

我国通用航空发动机发展思考

Consideration on the Development of General Aviation Engine in China

■ 蔡建兵/中国航发动研所

近年来，随着国民经济的持续发展和国民收入水平的稳步提高、低空空域管理改革深入推进、通用航空配套保障条件不断完善、各种社会资源竞相布局，国内通用航空产业正迎来高速发展时期。

通用航空产业的发展离不开中小型民用航空发动机的支撑。长期以来，国内中小型民用航空发动机市场主要由国外制造商垄断，国产发动机型谱不完善，可靠性、安全性水平不高，市场占有率低，严重制约了我国通用航空产业的发展。自主研发和发展通用航空发动机，尤其是中小型涡轴、涡桨和涡扇发动机已迫在眉睫。

现状分析

通用航空机队结构分析

据中国民航局统计数据，截至2018年年底，国内在册通用航空飞行器总数为3380架，其中固定翼飞机2098架，旋翼机1166架，飞艇(气球)116架。

除飞艇(气球)外，按发动机类型分，活塞式发动机飞机1979架，涡轮增压发动机飞机1270架，纯电动

飞机15架。在涡轮增压发动机飞行器中，涡轴发动机为动力的直升机653架，涡桨发动机为动力的公务机和通用飞机368架，涡扇发动机为动力的公务机256架。

按照制造商分，国内涡轮增压机的民用直升机主要由欧直、贝尔、莱奥纳多、西科斯基和航空工业五大制造商提供，占比84.7%；涡桨发动机的通用飞机(含公务机)则主要由德事隆赛斯纳、航空工业、德事隆比奇、派珀和皮图拉斯等五大制造商提供，占比76%；涡扇发动机公务机主要由庞巴迪、湾流宇航、德事隆赛斯纳、达索、巴航工业五大制造商提供，占比94.5%。

目前，国内在役的国产通用航空飞行器747架，占通用航空飞行器总数的22%，虽远高于国产运输类飞机3%的份额，但多数国产飞行器是

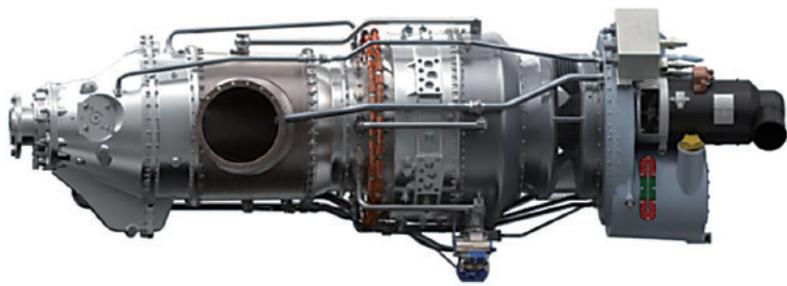
活塞式发动机的轻型运动飞机，很多还是由合资企业直接引进国外技术生产的。国产涡轮增压发动机通用飞机总数120架，仅占涡轮增压发动机通用飞机总数的9.4%，国产涡扇发动机公务机尚处于空白。

在役通用航空飞机用涡轮增压发动机结构分析

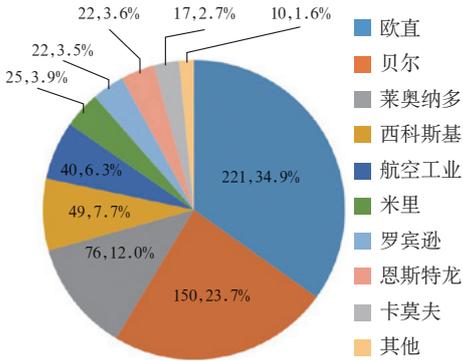
根据国内通用航空机队机型及其配装动力情况统计，国内通用航空飞机配装的涡轮增压发动机1936台。涡轴发动机共901台，其中功率不超过800kW的669台，功率为800~1500kW的120台，功率为1500~2500kW的104台，功率高于2500kW的8台；在役民用涡桨发动机499台，其中22台功率超过1500kW，18台功率在800~1500kW，其余发动机功率均小于800kW；在役民用涡扇发动机536台，其中推力小于15kN



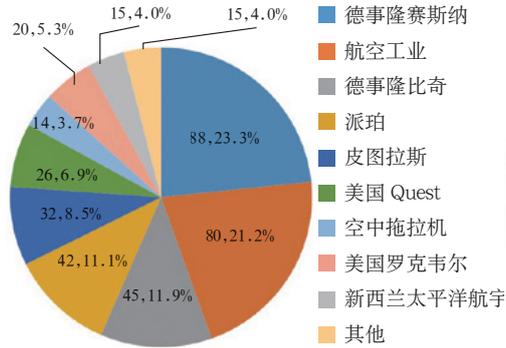
1000kW级涡轴发动机



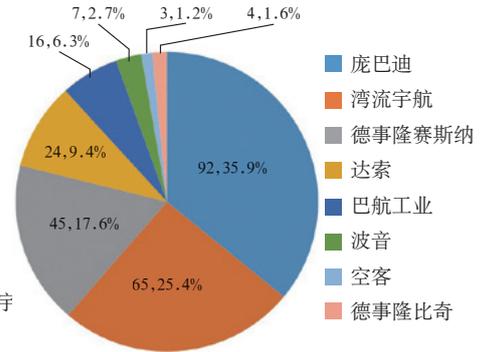
800kW级涡桨发动机



直升机制造商分布



涡桨动力飞机制造商分布



涡扇动力公务机制造商分布

的54台，推力为15~35kN的154台，推力为35~70kN的296台，推力超过70kN的32台。

按照制造商分，国内通用航空飞机用民用涡轴发动机主要由赛峰、普惠、罗罗三家公司提供，占比高达86%；民用涡桨发动机几乎由普惠加拿大公司一家垄断，占比高达96%；民用涡扇发动机主要由罗罗、普惠和GE三家公司提供，占比达到88%。

相比通用航空飞机制造商的格局，通用航空飞机用中小型航空发动机产业集中度更高，少数制造商垄断的格局更加明显，而国产发动机装机数量仅20余台，主要是配装

直11/AC311的涡轴8D发动机和配装直9/H410的涡轴8A发动机，在市场中处于非常弱势的地位。

技术需求

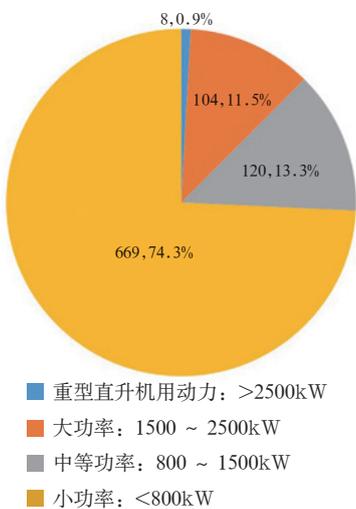
通用航空飞机与专门执飞定期航线的客货运飞机不同，其作业区域广阔，任务类型多样，用户不仅有专业的通用航空运营公司，还包括大量的政府和个人客户，机队规模小且分散，运营和保障的支持较为薄弱。通用航空飞行的这些特点，对动力装置本身提出了更高要求，发动机除了能满足与飞机性能相匹配的功率（推力）外，还在安全性、经济性、可靠性、维修

性、保障性、环保性等方面有更多多样化的设计考虑。

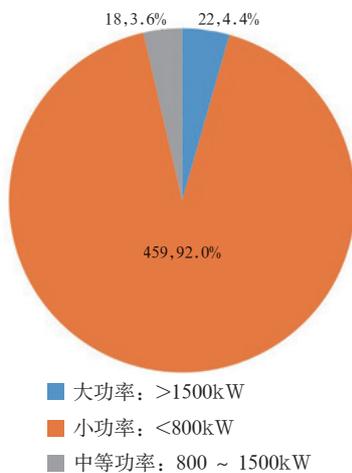
安全性

安全性是通用航空发展的底线和生命线，是提高社会公众信心的关键。通用航空飞行器的致命事故率不大于 10^{-5} 次/飞行小时，为保证发动机在全生命周期内安全使用，要求发动机产生危害性后果的失效预期发生概率不大于 10^{-7} 次/飞行小时。

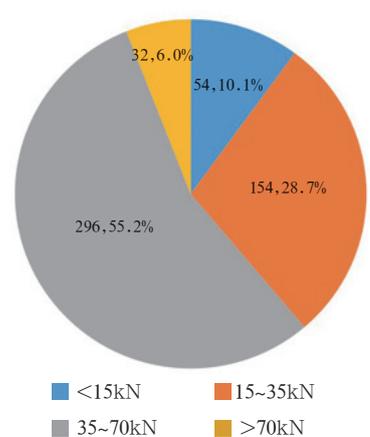
通用航空发动机应按照适航要求严格贯彻安全性设计理念：例如发动机转子应考虑防载荷超限设计；应考虑发动机包容性设计，以防止压气机或涡轮叶片断裂时飞出；发



不同功率等级涡轴发动机台份数占比



不同功率等级涡桨发动机台份数占比



不同推力量级涡扇发动机台份数占比

动机维修、装配时可能出现危险的部位应具有明显的警告标识；发动机安装节、滑油管路、燃油管路及滑油箱等应开展防火设计等。另外，发动机要能满足复杂气象条件、全地理条件安全使用，适应高原、荒漠、山地、海岛和城市中空的使用环境，耐沙尘磨蚀，耐盐雾腐蚀。

经济性

经济性是通用航空用户重点关注的指标，尤其是通用航空公司十分关注此指标。发动机全生命周期的成本，除发动机的直接采购费用外，还包括直接使用成本（DOC）和直接维修成本（DMC）。发动机的全生命周期成本一般占到通用飞机全生命周期成本的30%甚至更高。影响通用飞机直接使用成本的主要是燃油费用，直接维修成本则包括了定期维修、备件耗材、时寿件更换、发动机翻修等成本。

通用航空发动机的经济性设计，可考虑基于成熟的设计、材料、工艺和成附件开展发动机的系列化发展，研制满足多机型、多任务需求的发动机，降低单机采购成本；综

合权衡选择热力循环参数、材料和工艺水平，一方面减少燃油消耗，一方面提高关键重要件低循环疲劳寿命、整机寿命等指标；同时充分考虑维修性，降低使用维护成本，提高任务可达性和出勤率等。

可靠性

可靠性体现了发动机在规定条件下完成任务的能力，主要是提高平均故障间隔时间，降低空中停车率和提前换发率等。可靠性设计应从成熟技术、余度设计、降额设计、软件可靠性设计、元器件选用与控制等方面考虑。

通用航空发动机的可靠性设计，可考虑应用整体叶盘、整体涡轮导向器、集成机匣等整体结构件，采用功能集成、高速化附件，简化结构设计，减少零件数量；合理开展可靠性指标分配，提高整机可靠性；同时，在强度上应满足飞机的使用载荷要求，完成发动机适航规定的有关结构完整性、耐久性等可靠性试验。

维修性

维修性是发动机在采用规定的程序和方法进行维修后，保持和恢

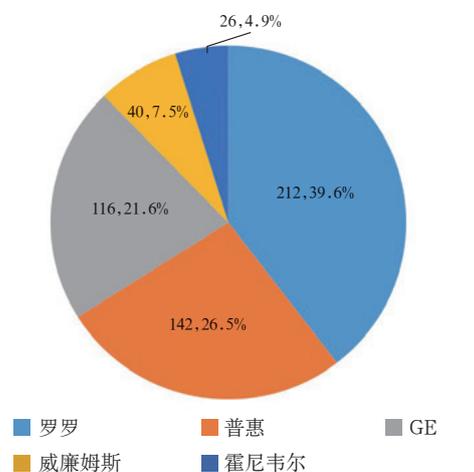
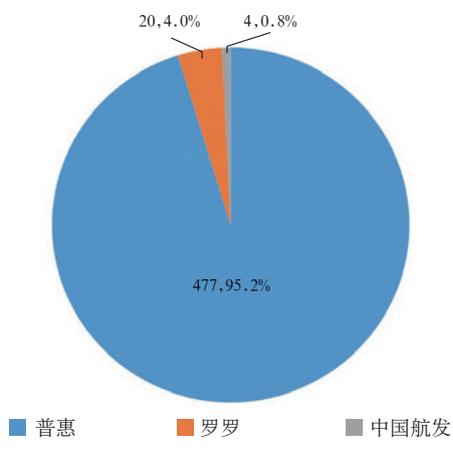
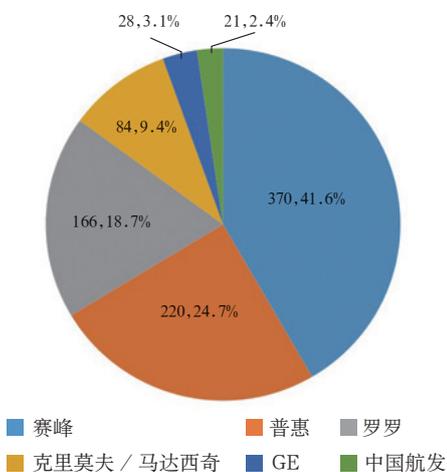
复到设计规定状态的能力，主要是降低平均修复时间，降低每飞行小时直接维修工时等指标。维修性设计应从维修可达性、单元体结构、外场可更换组件、快速换发和装配能力设计、可测试性、防差错标识、维修安全性和人为因素等方面考虑。

通用航空发动机的维修性设计，应尽量采用单元体设计；测试、保养、调整、拆卸、更换或维修的部位必须具有良好的可达性；外场可更换单元（LRU）更换时间应尽可能短；不同功能的管道和线路采用不同的颜色标识；考虑“人机工程”，例如应减小维修、装配人员的跪、蹲、卧、趴等动作。

保障性

保障性是指发动机在设计规定的保障资源的支持下，满足装备完好率和派遣率要求的能力。保障性设计应考虑减少备件需求数量，减少专用保障设备，简化零部件包装、装卸、贮存和运输要求，便于维护和运输等方面考虑。

通用航空发动机的保障性设计，应合理规划外场可更换单元件，尽



国内通用航空飞机用不同功率等级涡轴发动机台份数占比

国内通用航空飞机用不同功率等级涡桨发动机台份数占比

国内通用航空飞机用不同推力量级涡扇发动机台份数占比

可能减少专用设备,需要时可使用飞机通用设备进行检查;整机及零部件安装、拆卸、贮存和运输要求应尽可能简化;随机保障工具种类应通用化、标准化、小型化,尽量减少随机工具种类;应按照S1000D标准要求准备随机资料以及交互式电子手册等。

环保性

环保性是对民用发动机的特殊要求,主要是满足适航规章对于污染物排放的指标要求,提高社会公众对通用航空运营的满意度。目前,适航规章仅对喷气公务机用涡扇发动机及起飞功率超过1000kW级的涡桨发动机有明确的环保性要求,未来也会对利用运输机场起降的小功率涡桨通用飞机、直升机提出要求,因此发动机设计除需进一步降低油耗外,还要考虑降低氮氧化物排放,降低发动机外部可感噪声。

发展思路

近年来,随着通用航空市场的不断成熟,国内通用航空飞机制造商深入挖掘市场需求,通过自主研发、专利引进甚至生产线引进等途径,开发了多个适用于国内市场需求的通用飞机产品,尤其是在无人直升机、大型货运无人机领域,竞争迅速趋于白热化,其对动力装置的需求十分迫切。

国内在通用航空动力研制领域已经具备了一定的技术积累,500kW功率级涡轴8A/D、涡桨9发动机等产品通过了民航当局的适航认证,尤其是中法对等合作研发的1300kW级涡轴16发动机的适航取证,为自主研发通用航空动力提供了强有力的技术支撑。

未来10年,国内通用飞机用功率不超过1500kW的中小功率等级涡轴/涡桨发动机及轻型、中型公务机用涡扇发动机将成为市场急需。因此,以国内通用航空飞机市场需求为牵引,针对市场应用前景广阔的涡轴、涡桨和涡扇发动机等项目积极开展自主研发,充分借鉴在研/在役发动机研制经验及成果,力争较短时间内完成研制,快速投放市场参与竞争,满足通用航空直升机、涡桨通用飞机和轻型公务机对动力的需求。

国内正在开展和拟开展研制的通用航空动力产品如下。

200kW级涡轴发动机

经市场调研,500~1000kg级中小型无人直升机广泛用于农林植保、大气监测、交通监管、消防反恐、客货运输、电路巡检等民用领域,市场前景较好。

以500~1000kg级中小型无人直升机对动力装置的需求为牵引,严格遵循适航规章规定,充分利用在研/在役发动机技术基础及型号经验,在较短时间内完成研制,快速投放市场。目前正在开展工程设计,计划2年内交付首飞用发动机。

1000~1300kW级涡轴发动机

在“两机”专项中,针对市场前景较好的4~6t级民用直升机,已安排开展1000kW级第四代先进民用涡轴发动机研制。严格遵循适航规章规定,将经济性、安全性、可靠性、维修性、保障性等要求贯穿研制全过程,突破并掌握先进民用涡轴发动机关键技术,自主走完民用涡轴发动机适航取证全过程,综合技术水平达到国际在役第四代民用涡轴发动机水平。目前技术验证

机已实现性能达标和初步结构耐久性考核,计划2024年适航取证。此外,通过压气机等部件改进设计,功率可提高至1200kW级。

为满足7t级民用直升机的动力需求,2008年中国与法国赛峰直升机发动机公司同台竞技并以50:50对等合作研发了1300kW级涡轴16先进民用涡轴发动机。严格按照适航规章要求,完成了全部符合性验证工作,2019年10月9日正式取得了型号合格证。

800~1200kW级民用涡桨发动机

针对市场前景较好的3~5t级(配装单发)和6~10t级(配装双发)涡桨通用飞机、多用途飞机、公务机和无人货运飞机,已安排开展800kW级民用涡桨发动机研制。严格按照适航条例要求,以通用飞机需求为牵引,充分借鉴在役/在研涡桨和涡轴发动机的研制经验及成果,在较短时间内完成研制,综合技术水平达到国外在役同功率等级最先进民用涡桨发动机水平。目前技术验证机已实现性能达标。

此外,通过对压气机等部件改进设计,同时提高燃烧室出口温度,功率可提高至1200kW级。

9800N级涡扇发动机

以市场前景较好的6~8座轻型公务机和2~5t级无人飞机需求为牵引,基于AES100发动机核心机,通过增配低压部件,自主研发9800N级涡扇发动机,技术指标达到国外在役先进民用涡扇发动机水平。目前正在开展详细设计,计划2021年完成性能达标,2023年交付试飞用发动机。

此外,通过风扇及核心机部件适用性改进,推力可增至15680N级。

几点思考

经过多年的发展，国内通用飞机发动机的研制已经具备了坚实的技术基础，但对于通用航空无人机发动机适航、成本控制、市场营销及体制机制等方面还处于摸索阶段，有待深入研究。

通用航空无人机发动机适航

目前，有人机发动机按照《航空发动机适航规定》(CCAR-33R2)开展设计、制造、验证及取证工作，但对于无人机及其发动机暂无明确的适航规定。据了解，民航局已授权民航科学技术研究院开展民用无人机适航审定程序及相关标准的研究和起草，当前国内无人机适航标准还处于起草阶段。对于无人机动力装置标准的主要内容和章节架构，若按照CCAR-33R2部有人机标准，由于有人机与无人机的使用需求差异较大，取证标准则过于严苛。因此，应积极与适航当局沟通，讨论和协调民用无人机动力装置的适航规定，并将适航认证要求融入发动机设计过程中，开展适航符合性验证技术的研究，并推进适航规章的制定。

成本控制

目前国内通用航空产业整体盈利难，主要原因在于通用航空飞机和动力本身的采购费用、运营费用和维修保障费用等偏高，限制了国产通用飞机及其动力装置的应用发展，因此，应在发动机全生命周期的各个阶段进行限价设计，以发动机全生命周期费用最低为目标，从设计、制造、工艺、材料等方面严格贯彻成本控制措施，如在满足产品功能、性能要求前提下，尽可能选用适中的热力循环参数，采用较低应力级的部件、寿命长的关键重

要件，采用单元体结构和整体结构件、简化零部件结构设计，减少专用零件种类，主要部件设置窥视孔，方便孔探仪检查发动机内部，尽可能采用成熟技术、工艺和材料，降低动力研发成本及维修成本。

市场营销

目前，国内仅有涡轴8A、涡轴8D、涡轴16三型通用航空发动机完成适航取证，其他项目还处于研发阶段、未取得型号合格证，尚未制定完整的发动机营销、维修及售后策略，对通用航空发动机盈利模式缺乏研究。正在研发的通用航空发动机，应具有高安全性、高可靠性及较好的经济性等特点，还应制定完整的发动机营销、维修及售后策略，抢占市场，确保新研产品市场成功和商业成功。

借鉴国外民用发动机的营销经验，综合考虑市场占有率、竞争机型营销策略、发动机技术成熟度等因素，可采取“售价高、维修费用低”“售价低、维修费用高”及“售价、维修费用均衡”营销策略，供用户选择。营销考虑以厂商直销为主，结合融资销售、融资租赁、增值服务等方式。分类制定不同服务内容的维修策略，例如，计划性的维修、计划性的维修+健康数据分析、按飞行小时购买服务等，方便用户根据自身所需选择合适的维修服务。

此外，还应利用各类媒介大力推介国产通用航空动力，让用户充分了解国产通用航空动力并充满信心、放心使用。

体制机制

现有体制还是计划经济体制下发动机设计所和生产厂分离的军用航空发动机研发模式，设计、制造、

销售和服务分开，单位之间的责、权、利不清晰，难以满足市场竞争和通用航空发动机发展需要。此外，社会资本纷纷涌入通用航空发动机研发，对原有体制内的通用航空发动机研发格局产生了较大冲击。为适应内外部因素的挑战，应借鉴国外发动机公司的成功经验，以通用航空动力研发项目为载体，可考虑研究所牵头、相关制造单位配套或研究所和制造单位成立合资公司的模式，同时吸纳社会资本，统筹推进设计、生产制造与总装集成、试验验证、市场开发与售后服务等工作，构建适合所研发通用航空动力产品成果和商业成功的管理模式。

在宏观政策层面，应尽量争取国家在高技术产品进口税收、国产装备示范应用等方面的优惠政策，同时借助国家“一带一路”政策，努力开拓海外市场，让国产通用航空动力随着民机的出口“走出去、用起来”，树立起国产航空发动机的品牌形象。

结束语

随着空域开放试点逐步向全国推广，我国的通用航空需求巨大，将极大地带动通用航空动力的发展。通用航空动力研发单位应针对我国通用市场需求，积极开展通用航空动力自主研发，研发出具有较强市场竞争力的产品快速投放市场。还应积极开展成本控制、市场营销等方面的研究，以降低产品全生命周期费用，进一步提升产品竞争力。

航空动力

(蔡建兵，中国航发动力研究所副总工程师，研究员，主要从事航空发动机总体性能设计及市场方面的研究)