

飞轮储能、方兴未艾——飞轮储能的技术、应用与潜力

Photo by Rachael Rinchiuso
Kearney, Chicago

KEARNEY

飞轮是一种新的储能技术——利用飞轮转子的高速旋转,将电能转化为机械能存储,再进行能量释放。

相比锂电池等其他储能技术,飞轮具有**充放电频次高、响应速度快、功率大、且放电时间短**的特点,适合应用在地铁能量回馈、UPS 不间断电源、电网调频三种场景中。

科尔尼预测,若飞轮储能成本能够在未来 3-5 年内下降 50%、且绿色环保政策进一步引导,飞轮储能技术应用在未来几年将实现高速增长,科尔尼中性测算,到 2026 年飞轮储能累计装机量可增长至 ~572MW,到 2030 年可进一步增长至 ~1.62GW。

一、飞轮储能技术不断突破并逐步成熟

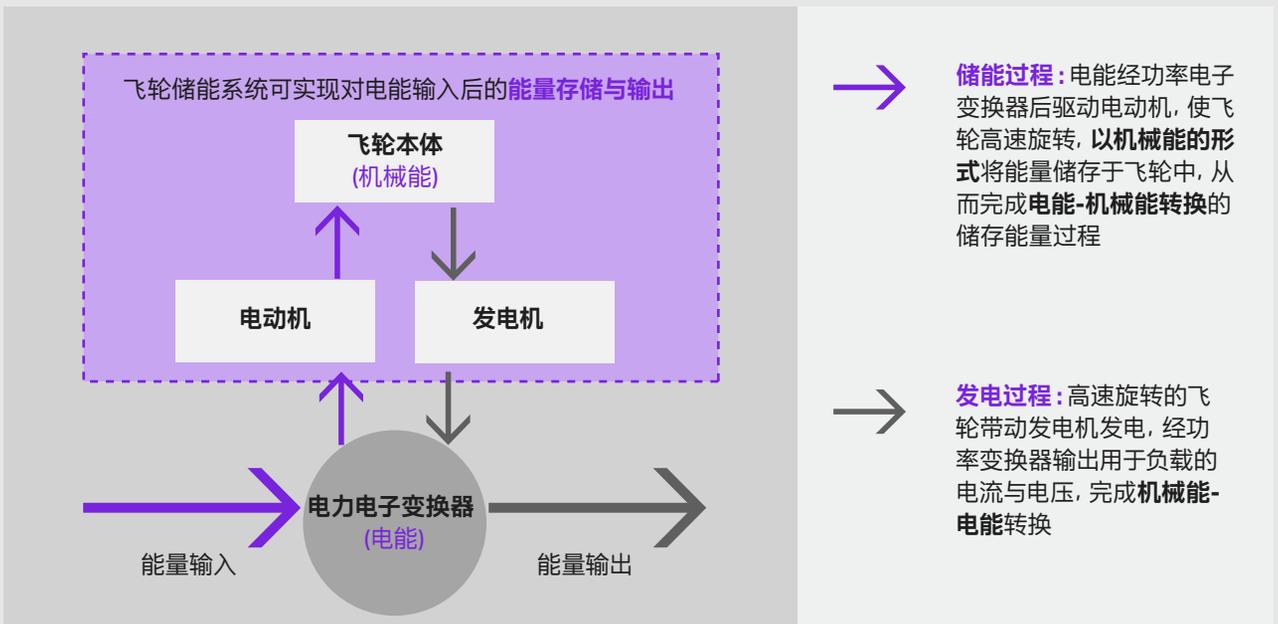
飞轮储能是一种源于航天领域的先进物理储能技术，利用电机驱动飞轮高速旋转，将电能转换为机械能进行存储，并在需要的时候利用高速旋转的飞轮惯性，经功率变换器输出用于负载的电流与电压，又将机械能转化为电能输出（如图 1）。

飞轮储能装置的核心结构包括电机、飞轮转子、轴承和真空室四部分，其储存能量 (E) 的大小主要与转动惯量 (J) 和角速度 (ω) 相关。由于 $J=mr^2$ ，因此为获得更大的转动惯量 (J)，需要采用大直径和大质量的飞轮。然而单纯提

高质量而使用沉重的飞轮在高速旋转时容易产生极大的离心力，如超过飞轮材料极限强度就会出现较大的安全隐患。

进一步提高角速度 (ω) 则大有可为，可通过提升**轴承技术**和**真空技术**实现。一方面，通过更优的磁悬浮控制技术使轴承在高速旋转中保持可靠性、承载力，提高可应许的角速度上限；另一方面，通过提高真空度和真空散热，减少飞轮高速转动中的风阻（摩擦力），提高角速度。

图 1
飞轮储能系统工作原理



来源：案头研究，科尔尼

另外选用材料的强度与密度将深刻影响飞轮储能的储能能量 (E)，材料强度越高、同等质量下密度越低，储能能量就越大。

可见，提升飞轮的轴承技术、真空技术和材料性能是提高可储能量的关键 (如图 2)。

中外之间由于不同的应用场景，在飞轮技术路线的选择方面也存在较大差异：

欧美国家受到更严格的环保政策驱动，对 UPS 和地铁节能场景的储能装置的体积和质量有较严格的限制，欧美的发电系统多采用燃气轮机发电，本身具有较好的调频性能，因此更注重将飞轮应用于 UPS 和地铁能量回馈，其技术发展方向更偏轻量化与高能量密度，而非单机能量容量最大化。

中国目前 UPS 储能电池仍以铅酸电池为主，对飞轮的刚需不强；但电网调频是中国发电体系的刚需，对单机能量容量要求更高，因此国内更倾向于研发高单机储能能量的飞轮装置，并应用于电网调频场景方向。另外飞轮面临与锂离子电池的竞争，因此产品的成本竞争力也尤为重要。

技术路线选择方面，中国多选择应用广泛的主动悬浮和混合悬浮技术，而欧美国家更注重适用于轻量化飞轮的被动悬浮技术。在转子材料技术和真空散热技术方面，中国与欧美相比仍有较大差距。

图 2
飞轮储能技术难点

技术路线		效果/应用	技术难度
磁悬浮技术 提高转速 提升可靠性 降低损耗	主动悬浮技术	— 通过电磁铁传感器检测被悬浮转子的位置，借助电子控制系统矫正电磁铁的电流，实现转子悬浮	— 悬浮稳定性中等
	被动悬浮技术	— 不通过控制系统，而是利用永磁体/超导体自身的电磁力使转子完全悬浮	— 悬浮稳定性中等，对于 <1,000 kg 的飞轮效果最好
	混合悬浮技术	— 主动与被动悬浮混合的技术，由永磁体提供偏置静磁场、由电磁铁提供平衡负载干扰的控制磁场	— 悬浮稳定性最强
转子材料技术 提高转速	金属材料	— 如高强度钢、钛合金、铝合金等材料，其强度较大、密度较高	— 密度高，限制转速；材料破裂的破坏性强
	复合材料	— 如玻璃纤维、碳纤维等材料，其密度约为金属材料 1/5，而比强度(强度/密度)为金属材料的 4 倍	— 密度低，提升转速；材料破裂破坏性弱(绒毛) <small>设计复杂、制备难、成本高</small>
真空散热技术 提高可靠性	被动散热	— 如辐射散热：机体以辐射方式将热传给外界	— 散热效果较弱，超过机体可承载热量则难易散热
	主动散热	— 如液冷散热：轴内配备压缩式冷水机，冷却液流过发热位置时吸收热量，增加热对流	— 散热效果更强 <small>工艺结构设计复杂度高</small>

国外领先的技术领域
来源：案头研究，文献整理，科尔尼

二、飞轮储能的应用场景不断打开, 尤其在地铁、电网和UPS相关领域

相比市场主流的锂电池, 飞轮储能能在循环次数、瞬时功率、响应速度、安全性等方面优势突出, 但也存在能量密度低、自放电率高的劣势 (如图 3)。

基于飞轮储能的特点, 其最适用于**充放电频次高、响应速度快、功率大、且放电时间短**的应用场景, 即**地铁能量回馈、不间断电源和电网调频**三大领域, 目前商业化应用正逐步开展 (如图 4)。

1. 地铁能量回馈

地铁进站刹车时会产生能量造成网压提升, 而离站启动时网压瞬间下降, 因此对电网的稳定性造成冲击, 不仅增加了制动系统相关回路的安全隐患, 也会造成大量的能源浪费。**地铁储能装置具有循环次数多、瞬时功率高的技术特点。**以飞轮储能与超级电容为代表的储能装置, 节能效果比中压回馈系统更强。对比飞轮与超级电容, 飞轮的节电量更大, 占地面积更小、且可靠性更高, 但也存在初始成本高与回收周期长的劣势。

图 3
储能技术特性对比

技术路线	充放电效率	功率密度 (W/kg)	能量密度 (Wh/kg)	响应时间	放电时间 (ms-h)	储能时间	自放电 (每天)	寿命 (年)	循环次数 (次)	环境污染	可靠性/安全性
飞轮储能	0.93-0.95	1,000	5-150	毫秒级	ms-15m	秒-时	100%	15-20	>20,000	无	较高: 工作温度 -20-50°C, 每年维护1次, 且工序简单
锂离子电池	0.85-0.95	50-800	150-300	百毫秒级	0.5-8h	分-天	0.1-0.3%	5-15	1,500-4,500	中等	较低: 工作温度 0-40°C, 过热有爆炸隐患, 维护工序较复杂

飞轮储能核心优势:

- 充放电循环次数多、使用寿命长
- 充放电响应极快
- 瞬时功率大
- 可靠性、安全性强



飞轮储能核心劣势:

- 能量密度较低 (单位重量的电池所储存的能量少)
- 自放电率高, 闲置状态电量损耗大



在地铁能源回馈应用领域,飞轮储能的收益主要来源于节省的电费和刹车系统磨损费成本。以北京地铁房山线为例,科尔尼预估其飞轮储能的投资回本周期约为7年,10年的内部收益率约为10%。

根据业内专家预估,未来3~5年飞轮储能的单价有望从目前的约3000元/kW降低为约2000元/kW,届时降本后投资回收周期将缩短为约5年,且10年内部收益率提高为20%以上。

2. 不间断电源 (UPS)

在不间断电源UPS场景下,飞轮主要应用于四个领域:高端医疗(如血液透析器等医疗设备等)、高端制造(如半导体制造业等)、数据中心(保障重要数据安全性)、及电源车(保障重要会议的供电正常)。**上述场景耗电量大、断电容忍度极低,因此需要储能技术达到百毫秒级的响应速度与较高的瞬时功率。**

飞轮能够以绿色环保的方式保障UPS供电稳定性,并作为第二电源,持续供电30-40秒,直至系统成功切换至备用电源。

目前,制约飞轮在UPS中应用的最大瓶颈在于成本,其初始成本高(是铅酸电池的4倍,锂电池的2倍),但其运营成本 and 元件更换费用较传统铅酸电池有显著优势(每年节省约60%运营成本,5年内元件更换费用为铅酸电池的1/40),因此总体成本5年后有望优于传统蓄电池。

3. 电网调频

在电网调频的应用场景下,飞轮可以凭借大功率密度与高可靠性的特点,有效辅助传统的风电/水电调频,维护电网负荷平衡。

相比火电/水电机组、锂电池等其他调频方案,飞轮具有诸多优势——无污染、耐高温、可频繁充放电、功率密度大、寿命长、更稳定、且维护成本低,随着技术成熟带来的成本逐步降低,飞轮有望成为未来电网调频增量市场中的最重要手段。

以某300MW的火电机组配置9MW/1.8MWh飞轮储能系统为例,科尔尼预估该项目飞轮的投资回收周期约5-6年,10年内部收益率约15%;投资回收周期随略长于同等规格锂电池(4~5年),但10年内部收益率略高于锂电池(14%),并且具有较好的安全性和环保性。

图4
与飞轮储能优势适配的应用场景

适用场景	应用领域	储能需求	飞轮核心价值/劣势
A 能量回馈 	— 主要应用于地铁轨道交通	循环次数多 节能效果好 清洁环保 占地面积小 经济性强	充放电次数多、使用寿命长 瞬时功率高、快速吸收地铁释放的能量,节能效果好 对环境无污染、不产生废热 占地面积小、可模块化灵活安装至各站点 节电量更大,但初始成本与回收周期长
B 不间断电源 (UPS) 	— 主要应用于高端医疗、高端制造、数据中心、电源车	响应快、功率高 清洁环保 经济性强	可达毫秒级响应速度,瞬时为高端场景提供大量过渡电量 对环境无污染 TCO整体比锂电池、铅酸电池更优,但初始成本高
C 电网调频 	— 主要应用于新能源电网调频、火电调频、水电调频	放电响应快 使用寿命长 清洁环保 经济性强	可达毫秒级响应速度,迅速应对电网频率波动 充放电可循环次数多 对环境无污染(相比锂电池) 今年起有效成本与锂电池逐步趋同,回本周期接近

来源: 案头研究, 专家访谈, 科尔尼

三、国内飞轮市场前景可期

1) 地铁能量回馈

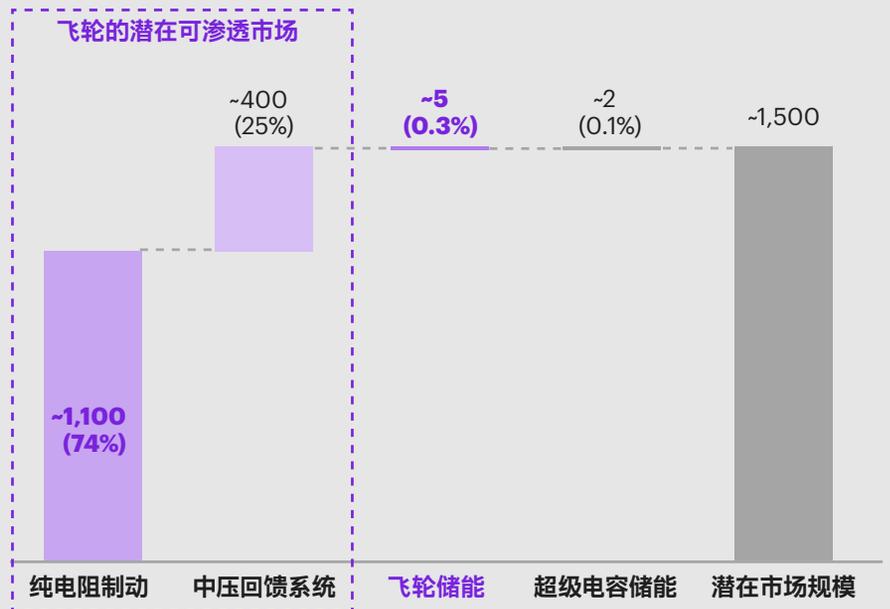
地铁能量回馈属于**趋势向好的培育型市场**，尽管目前飞轮储能在中国地铁能量回馈场景的累计装机规模仅为5MW，但其潜在市场规模(装机量)可超过1500MW(如图5)。飞轮在该场景中提升渗透率存在三大抓手：其一，初始成本下降、投资回报周期缩短；第二，市场对全生命周期成本的认可度提升；第三，重大事故防范能力提升。

2) UPS 不间断电源

UPS 不间断电源属于**非刚需的政策引导型市场**。根据飞轮储能的高端医疗、高端制造业、大型数据中心和电源车四个应用场景的潜力预判，预计**飞轮在 UPS 不间断电源的潜在市场规模可达约 900MW，而目前的市场份额仅为 2%**(如图6)。飞轮在该场景下市场份额提升的关键因素包含初始成本的降低、客户对 TCO 的认可度的提升、以及最重要的环保政策驱动。

图 5
中国地铁能量回馈的细分结构

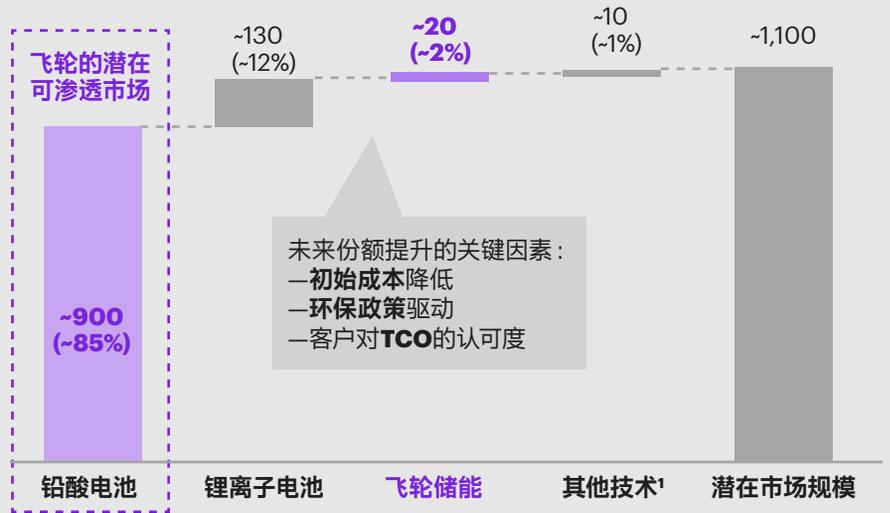
中国地铁能量回馈潜在市场规模
与各技术路线渗透率
[累计至2021, MW]



来源：专家访谈，科尔尼测算

图 6
中国UPS储能潜在市场规模与
各技术路线份额

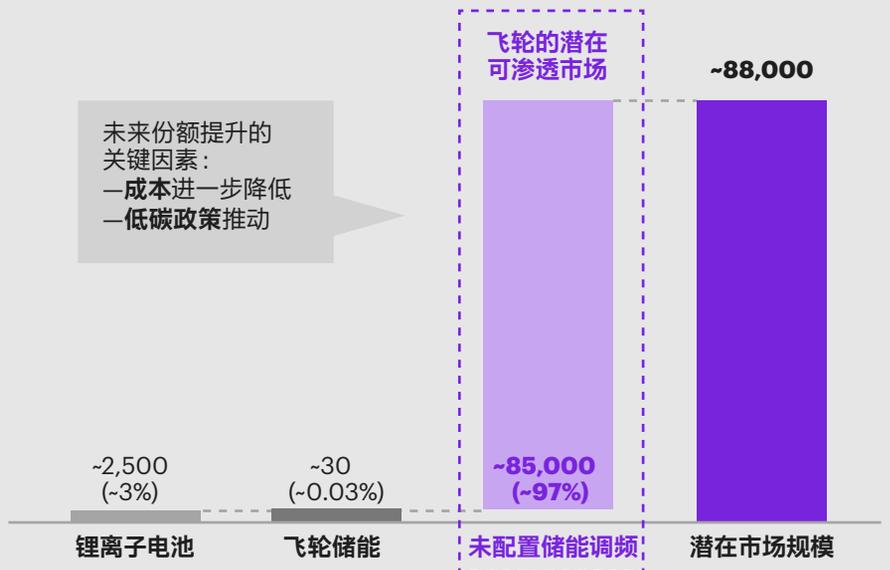
中国UPS储能潜在市场规模与
各技术路线份额
[累计至2021, MW]



来源：案头研究，专家访谈，科尔尼测算

图 7
电网调频储能潜在市场分析

中国调频储能潜在市场规模
与各技术路线份额
[累计至2021, MW]



来源：案头研究，专家访谈，科尔尼测算

2) 电网调频

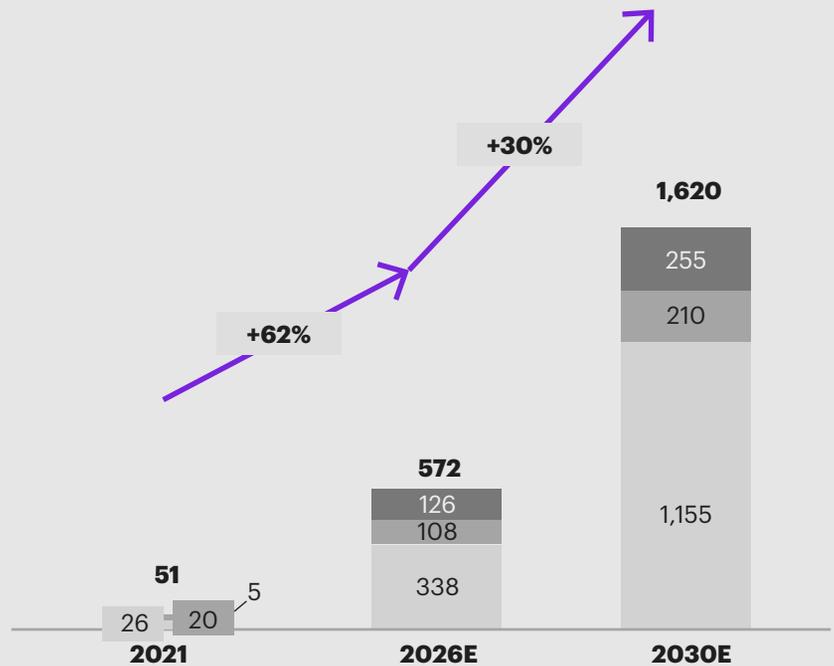
科尔尼认为飞轮应用于电网调频属于**高潜力的蓝海市场**。随着技术提升, 2022 年以来, 飞轮在电网调频应用领域的有效成本已经与锂电池逐步接近, 未来的市场竞争格局有望发生变化。科尔尼预测, 飞轮在中国电网调频领域的潜在市场规模高达 **~85,000MW** (如图 7)。

综上所述, 若飞轮储能成本在未来 3-5 年能够下降 ~50%、且绿色环保政策进一步引导, 飞轮储能应用未来几年将实现高速增长。结合业内专家意见、以及对不同场景的需求判断, 科尔尼中性测算, 到 2026 年飞轮储能累计装机量可增长至 **~572MW**, 到 2030 年可进一步增长至 **~1.62GW** (如图 8)。

图 8
中国飞轮储能市场规模预测

2021年 - 2030年飞轮储能累计规模
[MW]

- 轨道交通
- 不间断电源
- 电网调频



来源: 案头研究, 专家访谈, 科尔尼测算

四、飞轮储能企业需要把握与平衡六大核心要素，方能在市场开拓与竞争中取得优势

国内飞轮储能在技术及商业化指标上共有**六大关键成功要素**。除攻克**单机能量、功率、放电持续时长**等技术难点外，还需要在**成本把控、市场拓展、战略合作**多方面布局，以实现商业化成功。

— **成功要素一：单机最大能量**。单机最大能量是体现飞轮单体储能能力，是飞轮储能中最难突破的技术点之一。具有强储能能力的单体飞轮在技术上可更高效适用于大体量项目；且投资成本优于多个小能量飞轮并联实现的同等总能量规格飞轮。

— **成功要素二：单机最大功率**。单机最大功率体现飞轮充放电速度的快慢。大功率电池可适应多种需求的快速充放，满足电网、UPS、轨道交通能量回馈等大功率需求场景。

— **成功要素三：放电持续时长**。飞轮储能的持续时长受使用场景影响，其中电网调频所需的持续时间最长——大于2分钟（一次调频1-2分钟，二次及以上调频>3分钟），而UPS持续时间仅需30-40秒。因此飞轮应根据应用场景适配所需的放电持续时长。

— **成功要素四：价格竞争力**。价格对于国内项目获取具有较高的重要性，体现了飞轮制造商的成本把控能力。强大的供应链管理能力及机电一体化技术有助于降低成本。

— **成功要素五：单项目装机量**。单体项目的装机量大小是衡量商业化发展程度的重要指标。而产品一致性（产品性能稳定，单体差异小）和市场扩展能力（具备专业销售团队帮助渠道覆盖）是厂家获取大规模项目背后的关键因素。

— **成功要素六：战略合作伙伴**。绑定业内相关高校 / 大型能源企业合作开拓市场，获取其高销售额、大容量的项目和稳定的下游大客户合作关系，是飞轮储能和行业的重要市场拓展手段。

作者



滕勇
科尔尼全球合伙人, 上海
yong.teng@kearney.com



王侃
科尔尼公司董事, 北京
roger.wang@kearney.com



陈沛祎
科尔尼公司董事, 上海
peiyi.chen@kearney.com

本文作者感谢科尔尼咨询顾问黄诗琪、雷茜对于本文做出的贡献。

作为全球领先的国际管理咨询公司, 科尔尼自成立近一百年来, 始终服务于全球各行业优秀的企业、公共组织和非盈利机构, 是可信赖的顾问之选。遍布 40 多个国家的精英人才是我们的立身之本; 对工作和客户的无限热情是我们的动力源泉; 精于战略更敏于实施使我们与众不同。

kearney.com

For more information, permission to reprint or translate this work, and all other correspondence, please email insight@kearney.com. A.T. Kearney Korea LLC is a separate and independent legal entity operating under the Kearney name in Korea. A.T. Kearney operates in India as A.T. Kearney Limited (Branch Office), a branch office of A.T. Kearney Limited, a company organized under the laws of England and Wales. © 2023, A.T. Kearney, Inc. All rights reserved.



KEARNEY