

# 无人机动力装置的现状与发展

尹泽勇 李上福 李概奇

(中国航空动力机械研究所, 湖南株洲 412002)

**摘要:**分析了多种无人机动力装置的应用情况;根据无人机动力的发展趋势和需要,提出了发展无人机动力装置的一些看法。

**关键词:**无人机 动力装置 燃气涡轮发动机

## Current State and Development of the Unmanned Aerial Vehicle Powerplants

Yin Zeyong Li Shangfu Li Gaiqi

(China Aviation Powerplant Research Institute Zhuzhou 412002, Hunan, China)

**Abstract:** The application of some Unmanned Aerial Vehicle (UAV) powerplants are described. Some views on the development of the UAV powerplants are presented based on the future trend and need.

**Keywords:** Unmanned Aerial Vehicle, Powerplant, Gas Turbine Engine

### 1 应用现状

#### 1.1 种类

无人机技术得到了越来越多国家的重视,表 1 列出了部分无人机的主要技术参数及其动力装置<sup>[1]</sup>。

由表 1 中可见,目前无人机广泛采用的动力装置包括往复式和旋转式活塞发动机,以及涡喷、涡扇、涡桨和涡轴在内的燃气涡轮发动机;此外,还有未列入表中,但在微型无人机中普遍使用的电池驱动的电动机等。这些无人机动力装置可以分别应用于高空高速无人机、低空低速无人机、反辐射无人机、侦察监视无人机、垂直起降无人机、长航时无人机、攻击无人机、无人战斗机等无人飞行器。为了满足不同需求,无人机动力装置功率/推力变化范围很大,但基本属于中小型发动机范畴。

#### 1.2 应用范围

无人机发动机类型的选择不但与无人机要求的性能有关,而且与当时的发动机技术水平、研制进度要求及用户的经济承受力等有关。表 2~6 分别列出了部分活塞、涡喷、涡轴、涡桨、涡扇无人机动力装置及其主要技术参数。从现有在役无人机动力装置的情况来看,活塞式发动机适用于低速、中低空的侦察、监视无人机及长航时无人机,飞机起飞质量较小,一般为几百千克;涡喷发动机适用于飞行时间较短的中高空、高速侦察机及靶机、无人攻击机,飞机起飞质量可达 2500kg;涡轴发动机适用于中低空、低速短距/垂直起降无人机和倾转旋翼无人机,飞机起飞质量可达 1000kg;涡桨发动机适用于中高空长航时无人机,飞机起飞质量可达 3000kg;涡扇发动机适用于高空长航时无人机和无人战斗机,飞机起飞质量可以很大,如“全球鹰”重达 11.6t;微型电动机等微型动力适用于微型无人机,飞机起飞质量可少于 100g(见表 7)。

值得特别指出的是,虽然由于历史原因,目前多数无人机采用活塞发动机,但应该看到,活塞发动机只适用于低速小型无人机,局限性较大;而推力变化范围大、耗油率低、高空性能好的涡扇发动机,在无人机动力装置中将占有重要地位。

收稿日期: 2006-11-01

**第一作者简介:**尹泽勇(1945-),中国工程院院士。1967年毕业于西北工业大学飞行器结构力学专业,1990年获北京航空航天大学航空发动机工学博士学位;现任中航二集团航空动力机械研究所总设计师。他是中国第 1 型设计定型并批量交付使用的涡扇发动机、第 1 型自行设计的涡轴发动机及 2 个型号直升机传动系统的总设计师,曾获国家科技进步二等奖 2 项、部级一等奖 1 项、二等奖 3 项。

表 1 部分无人机技术参数及其动力装置

国别	型号	投入使用年代	平飞速度 (km/h)	航程/ (作战半径) (km)	升限 (m)	续航时间	起飞质量 (kg)	动力装置
美国	X-36 载人战斗机的 28% 缩比研究机	1997 年首飞	450				565	1 台 Williams 推力为 311daN 的 F112 涡扇发动机
美国	“全球鹰”(Global Hawk) 高空长航时监视无人机	2001 年	635	22224	20000	>42h	11612	1 台艾利逊公司(现 RR 公司)的 3690daN AE3007H 涡扇发动机
美国	鸭式旋翼/定翼垂直起落侦察和监视无人机(Camard Rotor/Wing)	计划 2001 年首飞	694	1815	3050	3h	600	1 台 Williams 的 314daN F112 涡扇发动机
美国	X-45A 无人战斗机	飞行试验中	$M_a=0.85$		11580		6804	1 台 Honeywell 无加力 2800daN F124-GA-100 涡扇发动机
美国	X-47A 海军无人作战飞机	在研			10600	12h	2495	1 台 PW C 公司 1419 daN 的 JT15D-5C 涡扇发动机
美国	箭(Arrow)高空长航时无人机	可能在飞行试验中	$M_a=0.7$	33336	21340	60h	10886	1 台 Williams-Rolls 的推力为 1023daN 的 FJ44-2E 涡扇发动机
美国	“圣甲虫”(Scarab) 战术侦察无人机	1988 年	850	2253	13100		1077	1 台 Teledyne Continental 431daN 涡喷发动机
美国	侦察靶机 2000(BQM-74C)	1991 年	927	833	9150		233	1 台 Williams 的 80daN J400-WR-402 涡喷发动机
美国	“直升翼”(Helwing) 垂直发射和回收无人机原型机	1995 年首飞, 在研	185		4575	3h	658	1 台 Williams 的 WTS 涡轴发动机
美国	“鹰眼”(Eagle Eye) 倾斜旋翼无人机	试验中	389	(370)	6100	3h	1020	1 台 313kW 的 250-C20B 涡轴发动机
美国	“捕食者”(Predator) B 军用和科研用无人机	1997 年	444		15600	32h	3200	1 台 496kW TPE331-1 涡桨发动机
美国	“蚂蚁”(Gnat) 750 长航时无人机	1989 年	259	(2778)	7620	40h	511	1 台 48.5kW Rotax582 活塞发动机
美国	“影子”(Shadow) 600 多用途无人机	1993 年	193	(200)	4575	>12h	265	1 台 33.8kW UE-LAR801 活塞发动机
美国	“捕食者”(Predator) A 中空长航时无人机	1994 年	204	(3704)	7925	40h	1020	1 台 84.5kW Rotax914 活塞发动机
美国	“猛禽”(Raptor) 高空长航时无人验证机	在研	<148		19800	48h	853	1 台 48.5kW Rotax912 (低空) 或 1 台 74.6kW 的 改进 Rotax912 (中空)
以色列	“哈比”(Happy) 反雷达攻击无人机		250	(500)	3000	2h	120	1 台 20.5kW 双缸 2 冲程发动机
以色列	“苍鹭”B(Heron) 中空长航时无人机	1996 年	357	1000	14020	25h	1650	1 台 410kW 涡桨发动机
以色列	“搜索者”(Searcher) 长航时多用途无人机	1992 年	194	120	4575	14h	372	1 台 35.0kW 的 L550 活塞发动机
以色列	“眼视”(Eye-view) 近程战术无人机	1997 年			2440	4h	80	1 台 17.9kW 的 活塞发动机
以色列	“微型”Micro V 近距离侦察无人机	1998 年	204	(50)	3960	5h	50	2 台 3kW 的 活塞发动机
以色列	“赫尔姆斯”(Hemas) 450 长航时战术无人机	在研	204	(200)	6100	24h	450	2 台 28.3kW AR741 活塞发动机
俄罗斯	图-141 斯泰兹远距战术侦察/监视无人机	1983 年	1100	1000	6000		6215	1 台 1960 daN KR-17A 涡喷发动机
俄罗斯	图-143 喷气式战术侦察系统	1989 年	875	(95)	3000	13min	1400	1 台 628daN TR3-117 涡喷发动机
俄罗斯	图-243 喷气式战术侦察系统	1995 年	940	(180)	5000		1600	1 台 628daN TR3-117 涡喷发动机
俄罗斯	“雅克”短程监视无人机	1991 年	180		3000	2h	130	1 台 23.9kW P-032 活塞发动机

续表 1

国别	型号	投入使用年代	平飞速度 (km/h)	航程 / (作战半径) (km)	升限 (m)	续航时间	起飞质量 (kg)	动力装置
俄罗斯	卡-37 多用途民用无人机	在研	110	5	3000	1h	250	2台 25.0kW P-037 活塞发动机
俄罗斯	卡-137 多用途无人直升机	在研	175	530	5000	4h	280	1台 48.5kW 活塞发动机
俄罗斯	蜜蜂-1T 近距监视和战术无人机		150	(50)	2500	2h	138	1台 23.9kW 的 P-032 活塞发动机 (3叶螺旋桨)
法国	“狐狸”(Fox)TX 电子战无人机	1988年	198	300	3500	5h	120	1台 16.4kW 活塞发动机 (2叶螺旋桨)
法国	“警戒观察员”(Vigilant Observer)小型近距无人直升机	2001年	100	15	2000	>1h	39	1台 9kW 的活塞发动机
法国	“鹰”(Eagle) 1号中高空长航时无人机		207	3300	9750	39h	1150	试飞时用 1台 84.6kW 的活塞发动机, 规划中的后继机用 PT6A 涡轮桨发动机
德国	“西摩斯”(Seamos)海上侦察垂直起降无人机	在研	167	(185)	4000	>4h	1060	1台 313kW 250-C20W 涡轮发动机
德国	DAR 微型反辐射无人机	在研	250	>150	3000	>3h	120	1台 20.5kW SF2-350 活塞发动机
德国	Mini-Tucan 轻型近距侦察无人机	在研	150		400	1h	30	1台活塞发动机
英国	“不死鸟”战场监视无人机	1991年	157	(70)	2440	4.5h	180	1台 18.6kW Meggitt 活塞发动机
意大利	“米拉奇”(Mirach)-150 中程战术无人机	1997年	700	(250)	9000	1h	380	1台 147daN TRS18-1 涡喷发动机
意大利	“米拉奇”(Mirach)-26 微型侦察无人机	1997年	220	900	3500	8h	230	1台 20.1kW 的 Sachs SF-350 活塞发动机
南非	“天使”(Seraph)高速监视无人机			Ma=0.86	12200		160	1台 TR160 涡喷发动机
南非	“搜索者”(Seeker)侦察无人机	1986年	176	(200)	5500	>9h	240	1台 37.3kW 活塞发动机
南非	“拉克”(Lark)反辐射无人机	1995年	222	400	4575	4h	120	1台 28.3kW AR731 活塞发动机
南非	“秃鹫”(Vulture)监视无人机	1997年	160	(60)	5000	3h	100	1台 18.6kW 活塞发动机
中国	可回收喷气动力靶机	1977年	850~910	600~900	16500	45~60 min	2450	1台改型的涡喷发动机
中国	高空发射多用途无人机	1983年	800	2500	17500	3h	1700	1台改进的涡喷发动机
中国	ASN-104 低空低速无人机	1985年	205		3200	2h	140	1台 22kW 活塞发动机
中国	ASN-206 短途多用途无人机	1997年	210	150	6000	8h	222	1台 37.3kW 活塞发动机

表 2 无人机用活塞发动机技术参数

发动机型号	研制公司	用途	转速 (r/min)	功率 (kW)	质量 (kg)	耗油率 (kg/kW·h)
Rotax582	奥地利 Bombardier-Rotax 公司	“蚂蚁”Gnat 750 等	6500	48.0	34.3	
Rotax912	奥地利 Bombardier-Rotax 公司	“捕食者”、“猛禽”等	5800	59.7	58.0	
Rotax914	奥地利 Bombardier-Rotax 公司	“捕食者”、“苍鹭”等	5800	85.8	68.2	
AR741	英国 UAV 发动机公司	先锋、影子等	7800	28.3	10.4	0.347

表 3 无人机用涡喷发动机技术参数

发动机型号	研制公司	用途	推力 (daN)	质量 (kg)	耗油率 (kg/daN·h)	长度×直径 (mm×mm)
TRS18	法国 M icroturboSA 公司	无人飞行器	115	42	1.242	578×306
TRS18-1	法国 M icroturboSA 公司	无人飞行器	147	38.5	1.20	564×306
TR160系列	法国 M icroturboSA 公司	侦察型无人机或靶机	340~422	47	1.08~1.27	749×330
T117	RR 德国公司	CL-289 监视靶机	105	24.2	1.22	766×355
TJM-3	日本三菱公司	J/AQM 靶机	196	46.5		863×349
MD 120	俄罗斯 Granit 设计局	靶机等无人飞行器	118	35.0		1290×265
TR3-117	俄罗斯 NPO Klimov 设计局	航行者-D 无人机	~600			
Midge	美国 M-Dot 公司	微型飞行器	0.62	0.085	1.63	76.2×39.9
L 系列	Locust 美国公司	无人飞行器	4.0~53.4	0.68~4.54		
TJ-90	美国 Sundstrand Aerospace 公司	无人飞行器	48	4.8	1.36	305×152
WR24 系列	美国 W illiam s International	无人飞行器	56~85	13.6~22.7	1.27	500×305
J700-CA-400	美国 Teledyne Ryan Aeronautical	海军 ITALD 诱饵无人机	79	17.2		340×211
J402-CA-702	美国 Teledyne Ryan Aeronautical	航空靶机, 导弹	427	62.6	1.05	846×317
J69-T-41A	美国 Teledyne Ryan Aeronautical	“火蜂”(Firebee) 靶机等	854	158.7	1.12	1138×567

表 4 无人机用涡轴发动机技术参数

发动机型号	研制公司	用途	功率 (kW)	质量 (kg)	功质比 kW/kg	耗油率 (kg/kW·h)	长度×直径 (mm×mm)
L 系列	美国 Leocut 公司	无人飞行器	4.1~82.0	4.54~31.75	0.90~2.58		
250-C20B	美国 RR 公司	“鹰眼”Eagle Eye	313	71.7	4.36	0.396	985×483
WTS34-16	美国 W illiam s International	“哨兵”CL-227 无人机	37.3	24.0	1.55	0.60	531×328
WTS 117	美国 W illiam s International	CL-327 垂直起降无人机	93.2	32.7	2.83	0.42	531×328

表 5 无人机用涡桨发动机技术参数

发动机型号	研制公司	用途	功率 (kW)	质量 (kg)	耗油率 (kg/kW·h)
TPR80-1	美国 M-Dot 公司	潜在无人机	70.8	16.3	0.40
TPE331-1	美国霍尼韦尔公司	捕食者 B	496	152	0.368

表 6 无人机用涡扇发动机技术参数

型号	研制公司	用途	推力 (daN)	质量 (kg)	涵道比	耗油率 (kg/daN·h)
JT15D-5C	加拿大 PWC 公司	X-47A 无人作战飞机	1419	302	2.8	0.584
PW 545A	加拿大 PWC 公司	无人机研制专用型号	1724	374	4.1	0.445
F408-CA-400	美国 Teledyne Continental Motors	无人飞行器	448	65.8		
FJ44-1	美国 W illiam s International	“暗星”(Dark Star) 长航时无人机	854	203	3.28	0.480
ATF3	美国霍尼韦尔公司	YQM-98A	2420	529	2.8	0.51
F124-GA-100	美国霍尼韦尔公司	X-45A	2800	499	0.70	0.81
AE3007H	美国 RR 公司	全球鹰 Global Hawk	3690	717	5.0	0.336

表 7 不同发动机所适用的无人机

发动机类型	速度 (km/h)	使用高度 (m)	续航时间 (h)	起飞质量 (kg)	适用的无人机类型
活塞发动机	110~259	2500~9750 (个别 19800)	1~48	30~1150	长航时、侦察、监视、反辐射等
涡轴发动机	160~390	4000~6100	3~4	658~1100	短距/垂直起降无人机
涡桨发动机	357~500	14000~16000	25~32	1650~3200	中空长航时、攻击无人机
涡喷发动机	700~1100	3000~17500	0.2~3.0	160~2500 (个别可达 13t)	靶机、高速侦察机、攻击无人机
涡扇发动机	500~1000	3000~20000	3~42	600~12000	中空长航时侦察、 监视及无人作战飞机
微型电动机 内燃机	36~72	45~150	<1.0	<0.1	侦察、监听、搜索等
喷气发动机					

## 2 发展途径及趋势

### 2.1 技术要求

不同用途的无人机对动力装置的要求也不同,但都希望动力装置体积小、工作可靠、成本低、维修方便。对一次性使用的靶机、自杀式无人机、导弹的动力装置,主要要求其推重比高,抗过载和抗进口气流畸变能力强,而寿命可以短(1~2h);对无人战斗机动力装置,主要要求其工作包线宽广,加、减速性能好,巡航耗油率低( $\leq 0.8 \text{ kg/daN} \cdot \text{h}$ ),隐身性能好;对长航时无人机,尤其是高空长航时无人机动力装置,则要求其耗油率低( $\leq 0.6 \text{ kg/daN} \cdot \text{h}$ ),寿命长( $\geq 3000 \text{ h}$ ),飞行范围广,高空特性好;小型低空无人侦察机动力装置功率小,但要求其质量小,加工

成本低。

### 2.2 发展途径

从经济性、安全性、可靠性等方面考虑,在成熟的军、民用发动机上改进改型是目前无人机动力装置的主要发展途径。如中国的某靶机动力装置由已有涡喷发动机改型而成,“全球鹰”采用艾利逊公司(现属 RR 公司)AE3007发动机的改进型 AE3007H,“捕食者”B 选用霍尼韦尔 联合公司的 TPE331-10T 发动机, PW 加拿大公司正与 NASA 和德国 MTU 公司共同实施将现有民用涡扇发动机 PW 545 改作 18000m 高空飞行的无人机动力装置的发展计划,并取得了重要进展;美国和欧洲分别实施的联合无人空战系统(J-UCAV)和“神经元”(Neuron)研制计划也首先选择了现有成熟的动力装置(见表 8)。

表 8 J-UCAV 和 Neuron 研制计划中的发动机

型号	X-45A	X-47A	“神经元”
国别	美国	美国	欧洲联合
制造商	波音公司	诺斯罗普·格鲁门公司	达索、萨伯公司等
动力装置	1台霍尼韦尔公司的 F124-GA-100 涡扇发动机	1台 PW 公司的 JT15D-5C 涡扇发动机	1台 RR 透博梅卡公司的 “阿杜尔”涡扇发动机
推力 (daN)	2800	1419	2950
飞机质量 (kg)	5530	2500	6000
飞行马赫数	0.75	亚声速	0.8
升限 (m)	10670	9144	

但是,当改进现有在役发动机不能有效满足飞机需求时,研制新发动机就成为必然。例如,GE 公司认为,对未来无人作战飞机用涡扇发动机而言,现有的发动机或者涵道比太小(如战斗机发动机),或者风扇直径(如民用发动机的)又太大。尺寸太大增加了额外的质量、成本和雷达/红外信号,而尺寸太小又使飞机持续飞行时间太短。为此,GE 公司计划研制新的先进发动机,将尺寸小的支线客机动力的核心机和适当直径的风扇结合起来,研制出可满足需求的具有较高涵道比的发动机。

### 2.3 发展趋势

#### (1) 燃气涡轮发动机将占有最重要的位置

如前所述,活塞式发动机只能适用于低速、低空及质量轻的无人机;对更大使用范围的无人机而言,燃气涡轮发动机应是首选的动力装置。随着燃气涡轮发动机技术的不断进步,其推重比/功质比越来越高,耗油率越来越小,寿命越来越长,使用维修成本越来越低,燃气涡轮发动机在无人机上的应用也就越发广泛。

#### (2) 涡扇发动机是无人机动力装置发展的重点

涡轴、涡扇、涡喷发动机的性能和结构特点各异,给无人机提供了较大的选择空间,如涡轴发动机用于无人直升机,后者用于固定翼无人机。值得强调的是,400~4000daN 推力的中小型涡扇发动机受到了无人机研制商的青睐,因为,这类涡扇发动机耗油率相对较低,质量和推力等级能与无人机较好匹配,易于实现系列化发展,十分适用于具有战略意义的高空长航时无人机(如美国的“全球鹰”)和无人作战飞机(如美国的 X-45A、X-47A)。

#### (3) 其他新型动力装置处于预研阶段

以色列 Bental 公司推出了下一代无人机动力方案——电推进组合型推进系统,其主发动机驱动无人机飞到目标区后关闭,然后用电动机产生电力驱动飞机飞行;PW 公司设计了 1 种新型发动机,不仅仅是推进装置,还能在不附加设备时,从内部产生武器和传感器所需的大量电力,是需要几兆瓦电力来运行微波武器或激光武器、大功率远距干扰器和尖端电子攻击系统的单发无人机十分理想的动力装置;波音公司及其合作伙伴正在研制的续航时间可达 10da 的新型高空长航时无人机(HALE UAV)的

特色之一是采用氢燃料;美国一些公司研制的由新型固态氧化物燃料电池驱动的和以色列研制的由锌空气电池驱动的电动机,正在微型无人机上试用。

### 3 对无人机动力装置发展的几点看法

动力装置仍是无人机发展的瓶颈,无法满足无人机发展的迫切需求,必须重点解决。

#### (1) 远近结合, 统筹规划

无人机用途广泛, 品种繁多, 是当前研究的热点。应制定合理的无人机发展路线, 合理谋划无人机动力装置的发展战略, 尤其是对显著影响国家国防及经济建设的无人机动力装置, 如中小型涡扇发动机, 应作为重中之重, 优先发展。

#### (2) 重点突破, 快速改型

以飞机需求为牵引, 选择成熟的有人驾驶飞机所用的航空发动机进行改进改型研究, 以快速突破无人机动力装置适应性改进的关键技术, 在较短时间内形成产品。

#### (3) 加强预研, 自主创新

应从长远出发, 坚持动力先行的原则, 积极开展无人机动力装置的预先研究和自主创新工作, 为适应未来无人机发展的要求打下坚实的基础。

动力装置类型不同, 预先研究也应各有侧重。

高空长航时无人机发动机的关键技术包括: 高空低雷诺数条件下风扇、压气机喘振, 高、低压涡轮效率降低, 高空低压下燃烧室稳定燃烧, 发动机数字控制系统可靠控制, 整机和部件在宽广工作范围的性能、可操纵性特性与极限; 无人直升机涡轴发动机的关键技术包括: 小流量、高压比组合压气机效率, 小流量燃油喷嘴高质量雾化, 小型高温涡轮叶片冷却, 高速转子动力学; 小型无人机涡喷发动机的关键技术包括: 由尺寸小带来的低雷诺数下部件的效率, 高速转子动力学, 小型部组件及零件精密加工工艺, 发动机润滑。

#### 参考文献

- 1 《世界无人机大全》编写组. 世界无人机大全. 北京: 航空工业出版社, 2004.
- 2 倪行强, 李新民. 发展中的长空时无人机动力装置. 国际航空, 1995, (6).
- 3 李美金, 等. 军用无人机动力装置分析. 无人机, 2006, (1).
- 4 吴蔚. 美、欧无人作战飞机研究的新举措. 航空情报, 2006, (9).
- 5 四明. 无人机用先进发动机设计. 无人机, 2005, (2).
- 6 杨致明. 退役发动机改装为无人机动力的技术途径. 无人机, 2005, (1).

## PW 公司验证先进涡轮转子

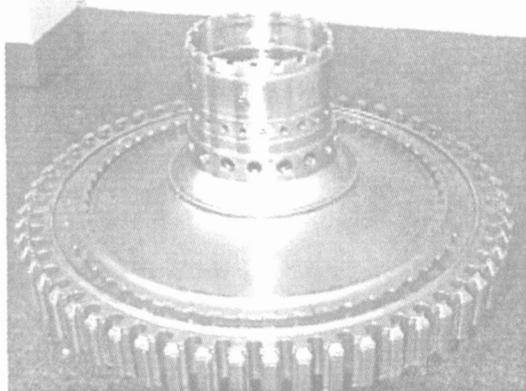
PW 公司为综合高性能涡轮发动机技术 (IHPTET) 计划第 3 阶段的先进涡轮发动机燃气发生器 (ATEGG) 的初始验证, 成功地完成了双轮辐盘 (TWD) 涡轮转子的旋转地坑试验。

TWD 概念的优点包括: 与常规的涡轮转子相比,  $AN^2$  能力显著提高 (+37%); 质量减轻。TWD 概念的高  $AN^2$  能力对实现 IHPTET 第 3 阶段目标至关重要。TWD 初始旋转地坑试验验证在 91% 工作转速时停止, 因为盘后孔出现了不对称的屈服力, 其原因是, 在热处理期间, 全尺寸转子中存在的热梯度造成盘后孔残余应力大。对全尺寸转子的分析结论是, 该转子具有足够的裕度, 可完成 ATEGG 试验。

在最终验证试验之前, 转子重新安装了测试仪表进行平衡, 以排除转子故障, 并为核心机试验提供了至少 10% 的爆裂裕度。转子达到 100% 的目标转

速, 使 ATEGG 核心机和发动机工作时结构和加速的限制最低。预计 ATEGG 核心机推重比将提高 70%。

(孙广华)



双辐板盘的涡轮转子