

某型低压压气机气动设计

鞠世立 李 斐 赵友生

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

[提要]采用以试验为基础的三元方法配之三元校算,设计出了性能优良并满足预定技术要求的某型低压压气机。全台试验结果表明,这台压气机未经调整,其流量、压比、效率已经达到了设计指标,优选工作点后性能更佳,压气机低工况性能好,有可用的稳定工作范围,出口流场均匀。

关键词 低压压气机 气动设计

一 前 言

将航空涡轮风扇双转子发动机改装为船用发动机,要去掉原机风扇的外函部分。对于前风扇,通常有两种途径:一是顶切或顶切加级;二是重新设计低压压气机。对某型航空涡轮风扇发动机的论证分析认为:重新设计是船用化改装的一条较佳技术途径。哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所循此途径进行工作,业已成功地研制出某型航空舰改机组的低压压气机,全台试验结果表明,性能达到并超过了设计指标。

该低压压气机在气动设计上千方百计地满足压比、流量、效率和稳定工作范围的要求,结构设计兼顾了可靠性、强度、刚度、工艺性、使用性和可维护性。为了达到预期目标,做了大量的气动、强度振动、材料和工艺试验。

实践证明:重新设计的低压压气机确比顶切加级低压压气机具有更为优良的性能。可以期望整个燃气轮机组的功率将增高,油耗将降低并适宜在海洋环境下工作。

二 气 动 设 计

1. 设计体系

在以往自行设计的几型亚音速轴流压气机基础上,已形成了适用于船舶及工业燃气轮机中等负荷轴流压气机设计体系。

它以平面叶栅吹风数据为基础,在经过实践验证的“设计规范”的参数范围内取值,通过三元核算确定气动参数,按马赫数选原始叶型,穿插进行叶片造型和强度振动计算,依据同类型压气机试验曲线,考虑本机特点,预先计算压气机特性。

以此体系设计的三型轴流压气机均获成功,几乎未加调整,压比、效率就达到了设计要求,仅流量的试验值略微偏大(比设计值约大4—6%)。

2. 气动设计

(1) 通流设计

a. 级数 设计了五级方案和六级方案,为获取较为平坦的压气机特性,使其在低工况

下具有良好的性能,选定六级方案。设计选定平均级压比1.22,平均级加功量23.7kJ/kg(2421kgm/kg),平均级温升23.63K,平均级效率0.886。

b. 流路 压气机转速由总体按整机工作性能和低压涡轮工作要求由总体给定。确定流路尺寸实际上就决定了各半径处的圆周速度。做了与顶切所取中介机匣良好衔接的流路方案设计,也做了重新设计中介机匣的流路方案。两者都可满足要求。但前者尺寸小,圆周速度低,气流转角要大些。后者气动参数比较适宜,但要重新设计中介机匣。综合考虑后,选定重新设计中介机匣方案。

流路为由前向后平均直径略向上倾之流路。对应第一级动叶进口边顶部机匣外壁半径386mm,机匣外壁母线为一内倾3.5°直线。第一级轮毂比0.530,第六级轮毂比0.758。

c. 气动参数 按进口气流轴速马赫数选取第一级轴向速度,按确定的级间轴速差,确定各级轴向速度。初选第一级反应度、马赫数,算出第一级切向分速。按级间反应度差确定各级切向分速。

第一级轴速185m/s,第六级轴速175m/s,沿压气机流路全程轴速降低10m/s。第一级动叶中径气流相对马赫数 $M_{w_1} = 0.797$,静叶气流马赫数 $M_{c_2} = 0.656$,第六级 $M_{w_1} = 0.715$, $M_{c_2} = 0.530$ 。第一级反应度 $\rho' = 0.60$,流量系数 $\varphi = 0.737$,第六级 $\rho' = 0.68$, $\varphi = 0.671$ 。

全机气动参数适宜,都在控制的佳佳范围内。最大动叶气流转角 $\angle\beta = 19.52^\circ$,相应叶栅实度 $(b/t)_R = 0.99$;前五级最大静叶气流转角 $\angle\alpha = 29.26^\circ$,相应叶栅实度 $(b/t)_R = 1.11$ 。压气机没有出口调直叶片,气流经第六级静叶转成轴向,气流转角较大 $\angle\alpha = 38.16^\circ$,叶栅实度 $(b/t)_S = 1.34$ 。第六级静叶出气角 90° ,具有较大的转角能力,设计适当的单排大弯度叶栅能够实现所要求的 38.16° 的气流转角。

2. 流型设计

六级全部采用居间流型。第一级接近等反应度,第六级接近等环量。

本机流量较大,叶片较长。第一、二级动叶顶部气流相对马赫数突破了原设计体系规定的0.82的限制,这可以通过采用双圆弧叶型加以解决,从而向跨音速迈进了一步。

由给定的各级动叶顶部气流相对马赫数 $M_{w_1,t}$ 求解居间流型各常数,这样就可以沿叶高进行设计了。

第一级, $M_{w_1,t} = 0.9$,第二级 $M_{w_1,t} = 0.87$,第三级 $M_{w_1,t} = 0.825$,第六级 $M_{w_1,t} = 0.77$;在静叶中, $M_{c_2,\max} = 0.75$ 。第一、二级动叶采用双圆弧叶片,第三至第六级动叶和全部静叶采用A-40叶片。

在全部六级中,几个参数最大值如下:

$$\begin{aligned} \angle\beta_{\max \cdot h} &= 33.41^\circ, & D_{R \cdot \max \cdot t} &= 0.43, & D_{R \cdot \max \cdot h} &= 0.43, \\ \angle\alpha_{\max \cdot h} &= 39.12^\circ, & D_{S \cdot \max \cdot t} &= 0.38, & D_{S \cdot \max \cdot h} &= 0.49, \\ (b/t)_{R \cdot \max \cdot h} &= 1.41, & (b/t)_{S \cdot \max \cdot h} &= 1.42, & (b/t)_{S \cdot \max \cdot h} &= 1.325. \end{aligned}$$

3. 叶片设计

得到较宽的稳定工作范围,一直是我们追求的重要目标。为此,采用进口变尾缘叶片防喘,在第一、二级动叶顶部加处理机匣,在设计中选用小展弦比叶片。

按设计流路图所取弦宽 b ,由气动需要的叶栅实度 b/t 算出叶片数。动叶取质数,静叶取偶数。计算扩散因子,最后确定叶片数和实际叶栅实度。

为了使级在变工况下具有良好性能,按级所在前后次序、叶型、截面正确选取攻角。按

气流马赫数以及截面位置，确定叶片相对厚度。

计算出叶片造型几何参数，选择叶片型，计算叶片几何特性，计算应力和振动频率，最后计算出叶片型面座标。叶型座标由一个横座标对应两个纵座标的形式给出，横座标经过圆整以利加工。

4. 特性计算

- (1) 按统计法计算特性；
- (2) 以同类型压气机试验特性为基础，考虑本机特点，如变尾缘进口导叶，计算特性。

三、试 验 验 证

按能装在发生器上试验并能在实舰上应用的要求，设计并加工出一台产品与试验兼用的压气机。其上分布许多测量孔，增设出口测量段及适当部件使它在试验台上可靠定位并与传动轴系、进排气道相衔接。从而实现全尺寸实物压气机在试验台上的试验。

试验的主要项目有：

- (1) 设计状态（未加调整）总特性；
- (2) IGV和S1转角总特性；
- (3) 加处理机匣总特性；
- (4) 级特性测量；
- (5) 进出口流场测量；
- (6) 失速与喘态跟踪测量。

1. 设计点参数

图 1 示出了设计状态试验总特性。

表 1 给出了设计点参数的设计要求、设计结果、试验结果和整机优选工作点数据。

表 1

序号	符号	单位	设 计 点			优选工作点
			设计要求	设计结果	试验结果	
1	π^*	—	3.1~3.3	3.3	3.3	3.31
2	η^*	—	0.86~0.87	0.867	0.868	0.8893
3	\bar{G}	%	100	100	104.6	101.3
4	SM	%	15	20.68	21	16.5
5	n	r/min	8120	8120	8120	7958
6	$\frac{1}{n}$	%	100	100	100	98

由表 1 可见，在设计状态下，即压气机未经任何调整，在设计转速下，压气机全面达到设计指标。

在图 1 标有阴影的三角区内，各点参数均能满足整机要求，其中以表 1 给出的优选工作点参数对整机为优。

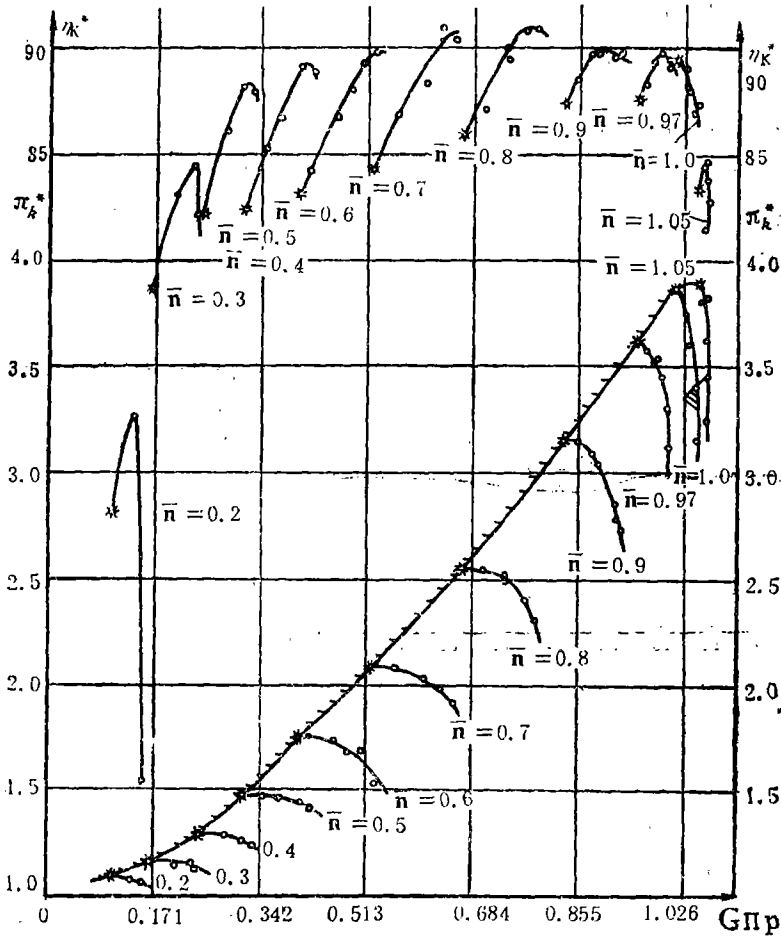


图 1 低压压气机设计状态试验总特性

2. 变工况

表 2 给出了整机工作线上各点参数。

表 2

\bar{n}	0.980	0.964	0.928	0.887	0.810
π	3.31	3.26	3.12	2.94	2.57
\bar{G}	1.013	0.990	0.938	0.875	0.75
$\eta^* \%$	88.93	89.56	90.22	89.86	89.69
\bar{n}	0.765	0.720	0.646	0.524	
π	2.36	2.16	1.88	1.53	
\bar{G}	0.673	0.600	0.500	0.375	
$\eta^* \%$	89.03	88.00	86.90	86.08	

由表 2 可见:

(1) 压气机具有良好的变工况性能，其突出优点是效率高，在 $\bar{n} = 0.928$ 时效率最高，达0.9022，即使在低速区效率也很高， $\bar{n} = 0.524, \eta^* = 0.8608$ ，使整机在整个运行范围内都具有良好的经济性。

(2) 压气机特性图比按统计法算出的特性图好，喘振边界在中速无凹折。计算的工作线与喘振边界有足够距离，有可用的喘振裕度，但在部分低转速下SM显得较小。为了使整机具有更宽广的工作范围，增大SM，可以通过变几何等方式进一步解决。

3. 出口场

图2给出六级静叶出口总压沿叶栅节距分布，图3给出六级静叶出口总压沿径分布。

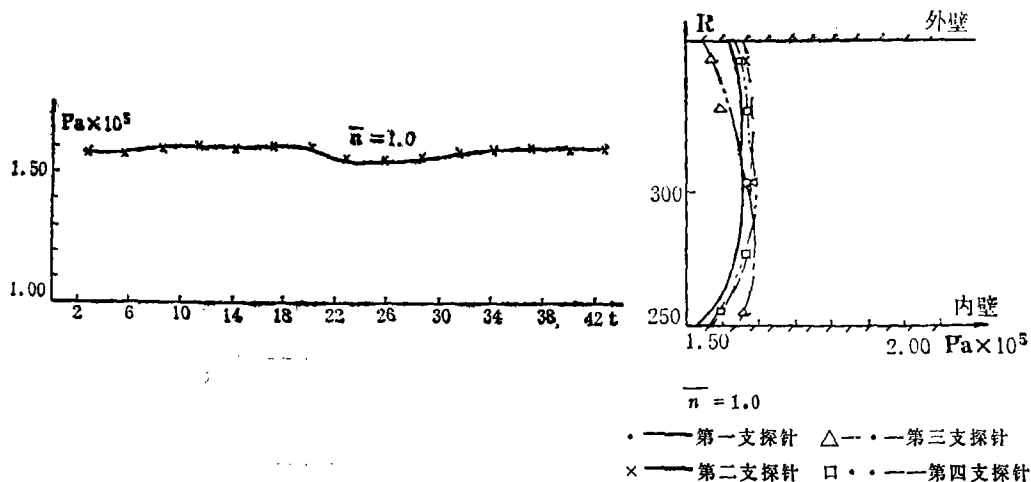


图2 六级静叶出口总压沿叶栅分布

图3 六级静叶出口总压沿径分布

由图2、图3可见，六级静叶出口总压无论沿叶栅节距还是沿叶高分布都是很均匀的。流经中介机匣后更加均匀，其不均匀度 $< 3\%$ 。

图4给出六级静叶出口气流速度沿径分布，图5给出中介机匣后气流速度沿径分布。

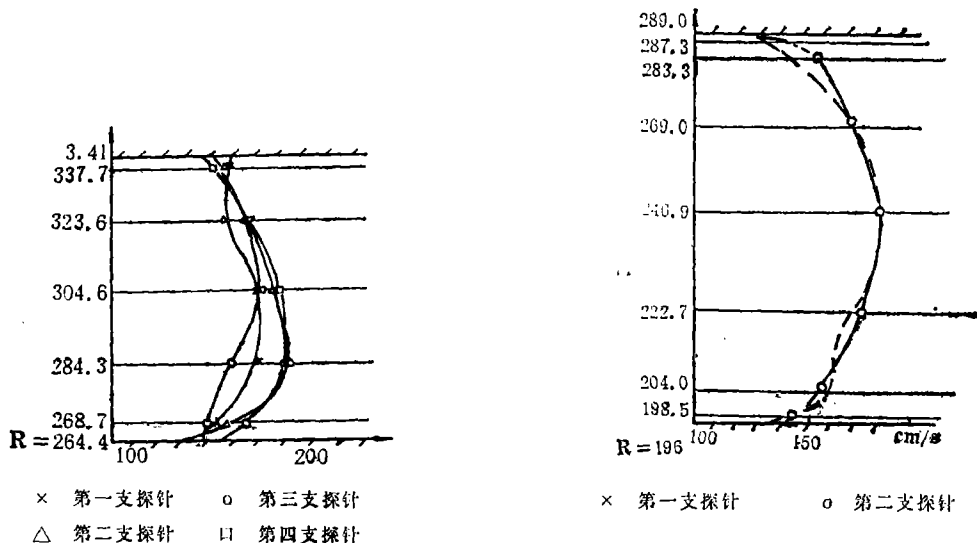


图4 六级静叶出口气流速度沿径分布

图5 中介机匣出口气流速度沿径分布

由图4可见，在六级静叶出口通道两端由于受壁面影响速度较低，通道中间偏下处速度

较高。第六级静叶出口气流速度设计值沿叶高相等,均为 177.16m/s ,第一、三支探针测得数据沿径变化平坦,接近设计值,第二、四支探针测得数据沿径变化略大,最大比设计值约大10%,最小比设计值小约15%,这种局部不均匀一般认为是正常的,进入下游特别是经数次吹风调整的中介机匣后会逐渐趋于平坦、均匀。图5中的气流分布证实了这一点。

六级静叶出口气流已基本转为轴向。用方向探针沿径做了测量,一些截面气流偏离轴向为 0° ,部分截面气流偏离轴向 $5\sim 10^\circ$ 。

四 结 束 语

1. 该低压压气机的研制表明,重新设计低压压气机是航空燃气涡轮发动机船用化改装的一条现实可行的技术途径。

2. 采用以试验为基础的设计方法设计出了满足总体要求的低压压气机。这种方法使设计点和变工况都具有良好的性能,能够保证设计的压气机压比、效率和流量(通常不需要调整或调整工作量很小)。但在扩大稳定工作范围方面还需进一步做工作。

3. 20多年来研制压气机的经验是宝贵的,几型压气机按着有继承有发展的方式逐步前进。这台压气机采用变尾缘进口导叶、双圆弧动叶片,在原有基础上做了若干发展工作。

4. 低压压气机给出了较为均匀的出口压力场、速度场,这是精心设计和反复试验优选而得到的。单对低压压气机来说,其出口场是良好的;做为高压压气机进口,畸变度小、流场均匀本应是可以匹配的。当然就高低压转子匹配来说,虽然已经做了大量工作,但仍需进行预先研究和匹配试验,以保证利用机上的调整措施使高低压转子匹配良好地工作。

参 考 文 献

- [1] 斯捷金B.C.等编,张惠民等译:《喷气发动机原理(叶片机)》,国防工业出版社,1958年
- [2] 帕达布也夫Ю.С.等编,李超俊等译:《轴流式和离心式压缩机的理论与计算》,中国工业出版社,1962年
- [3] 美航委成员编,秦鹏译:《轴流压气机气动设计》,国防工业出版社,1975年
- [4] 王仲奇、秦仁编:《透平机械原理》,机械工业出版社,1981年
- [5] 贺尔谢尼柯夫 K.B.等著,魏仲犹等译:《多级轴流压气机的参数选择和计算》国防工业出版社,1964年
- [6] 斯贝MK202发动机设计、试验资料选编,国营红旗机械厂,1982年



marine prime mover with the steady-state error constants of six systems being provided, which can serve as useful reference data to marine and electrical engineers.

Key words: marine engines, speed governing system, analysis.

MIA-01-CC Chen's Cycle Co-generation Power Plant..... Wen Xueyou (21)

A Study on the serious Corrosion Found on a Marine Main

Superheater.....Gong Sanxing (26)

Abstract

The chief causes of serious corrosion found in a marine main boiler superheater are analysed. It has been pointed out that the boiler operation in conformity with the thermal calculations drawn up by the boiler design bureau is justified and is to be recommended.

Key words: corrosion of marine boiler superheater, steam wetness

The Present Status of Industrial and Marine Boiler Development in

Foreign Countries.....Cnen Qiduo, Sun Shaojing,

Lin Binggang, li weigen (31)

Abstract

This paper gives a brief description of the industrial and marine boiler development in some foreign countries. Presented in some detail are the technical achievements as regards the enhancement of boiler capacity and steam parameters, improvement of boiler design and efficiency, upgrading of firing equipment and the use of advanced automatic control systems, etc.

Key words: industrial boilers, marine boilers.

Aerodynamic Design of a Low pressure Compressor

.....Ju shili, Li Fei, Zhao Yousheng (38)

Abstract

By adopting a test-based two-dimensional method coupled with three-dimensional verification calculations a high-quality lowpressure compressor with characteristics capable of satisfying preset technical requirements has been successfully designed. The test results of the compressor as a whole have shown that the compressor without any further adjustment can attain all design objectives in respect of flow rate, pressure ratio and efficiency. With operating points being optimized it is possible to achieve an even better performance. The compressor features good working characteristics when operating at low load conditions, a relatively wide range of stable operation and an uniform outlet flow field.

Key words: low pressure compressor, aerodynamic design.

Boundary Element Method for the Solution of Subsonic Compressible

Plane Cascade Flow Fields by Use of Equivalent Cascades

..... Lin Chengxian, Liao Aixian (44)