

# 商用航空发动机的价值构成分析

## Analysis to the Value Breakdown of Commercial Aero Engine

■ 黄飞 邱国强 / 中国航发商发

商用航空发动机的价值与其设计构型、维修策略和市场环境息息相关，制造商在初始设计阶段就应该对影响发动机价值的因素开展分析，为制定发动机性能设计指标和售后维修策略提供输入。

商用飞机从投入运营到停产通常会经历15~20年，停产后再过20多年才会全部退出运营，这意味着与之配套的商用发动机的经济性寿命将长达40多年。如果该型飞机成功推出客改货项目，那么发动机的经济性寿命将再增加10~15年，累计长达50年之久。在如此长的时间跨度内，通过销售全新发动机获利的窗口期大约只有25年，而从第一台发动机进入大修开始，通过提供维修服务和销售二手发动机获利的窗口期则长达45年之久。由此可见，对于发动机制造商而言，不仅要考虑全新发动机的出厂定价，还要从全生命周期层面去理解发动机的价值变化，以便在不同阶段采取不同的市场策略，确保商业利益最大化。

### 商用航空发动机的市场价值

国际运输类飞机贸易协会（ISTAT）在给资产评估师的指南中定义了不同交易背景下的发动机价值，其中最重要的是市场价值。市场价值代表了在特定时间内、最可能存在的交易环境下、最可能获得的发动机的价值。商用航空发动机的技术特性导致了随着使用时间的延长，其性能会发生衰退，再经过维修后，

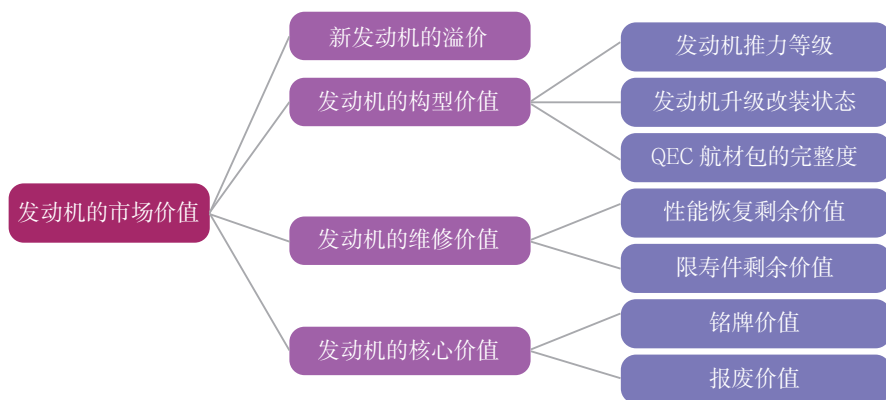


图1 商用航空发动机的价值构成分解

性能又会得到恢复。基于这样一个规律，为了分析发动机的市场价值，可假定存在一台理想发动机，它拥有最好的性能、全新的状态以及最高的市场价值，以此为基准，把发动机的市场价值分解成如图1所示的4个部分，即新发动机的溢价、构型价值、维修价值和核心价值。其中构型价值可进一步分解为发动机推力等级、升级改装状态和快速更换发动机（QEC）航材包的完整度；维修价值可进一步分解为性能恢复（PR）的剩余价值和限寿件（LLP）的剩余价值；核心价值可进一步分解为铭牌价值和报废价值。

### 新发动机的溢价

发动机使用时间越长，硬件性能衰退的速率就越高，返厂修理时的零

部件报废率也越高，反映到发动机价值上就是下次返厂维修成本变高了、能够恢复的性能程度变低了。以一台典型的窄体飞机发动机为例，在其经济性寿命内，通常会经历3次性能恢复级别的翻修，第一次发生在开始服役后的20000发动机飞行小时左右，第二次发生在第一次性能恢复后的16000发动机飞行小时左右，第三次发生在第二次性能恢复后的15000发动机飞行小时左右，如图2所示。可见，发动机首次翻修时间比成熟期翻修间隔长25%左右，这对购买全新发动机的客户来说是非常具有吸引力的。

此外，对于购买全新发动机的客户，发动机制造商通常会对发动机的首次翻修时间进行担保，如果发动机实际使用中未达到约定的

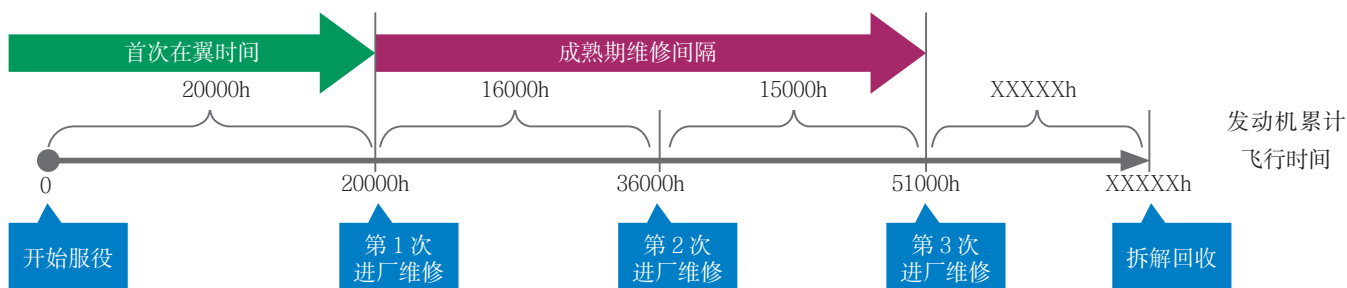


图2 典型窄体飞机发动机的返厂维修间隔示意

首次翻修时间，发动机制造商一般会提供相应的经济补偿。这样一来，相对于处于成熟阶段的发动机，新发动机就存在一定的溢价，这就是为什么全新备发通常比较贵的原因。

## 发动机的构型价值

发动机的构型一般可以从其铭牌或发动机制造商的交付文件上获得，不同发动机制造商有不同的表示方法，以CFM56发动机为例，其构型由发动机系列（engine family）、发动机型号（engine model / engine type）和衍生型号（engine variant）3部分组成。一般而言，对发动机价值影响较大的构型因素有推力等级（thrust level）、升级改装（upgrade modification）状态和QEC航材包的完整度。

### 推力等级

以CFM56-7B发动机为例，推力为121kN的CFM56-7B27可以适配737-700/800/900三款飞机，而推力为101kN的CFM56-7B22却只能适配737-600/700两款飞机，这意味着发动机的推力越高，其适用的飞机队就越大，市场需求也越大，价值自然也越高。例如，737-800飞机安装的标准发动机构型为CFM56-7B26，但如果该飞机要飞高温高原机场，就需要安装更高推力的发动机CFM56-7B27，后者比前者在售价上

要贵约100万美元，相当于每1kN推力价值22.5万美元。

### 升级改装状态

同样以CFM56-7B发动机为例，其高压涡轮（HPT）单元体的LLP在不同推力下的限制循环是不一样的，如高压涡轮前空气封严在98kN和107kN推力等级下是20000循环，在116kN和120kN推力等级下只有17600循环，少了2400循环，这相当于减少了2年左右的在翼时间。因此，CFM国际公司在2008年推出了“技术嵌入”（technical insertion）改装包（在构型上用后缀“/3”表示），把5个推力级别下的HPT单元体的LLP的限制寿命均提高到20000循环，同时还增加了排气温度裕度、降低了维修成本。2011年，CFM国际公司又推出了名为“进化”（evolution）的升级包（在构型上用后缀字母“E”表示），该升级改装不仅使得CFM56-7BE比CFM56-7B的油耗要降低约2%，而且可以和CFM56-7B和CFM56-7B/3发动机互换和混合使用，反映到发动机价值上，CFM56-7B26E比CFM56-7B26的市场价值要高出近250万美元。

### QEC航材包的完整度

以上所讨论的发动机都是指裸发（bare engine），不能直接安装到飞机上，要想发动机处于准备安装

（ready-for-installation）的状态，还需要安装一些QEC的航材包。

QEC航材包有两个定义：一个是基本QEC航材包；另一个是完整QEC航材包。基本QEC航材包包括发动机和发动机短舱接触面上的所有部件和附件，但不包括喷管和中心体。完整的QEC航材包是指除了基本QEC的部件之外，还包括喷管和中心体。

相对于可以被立即使用的安装有完整QEC航材包的发动机，裸发需要额外花费3~4天的时间来安装QEC航材包，这导致裸发的市场价值更容易被拉低，以CFM56-7B为例，QEC航材包对发动机价值的影响在60万~180万美元。因此，在航材备发业务规划中，要重点关注QEC航材包范围和备发QEC航材包完整度设计的合理性。

## 发动机的维修价值

发动机的价值与其维修状态和使用情况密切相关，如图3所示，在发动机经济性全生命周期内，性能恢复、限寿件、铭牌价值和报废价值共同决定了发动机的价值。

发动机的性能可以通过返厂维修得到恢复，把通过维修增加的发动机的价值称为发动机的维修价值，这个概念包含了发动机性能恢复这

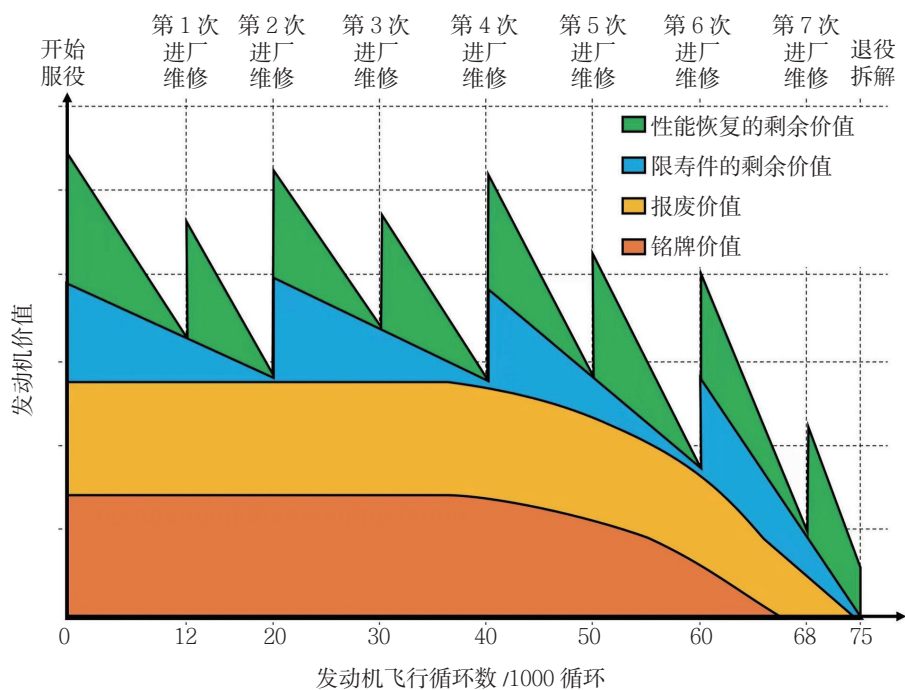


图3 与维修使用状态相关的发动机价值示意

个视情维修项目和LLP更换这个准  
 硬时限维修项目。

### 性能恢复的剩余价值

当发动机的性能指标衰退到发动机手册上规定的下发条件时，就需要执行返厂翻修来恢复性能。从价值的角度来看，就是上次性能恢复所增加的价值随着使用时间的累计而消耗殆尽了。假设上次性能恢复花费了 $C$ 元，截至目前已在翼使用了 $M$ h，估计距离下次返厂性能恢复的剩余在翼时间为 $X$ h，那么，可以推算出性能恢复的剩余价值为 $X/(M+X) \times C$ 元。这里的剩余在翼时间(remaining on-wing time)需要综合考虑发动机排气温度(EGT)裕度、LLP剩余寿命、硬部件损伤情况、滑油消耗量、发动机振动量等因素才能得出，这些都是发动机健康管理的重要参数，在设计发动机机载系统和健康管理地面系统时需要重点关注。

### 限寿件的剩余价值

和性能恢复的剩余价值相似，限寿件的剩余价值也是用剩余寿命和寿命限制的比例与限寿件的目录价格(CLP)乘积来计算，将一台发动机上所有限寿件的剩余价值加起来，就可以得到整套限寿件的剩余价值。然而，并不是所有的二手限寿件都有市场价值，一般而言，如果LLP的剩余循环少于2000循环，就认为其不再具有市场价值，应当按零价值计算，因为很少有发动机返厂翻修的目标在翼时间会低于2000循环。因此，在限寿件设计过程中，要关注LLP设计寿命与性能恢复维修间隔的匹配性，尽可能避免出现限寿件到寿而性能尚有剩余，反之亦然。

### 发动机的核心价值

一般把发动机的性能和限寿件都耗

尽时的状态称为耗尽状态，与之对应的市场价值称为发动机的核心价值(ECV)，ECV是发动机在任何维修状态下和全生命周期的任何阶段都具有的经济价值，这个价值由两类市场因素驱动：一是发动机的维修成本，它决定了该发动机是否还值得翻修，以便保持其铭牌继续投入商业运营；二是除限寿件以外的其他发动机硬件的经济收益。把由第一类因素驱动的价值叫作铭牌价值(data-plate value)，而把由后一类因素驱动的价值叫作报废价值(salvage value)。

### 铭牌价值

对航空公司来说，获取发动机的可用在翼时间有两种方式：一是对现有的发动机继续执行返厂翻修；二是购买一台带有剩余在翼时间的可用发动机(green time engine)。前者取决于发动机的返厂翻修成本，后者取决于市场上可用发动机的供应量，铭牌价值就体现在对这两种获取方式的经济性比较上。

为了分析维修成本和可用发动机的供应量的变化，需要引入“发动机型号全生命周期”这个概念，它是指从第一台发动机进入市场开始，到这一型号的最后一台发动机停止运营的这一段时间。根据发动机在役数量的变化趋势，把发动机的型号全生命周期划分为以下3个阶段。

第一阶段为引入/成长阶段。由于航空公司对新飞机和新发动机的需求强劲，以及发动机制造商有限的产能，使得全新发动机在这一阶段的初期处于供不应求的状况，发动机制造商往往会抬高发动机的价格；而在维修市场上，为了抢夺市场，



维修企业往往会采取低价策略获取新客户，使得维修成本处于中等水平。因此，较高的新发动机售价和相对中等的翻修成本，使得继续翻修发动机成为最佳选择，因此其铭牌价值也会比较稳定，甚至在这一阶段的初期还会略有增长。

第二阶段为成熟阶段，替代机型出现导致现有飞机停产，这意味着随新飞机交付的新发动机需求的减少，但由于第一阶段购买的发动机这时开始大面积进入大修周期，以及客改货这个新增市场，航空公司对备发的需求开始持续高涨，此时的维修费用也往往最高，在这几种因素的作用下，市场对可用发动机，特别是维修状态比较好的发动机需求很大，这时的铭牌价值虽有贬值，但幅度并不是很大。

第三阶段为衰退阶段，发动机停产，早期交付的飞机开始进入拆解阶段，为市场带来大量的二手可用发动机，部分提前拆解的发动机也为市场带来大量的二手航材，使得发动机维修中材料成本大大降低。在这个时期，如果从售后市场上获得可用发动机的成本低于翻修一台耗尽状态的发动机的成本（特别是

送修的时间成本），那么航空公司就不会选择继续修理现有的发动机，而是把它卖掉，这样一来，市面上可供拆解的耗尽状态的发动机会越来越多，被拆解掉的可能性越来越大，发动机铭牌价值迅速贬值。

综上所述，发动机的铭牌价值在整个型号全生命周期的引入/成长阶段初期略微上升，接着便进入稳定期，然后是缓慢下降，最后是雪崩式跌落。发动机制造商在维修策略制定中要处理好维修定价和二手航材供应的关系。

### 报废价值

一旦发动机不值得继续维修，那么唯一的可以获得经济收益的方式就是把它拆解掉，以便从除限寿件以外的其他硬件上（如风扇叶片、航线可更换件、QEC 部件）攫取最后的经济价值，这个价值被称为报废价值。

报废价值很大程度上取决于发动机制造商对待二手航材的政策。以CFM国际公司和IAE公司为例，由于CFM国际公司允许第三方独立的维修单位拆解发动机和使用二手航材，这样就在航空公司、维修单位和航空租赁公司之间形成了一个

繁荣的交易市场，支撑起了发动机的残值。而IAE公司授权的第三方独立维修单位不多，报废发动机除了卖给IAE公司外没有更多的流通方式，导致CFM65-5B/7B发动机比V2500发动机的报废价值高出近100万美元，甚至有评估机构给V2500发动机的报废价值做出零价值的投资建议。由此可见，发动机制造商对待二手航材的政策也会影响发动机的价值，需要在航材业务规划和发动机处置回收策略中予以考虑。

### 结束语

商用航空发动机的价值与新发动机担保、设计构型、维修策略、航材供应策略、处置回收策略等密切相关，整体而言，发动机的价值变化会呈现出如图4所示的变化趋势。第一阶段的需求主要来自第一级航空公司，不断扩大的机队为新发动机带来了持续增长的订单，加上制造成本和通货膨胀因素，对发动机价值影响最大的是新发动机的溢价。第二阶段的需求主要来自备发需求，二手发动机交易和客改货项目创造了新的客户数量，客户数量越多，对备发的需求就越多，此时的备发供应主要依赖维修单位，因此推高了发动机的维修成本，对发动机价值影响最大的是发动机的维修成本。在第三阶段，机体拆解导致了发动机的过量供应，而需要发动机的飞机数量却在持续减少，此时主导发动机价值的因素是发动机的维修状态，大修状态的发动机将具有良好的保值能力。

**航空动力**

（黄飞，中国航发商发，工程师，主要从事发动机运行技术研究）

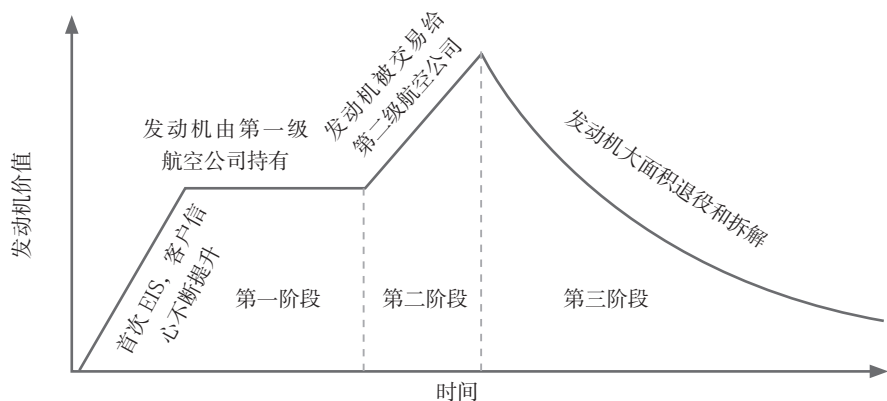


图4 典型发动机的价值曲线