

国产航空斯贝发动机的工业及船用化发展

闻雪友 赵友生

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

【提要】 本文介绍了改型航空发动机应用概况,提出了航空斯贝发动机作母型机改装为工业和船用系列化机型的途径及优点。

主题词 航空改装 斯贝发动机

前 言

世界上,工业和船用燃气轮机正方兴未艾。在国内,对工业及船用燃气轮机的热情一直在增长,我国各大油田相继从国外购置了各种型号的燃气轮机发电、热电或热动联供装置(表1),由国产航空发动机改装的轻型燃气轮机也纷纷投运,用于发电、供热、注水、泵气、煤矿灭火和机车动力等(表2)。在舰船动力方面,除了国内研制的船用燃气轮机外并购置了LM2500燃气轮机,正在和美国普朗特·惠特尼公司合作开发FT-8工业及船用燃气轮机,也显得生机勃勃(表2)。

在工业及船用燃气轮机市场上,由航空发动机派生的工业及船用燃气轮机占有相当大的比例,因为“航空改装”可用最快和最节省的方式使工业界应用一直保持领先的航空发动机技术。高性能发动机的设计、研究、运行验证是一个长期而花费巨大的过程,航空改装在财政上的优点更使它受到强烈的偏爱。

表 1 油田引进的燃气轮机装置

序号	机 组 型 号	厂 商 名 称	投 运 方 式
1	MS6001	GE	COGAS发电,热电联供
2	Frame6	JB	COGAS发电,热电联供
		Alshom	COGAS发电,
3	SK15HE	R-R	热电联供
4	Centaur	Solar	海洋平台发电,驱动压气机
5	Tornado	Ruston	热动(驱动压气机)联供
6	KG5	Kongsberg	热电联供
7	LM2500	GE	发电
8	PG5000	Ruston	热动(驱动压气机)联供

※ 本文收到日期:1988年4月1日。

• 1 •

表 2 航空改型燃气轮机应用概况

型 别	使用的燃气轮机	功率 (kW)	使用地点
YD—2000发电机组	WJ ₆ G1/1A	2000	中原、南阳、任邱、大庆、克拉玛依等油田
YD—1250发电机组	WJ ₅ G	1250	大庆油田
3DR ₅ 热电联供机组	WP ₆ G1/1A	4050/4700	大庆油田
WB—75注水泵机组	WZ ₆ G	750	中原油田
WZ5G注水煤机组	WZ ₅ G	1140	炼油厂、克拉玛依油田
WZ5G压缩机组	WZ ₅ G	1140	中原油田
DQ—1000煤矿灭火器	WZ ₂ G		在萍乡煤矿作试验
WS ₉ G ₁ 发电机组	WS ₉ G1	4400	东方红炼油厂
机车动力	WJ ₆ G ₂ C	2600	试运

表 3 国内船用燃气轮机近况

我国于1975年从英国罗耳斯·罗依斯公

型 别	产 地	司引进的 Spey MK202 航空涡轮风扇发动
LM2500	美	机已基本国产化，其工业及船用化工作取得
MGT-260	中	了进展。现在，也许是讨论进一步发展的适
MGT-950	中	
FT-8	中、美联合	当时机。

斯贝—合适的母型机

航空斯贝发动机有民用和军用两个系列，其发展见表 4，主要性能数据见表 5，发展过程见表 6。

从中可见，航空斯贝发动机经各种机型的发展和改进，性能有了很大的提高。燃气初温由 1313K 提高到 1440K，总压比由 15.4 增高到 21.4，内涵流量由 46kg/s 加大到 56—68kg/s。到 1981 年底，使用总数已达 4440 台，累计运行 2200 万小时，发展得相当成熟，因而它是一型适于工业、船用化改装，性能良好且功率等级适中的机型。

美国 COOPER—ROLLS 公司与英国 ROLLS—ROYCE 公司已先后将航空斯贝 RB168—66 型 (TF41—A2) 发展成五型工业及船用燃气轮机：

1) COOPER—ROLLS 工业斯贝燃气轮机

由 MK1900 工业斯贝燃气发生器 (低压风扇顶切) 配 RT45 动力涡轮组成，用于加拿大输气干线。

2) SMIA 船用燃气轮机

由 MK1903 船用斯贝燃气发生器 (低压压气机系重新设计并采用 RAB 燃烧室) 配 1978 动力涡轮组成，已用作英国海军 22 型、23 型和荷兰海军 M 级等大型护卫舰的主动力。

3) SK15HE 燃气轮机热电联供装置

其燃气轮机系由 MK1907 工业斯贝燃气发生器 (除燃烧室及起动方式外与 MK1903

相同) 配侧面排气的 1978 动力涡轮组成, 用于我国大庆、南疆油田等处。

4) SMIC 燃气轮机

1984 年起 R—R 公司在 SMIA 的基础上通过改进高压涡轮叶片冷却结构提高了燃气初温, 加大低压压气机压比和流量, 使功率增大到 18MW, 发展成 SMIC 燃气轮机。

5) SMIC ICR 燃气轮机

在 SMIC 基础上增加一个中间冷却器和一个回热器, 发展成间冷一回热循环。其额

表 4 航空“斯贝”发动机的发展系列表

压气机	民用型	亚音速军用型	超音速军用型
函道比 1.0, 4 级低压压气机, 12 级高压压气机	<p>RB163-1 (MK505)</p> <p>“三叉戟” 1 C</p> <p>RB 183 (MK555)</p> <p>“友谊”</p>	<p>RB 168-1A (MK 101)</p> <p>“海盗” S₂</p>	
修改涡轮	<p>RB 163-2 (MK 506)</p> <p>B.A.C. 111/200</p>		
函道比 0.7, 5 级低压压气机, 12 级高压压气机	<p>RB 163-25 (MK 511)</p> <p>“三叉戟” 1E 1E-140</p> <p>B.A.C. 111/300</p> <p>RB 163-25 (MK 512)</p> <p>“三叉戟” 2E 3B</p>	<p>RB 168-20</p>	<p>“猎犬” MK 250</p> <p>RB 168-25R (MK 201, 202)</p> <p>“鬼怪” F-4K (海) F-4M (空)</p>
函道比 0.77, 3 级低压风扇, 2 级中压压气机, 11 级高压压气机		<p>RB 168-62 TF 41-A-1</p> <p>A-70 “海盗” I</p> <p>RB 168-62 TF 41-A-1</p> <p>A-7E “海盗” I (海)</p>	
函道比 0.87, 2 级低压风扇, 12 级高压压气机		<p>TF 41 放大型 912-B28</p>	<p>TF 41 放大型 912-B23</p>

表 5 航空“斯贝”发动机的主要性能数据

发 动 机 型 号	低 压 压 气 机				高 压 压 气 机				总 比 压	涡 轮 前 温 度 K	最 大 起 飞 推 力 kg	最 大 连 续 推 力 kg	备 注
	级 数	压 比	流 量 kg/s	转 速 r/min	级 数	压 比	流 量 kg/s	转 速 r/min					
R B 163- (M K 555)	4	2.46	92	8,600	12	6.26	46	12 200	15.4		4468	4295	军用运输机, 1968年服役
R B 163-1 (M K 505)	4		92		12				16.9	1313	4468	4285	民 航 机
R B 163-2 (M K 506)	5		92		12				16.9	1313	4722	4532	民 航 机
R B 163-25 (M K 510)	5		93.3		12				19.1	1356	4990	4781	民 航 机
R B 163-25 (M K 511)	5		93.3		12				19.1	1356	5171	4963	民 航 机, 1968年 航线使用
R B 163-25 (M K 512)	5	2.6	93.3	8115	12	7.36	55	12 490	19.1	1390	6430	5253	民 航 机
R B 165-25R (M K 201-202)	5	2.7	95	8600	12	7.45	56	12 640	20.1	1440	5670		攻 击 机, 1968年 交付使用
R B 168-62 (T F 41-A-1)	3	2.45	117	8850	11	5.92	66	12 770	20.2				攻 击 机, 1968年 交付使用
R B 168-66 (T 41-A-2)	3	2.49	119	9150	11	6.18	68	13 000	21.4	1424	6800		舰 载 攻 击 机 1968年 交付使用
	2	1.39											

表 6 航空斯贝发展过程

机 型	发展过程 $\left(\frac{\text{型号}}{\text{公斤推力}} \times \text{推力增长率} \right)$	备 注
斯贝 (民用)	$\frac{\text{MK505}}{4720} \times 9.5\% \rightarrow \frac{\text{MK511}}{5170} \times 5.5\% \rightarrow \frac{\text{MK512-5}}{5454} \times 4\% \rightarrow \frac{\text{MK512-4}}{5670}$	总共增加 20.1%
斯贝 (军用)	$\frac{\text{MK101}}{5100} \times 6.6\% \rightarrow \frac{\text{MK250}}{5440} \times 4.6\% \rightarrow \frac{\text{MK201}}{5692} \times 12.4\% \rightarrow \frac{\text{TF41-A1}}{6400} \times 6.2\% \rightarrow \frac{\text{TF41-A2}}{6800}$	总共增加 33.3%

定功率可达 21.5MW，热效率达到42—43%，具有极好的部分负荷性能。这种发动机正在研制中。

以上情况表明，斯贝是一台合适的母型机。

英国在十多种斯贝型号中选择了 RB168—66 (TF41—A—2) 作为工业/船用改装的母型机，原因主要有三：

- 1) 其核心机流量大，因而改装后功率大。
- 2) 它是为美国海军 A7E “海盗” I 歼击机设计的，有关部件已考虑了抗腐蚀要求，因此特别适合于船用改装。
- 3) 风扇级数少（两级），对顶切方案实施有利。

我国引进的是 MK202，其内涵流量比前者小 17.6%，如燃气初温相同，则功率也明显小于前者。MK202 有五级风扇，对顶切方案来说，增加一些难度。

中国工业和船用斯贝的发展系列

基于我国目前在工业和船用燃气轮机方面还处于较落后的现实和研制经费严重不足的情况，需要最大限度地一机多用。此外，双转子内外涵涡轮风扇发动机斯贝的涵道比小，推力中等，发展成熟，客观上也有可能发展成各种功率等级、性能的行业及船用燃气轮机，以满足各种应用场合的需要。

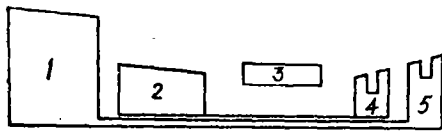


图 1

- 1—低压风扇 2—高压压气机 3—燃烧室
4—高压涡轮 5—低压涡轮

图 1 为 Spey MK202 发动机组成的示意图

1) 利用 MK202 核心发动机发展一型工业/船用双轴燃气轮机。其燃气发生器由原高压压气机、燃烧室和高压涡轮组成，功率从新设计的动力涡轮输出（图 2）。此型燃气轮机功率可达 4420kW，耗油率为 350g/(kW·h)。



图 2 (6—动力涡轮)

2) 上述简单循环燃气轮机压气机的压比为 8，可在此基础上发展成回热循环（图 3），从而使热效率达 35%。当然，这样的效率水平是一

台高压比的简单循环燃气轮机也可能达到的，且免去了增加回热器所带来的复杂性。两相比较，是否一定要用回热循环值得商榷。但是，如果没有一台适宜的高压比简单循环燃气轮机，则发展回热循环也不失为一种现实的考虑。

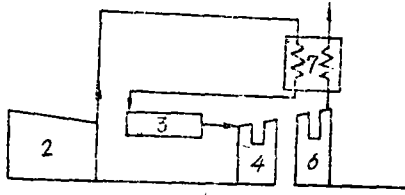


图 3 (7—回热器)

3) 直接将 MK202 的低压风扇顶切，用作低压压气机，利用双转子的燃气发生器发展一型中挡功率的工业/船用叁轴简单循环燃气轮机(图 4)。功率10 500kW，耗由率290g/(kW·h)。

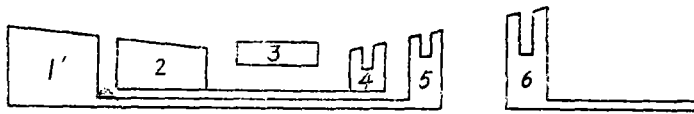


图 4 (1'—低压压气机)

4) 在上述低压风扇顶切形成的低压压气机前再加一级，提高压气机的流量和压比，使功率增至 12 000kW，发展成一型工业用燃气轮机。

5) 把 MK202 双转子燃气发生器中的低压风扇整个去除，换装一台重新设计的低压压气机(压比3.3)，使整机功率达 12 500kW。这一型与前述的“顶切加级”型相比不仅功率略大，并可获得较好的低工况性能，因而更适于发展为一型工业/船用燃气轮机。

如果在新设计的低压压气机前再加一级，进一步增大流量、压比，功率可达 14 000kW。这个方案的最大优点是原航机的低压涡轮几乎可不作调整，高压轴转速也可保持不变，给燃气发生器的匹配调整带来许多方便。

6) 在方案 5 的基础上增加中间冷却器和回热器，构成间冷一回热复杂循环燃气轮机(图 5)。它具有很高的循环效率，优良的变工况性能。由于热交换器方面的技术进步，仍能使装置结构紧凑。这种燃气轮机可能特别适于舰用，美国、英国和联邦德国都在积极研制，作为未来的舰用燃气轮机动力。

图 6 示出了英国 ICR Spey 的功率、耗油率，并与其它循环作了比较，其热效率可达 42%。利用动力涡轮可变几何，使在 50% 的功率时仍能保持全负荷的效率。

诚然，ICR 循环的研制更为复杂。

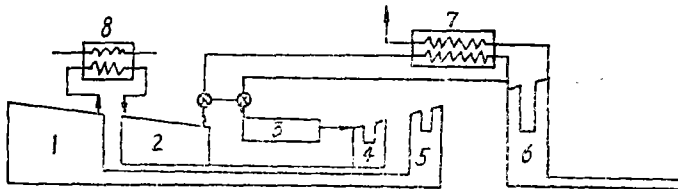


图 5 (8—中间冷却器)

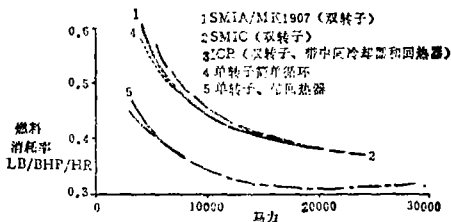


图6 斯贝改型机功率与耗油率的关系

7) 可在斯贝改型简单循环燃气轮机的基础上发展成双工质热机(图7)。把余热锅炉产生的蒸汽回注到燃气轮机中去, 燃气—蒸汽混合工质在涡轮中做功。这种循环的热机比功大、热效率高。以方案3的10 500kW燃气轮机为例, 改成双工质发动机后其功率可增至15 000kW, 热效率提高38% (以纯发电计)。这种双工质热机特别

适合于工业上热电联供, 当余热锅炉前有补燃时更具有宽广的运行范围, 可以相当灵活地适应各种热电负荷要求。

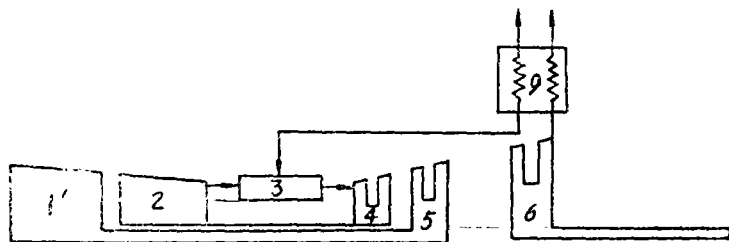


图7 (9—余热锅炉)

8) 在斯贝改型简单循环燃气轮机上加装余热锅炉(图8), 产生的蒸汽驱动一蒸汽轮机, 组成燃—蒸联合循环装置。以方案3的10 500kW燃气轮机为例, 改为联合循环后, 其总功率为15 000kW, 热效率为43%。

如果所设计的余热锅炉其产出的蒸汽系供热之用, 则组成燃气轮机热电联供或热动联供装置。

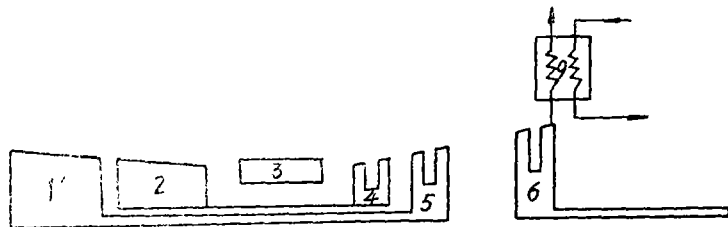


图8

系列发展的优点

以MK202为基础发展一系列机型的做法具有显著的优点:

- 1) 用一种灵活的组合概念, 适应了各种不同的用途(图9)。
- 2) 为实现系列化、通用化和标准化提供了良好的基础。
- 3) 系列发展方式无疑能降低研制费用, 减少用户的购置费。
- 4) 便于解决用户最关心的售后服务保障问题。
- 5) 易于积累运行经验, 提高可靠性。

6) 有利于运行人员的培养。

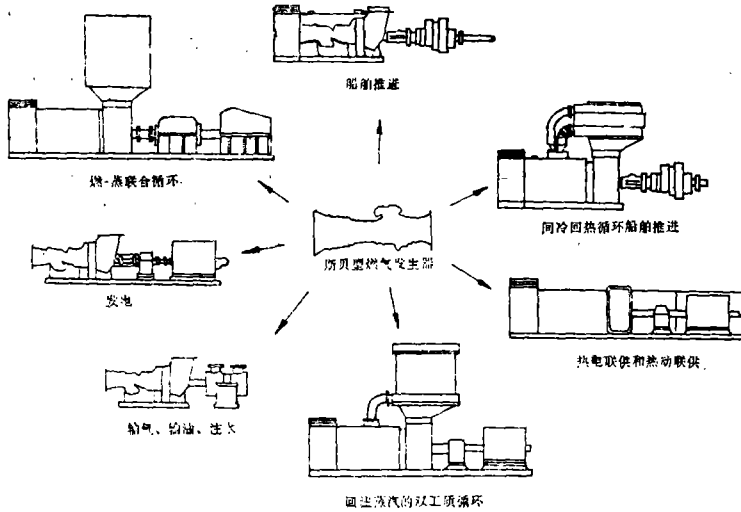


图9 国产斯贝改型机的应用

结 束 语

1) 国产航空斯贝发动机是一台合适的母型机。它的工业/船用系列化发展是一项符合国情,技术上可行,有一定先进性、现实性的政策,希望引起各有关部门进一步重视。

2) 在发展工业/船用系列过程中,应对能燃烧多种液态和气态燃料的能力以及控制装置予以足够注意。

3) 系列发展问题并非纯系设想。事实上,双轴简单循环燃气轮机,叁轴简单循环燃气轮机,顶切加级低压压气机,重新设计低压压气机,双工质平行一复合循环验证机等方案在哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所、西安航空发动机公司、中科院工程热物理所、哈尔滨船舶工程学院等单位已进行了大量实机性工作,有的已开始整机运行。

Development Efforts Aimed at Adaptation of Home-Made Aero Spey Engines for Industrial and Marine Applications

Wen Xueyou, Zhao Yousheng

(Harbin Marine Boiler and Turbine Research Institute)

Abstract

This paper gives a brief description of the application of an aero-derivative marine engine and outlines the general approach and advantages of modifying aero Spey engines into serial production engines for industrial and marine use.

Key Words: Aero engine marinization Spey engine