

生命周期内蓄电池储能和飞轮储能碳足迹分析

第 209 号白皮书

版本 0

作者 Wendy Torell

摘要

静态 UPS 的飞轮储能通常被认为是一种比蓄电池储能“更绿色”的技术。本文进行全生命周期内碳足迹分析后，结论恰恰相反，主要原因在于飞轮在其生命周期内运行能耗比等同的 VRLA 蓄电池解决方案要多，且这些能耗所对应的碳排放远超其原材料或所需制冷系统所能减少的碳排放。施耐德提供的权衡工具可以帮助计算并比较相对应的碳排放量。

简介

现今数据中心的 UPS 大多数为使用铅酸蓄电池储能的静态 UPS。然而，人们对飞轮储能取代更为常见的蓄电池储能产生了越来越大的兴趣。将飞轮作为替代方式的原因有很多，第 65 号白皮书《数据中心蓄电池、飞轮和超级电容器不同储能方式比较》分别对不同储能方式做了详细的描述并分析了各自的优缺点。表 1 总结了铅酸蓄电池和飞轮储能方式的主要区别。

表 1
储能 VRLA 蓄电池与飞轮的
概要性比较

属性	铅酸蓄电池	飞轮
运行时间	5 分钟 - 8 小时	1 秒钟 - 1 分钟
运行条件	运行温度范围窄	运行温度范围宽
维护成本	预防性维护，每 3 - 5 年更换一次电池	预防性维护，更换轴承（取决于供应商）
占地面积	较大占地面积	较小占地面积
能耗	蓄电池浮充充电消耗能量 = 较低损耗	维持飞轮旋转的能量 = 较高损耗
碳足迹	生命周期内碳足迹较低	生命周期内碳足迹较高

飞轮和旋转式不同

飞轮 UPS 和旋转式 UPS 经常交替使用，然而这两个术语并不相同

- “飞轮” UPS 是一种静态 UPS，通过直流电源供电的飞轮动能储能取代直流的电池串。
- 旋转式 UPS 之所以称为“旋转式”，因为 UPS 的旋转组件（如电动发电机）用于将能量传输给负荷。旋转式 UPS 储能既可以是飞轮，也可以是蓄电池。

第 92 号白皮书《静态式 UPS 和旋转式 UPS 的比较》详细解释了这两者的区别。

本白皮书深入比较了静态 UPS 储能选择的飞轮与 VRLA 蓄电池的碳足迹，并提供了明确的比较方法。

飞轮通常被认为是一种 比蓄电池“更绿色”的替代方案，主要缘于以下三个因素：

- 飞轮与蓄电池所用材料的不同
- 较高的耐温性，因此无需对飞轮提供额外制冷
- 预期更长的寿命

相反，铅酸蓄电池因其有害物质及铅的使用量，通常被认为对环境有害。人们总是设想蓄电池垃圾填埋场以及其对环境所造成的相关危害。但事实上 VRLA 蓄电池中的大多数铅可以回收。根据美国国际电池理事会（BCI）的数据，实际上超过 98%的蓄电池铅被回收¹。

本文分析并展示出整个数据中心生命周期内 VRLA 蓄电池与飞轮的碳足迹。分析显示，原材料、服务更换寿命和所需的制冷消耗并不能推动“更绿色”。数据中心生命周期内的运行能耗的差异得到的结论是 VRLA 蓄电池在生命周期的碳足迹比飞轮储能更少。

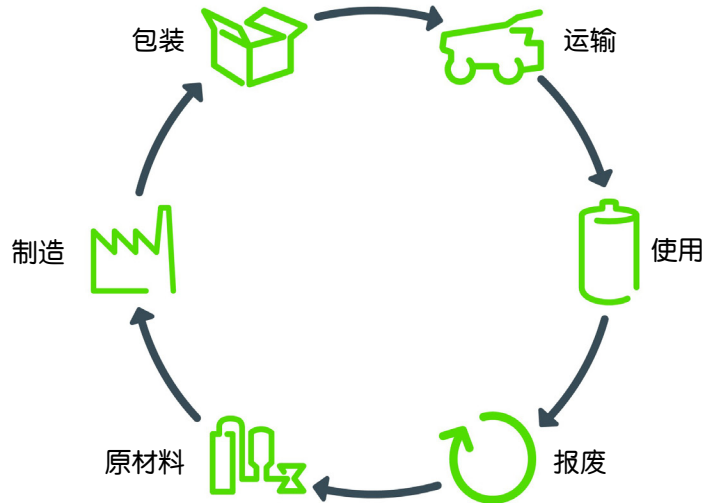
¹ http://battery council.org/?page=battery_recycling

生命周期碳足迹

在比较备选储能方式的碳足迹时，考虑全生命周期内的碳排放是非常重要的。本文在分析时考虑到“从摇篮到坟墓”的总体碳排放（图 1），有时又称“隐性”碳排放。产生碳排放的主要环节包括原材料提取、生产流程、运输、系统运行能耗、配套系统（UPS 情况中的制冷）以及材料回收处理等。

图 1

“从摇篮到坟墓”的碳足迹



分析方法

基于生命周期中的以下各个阶段，对 VRLA 蓄电池和飞轮进行建模。其中，某些环节的碳足迹未被考虑，原因是这些环节对整体碳足迹的影响很小，或者对两种储能方式的影响相同或非常相似。

本文旨在比较储能方式，并非 UPS 拓扑结构

在讨论及分析替代方案时（目的为确定一种更环保或高效的方式），储能方式和 UPS 拓扑结构有时会被混淆。

如果选择一种带有效率低下的 UPS 的高效储能方法，并将其与带有更高效 UPS 的低效储能方法对比，则很难区分出储能系统的实际差异。

本文所做的分析并非 UPS 类型比较，并且假定飞轮和蓄电池具有相同的 UPS 损耗。

- 1. 原材料：**通过多种产品规格书确定 VRLA 蓄电池和飞轮的典型化学成分，从而得出原材料的组成百分比。受麻省理工大学支持、由英国巴斯大学完成的一份报告收集了各种原材料的隐性碳比例（碳重量（kg）/原材料重量（kg））。材料的碳排放率包括原材料以及根据原材料的典型回收率计算而得到的数据²。
- 2. 制造 & 包装：**飞轮和蓄电池在生产和包装阶段的碳排放强度相似，对整体生命周期碳足迹的影响很小。因此，分析中不考虑这一环节。
- 3. 运输：**系统与目的端的距离越远，对总体碳足迹的影响越大。我们默认距离为 322 千米（200 英里），但在后续提供的权衡工具是可调节为任意预期距离。满载 19958 千克（44000 磅）货运卡车的标准燃烧效率为 2.6 千米/升（6 英里/加仑），产生的碳排放率为 0.73 千克/升（2.77 千克/加仑），这些参数用来计算运输过程产生的碳排放³。考虑运输不同重量的结果，采用单位千克运输产生的碳排放乘以所对应的重量。假设在生产制造工厂和数据中心之间的距离上运输方面不存在技术上的优势。
- 4. 安装：**考虑现场安装的人工时和所涉及的安装设备，假定电池和飞轮现场安装所产生的碳排放相似。因此，分析中不考虑这一环节。

² 英国巴斯大学，哈蒙德，G.P. 和 C.I. Jones, Inventory of Carbon Energy (ICE) Version 2.0, <http://web.mit.edu/2.813/www/readings/ICEv2.pdf> old

³ <http://www.chemicaltransportation.com/transportation-resources/how-to-calculate-your-trucking-carbon-footprint>

5. **运行能耗：**运行期间的能耗是影响总体碳足迹最大的因素。对于使用 VRLA 蓄电池的 UPS 而言，功率损耗表示蓄电池涓流充电（包含放电期间或充电器的损耗）所消耗的能量。飞轮功率损耗表示正常运行时维持飞轮旋转所需的能量。保持飞轮旋转的损耗，供应商并不能提供好的资料，但与蓄电池相比测量数据则验证了其所产生的损耗。飞轮功率损耗典型值为 1-2% 左右，由真空泵或磁轴承等组件产生。蓄电池功率损耗的典型值为 0.2%。假设 UPS 系统在两种存储方式时性能相同（具有相同的 UPS 损耗），在分析中不考虑该因素。“运行能耗比较”章节提供了一个运行在英国、且具有 20 年数据中心寿命的 1MW 储能系统的结果。每度电能的产生的碳排放量取决于不同的能源类型，各个国家或地区的能源类型或结构是不相同的。在模型中采用的是包括全球各个国家或地区各自的平均碳排放率。
6. **制冷运行能耗：**飞轮相对蓄电池的一个常被引用的优点是耐温范围更广。通常规定蓄电池运行于 0-25° C (32-77°F)，而飞轮可承受 -20-40° C (-4-104°F)。由于耐温范围更广，分析时飞轮是不需要考虑额外制冷。相反，分析中蓄电池室则需要辅助制冷，部分 PUE(电能使用效率)为 1.3。
7. **维护：**VRLA 蓄电池的设计寿命通常为 5 年。这表明，在数据中心 20 年的生命周期内，需要更换四次。每次更换时，我们均需计算原材料和运输的产生的碳排放值。为确保蓄电池安全可靠运行，通常还需要进行 VRLA 蓄电池的半年度维护保养。飞轮的维护要求有所不同，但使用磁轴承的飞轮无需更换轴承，且设计寿命通常为 20 年。因此，假定飞轮在该生命周期内无需更换。飞轮是需要年度维护的，维护任务包括更换真空泵油等。对于蓄电池和飞轮的维护巡修，假定维护人员车辆的燃油效率为 12.7 千米/升（30 英里/加仑）。
8. **报废：**在数据中心寿命终结时，假设处理蓄电池和飞轮所用的人工时相同，因其只占生命周期碳足迹的很小百分比。因此，分析中不考虑这一部分。注意，当蓄电池运行寿命终止时，作为服务的一部分，UPS/蓄电池供应商应更换电池，并提供一份诸如附录中的文档，指出废弃蓄电池会根据当地和国家法规及建议回收。

飞轮和 VRLA 蓄电池碳排放的最大差异是由原材料和使用/运行产生，包括蓄电池或飞轮的运行能耗，以及支撑其运行的制冷系统能耗。以下两个部分将详细计算每一环节的对应的碳排放量。

原材料比较

VRLA 蓄电池的主要原料为铅，其次为硫酸。图 2 给出了 VRLA 蓄电池化学成分的采样数据表，包括各成分的浓度。

US Office: B&B Battery USA, Inc.
Address: 6415 Randolph Street, Commerce, CA 90040
Tel: 323-278-1900
Fax: 323-278-1268

图 2

VRLA 蓄电池化学成分采样数据表

SECTION 2: INFORMATION ON INGREDIENTS

Product name: Valve Regulated Lead-Acid Rechargeable battery

Ingredient	CAS No.	Concentration	Hazardous Label
Inorganic Lead/Lead Compounds	7439-92-1	~ 72%	T
Sulfuric Acid	7664-93-9	~ 20%	C
Fiberglass Separator	65997-17-3	~ 2%	/
Container Plastic (ABS or PP)	9003-56-9 (ABS)	~ 5%	/
	9003-07-0 (PP)		/

表 2 给出了构成 VRLA 蓄电池的原材料的隐性碳排放(kg CO₂/kg)。计算出的加权平均值为每千克碳排放量 1.14 千克。

表 2
VRLA 蓄电池的原材料
碳排放

VRLA 构成	重量百分比	kg CO ₂ /kg
铅及铅化合物	72%	1.33
硫酸	20%	0.00
玻璃纤维隔板	2%	1.35
容器塑料 (ABS 或 PP)	5%	3.10
加权平均值		1.14

飞轮重量主要集中在轮毂上，轮毂主要由高强度钢材制成。图 3 以一个 AISI 4340 合金钢的化学成分为例来分析构成飞轮的原材料。

图 3
AISI 4340 合金钢化学成分
为例用来分析构成飞轮的
原材料。

Chemical Composition

The following table shows the chemical composition of AISI 4340 alloy steel.

Element	Content (%)
Iron, Fe	95.195 - 96.33
Nickel, Ni	1.65 - 2.00
Chromium, Cr	0.700 - 0.900
Manganese, Mn	0.600 - 0.800
Carbon, C	0.370 - 0.430
Molybdenum, Mo	0.200 - 0.300
Silicon, Si	0.150 - 0.300
Sulfur, S	0.0400
Phosphorous, P	0.0350

图 3 飞轮中所使用的高强度合金钢化学成分采样数据表。

表 3
飞轮原材料碳排放

要素	含量 (%)	假定值 (%)	隐含碳 (kg CO ₂ /kg)
铁, Fe	95.195 - 6.33	95.5%	1.91
镍, Ni	1.65 - 2.00	1.83%	12.4
铬, Cr	0.700 - 0.900	0.80%	5.4
锰, Mn	0.600 - 0.800	0.70%	3.5
碳, C	0.370 - 0.430	0.00%	0
钼, Mo	0.200 - 0.300	0.25%	32.2
硅, Si	0.150 - 0.300	0.20%	13.5
硫, S	0.04	0.00%	0.0
磷, P	0.035	0.00%	0.0
加权平均值			2.2

计算结果表明，每单位重量蓄电池比飞轮的碳排放率低。当考虑到蓄电池可高达 72%可回收(铅)时，这个结果并不出乎意料。

当比较蓄电池和飞轮的原材料时（见表 4），蓄电池重量确实会高很多，从而导致更高的隐含碳足迹。然而，与运行能耗产生的碳排放量相比，其差异幅值并不明显（在下一部分讨论）。

表 4

原材料的碳排放比较

蓄电池	1MW 解决方案 电池重量	碳排放 / kg	总计 (kg CO ₂)
蓄电池	11,700 kg	1.14	13,349
飞轮	2,748 kb	2.2	6,115

运行能耗 比较

VRLA 蓄电池浮充充电（又名涓流充电）相关的典型损耗为 0.2% 左右。该值记录于 UPS/蓄电池的规格书中。相反，很难在发表刊物上找到飞轮的损耗数据（保持飞轮旋转所需的能量）。当用飞轮替代蓄电池时，所测数据表明 UPS 上的额外损耗为 1.5%。该值可能因供应商不同而有所不同，预期的最低飞轮损耗为 1%。

运行损耗差异看起来是很小的比例，但是考虑到数据中心的寿命为 15-20 年，差值其实不小。表 5 展现了一个位于英国的 1MW 数据中心的运行能耗对比情况。

表 5

生命周期内运行能耗的碳排放

	飞轮	阀控密封式蓄电池
损耗百分比	1.00%	0.20%
负载 (kW)	1000	1000
损耗 (kW)	10	2
伦敦的碳排放率 (kg CO ₂ /kWh)	0.475	0.475
1 年的能耗 (kW-hr)	87,600	17,520
20 年寿命的能耗 (kW-hr)	1,752,000	350,400
碳足迹 (kg CO ₂)	832,200	166,440

在此 UPS 示例中，VRLA 蓄电池比飞轮在运行能耗上产生的碳排放少 80%。这种以 CO₂ 排放量 (kg) 的绝对差值在不同地方差异很大，原因是不同地区供电网的能源类型不同。表 6 给出了不同能源类型发电的碳排放差异⁴。

⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Life-cycle_greenhouse_gas_emissions_of_energy_sources

表 6

不同能源类型的碳排放

能源类型	发电所产生的碳排放量 (g CO ₂ /kWh)
水电	4
风电	12
核电	16
生物发电	18
太阳能发电	22
地热发电	45
太阳能光伏发电	46
天然气发电	469
燃煤发电	1001

由于蓄电池的耐温范围通常较窄，人们经常据此判断飞轮的碳足迹更小，因此分析假定蓄电池的额外制冷能耗为 30%（仅考虑制冷系统的 PUE 为 1.3），飞轮无额外制冷能耗（仅考虑制冷系统的 PUE 为 1.0）。这会导致蓄电池在整个生命周期内产生约 50,000 千克的额外碳排放（见表 7），但这只占生命周期中运行（运转）飞轮所需的额外能量所产生的碳排放的一部分（见表 5）。

表 7

由制冷耗能产生的碳排放

	飞轮	阀控密封式蓄电池
仅考虑制冷系统的 PUE	1.0	1.3
制冷功率 (kW)	0.00	0.60
年均的制冷能耗 (kW-hr)	0	5,256
生命周期内的制冷能耗 (kW-hr)	0	105,120
碳足迹 (kg CO ₂)	0	49,932

此外，上述比较分析中未考虑其他的一些“绿色”因素，但这些因素确实会对数据中心整体产生一定的影响，包括：

- **发电机燃料消耗/废气排放** – 对于风轮而言，发电机启动更频繁，导致产生更多的燃料消耗和废气排放。
- **发电机噪音** – 对于风轮而言，频繁启动的发电机意味着更大的噪音。

碳足迹分析

假设条件是所有建模过程的关键，鉴于上述分析中使用的具体参数会影响碳排放的计算结果，我们开发了一个权衡工具，允许数据中心决策人员根据自己数据中心的情况调节这些输入参数，从而确定这些参数的影响。用户可选择数据中心所处位置，输入蓄电池和风轮的损耗，指定制冷损耗，并选择维护和更换频率。

对结果影响最大的因素为：

- **所处位置**：根据发电所用能源的来源类型不同，不同国家之间（甚至是不同电力公司之间）的碳排放差异巨大。英国排放率的估值为 0.475 kg/kWh，而法国为 0.083 kg/kWh，中国为 0.83 kg/kWh。系统的能源越“清洁”，运行能耗对整个生命周期内碳足迹的影响越小。

- **飞轮的功率损耗：**很难在已发表刊物中找到飞轮的损耗数据，这很有可能是因为风轮的应用较少。当针对一个具体数据中心项目比较时，最好要求供应商提供具体的运行功耗数据。
- **蓄电池的功率损耗：**蓄电池的损耗通常较容易获取，一般可在相关文档查到。

图 4 即显示了权衡工具 16 **飞轮储能与电池储能碳足迹计算器**。在默认设置情况下（所处位置为中国，飞轮损耗 = 1%，VRLA 损耗 = 0.2%），蓄电池的生命周期内碳排放较飞轮减少 70%。

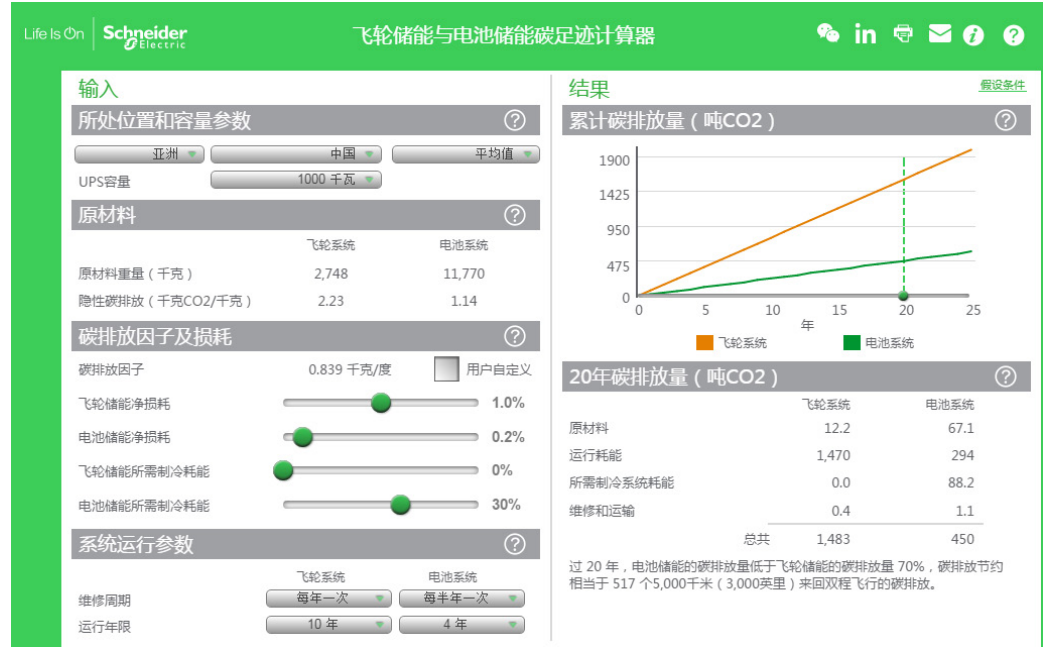


图 4

飞轮储能与电池储能碳足迹计算器 TradeOff Tool 权衡工具

结论

在分析飞轮和蓄电池储能时，无论哪种方式都可能比另一种“更绿色”。关键在于对“绿色”的定义，以及所做的假设和分析范围。飞轮通常因其所使用的原材料、较低（或没有）制冷要求以及预期较长的寿命，降低了对服务的要求而被误认为是“更绿色”。

本文中，我们关注整个生命周期内系统的碳足迹，分析表明，尽管飞轮在原材料、制冷和维护中产生的碳排放较少，但 VRLA 蓄电池在全球绝大多数地区的总体碳足迹更低。这是因为飞轮在某些方面所减少的碳排放和蓄电池在整个生命周期内减少的运行能耗碳排放相比，数量级较低。

施耐德开发的权衡工具（可在线获取）在给定的具体要求和假设的情况下帮助决策人员理解两种技术在碳排放方面的区别。



关于作者

Wendy Torell 是施耐德电气数据中心科研中心的高级战略研究员。Wendy 致力于数据中心设计与运行最佳实践的研究，发表白皮书和文章，并开发 TradeOff Tools 权衡工具来帮助客户优化数据中心环境的可用性、能效和成本。她还通过向客户提供关于可用性科学解决方案和设计实践方面的咨询，来帮助客户实现他们数据中心的性能目标。Wendy 在位于纽约州斯克内克塔迪的美国联邦学院 (Union College) 获得了机械工程学的学士学位，而后在罗德岛大学 (University of Rhode Island) 获得 MBA 工商管理硕士学位。Wendy Torell 是美国质量协会认证的工程师。



[数据中心储能技术比较：电池，飞轮和超级电容](#)

第 65 号白皮书



[静态 UPS 和旋转式 UPS 的比较](#)

第 92 号白皮书



[浏览所有白皮书](#)

whitepapers.apc.com



[飞轮储能与电池储能碳足迹计算器](#)

权衡工具 16



[浏览所有 TradeOff Tools™ 权衡工具](#)

tools.apc.com



联系我们

关于本白皮书内容的反馈和建议请联系：

数据中心科研中心

dcsc@schneider-electric.com

如果您是我们的客户并对数据中心项目有任何疑问：

请与您的施耐德电气销售代表联系，或登陆：

www.apc.com/support/contact/index.cfm

附录： 蓄电池回收证 书实例

图 A1 给出了一个描述施耐德电气承诺回收蓄电池的实例。这类文档用于向终端用户提供担保，确保废弃产品被适当处理，从而将碳影响降至最低。

图 A1

蓄电池回收授权书

