

罗罗公司遄达发动机发展及升级分析

Development and Upgrade Analysis of Rolls-Royce's Trent Aero Engine

■ 韩玉琪 / 中国航空发动机研究院

宽体客机主要用于枢纽机场之间的长途航线，当前全球在役的宽体客机共有6000多架，相应的发动机市场份额被GE航空航天公司、罗罗公司、普惠公司占据97%以上。其中，罗罗公司占比约为36%，主力产品是遄达（Trent）系列发动机，其发展及改进过程可为宽体客机动力的发展提供借鉴。

由于激烈的国际产业竞争，英国目前已不再制造通勤以上级别的飞机整机，但却从未放弃先进航空发动机整机的研发，而罗罗公司则是英国在航空动力领域的典型企业。目前，罗罗公司在民用航空发动机市场提供的产品主要包括用于宽体客机的遄达系列发动机，用于公务机及支线飞机的BR系列、“珍珠”系列、AE系列发动机，其中，遄达系列发动机是其最重要的产品系列。

遄达发动机发展历程

罗罗公司的遄达系列发动机自1995年投入使用以来，迄今已达30年，累计飞行时间超2亿h，衍生发展出了遄达700、800、500、900、1000、XWB、7000等7个子系列产品，配装空客A330、A330neo、A340、A350、A380以及波音777、787等宽体客机，如表1所示。遄达系列发动机延续了罗罗公司RB211发动机的三转子结构，推力范围为236~431kN，目前在全球为150多家航空公司提供服务。截至2024年12月底，7个子系列在役发动机总量达4360台，平均派签可靠率达到99.9%，新订单达1843台，集中在遄达1000、XWB、7000等3个较新的子系列产品。

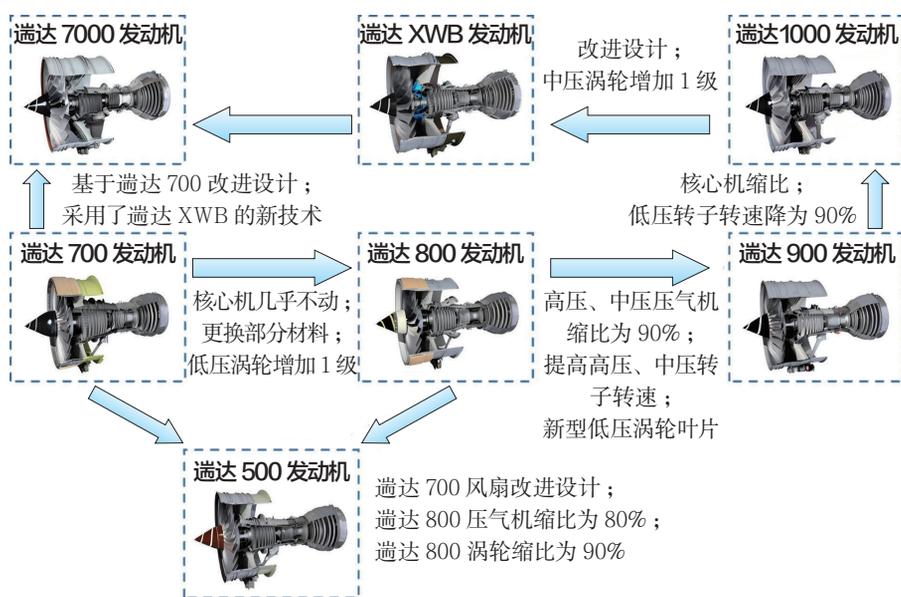


图1 遄达系列发动机的衍生发展过程

遄达系列发动机的发展采用了基于核心机衍生发展新型号的技术路径，从而继承原核心机的可靠性、耐久性和维修性，同时稳步引入新技术，可在节省研制经费、缩短研制周期、降低研制风险的情况下，快速形成满足飞机需求的发动机产品^[1]。遄达系列发动机7个子系列的衍生发展过程如图1所示，采用的改进技术包括：低压部件设计改进，改变流道件或者改变高压转子、中压转子、低压转子转速，中压涡轮或低压涡轮加减级，核心机按比例缩放等。

使用中遇到的主要问题及影响

从2016年起，遄达1000发动机陆续出现涡轮叶片腐蚀和压气机叶片断裂问题，导致了多家航空公司的波音787客机航班取消和停飞。2017年，耐久性问题影响多达500台发动机，几乎涵盖所有配装遄达1000的波音787飞机。2018年3月，遄达1000发动机的压气机叶片上又发现新的裂纹信息。鉴于事件的严重程度，2018年4月，欧洲航空安全局（EASA）和美国联邦航空局（FAA）都发布了安全警报和适航指令，要求检查所

表1 遄达系列发动机的主要参数及装配飞机

发动机系列	主要型号	推力 / kN	涵道比	取证时间	投入使用时间	装配飞机
遄达700	遄达768、772、772B	300 ~ 316	5.0 ~ 5.1	1994年1月	1995年3月	空客 A330
遄达800	遄达875、877、884、895	334 ~ 423	5.8 ~ 6.2	1995年1月	1996年2月	波音 777
遄达500	遄达553、556	236 ~ 267	7.5 ~ 7.6	2000年12月	2002年8月	空客 A340
遄达900	遄达970、977	311 ~ 340	8.5 ~ 8.7	2004年10月	2007年10月	空客 A380
遄达1000	遄达Package A/B/C、1000TEN	236 ~ 360	10.4 ~ 11.0	2007年8月	2011年10月	波音 787
遄达XWB	遄达XWB-75、XWB-79、XWB-84、XWB-97	330 ~ 431	9 ~ 9.6	2013年2月	2015年1月	空客 A350
遄达7000	遄达7000-72	302 ~ 320	10	2018年7月	2018年11月	空客 A330neo

有200 ~ 1000飞行循环的遄达1000 Package C 发动机^[2]。2019年，新加坡航空因遄达1000发动机问题取消大量航班并停飞2架波音787-10客机。2024年3月，新西兰航空公司宣布，2024年3月31日—10月25日期间暂停奥克兰—芝加哥的波音787直飞服务，原因在于遄达1000发动机在750 ~ 850循环就需要维护（通常在1000循环后进行全面维护），但罗罗公司无法提供备用或替换发动机，导致出现可用性质量问题。波音787飞机可选择装配罗罗公司的遄达1000发动机或者GE航空公司的GENx发动机，尽管遄达1000是首发发动机，但持续发生的耐久性问题，导致越来越多的波音787订单放弃遄达1000发动机而选择GENx发动机，如图2所示。截至2024年年底，遄达1000的市场份额已降至35%。

此外，遄达7000发动机面临着遄达1000发动机同样的压气机和涡轮叶片耐久性问题，而遄达XWB发动机在炎热和多沙的环境中使用的耐久性并不如预期，需集中精力解决该问题。遄达7000、XWB-84、XWB-97发动机是相应飞机平台的独家动力选择，持续的技术升级对于在中长期的时间尺度上维持客户信心具有重要意义。由于当前罗罗

公司的宽体客机动力订单集中在遄达7000、XWB、1000等3型发动机上，解决这三者使用中出现的也就更为迫切和重要。

技术升级措施

在遄达发动机的使用过程中，罗罗

公司开展了持续的技术升级工作，当前的技术升级工作主要针对遄达7000、XWB、1000发动机开展，以稳固市场份额。2024年2月，罗罗公司更是宣布投资10亿英镑开展升级工作，对上述3型发动机提供新的技术包，以改善在翼时间、耐久性

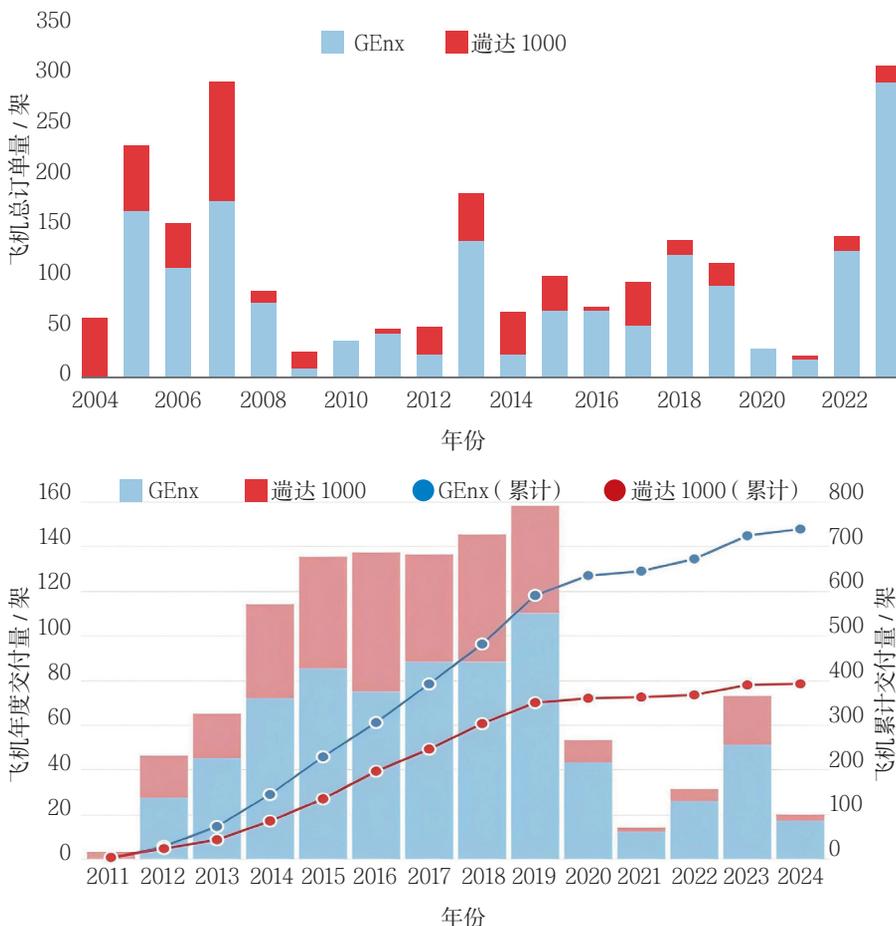


图2 配备不同型号发动机的波音787飞机总订单量（上）及交付量变化（下）

和燃油效率。此外，罗罗公司在“超扇”（UltraFan）发动机研发过程中积累的新技术也将用于改进现役的发动机。同时，罗罗公司所有在产的民用发动机均已通过认证可使用50%可持续航空燃料（SAF），并经过了100%SAF兼容性测试。

遛达7000发动机

罗罗公司已对遛达7000发动机进行了耐久性更新，第一阶段改进包于2022年8月通过认证并应用，使其在所有环境下的在翼时间至少增加了1倍。罗罗公司将对其进行进一步改进，第二阶段改进包将于2026年推出，将耐久性再提高30%。

遛达XWB-84发动机

对遛达XWB-84发动机的技术改进，旨在将耗油率降低1%，并减少二氧化碳排放，主要的改进措施包括改进风扇气动设计、提高压气机效率、提高燃烧效率、增强涡轮叶片冷却。2024年12月，遛达XWB-84性能增强型（遛达XWB-84 EP）发动机获得EASA认证，将于2025年投入使用。

遛达XWB-97发动机

针对遛达XWB-97发动机，罗罗公司已着手实施3阶段升级计划。第一阶段，提高热端部件的温度裕度并改善涡轮机匣冷却，已投入使用；第二阶段，引入所谓的“不受沙子影响的涂层”（CMAS涂层）及高压涡轮密封件，采用这种增强功能的部件已投入使用；第三阶段，从2028年起对高压涡轮部件进行额外的修改，有望大幅提升寿命，包括在中东地区服役的发动机。

改进的高压涡轮叶片将增强冷却效果，同时在高压涡轮密封件中添加陶瓷基复合材料（CMC），改善

2个部件间的接口。燃烧室也将进行更新，使涡轮叶片的温度分布更均匀，从而延长使用寿命。罗罗公司已进行了广泛的部件和发动机测试，包括使用与中东地区沙子相匹配的灰尘进行吞入测试。遛达XWB-97发动机的升级将纳入所有新产发动机，并在检修期间改装到在役机队，部分改进有助于将遛达XWB-97发动机在最严酷环境下的在翼时间延长1倍，在正常环境下的在翼时间延长50%。

遛达1000发动机

遛达1000 Package A发动机为基本型，Package B发动机是标准生产型，Package C发动机基于Package B发动机改进了风扇叶片和高压压气机设计、增加了1级低压涡轮、改进了涡轮机匣冷却系统并调整了附件传动方式。遛达1000TEN发动机是在Package C发动机的基础上，吸收了遛达XWB发动机的整体叶片、高压压气机和高压涡轮技术。遛达1000TEN发动机的升级包是以新的高压涡轮叶片为中心^[3]，新叶片的弦线中段增加、增大冷却孔，并增大叶根处冷却气流通道，冷却气流增加40%，持续工作温度降低45℃，从而延长叶片寿命。其他改进还包含了燃油喷嘴、燃烧室后内罩（CRIC）和发动机控制软件。2025年1月，罗罗公司已完成高压涡轮叶片的主要飞行测试，预计可于2025年完成升级包开发工作并获得FAA的认证，未来2年内将在现役的遛达1000发动机机队中升级应用，使在翼时间实现翻倍。此外，罗罗公司还计划在2026年推出第二阶段耐久性改进方案，目前目标是将在翼时间再延长30%，正在进行第二阶段改装的测试发动机的准备工作。

超级合金涡轮盘

罗罗公司还计划推出由新型专有超级合金（品牌为RR1073）制成的涡轮盘，该合金最初是为“超扇”项目开发。使用新的镍基高温合金铸造的部件使用寿命更可预测，能承受的温度比目前RR1000材料高约50K；使用该材料的涡轮盘已完成制造，并将于2025年引入到遛达XWB-84发动机和遛达XWB-97发动机。

结束语

自2012年6月罗罗公司退出窄体客机市场之后，宽体客机市场已成为其不容有失的底线。航空发动机作为尖端技术集成的高度复杂的工业产品，在投入使用后出现问题是正常的，但及时解决问题并有效控制成本是应对市场竞争的必要选择，使其在使用中逐渐更加成熟稳定。面对供应链挑战、长航程窄体客机的跨界竞争以及老对手GE航空航天公司的步步紧逼，罗罗公司投入巨资对遛达系列发动机开展持续的技术升级是明智且关键的举措，其成功与否直接决定了罗罗公司未来的发展及市场地位。

航空动力

（韩玉琪，中国航空发动机研究院，高级工程师，主要从事航空发动机科技情报与战略论证研究）

参考文献

- [1] 韩玉琪,董芃星,王翔宇.核心机技术发展研究[J].航空动力,2021(1):33-35.
- [2] 李东海.遛达1000发动机故障事件愈演愈烈[J].航空维修与工程,2018(6):21-22.
- [3] NORRIS G,赵平.遛达7000和遛达1000发动机的技术改装包发展现状[J].航空维修与工程,2023(9):15-16.