

至 4000 美元每公斤。

值得注意的是，火箭回收并非只是商业航天的“专属技能”，它对载人登月、空间站建设等国家级重大工程而言同样具有长远价值。中国载人月球探测工程稳步推进，长征十号系列火箭和梦舟飞船是核心装备。2026 年 2 月，长征十号火箭低空演示验证与梦舟飞船最大动压逃逸飞行试验在文昌成功实施，其中就验证了火箭回收技术。可以预见，未来载人登月中高频次、低成本的地月转运同样需要可重复使用的运载火箭技术支撑。商业航天在回收领域积累的经验一方面将为“国家队”提供有益借鉴，另一方面也将直接为后者分担货物运输等任务。

回收技术“三剑客”

目前全球火箭回收的主流路线主要有三种，都属于垂直回收技术，各有千秋。

第一种是着陆腿技术，这是目前全球验证最充分、商业化最成熟的回收路线，典型代表是美国 SpaceX 的猎鹰 9 号和中国蓝箭航天的朱雀三号。火箭一子级分离后，通过发动机多次反推制动，末端展开四条液压着陆腿，以近乎零倾斜的姿态垂直站立于陆地或海上回收船。

着陆腿方案的最大优势是技术成熟度高。猎鹰 9 号于 2015 年 12 月首次实现一子级垂直软着陆，此后经过数百次商业发射验证，工程确定性高，能满足高频次重复使用需求。同时该方案对着陆场地要求较低，回收场建设维护成本不高，可在火箭的航路上，灵活选择陆地或海上回收点。

但其缺点也十分突出。陶建中告诉《新民周刊》记者：除了有效载荷外必须携带但不产生直接效益的固定重量，称作“死重”。着陆腿及相关液压、锁定和加强结构往往为火箭增加 2 至 2.4 吨的死重，这约占猎鹰 9 号一级干重的 10%。火箭的一级结构质量减少约 10%，入轨有效载荷可能增加约 10%；反过来，携带着陆腿意味着直接牺牲约 10% 运力。此外，硬着陆产生的结构冲击和金属疲劳使后续检修翻新工作量较大。

第二种是机械臂抓取技术，

目前仅由 SpaceX 在其“星舰”重型火箭上采用。超级重型助推器分离后返回发射塔上空悬停，发射塔两侧的巨型刚性机械臂直接在空中夹持住箭体，火箭无需着陆腿。这一方案被形象地称为“筷子夹火箭”。

机械臂抓取方案的核心优势是实现了发射、捕获、加注和复飞一体化。火箭返回后直接被机械臂固定在发射塔上，经简单燃料补充和检查即可再次起飞，理论上可实现极快周转。同时，取消着陆腿减少了箭体死重。对星舰这种超重型火箭而言，如果采用着陆腿方案，容易面临两难：箭体过重，着陆腿难以承受着陆时的冲击力；而加粗着陆腿又会造成死重激增。“筷子”方案则解决了这个问题。

这个方案的局限在于，对降落精度要求极高，火箭必须精确返回发射场，业内常将其难度比作“从百层楼顶扔一支钢笔进笔筒”。其次只能在原发

下图：猎鹰九号（Falcon 9）是世界首款轨道级可重复使用火箭，2010 年 6 月 4 日完成首次发射，2015 年 12 月 21 日完成全推力版首次陆地垂直回收。

