衡的电池上, 副端跨接在12节或更多相邻电池上, 包括接受平衡的电池。副端上电池的数量仅受外部组件击穿电压的限制。在相应的外部开关和变压器调节范围内, 电池的充电和放电电流可由外部检测电阻器设定为10A以上。高效率是通过同步工作以及组件的恰当选择实现的。每个平衡器都是通过BMS的系统处理器启动的, 而且平衡器将保持启动状态, 直至BMS发出停止的命令或指示检测到故障。

平衡器效率事关紧要

电池组面对的大敌之一是热量。高环境温度会快速缩短电池寿命并降低其性能。不幸的是，在大电流电池系统中，平衡电流也必须很高，以延长运行时间或实现电池组的快速充电。如果平衡器的效率不高，就会在电池系统内部导致不想要的热量，而且这个问题必须通

过减少能在给定时间运行的平衡器的数量来解决，或通过采用昂贵的降低热量方法来应对。如图3所示，LTC3300-2在充电和放电方向实现了高于90%的效率，与具备相同平衡器功耗、效率为80%的解决方案相比，这允许平衡电流提高一倍多。此外，更高的平衡器效率允许更有效地重新分配电荷，这反过来又可产生更有效的容量恢复和更快速的充电。

(上接第36页) 结论

虽然诸如电动汽车和PHEV等新型应用的发展十分迅猛，但消费者对于长工作寿命及可靠运作的期待却并未改变。对于汽车，不管采用电池还是汽油作为动力，人们都期望其在使用5年以上之后不出现任何可察觉的性能劣化。就EV和PHEV而言，性能等同于以电池为动力时的可行驶距离。EV和PHEV供应商不仅必须提供很高的电池性能，而且还要提供多年的质保期，保证车辆具备合理的最低行驶距离以使自身拥有足够的竞争力。随着电动汽车数量的不断攀升及使用年限的增加，电池组内部的不规则电池老化逐渐成为一个持续存在的问题，而且是导致运行时间缩短的主要根

源。串接式电池的工作时间始终受限于电池组中容量最低的那节电池。只是一节弱电池就会殃及整个电池组。对于汽车供应商来说，由于车辆行驶距离不足而依照质保条款要为客户更换或整修电池是一种成本非常昂贵的主张。为了避免承受如此高昂的代价，可以采用较大和较贵的电池，或者运用高性能的主动平衡器（例如：LTC3300-2），以补偿由于电池的不均匀老化而引起电池之间的容量失配问题。一个严重失配的电池组利用了LTC3300-2后，它的运行时间与一个具相同平均电池容量的完全匹配电池组几乎相同。