



**VERTIV**<sup>TM</sup>  
维谛技术

维谛技术白皮书

# 锂离子电池在不间断电源 应用场景中的关键因素

长期以来，铅酸电池作为不间断电源应用中的备用电源，一直作为保证数据中心、通信设备和工业场景的储能选择。

虽然铅酸电池能够提供此类应用所需的功率及可靠性，但由于需要进行适当的监测和维护，且维护成本高、重量大、需要频繁更换，因此铅酸电池通常被视为不间断电源系统中的薄弱环节。

如今，锂离子电池已经成为数据中心后备储能的替代品，越来越多的用户正在考虑锂电池在不间断电源系统中的应用。作为全球领先的关键基础设施提供商，维谛技术与一系列计划使用锂离子电池的客户合作，解决客户在是否采用锂电池时面临的关键问题。

相关信息，请参阅配套文件“关于在不间断电源应用中使用锂离子电池的常见问题”。

## 不间断电源场景中锂离子电池的预期寿命

锂离子电池的一个重要优势是其电池寿命是铅酸电池的几倍。但由于目前不间断电源应用中的运行数据有限，一些潜在用户会对锂离子电池的实际使用时长有所疑虑。

要解决这一问题，首先需要了解锂离子电池在正常情况下是如何老化的。锂离子电池基本上有两种老化模式：日历寿命和循环寿命。

日历寿命表示的是，随着时间的推移，电池容量下降，阻力内阻增加。就日历寿命而言，电池的工作温度是决定电池寿命的最重要因素。热量会加速电池老化，较低的工作温度可以减缓电池的老化速度。

循环寿命字面意思很容易理解，但由于电池的损害程度取决于循环的工况，如充/放电速率、环境温度等，所以锂离子电池的循环寿命预测并不像看起来那么简单。

锂电池行业有一项针对循环寿命的基准测试，即在室温（25°C/77°F）条件下，一小时内放完电池的所有电量，然后在一小时内将其充满，即1C充、1C放，电池容量下降至初始容量的80%时能达到的循环次数。循环寿命通常对充放电速率等因素相当敏感。影响循环寿命的关键因素如图 1 所示。

循环参数	对循环寿命的影响	描述
充电/放电速率	★★★★★	以高于设计的速率对电池进行充电或放电会大大缩短其循环寿命
放电深度	★★★★	充电前对电池进行部分放电比完全放电对电池造成的损害小
温度	★★★★	虽然温度较高的电池电阻较小，自发热率较低，但温度较低的电池通常寿命更长。许多锂离子电池对低温（通常低于0°C）充电也很敏感，但这对于数据中心应用场景来说通常不存在该问题
SOC窗口	★★★	当在局部放电深度下使用电池时，在接近完全充满（100%SOC）或完全放光（0%SOC）的情况下循环比部分充放电状态更具破坏性

图 1 影响锂离子电池循环寿命的关键因素概述

在数据中心应用中, 由于电池循环次数较低, 电池在大部分使用寿命内都处于闲置状态, 因此锂电池的日历寿命对数据中心应用场景更有意义, 通常也以日历寿命为准。但在不间断电源电池用于支持能源管理或电网需求侧响应的情况下例外, 此类应用情况不在本文讨论范围之内。

电池制造商通常将电池长时间置于不同温度下, 定期检查其剩余容量, 评估日历寿命。根据此类数据绘制的曲线能够显示时间、温度和剩余容量之间的关系。在收集了足够的数量之后, 就可以将这些数据拟合成一个日历寿命公式, 日历寿命在锂离子电池几十年实践应用中得到证实。锂离子电池日历寿命图的示例如图 2 所示。

## 锂离子剩余容量

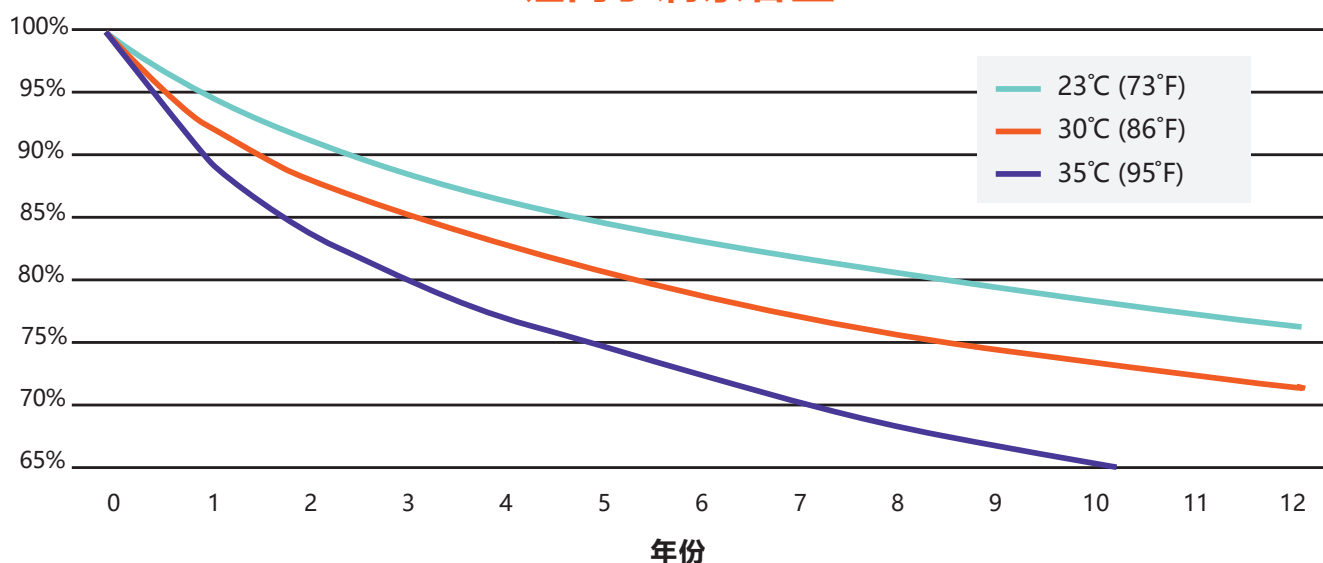


图 2 锂离子电池日历寿命图表

图 2 显示, 在 23°C (73°F) 的温度下测试的锂离子电池, 大约十年后仍保持 80% 左右的初始容量。不同的锂离子电池老化率不同。重要的是, 锂离子电池年老化率在 80% 左右放缓, 然后继续以可预测的速率老化, 因此

80% 的容量对锂离子电池的寿命来说并不是一个重要的里程碑。下一节将介绍剩余容量和电池电阻如何影响锂离子电池在不间断电源系统中的运行时间。

## 锂离子电池运行时间预测

锂离子电池用户最关心的问题之一是电池寿命对预期后备时间的影响。这种担心反映在一个共同的问题上: 锂电池是否与铅酸电池类似, 在寿命后期故障率较高?

回答这一问题, 需要重点考虑前面关于锂离子电池老化的讨论, 以及电池系统中每个电池的电极设计。锂离子电池可以根据制造商的不同性能目标进行定制, 一个重

要的比较指标是电池充放电速率和电池能量密度之间的比较, 如图 3 所示。

性能指标	能量优化型电池 (低放电倍率)	功率优化型电池 (高放电倍率)
能量密度	如今的锂离子技术可以产生高达 600 瓦时/升的电池能量密度, 可减少电池占地面积, 但不能高倍率放电。	功率优化型电池在能量密度上做出了妥协, 在极端情况下, 此类电池的能量密度可能仅为高能量电池的一半。
倍率性能	能量密度优化型电池可能需要一个小时或更长时间才能持续以最快的速度完全放电。	功率优化型电池可以在不损坏电池的情况下在几分钟内实现完全放电。
电阻	能量密度优化型电池的内阻比铅酸电池低得多, 但比锂动力电池高。如果以最大速率充电或放电, 能量密度优化型电池将会产生更多的热量。	高功率容量电极设计参数情况下电池的电阻非常低, 因此功率优化型电池即使在快速循环期间产生的热量也比较少。
相对成本	能量密度优化型电池制造成本较低, 产量较高。市场上以美元/千瓦时的价格兜售销售的较低价格电池, 几乎都是指这种类型的电池。	高功率电池中的电极更难制造, 并且在设计中具有额外的成本动因。同样容量 (以千瓦时为单位) 的高功率电池通常要贵得多。

图 3 功率优化型和能量密度优化型锂离子电池的性能比较

从上表的对比可以看出, 能量优化型电芯适合储能、新能源汽车等应用场景, 该场景对电池放电速率要求不高, 但后备时间较长、用量较大; 与之相反, 功率优化型锂电池则主要适用于后备时间不长、要求快速放电的应用场景, 如数据中心不间断电源系统中的后备电池。

针对不间断电源应用, 电池制造商主要设计以尽可能低的成本提供所需运行时间的电池。因此, 目前市场上大多数不间断电源解决方案倾向于使用在能量密度和成本方面更优的电池, 不太使用更能快速放电的电池。这也意味着所选的锂离子电池的内阻并不是最低的, 当它们在不到10分钟或15分钟的时间内放电时, 温度通常会快速升高。

在不间断电源应用中分析锂离子电池的运行时间时, 由于电池达到最低电压、最高温度或电池由于容量限制而耗尽能量均会导致放电结束, 所以了解电池的特性非常重要。在许多情况下, 导致放电结束的条件在不同的荷载下也是不同的。

这为预测未来十年的运行时间又增加了一个难度。与普遍的看法相反, 电池老化后的剩余容量, 尤其在高荷载时, 可能不会限制运行时间。除了容量损失之外, 锂离子电池的内阻也会随着寿命的延长而增加, 这将产生比新电池更大的压降和更强的自发热。因此, 电池制造商不仅要了解容量是如何下降的, 还要根据电池的运行历史和使用年限了解电阻是如何增加的。

虽然锂离子电池的运行时间分析很复杂, 但用户通常不用面临电池突然只提供预期或规格所承诺的一半运行时间的风险。根据美国电气和电子工程师协会对阀控式密封铅酸蓄电池的推荐做法 (1188), 当铅酸电池达到其初始容量的80%时, 剩余容量会快速下降, 因此在此之前需要更换电池。而锂离子电池则不会出现后备时间快速下降的故障, 其容量下降通常是一个相对缓慢的过程, 且可预测。

## 锂离子电池安全性

在以往的应用过程中可知，锂离子电池如果内部压力过高，可能会起火或释放气体。电池管理系统需要了解这些风险条件并加以控制。

对于任何安全问题相关产品，良好的系统集成实践始于了解每个潜在故障模式的概率和严重性。就锂离子电池而言，最危险的极端条件通常包括电池过度充电、过热和短路。每种情况都会导致锂离子电池中的电解液分解成气体，在极端情况下会着火。

虽然一些电池制造商以阴极或阳极中使用的化学物质为依据宣称其电池具有安全性，但锂离子电池的故障通常全部因电解液而起，几乎所有目前市售的电池都使用易燃电解液。这并不是说阴极和阳极的化学性质对电池的安全性没有影响。这些材料的选择可能会导致故障强度的显著差异，但如果认为任何锂离子电池都不会受到极端条件的影响，那就错了。

为确定任何电池设计对极端条件的反应，锂离子行业开发了一系列测试来评估安全风险。最有名的是针刺试验。针刺试验不是为了评估物理损伤对电池的影响。而是当针穿过所有电极时，会造成整个电池立即短路。由此产生非常快的能量释放，导致针变得非常热，从而点燃设计不当的电池中的电解液。

其他测试可用于研究其他故障模式的影响，完成所有电池极端条件测试后，系统集成商就可以确定确保系统安全运行的操作限制。

电池管理系统主要用于实施控制，使电池保持在其

安全工作范围内。电池管理系统对电池电压、系统温度和电池电流以及其他参数进行持续测量。

当电池管理系统检测到电池接近其工作极限时，会向负载（如不间断电源）发出警告。如果不间断电源没有做出适当的反应，将电池保持在允许的工作范围内，电池管理系统可以断开电池与负载或充电器的连接以确保安全。电池管理系统本身的功能和有效性也通过实现电池系统UL或CE认证所必需的测试得到验证。

由于电池管理系统（BMS）在锂离子电池系统的安全中起着重要的作用，因此电池管理系统本身的冗余是一个重要的设计考虑因素。例如，许多电池管理系统设计有一个硬件电路，如果系统的处理器出现软件故障，该电路将断开电池连接。传感器值也经常以多种方式进行测量，并进行比较以确认测量结果的可靠性。UL1973要求，在不间断电源应用中使用锂离子电池，需对电池管理系统设计进行功能安全分析。功能安全分析是一种确保控制系统按预期运行的系统方法，其原理已经在航空工业中应用了20多年。虽然这些安全保证方法对数据中心设备来说相对较新，但毫无疑问，经过认证的电池管理系统设计非常可靠。

电池管理系统中的一些工作阈值也不仅仅只是考虑安全性，比如在不间断电源应用中电池的热极限。一般来说，数据中心应用中的电池管理系统的温度限值远低于确保安全所需的限值，这是因为在设置该阈值时还需考虑寿命问题。因此，电池管理系统断开电池连接并不一定意味着有安全性有问题。

虽然精心设计的电池管理系统对锂离子电池的安全性提供了较高保障,但其无法控制的一个重大风险是电池着火。我们不可能确保使用的锂离子电池柜永远不会

发生火灾。这一现实问题最近推动了与锂离子电池相关的防火规范的广泛宣传。

## 锂离子电池消防规范对电池部署的影响

一些国家最近的消防法规的变化引起了人们对电池安全的更多关注。特别是,北美消防协会推出新的法规UL9540A,该法规正在各个区域逐步推广。UL9540A旨在确保安全,并对市场中的锂电池的安全性提出了明确的要求。

UL9540A防火标准是基于这样一种假设:锂离子电池火灾不可避免,电池制造商对如何改善锂离子电池安全性能几乎毫无办法。

汽车行业是锂离子技术的早期采用者,可通过研究锂离子电池在汽车市场中的发展来获得一些思路。十多年前,汽车行业针对锂离子电池的应用设立了一系列安全测试,并建立了明确的标准。在测试确立之时,虽然许多电池设计很难通过测试,但稳定性要求最终促使每个电池制造商只能遵守规定,否则就只能退出市场。

如今,不间断电源系统用锂电池受益于汽车行业已经推动的安全。与此同时,有必要承认,市场上仍有一些锂离子电池设计无法通过更严格的安全测试。

随着不间断电源用电池防火标准的不断发展,锂电池生产商不断对方案进行改进,如今面对的问题是如果锂电池不关闭BMS系统,不管多极端的条件,锂电池均很难起火。

鼓励出于安全考虑开发具有更强极端条件耐受性、具有更好电池管理系统功能的系统是合理的,但最初针对不间断电源用场景确定的火灾测试并未考虑在实际应用中实际发生火灾的可能性。测试只是要求通过任何必要的方法引发火灾,然后观察火蔓延的程度。如果制造商无法通过UL9540A大规模火灾测试证明其系统设计能够防止火灾蔓延,则每个电池柜的四周必须有三英尺的间距,以防止火灾蔓延,这实际上抵消了特定锂离子电池相对于铅酸电池的占地优势。

尽管这些防火规范要求仍在不断完善,但用当今的锂离子电池开发系统来防止火灾蔓延到电池柜之外在技术上是可行的,与其他必须具备三英尺净间距的解决方案相比,这些解决方案将获得占地面积优势。随着时间的推移,法规有望趋于稳定,性能更好的解决方案可能会获得更多市场份额。



## 锂离子电池监测

锂离子电池系统中的电池管理系统持续监测大量运行参数以确保安全。由于所有这些运行数据已经存储在电池管理系统存储器中，因此电池管理系统制造商通过Modbus协议或类似的数据采集方案将数据提供给外部系统相对简单。这是锂离子电池相对于铅酸系统的一个关键优势，在铅酸系统中，任何监测系统都需要安装传感器。

在判断外部监控系统监测哪些电池参数时，应注意不要记录锂电池管理系统提供的所有信息，否则大量数据可能会掩盖有价值的信息。

以电池电压为例。电池管理系统通常有超过100个电池单体的电压测量值，但单个值远没有基于所有这些值分析出的信息重要。在某些情况下，电池管理系统还提供整个系统中单体的最大和最小电池电压，二者的差值可以更好地指示电池状况。

## 安装、维护和处置

受限于UN38.3的要求，一些锂离子电池系统可以大部分组装后运输，而另一些则需要现场组装。购买组装好的系统可以节省安装成本和时间，购买Pack单独运输的产品，需要考虑系统组装的难度。

电池模块本身应经过出厂测试，但它们在交付时荷电状态可能并不相同。最好在开始功能测试之前，为电池管理系统预留时间来平衡所有电池的电压。此外，在

目前没有标准规定外部监测系统可用的电池管理系统数据，因此不可能确定一个在所有情况下都有效的监测策略。一般来说，温度数据是有意义的，并且在放电或充电事件期间收集的数据对于评估电池状况比系统闲置时的运行数据更有价值。

此外，一些电池管理系统提供荷电状态变量，该变量是控制系统对电池使用寿命的总体评估。但在不了解如何计算荷电状态值的情况下，不要过于相信该值，市场上不同的电池管理系统解决方案在用于计算该值的算法的复杂性方面有很大差异。

最后一点，监测数据中心锂离子电池系统的最佳方式还取决于电池管理系统与不间断电源控制器的集成程度。增加这两个控制器之间的运行数据共享具有操作优势，在实现更紧密集成的情况下，可以通过不间断电源的监测接口监测关键电池数据。

进行放电测试或充电循环之前，确保电池安装在稳定的环境温度下足够长的时间，环境温度与电池管理系统测量的电芯温度一致。

一般来说，锂离子电池中电池管理系统的远程监测功能支持状态检修和更换，所以锂离子电池的维护频率比铅酸电池低。老化情况也更容易预测，因此可将容量骤降的风险降至最低。

此外，锂离子电池模块上的接线柱不会像铅酸电池上的接线柱那样发生变形，因此后期无需重新紧固连接。锂离子电池集成商应根据系统设计提供具体的维护方案。

锂离子电池是可回收电池，从整体结构中拆取电池单元很大程度上确定了收益。回收锂离子电池，并从中

拆取有价值的材料，这类回收行业正稳步发展，利润潜力巨大。回收再利用可能会在未来几年压低锂离子电池的成本。

虽然无法预测未来的成本，但当目前这一代锂离子电池达到寿命末期并继续受益于汽车行业的规模和经验时，锂离子回收行业将更加成熟。

## 安装、维护和处置

锂离子电池已经达到成熟阶段，可将其视为不间断电源应用中铅酸电池的可行替代品。尽管缺乏可用的运行数据，但日历寿命测试表明，锂离子电池的寿命比铅酸电池长得多，当容量低于 80% 时，故障风险也不会增加。除了确保安全性之外，锂离子电池管理系统还可以

通过支持状态检修的连续监测来帮助最大限度地延长电池寿命，减少停机时间。经验丰富的集成商可以帮助您评估锂离子电池与铅酸电池在特定应用中的总拥有成本。