

News & Highlights

重力储能有望扩大规模

Sean O'Neill

Senior Technology Writer

可持续性极高的重力储能创新技术（通过举起与放下重物来储存或释放能量）现已步入全球视野。在与特殊目的收购公司 Novus Capital Corporation II 合并，并融资 2.35 亿美元后，Energy Vault 控股有限公司于 2022 年 2 月 14 日在纽约交易所上市[1]。

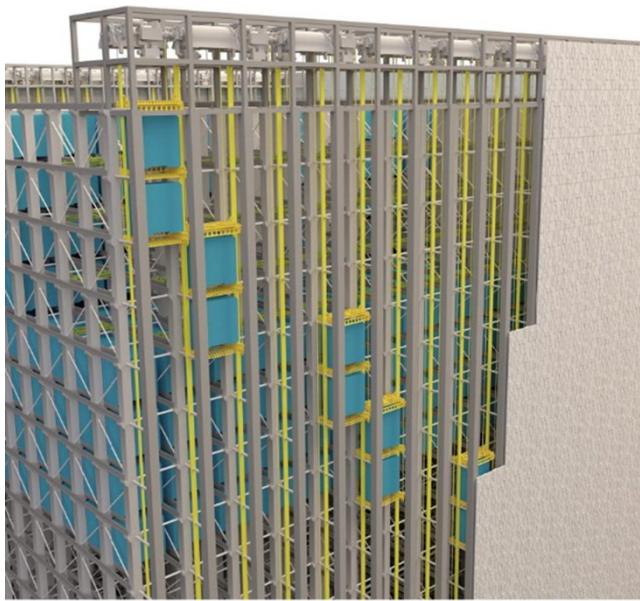
Energy Vault 公司旨在通过 Energy Vault 弹性中心 (EVRC) 推进“循环经济转型和全世界使用可再生能源”。EVRC 设计均为方形建筑，其 3D 网格型追踪系统（图 1）内含 10 MW·h “EVx” 储能模块，每个模块重约 130 030 t。Energy Vault 公司还获得了 Leonardo DiCaprio 等环保主义人士的高调支持[2]。当发电量超过电力需求，或电价较低时，EVRC 会通过电力将这些模块抬至高楼上，放置在支架上。当电力需求增加或电价上升时，这些模块就会下降以产生电力。

2021 年 10 月，Energy Vault 公司宣布与总部位于美国华盛顿特区的 DG Fuels 公司达成交易，为该公司多个项目提供共 1.6 GW·h 的能源储存，比如“结合光伏太阳能发电设施，提供绿色电力，同时根据 DG Fuels 公司绿氢发电载荷，稳固并调整相应的可再生能源”[3]。Energy Vault 公司称该项合作将带来超过 5 亿美元的收入[3]。Energy Vault 公司在美国加利福尼亚州西湖村以及瑞士卢加诺设立了办公室，此外还与澳大利亚墨尔本的矿业巨头必和必拓公司 (Broken Hill Propriety Company, Ltd., BHP)、昆士兰锌精炼厂 Sun Metals 公司和沙特阿拉伯达兰的石油天然气公司沙特阿美公司 (Saudi Aramco) 达成交易[4–5]。

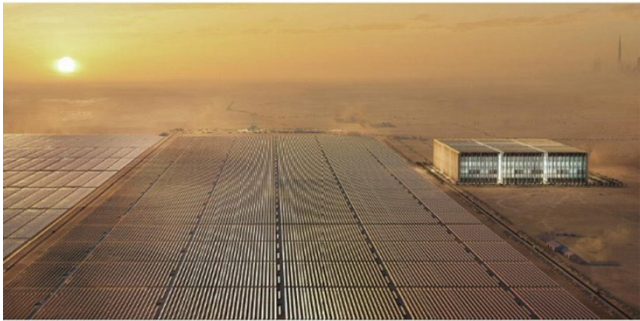
2022 年年初，Energy Vault 公司首席执行官 Robert Piconi 称，该公司将与中国天楹公司 (China Tianying) 携手，在江苏如东建设首个 EVRC 项目，容量达 100 MW·h。Piconi 说：“我们的项目在三月份开始动工，随后也会在世界其他地方开始建设一些项目。”

同样在 2021 年，位于英国爱丁堡的重力储能公司 Gravitricity（规模相对较小）已完成了与电网互联的 250 kW 示范项目。该项目采用两个 25 t 重的重物，悬挂高度最高为 15 m（图 2）。Gravitricity 公司现在计划在捷克共和国开始建设全尺寸重力储能系统，通过在已关停的煤矿中升降单个 1000 t 重的重物，可使该系统功率达 8 MW，储能容量达 2 MW·h [6]。Gravitricity 公司的项目开发经理 Chris Yendell 说道：“将计划在摩拉维亚-西里西亚州开展该项目。那里有数个荒废的煤矿。在 2021 年与 2022 年初步观察现场后，我们的下一步建设活动包括进一步细化可行性研究与前端工程设计。”在前端工程设计方面，2022 年 2 月，Gravitricity 公司从英国政府处获得了 115 万美元拨款，用于研究如何在北英格兰建设多重力储能设施[7]。

重力储能的概念由来已久。与抽水蓄能水电站的工作原理相同，如今重力储能技术已经非常成熟。电力供应超过需求时，抽水蓄能水电站从低地势水库抽水，输送至高地势水库。必要时，水电站将开闸放水，水流经过涡轮发电。该充/放电的“往返”效率 (round-trip efficiency) 可达同效能尺度电池的 80% [8]。考虑到一天之内电力需求



(a)



(b)

图1. (a) Energy Vault公司的每“EVx”重力储能模块，每块模块预计储存10 MW·h能量。设计EVRC需要至少4块并排模块，并且最高抬升至120 m高；在该维度下，储存100 MW·h能量大概需要9713 m²土地。在每个“EVx”模块结构中，大概有1300个30 t左右的重物（蓝色）被放置在支架上。当“充电”时，这些重物被抬起（黄色）并在建筑高层储存；放电时则相反。(b) 太阳能发电站与相邻的EVRC，该EVRC有9块方形“EVx”模块。在发电量高时，EVRC将通过重力势能“稳固并形成”复合发电设施的能源，并在日落后再转化为电力。来源：Energy Vault（经许可）。



图2. Gravitricity公司的250 kW重力储能示范项目，已连接至电网。塔高15 m，利用两个25 t重物存储能量。来源：Gravitricity（已授权）。

和价格浮动，抽水蓄能在经济上具有可行性。Piconi称，Energy Vault公司首个商业示范单元采用起重机方案，2020年7月于瑞士提契诺州完工（图3）[9]，“来回”效率可达到75%。他预计公司下一代“EVx”的效率可达到80%~85%。



(a)



(b)

图3. Energy Vault公司早期技术商业示范单元的顶部(a)和基座(b)。该技术通过起重机抬升或放下35 t的重物来储存/释放能量。该项目位于瑞士提契诺州，于2020年完工，并已连接至国家电网。该公司后来决定更换项目为图1中的封闭式、模块化设计。来源：Energy Vault（经许可）。

据估计，当前世界将近96%的能源储备容量由抽水蓄能提供。2019年，抽水蓄能容量已经达到1.3 TW [10]。从历史角度看，抽水蓄能与煤炭发电和核能发电结合得很好，后两者运行效率高，输出稳定。但抽水蓄能与每天涨落落的电力需求不匹配[10]。现在，针对气候变化问题，世界各国正推进去碳化以及降低化石燃料消耗。据预测，在未来几十年内可再生能源发电，尤其是风力发电和太阳能发电将迅速成为主流[11–12]。但是，考虑到这些能源本质上是易变的，预测储能容量需求也会持续上涨。确实如此，部分专家警告称，如果储能容量不能实现持续增长，那么可再生能源发展也可能停滞[13]。

国际能源协会（International Energy Association）预

测，虽然抽水蓄能项目成本高昂，还依赖特定地理条件，但在储能需求的驱动下，抽水蓄能项目在未来10年内将实现创纪录增长[14]。针对预计储能需求，工业也在大力发展化学储能。而其中，锂离子电池将在发展中扮演重要角色，比如特斯拉公司的Megapack储能项目将达到公用事业规模[15]。彭博新能源财经（Bloomberg New Energy Finance）预测全球储能（排除抽水蓄能）容量在2030年将达到1 TW·h，是2020年可用容量的20多倍（图4）[16]。该目标大部分将由锂离子电池完成，不过新型公用事业规模的“液体电池”也在开发中[17]。但Gravitricity公司首席工程师Miles Franklin认为锂离子电池储能方案仍存在缺陷。“锂离子电池很适合手机和电动车，但是不适合静态、与电网互联且不要求高能量密度的设施。”

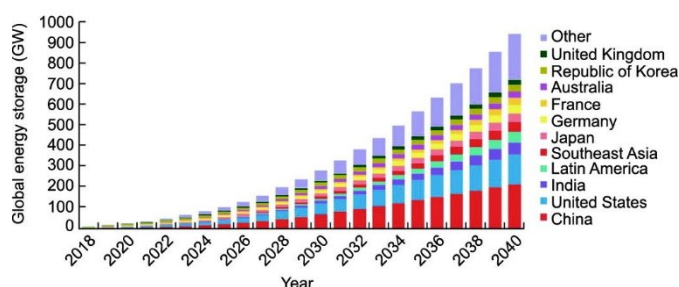


图4. 全球累计储能部署（排除抽水蓄能），以GW显示，预计在未来数十年内将实现飞跃，部分原因是公共事业规模锂离子电池储能成本预计将下降。来源：Bloomberg New Energy Finance（经授权）。

部分人支持重力储能系统，理由是该系统不仅具备电池的响应速度，也具备抽水蓄能的优点。此外，该系统并不需要巨额的资本支出或特定地理条件。工作原理也很简单：储存的能量=质量×抬升高度×重力。重力为常量，问题在于如何最大化质量或高度，最好两者均能实现最大化。Energy Vault公司的策略为将多个30 t重的重物从120 m高或以下高度放下。相较之下，Franklin表示，通过将使用寿命到期的煤矿竖井重新翻修为储能设施（图5），Gravitricity公司选择用单个或两个重1000 t的重物（钢结构并内置高密度压载物）进行储能。“现有竖井改建项目具有明显效益，因为现有竖井已经建好，而我们不需要再花钱挖一个新竖井了。”

作为平衡能源需求和供应的重要方面，储能系统设施能帮助“调峰”，即让储能运营商在低能源需求时可以低价购电，将所购能源作为重力势能进行存储，并在电价峰值时释放能源。Franklin说，Gravitricity公司的示范项目显示该储能设施能在1 s内达到全额电力输出。“在爱丁堡示范项目中，重物下落速度峰值为0.62 mps（mps代表米每秒）。我们实现的加速度让其电力输出能迅速达到峰



图5. Gravitricity公司的重力储能系统，利用现存矿井或专门竖井修建。在竖井内抬升重约1000 t的单个重物以储能，或下降以释放能量。来源：Gravitricity（已授权）。

值。”这种水平的反应速度意味着，此类重力储能设施能为更大的电网系统提供短期电网平衡服务，在能源需求大于发电时或相反的情况下保持电网处于最佳状态。

但是，根据美国加利福尼亚州圣芭芭拉重力发电公司（Gravity Power）首席技术官Jim Fiske的说法，Gravitricity公司和Energy Vault公司研发的重力储能技术不足以满足预期的巨大储能需求。Fiske说道：“重力储能的真正需求并非调峰这种辅助作用，而是大量储能。用液压，你能举起几百万吨的重物。”

重力发电公司已经设计了一套储能系统，其中升降的重物是一个柱塞，由加固岩体制作而成，在封闭、灌满水的竖井中进行上下移动以存储/释放能量。该竖井高度为柱塞高度的两倍。柱塞由竖井底部抽水抬升，所用技术与抽水储能相同。当需要电力时，柱塞下沉，将水推入涡轮机进行发电（图6）。Fiske称：“其本质上还是抽水蓄能——动力源与抽水蓄能相同，而且液压技术已经非常成熟了。”Fiske预想，全尺寸柱塞应有500 m高且直径为50 m。他认为：“一个大型系统能连续8 h甚至16 h将功率维持在400 MW。”不过，该概念依然停留在计划阶段，重力发电公司还需要商业合作伙伴和投资。

南非独立研究员兼工程师Christoff Botha，在看过一系列重力储能系统设计[18]后，对重力发电公司的方案评价道：“人们一般都认为重力储能系统‘是个好主意’。但是当你告诉他们需要多大的重量才能运行时，人们突然又会说‘那也太重了，这肯定行不通。’重力发电公司的模型很诱人，这是因为系统不仅不需要缆绳，而且无论重量多大，水都能抬起重物。”

支持这项技术的人称，所有类型的重力储能系统都有两大卖点，第一是环保。重力储能系统原则上可持续性极高，不排放温室气体，同时重物不会分解。不过，尚不清

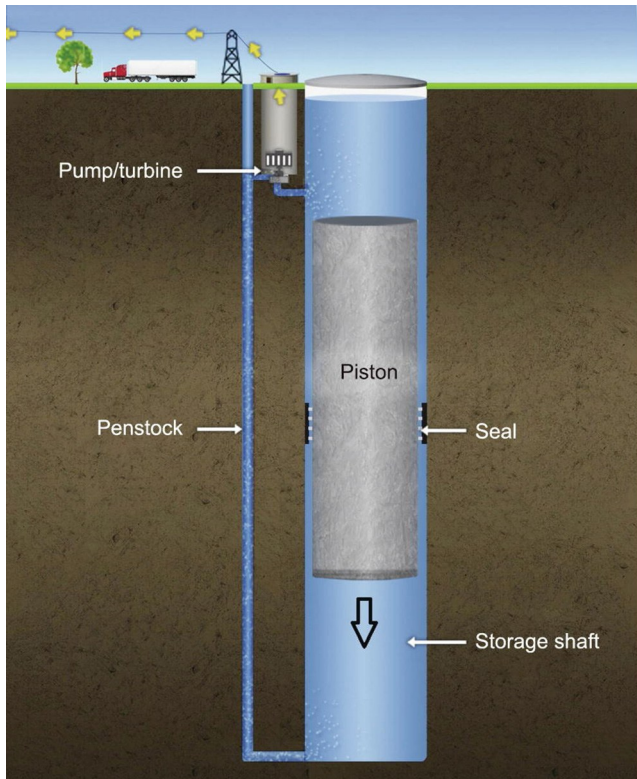


图6. 重力发电公司的重力储能系统概念所用的技术与抽水蓄能相似。一个由加固岩体制成的大型柱塞，高约为500 m，直径为50 m，垂直放置在一个灌满水的密闭系统（图像不按比例绘制）中。当储存能量时，电力被消耗，将水泵入底部舱室，抬升柱塞。放电时，柱塞下落，将水冲入涡轮发电机。来源：Gravity Power（已授权）。

楚 Energy Vault 公司在制造大型地上设施和大量重物中产生的碳排放会对整体可持续性造成多大的影响[19]。

第二个卖点是低平准化储能成本[20]，即使用寿命中必须支付的建设和运维成本除以存储/释放能源单位得出的价格。重力储能系统的工程难度较低，比如 Gravitricity 公司的方案，意味着设施具有长期生产力，而维修保养需求较少。Franklin 说：“降低平准化储能成本的关键因素不在于低资本支出。事实上，首日成本预计将不低于锂离子电池。关键因素在于重力储能系统的使用寿命，即便不超过使用寿命，也不能少于现有电网基本建设的使用寿命。”根据比较，锂离子电池的储能与放电会导致电池性能退化，从而使其使用寿命缩短至10~15年，或3000次循环[21]，更不用提锂离子电池所需元素的开采与循环使用中的环境问题[22–23]。

除了绿色认证和潜在的长期收益，重力储能行业尚在襁褓中，未来前景尚不清晰。除了 Energy Vault 公司，投资重力储能系统的公司依然相对较少。Piconi 说道：“除了 Energy Vault 公司以外，还有4~5家公司打算进军该行业，但是他们没有一个能成功获取创业基金。可持续、经济地解决这个问题很难。”

锂离子电池和流动电池的成本不断下降[24]，市场份额不断上升。但是这于事无补。英国爱丁堡大学电力电子学和智能电网专业（Power Electronics and Smart Grids at the University of Edinburgh, UK）讲师 Thomas Morstyn 称：“特定储能技术可行并具有潜在价值的原因很多，然而其中只有一部分是纯技术原因。直到最近部分国家才研发出了基于电网的清洁电池储能商业模型。我们是现在需要重力储能系统，还是当可再生能源普及之后才需要重力储能系统？”

References

- [1] Energy Vault Holdings, Inc., begins trading on the New York Stock Exchange [Internet]. San Francisco: Business Wire; 2022 Feb 14 [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.businesswire.com/news/home/20220214005285/en/Energy-Vault-Holdings-Inc.-Begins-Trading-on-the-New-York-Stock-Exchange>.
- [2] Energy Vault announces appointments to its board of directors and formation of new strategic advisory board [Internet]. San Francisco: Business Wire; 2022 Feb 24 [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.businesswire.com/news/home/20220224005343/en/Energy-Vault-Announces-Appointments-to-Its-Board-of-Directors-and-Formation-of-New-Strategic-Advisory-Board>.
- [3] Energy Vault announces energy storage agreement with DG fuels to provide 1.6 GW·h of energy storage capacity in support of sustainable aviation fuel projects [Internet]. San Francisco: Business Wire; 2021 October 27 [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.businesswire.com/news/home/20211027005554/en/Energy-Vault-Announces-Energy-Storage-Agreement-with-DG-Fuels-to-Provide-1.6-GW-h-of-Energy-Storage-Capacity-in-Support-of-Sustainable-Aviation-Fuel-Projects>.
- [4] Energy Vault announces strategic agreement with BHP to support decarbonization of natural resources production [Internet]. San Francisco: Business Wire; 2021 Dec 15 [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.businesswire.com/news/home/20211215005317/en/Energy-Vault-Announces-Strategic-Agreement-With-BHP-to-Support-Decarbonization-of-Natural-Resources-Production>.
- [5] Saudi Aramco Energy Ventures invests in energy vault [Internet]. San Francisco: Business Wire; 2021 Jun 2 [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.businesswire.com/news/home/20210602005350/en/Saudi-Aramco-Energy-Ventures-Invests-in-Energy-Vault>.
- [6] Gravitricity Projects—renewable energy storage [Internet]. London: Gravitricity [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://gravitricity.com/projects/>.
- [7] Longer duration energy storage demonstration programme [Internet]. London: UK Government; 2022 Feb 23 [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.gov.uk/government/publications/longer-duration-energy-storage-demonstration-programme-successful-projects/longer-duration-energy-storage-demonstration-programme-stream-1-phase-1-details-of-successful-projects>.
- [8] Utility-scale batteries and pumped storage return about 80% of the electricity they store [Internet]. Washington, DC: US Energy Information Administration; 2021 Feb 12 [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=46756>.
- [9] EV1 commercial demonstration unit [Internet]. Lugano: Energy Vault; [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.energyvault.com/cdu>.
- [10] Blakers A, Stocks M, Lu B, Cheng C. A review of pumped hydro energy storage. Prog Energy 2021;3:022003.
- [11] O' Neill S. Giant turbines poised to claim offshore wind. Engineering 2021; 7: 894–6.
- [12] O' Neill S. Perovskite pushes solar cells to record efficiency. Engineering 2021; 7:1037–40.
- [13] Leonard MD, Michaelides EE, Michaelides DN. Energy storage needs for the substitution of fossil fuel power plants with renewables. Renew Energy 2020; 145:951–62.
- [14] Executive summary—hydropower special market report—analysis [Internet]. Paris: International Energy Agency; 2021 July [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report/executive-summary>.
- [15] Introducing megapack: utility-scale energy storage [Internet]. Austin: Tesla Inc; 2019 Jul 29 [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.tesla.com/blog/>

- introducing-megapack-utility-scale-energy-storage.
- [16] Global energy storage market set to hit one terawatt-hour by 2030 [Internet]. London: BloombergNEF; 2021 Nov 15 [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-set-to-hit-one-terawatt-hour-by-2030>.
- [17] Stover D. We're going to need a lot more grid storage. New iron batteries could help [Internet]. Cambridge: MIT Technology Review; 2022 Feb 23 [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.technologyreview.com/2022/02/23/1046365/grid-storage-iron-batteries-technology>.
- [18] Morstyn T, Botha CD. Gravitational energy storage with weights. In: Cabeza LF, editor. Encyclopedia of energy storage. Amsterdam: Elsevier; 2022. p.64–73.
- [19] Barnard, M. Energy vault loses \$1.2 billion/40% market cap, CO₂e/kW·h worse than natural gas [Internet]. Long Beach: CleanTechnica; 2022 Apr 20 [cited 2022 April 27]. Available from: <https://cleantechnica.com/2022/04/20/energy-vault-loses-1-2-billion-40-market-cap-co2e-kwh-worse-than-natural-gas>.
- [20] Gravity-based storage [Internet]. London: Storage Lab; 2018 Oct [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.storage-lab.com/gravity-based-storage>.
- [21] da Silva Lima L, Quartier M, Buchmayr A, Sanjuan-Delmás D, Laget H, Corbisier D, et al. Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. *Sustain Energy Technol Assess* 2021;46:101286.
- [22] O'Neill S. Battery recycling challenge looms as electric vehicle business booms. *Engineering* 2021;7:1657–60.
- [23] Dehghani-Sanij AR, Tharumalingam E, Dusseault MB, Fraser R. Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;104:192–208.
- [24] Schmidt O, Melchior S, Hawkes A, Staffell I. Projecting the future levelized cost of electricity storage technologies. *Joule* 2019;3:81–100.