

战斗机用辅助动力装置的发展

The Development of APUs for Fighters

■ 马强 田宏星/中国航发动研所

辅助动力装置 (APU) 是指为主发动机的起动和飞机的环控、液压、电力等系统提供辅助能源的动力装置。结合战斗机的发展, 可以一窥辅助动力装置发展的过程和趋势。

辅助动力装置 (APU) 本质上是一台燃气涡轮发动机, 为主发动机的起动和飞机的环控、液压、电力等系统提供辅助能源, 并不直接为飞行提供动力, 因此这类发动机被统称为辅助动力装置。辅助动力装置诞生于20世纪50年代, 最初的目的是满足大推力/功率发动机对起动功率的需求, 以取代质量大的电起动机、液压起动机、活塞起动机及其附设系统。此后, 随着飞机需求的增加、航空技术水平的发展, 辅助动力装置的功能日趋多元化, 从短时工作的单一起动能源, 演变成为可长时间工作的能输出多种能源的动力装置。以下结合战斗机的发展, 就战斗机用辅助动力装置的应用情况和发展趋势进行分析。

第一代、第二代战斗机的起动方式

第一代战斗机最大特征是突破声障, 实现马赫数 (Ma) 1 以上的飞行速度, 主要作战方式是近距离格斗, 代表机种有苏联的米格-19 和美国的 F-100、F-104 等。第二代战斗机采用了更优设计的后掠翼或三角翼、梯形翼面, 采用更强劲涡轮喷

气发动机, 达到两倍声速的飞行速度和 20000m 的飞行高度, 主要还是视距内作战, 代表机种有苏联米格-21、美国 F-4 和法国“幻影” III 等。第一代、第二代战斗机的发动机推力较小, 对起动功率的需求也较小, 因此多采用电起动机, 见表 1。

电起动机的优点是结构及控制简单、使用方便可靠, 容易实现起动自动化; 缺点是低速电起动机的总质量大, 功重比不到 0.3kW/kg, 因此一般起动功率都低于 30kW; 蓄电池的质量大且对电压降很敏感, 在冬季低温条件下蓄电池的电容量显著下降且不可靠, 受蓄电池容量限制, 一般只能保证连续 3 ~ 5 次的起动。

第三代战斗机用辅助动力装置

第三代战斗机采用以空气动力学优化后的气动外形, 大量采用复合材料减轻质量、增加强度, 都采用“尖头”造型并装备大型航空雷达, 大量使用先进航空电子设备, 最大飞行速度维持在 $Ma2$ 左右, 最大升限 20000m 左右, 但机动性大大加强。这一代战斗机以“超视距空战”为主要作战场景, 代表机种有苏联的米格-29/31 系列、苏-27 系列, 美国的 F-14/15/16/18 系列, 欧洲的“幻影” 2000 和“狂风”战斗机等。第三代战斗机使用的发动机较第一代、第二代战斗机的推力增大, 对起动功率的需求也增加, 多采用功

表1 第一、二代战斗机发动机起动方式

战斗机		发动机			发动机的起动方式
划代	型号	类型	型号	加力推力/kN	
第一代	米格-19	涡喷	RD-9B	31.9	电起动机
	F-100	涡喷	J57	71.2	电起动机
	F-104	涡喷	J79	70.3	电起动机
第二代	米格-21	涡喷	R-11F	64.7	电起动机
	F-4	涡喷	J79-GE-17	79.6	电起动机
	“幻影” III	涡喷	阿塔09	58.8	电起动机

表2 第三代战斗机用辅助动力装置

战斗机		发动机			发动机的起动方式		
划代	型号	类型	型号	加力推力/kN	APU型号	轴功率/kW	类型
第三代	米格-29	涡扇	RD-33	81.3	VK100	72	机械型APU
	米格-31	涡扇	Д-30Ф6	149.0	TKC48	90	机械型APU
	苏-27	涡扇	AL-31F	117.6	Г Т Д Э 117	66	机械型APU
	F-15	涡扇	F110	126.4	JFS190	121	机械型APU
	F-16	涡扇	F100	126.4	T62-4-8	169	机械型APU
	F-18	涡扇	F404	69.8	GTCP36-200	—	气压型APU
	“幻影”2000	涡扇	M53-P2	95.9	Noelle180	133	机械型APU
	狂风	涡扇	RB199	73.3	T312	105	机械型APU

重比大的机械型APU（即燃气涡轮起动机），见表2。

机械型APU是指该类APU直接输出轴功率，通过机械传动起动主发动机。该类APU的本身就是一台微型燃气涡轮发动机，自身的起动功率小，但输出功率大；不需要特殊工质，可多次独立起动主发动机；功重比大大增加，达到0.88 ~ 2.5kW/kg；对带自由涡轮的燃气涡轮起动机，其燃气涡轮大部分时间处于稳定工作状态，自由涡轮转速变化平稳，保证主发动机在起动过程中平稳加速。缺点是APU必须尽量靠近主发动机安装，不利于飞机布局，同时缺乏备用起动手段。此类APU功能比较单一，多数仅用来起动主发动机。

三代半战斗机用辅助动力装置

第四代战斗机的典型特征是超声速巡航、隐身性、短距起降能力、超机动性，代表机种为美国的F-22和F-35，但有些战斗机仅部分达到了第四代战斗机的特性要求，因此被称为“三代半”战斗机，典型机种有欧洲合作研制的EF2000、法国的“阵风”和瑞典的“鹰狮”等。三代半战斗机采用的是空气涡轮起动机（ATS）起动主发动机，使用气压型APU为空气涡轮起动机提供压缩空气，见表3。

气压型APU是指该类APU输出压缩空气，通过管路去冲击ATS，然后由ATS输出轴功率带动主发动机起动。这种气压型APU+ATS的起动方式的好处是，APU的安装位置

表3 典型三代半战斗机用辅助动力装置

战斗机		发动机			发动机的起动方式	
划代	型号	类型	型号	加力推力/kN	APU型号	类型
三代半	“阵风”	涡扇	M88	87.2	RUBIS3	气压型APU+ATS
	EF2000	涡扇	EJ200	88.2	GTCP36-170	气压型APU+ATS
	“鹰狮”	涡扇	RM12	87.2	TGA15	气压型APU+ATS

灵活，可远离主发动机，有利于飞机系统布局。同时ATS使用的压缩空气来源丰富，既可由APU提供，也可由已起动的主发动机或机场地面气源车提供，使用灵活。与机械型APU相比，气压型APU不仅可用于起动主发动机，还可以为飞机环控系统提供压缩空气、为电力系统提供电源，从而提高战斗机的自主保障维护能力。缺点则是整个系统转化效率低，要求APU的额定功率较大，机体内需布置较粗的空气管道。

第四代战斗机用组合动力装置

一些战斗机上除了有APU外，还有一种应急动力装置（EPU）为飞机快速提供短时应急功率。传统APU和EPU在战斗机上分开布置、分时工作、优势互补，共同降低飞机的维护使用费用和保证飞机的飞行安全。APU使用飞机上的燃油和外界空气工作提供起动和辅助能源，工作高度有限（通常低于13000m），起动时间较长（通常在30s以上），优点是可长时间工作；EPU则是一台没有压气机、使用飞机上的燃油和机载压缩空气工作或主发引气的涡轮动力装置，由于其工作介质都来自机上，因此可在飞机飞行全包线内工作，起动时间短（2 ~ 5s），缺点是机载压缩空气瓶体积有限，工作时间受限（2min内）。随着第四代战斗机复杂程度的增加，使得尺寸、质量、航程、隐身、新武器、多余度、经济性之间的矛盾愈加突出。要在有限空间内实现使用功能、性能的增加，除了在原有设备基础上进行性能提升和小型化发展之外，另外

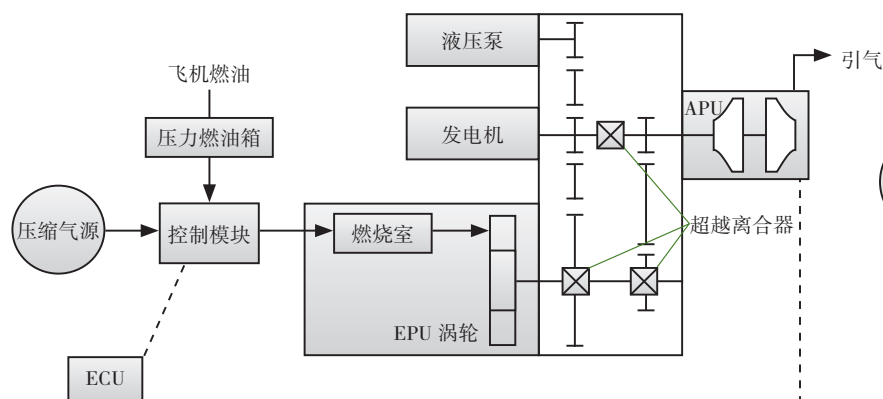


图1 G250组成示意图

一种思路就是将原有分散独立、各司其职的系统或装置进行有效综合，实现一物多能，从而节省空间和减轻质量。美国的F-22和F-35战斗机就是基于上述理念，发展出了组合动力装置（IPU），见表4。

G250组合动力装置

F-22战斗机上的G250组合动力装置就是采用物理组合的方式将APU和EPU综合到一起。与传统分开布置的APU和EPU相比，G250至少节省了一套齿轮箱和一套液泵泵及发电机（如图1所示），整个系统体积缩小，质量也减轻40%。

工作中，APU在有限高度内（12500m以下）提供轴功率给齿轮箱，驱动其上的发电机和液泵，也可在更低高度范围内提供压缩空气用于主发动机的起动或是飞机的环控系统。EPU则用来起动APU或在飞行全包线范围内、应急条件下

驱动发电机和液泵（此时也以半速带动APU空转）。当飞机高度降低到APU工作高度时，APU点火起动接替EPU的工作，实现无缝切换。上述功能的实现都有赖于一个带有两速三离合器的齿轮箱。

F-22飞机上还带有一个压缩机，可在飞行中利用冲压为EPU用的压缩空气瓶充气。

G230组合动力装置

F-35战斗机上的G230组合动力装置仅输出电功率，采用更先进的设计技术使得APU直接综合了EPU的功能，继续优化系统的体积和质量（如图2所示）。

综合APU和EPU功能的关键是一个带节流装置的压气机，即在离心压气机进口带有进口导叶、在压气机出口有挡板阀。当以APU模式工作时，压气机进口导叶和挡板阀打开，此时G230就是一台自吸气的

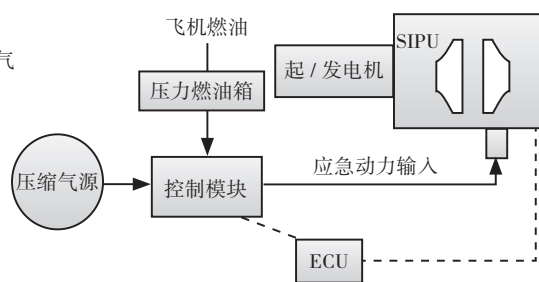


图2 G230组成示意图

燃气涡轮轴发动机，吸入大气与燃油在燃烧室点火燃烧后，冲击涡轮去驱动一台大功率（约130kW）的起动发电机发电，提供电源给主发动机的起动发电机和飞机其他电源系统。当以EPU模式工作时，压气机进口导叶和挡板阀关闭，机载压缩空气瓶的压缩空气进入燃烧室与燃油混合燃烧后，冲击涡轮去驱动起动发电机发电。当飞机的飞行高度下降到APU模式的工作范围时，G230还能从EPU模式切换到APU模式，不间断地为飞机提供电源。

结束语

辅助动力装置自诞生以来，功能由最初的提供单一起动能源，发展到现在为飞机提供起动、辅助和应急能源，功能的增加不单单是由当时的技术水平决定，还与飞机系统设计的需求密切相关，即需求作为牵引，技术作为支撑，两者相互制约与促进。

航空动力

（马强，中国航发研研所，工程师，从事辅助动力装置设计研究）

表4 第四代战斗机用组合动力装置

战斗机		发动机			发动机的起动方式	
划代	型号	类型	型号	加力推力/kN	APU型号	类型
第四代	F-22	涡扇	F119	152.8	G250	气压型IPU+ATS
	F-35	涡扇	F135	187.2	G230	电力型IPU

参考文献：

- [1] 田涛,王进.飞机第二动力系统发展及关键技术[J].航空装备论证,2008(3):17-23.
- [2] 雷友锋,王进.军用飞机第二动力系统发展现状与趋势[J].航空装备论证,2001(4):22-26.