

轴流压气机模化设计探讨

金永民

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔提要〕 本文简述了轴流压气机模化设计的基础、应该具备的模化条件及修整系数考虑。对如何选择母型机、模化点的选取及加级设计作了一些讨论,并具体举例说明采用模化设计方法,得到满足性能要求的轴流压气机。

关键词 轴流式压气机 模化设计

前 言

模化设计是轴流压气机设计诸方法中行之有效的办法。它不同于孤立翼型,平面叶栅及模型级的试验结果为基础的计算方法,也不同于三元气流的理论计算方法。模化设计是整台模化或大部分级模化母型压气机,还可以加级或减级,是一种有发展前途的设计方法。

一、相似理论是模化设计的基础

1. 模化准则

- (1) 通流部分几何相似,包括表面粗糙度相似。
- (2) 平均绝热指数(K)相等。
- (3) 表示压缩特性的马赫数 M 相等。
- (4) 表示粘性特性的雷诺数 Re 在自动模化区域。
- (5) 表示气体速度与圆周速度之比斯特鲁哈尔数 Sh 相等,即流量系数 φ 相等。

2. 相似参数关系式

模化设计是以 $\frac{G\sqrt{T_1^*}}{P_1^*}$ 和 $\frac{n}{\sqrt{T_1^*}}$ 作为相似参数,当比转速 $n_s = \frac{G\sqrt{T_1^*}}{P_1^*} \cdot \frac{n}{\sqrt{T_1^*}}$

相等和几何相似时,就能满足模化准则(雷诺数要在自模区中)。于是得关系式:

文稿收到日期:1987-12-30

$$\begin{cases} i = \sqrt{\frac{G\sqrt{T_1^*}}{P_1^*}} / \left(\frac{G\sqrt{T_1^*}}{P_1^*} \right)_m & (1) \\ \frac{n}{\sqrt{T_1^*}} = \left(\frac{n}{\sqrt{T_1^*}} \right)_m \frac{1}{i} & (2) \\ l = l_m \cdot i & (3) \end{cases}$$

3. 简要说明比转速 n_r 相等和几何相似, 模化机与母型机模化点有相同的马赫数 M_1 和相同的斯特鲁哈尔数 Sh

$$\text{按空气动力学公式: } \frac{P_1}{P_1^*} \sqrt{\frac{T_1^*}{T_1}} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2 \right)^{-\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (4)$$

$$\text{状态方程式: } \frac{G\sqrt{T_1}}{P_1} = \frac{F_1}{R\sqrt{T_1}} M_1 \sqrt{kgRT_1} \quad (5)$$

$$\text{相似参数: } \frac{G\sqrt{T_1^*}}{P_1^*} = \frac{F_1 M_1 \sqrt{kgR}}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2 \right) \frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (6)$$

将(4)(5)(6)式代入相似参数关系式。由于几何相似, 近似认为进口导叶气流出口角不变 $\alpha_1 = (\alpha_1)_m$ 。

$$\frac{Ma}{\left[1 + \frac{k-1}{2 \cdot \sin^2 \alpha_1} Ma^2 \right] \frac{k+1}{2(k-1)}} = \frac{(Ma)_m}{\left[1 + \frac{k-1}{2 (\sin^2 \alpha_1)_m} (Ma)_m^2 \right] \frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (7)$$

轴流压气机绝热指数 k 差别不大, 认为相等

所以 $Ma = (Ma)_m$, $(M_1) = (M_1)_m$ 。

$$\text{经换算 } \varphi = \frac{60}{\pi} \sqrt{kgR} Ma / \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{n}{\sqrt{T_1^*}} \right) \cdot D \quad (8)$$

$$\frac{n}{\sqrt{T_1^*}} \cdot D = \left(\frac{n}{\sqrt{T_1^*}} \cdot D \right)_m, \text{ 所以 } \varphi = \varphi_m, Sh = (Sh)_m$$

符号代表:

- i —模化系数。 P_1 —进口压力
- T_1 —进口温度。 M_1 —进口马赫数
- G —空气流量。 n —转速。
- D —平均直径。 带“ m ”代表母型机参数。
- 带“*”代表滞止参数

4. 检查模化机的雷诺数

模化设计中, 需要进行模化机的雷诺数计算, 认为雷诺数大于 $2 \sim 3 \times 10^5$ 时, 在自

动模化区域, 小于这个数值, 不满足相似准则。

二、模化设计条件

1. 选择合适、先进、效率高的轴流压气机作为母型机, 一般要求母型机的设计压比应大于或等于模化机的压比。

2. 一般地要有母型机的通用特性曲线, 经试验得到的特性曲线是可靠的。

3. 必须知道母型机通流部分的几何特性。

4. 必须知道母型机叶片型线座标。

这四个条件中, 第三、四条件必须具备, 因为没有这二个条件, 模化设计无法进行。第一条选择合理的压气机是相对而言。只要选择合理的模化点, 能够模化设计出满足要求的压气机。第二条一般希望有经试验得到的通用特性曲线。倘若没有试验通用特性曲线, 只要母型机是合适的、可靠的、先进的, 也可以在工作特性曲线上选择模化点, 甚至模化设计点。

三、选择母型机

一般选择调试成功的轴流压气机作母型机, 由于模化机与母型机相似, 总的性能指标相差不大, 为此对母型机的情况要有全面了解。

可供选择的母型机的数量在不断增加, 如 $\Gamma TY-42$, $AGT-1$, $MGT-1$ 等是合适的母型机, 但各自有不同的特点。表 1 中列举三个母型机设计点参数。

从表 1 中看出, $\Gamma TY-42$ 级数最多, 每级负荷低, 压比小, 但效率高。 $AGT-1$ 压气机级数最少, 压比达 6.78, 效率为 0.842, $MGT-1$ 压气机各参数介于两者之间。

表 1

	$\Gamma TY-42$		$AGT-1$	$MGT-1$	
转 速 n	8200		4700	8600	
流 量 G	18.7(设)	20.15(试)	162	37.15(设)	40.3(试)
压 比 π	4	4.6	6.78	6.36	7.3
级 数	11		8	10	
效 率 η	0.825	0.89	0.842	0.85	0.86
第一级马赫数 M_{v1}	0.607		0.893	0.821	

表 2 列出模化这三个母型机的部分轴流压气机的参数。从表 2 看出:

1. 希望选择母型机的设计压比与模化机差不多, 倘若相差较大, 可以用加级或减级

的办法来得到模块化压气机的好性能及其满足发动机匹配的要求。

2. 选择母型机的设计流量允许与模块化机相差很大, 表2中列出的模块化机的流量比母型机大三倍或是母型机的1/10, 都能满足性能要求。

3. 选择母型机设计转速允许与模块化机有差别。

4. 选择母型机的几何尺寸允许与模块化机相差很大。模块化系数在0.7~2之间, 模块化机的效率与母型机差不多, 甚至在模块化系数只有0.257时, 间隙不成比例, 但效率降低也不大。

表 2

模 化 机	压 比	流 量	转 速	效 率	级 数	模 化 系 数	母 型 机
ГТТ-10 高压	3.91	34.2	7100	0.895	12	1.00	↑
	2.3	34.2	5860	0.89	5	1.35	
ГТ-700-5	4	45	5000	0.89	11	1.56	↑ ГТТ-42 ↓ AGT-1 MGT-1
ГТ-6-750	6	45.5	6000	0.88	12	1.41	
ГТТ-15	3.65	15.66	8540	0.898	10	0.895	
ГТН-9	4.6	81	4100		11	2	
ГТТ-6	4.22			0.867	11	0.69	
某 机 车	4.6	30	6340	0.87	11	1.212	
列 车 电 站	4.6	35	6100	0.87	11	1.342	
汽 车 电 站	4.7	11.1	10800	0.86	11	0.754	
59 增 压 器	5.3	11.0	11100	0.85	12	0.751	
70S	6.44	10.64	18340	0.823	8	0.257	
MGT-2	9	52.1	8600	0.85	12	1.0	

四、模化点选取讨论

一般在母型机的通用特性曲线上选取模化点, 此外, 可在工作特性曲线上找模化点, 甚至模化母型机的设计点。

1. 选取的模化点使模块化机的压比、效率转速和流量符合要求, 这是理想的模化设计, 表2中有好些是属于这种情况。但在有些情况下, 压比不满足要求, 采用加级或减级的办法, 保证模块化机达到压比要求, 这是模化设计的一个重要方法。似乎这种方法不完全满足相似条件, 只能接近相似, 但在实际工程应用中, 这种方法是很成功的。用表2中一些例子说明:

(1) ГТТ-15 电站压气机模化设计时, 在保证其他条件下, 其压比偏高, 采用去掉末级, 满足压比要求。

(2) ГТТ-10 船用高压机选取模化系数等于1, 采用末级后增加一级的办法来保证要求的压比。

(3) ГТ-6-750 压力站压气机选择模化点时考虑效率和必要的临界转速储备, 压

比取 4.85, 采用在压气机前面增加一级, 满足设计压比 6。

(4) MGT-2 船用压气机模化 MGT-1, 选取模化系数等于 1, 转速等于母型机设计转速, 采用在压气机前面增加二级, 满足模化机的压比 9。相应通用特性曲线上模化点折合转速低于设计点转速。

这四个加级或减级的模化设计, 都经过试验, 证明是成功的。

2. 在通用特性曲线上选择模化点, 效率是重要的参数, 只有模化点是在高效率区才能得到模化机的高效率。从表 2 中所列模化设计证实了这样的情况。

有时为了与涡轮匹配或强度关系, 对模化机的转速、模化系数有一定要求, 须变换模化点的位置。ГТУ-10 (高) 与 MGT-2 压气机模化设计就是明显的例子。

3. 模化点选取中, 强调喘振裕度。由于设计习惯不同, 评喘振裕度的方法也不相同。目前有 a) 稳定工作储备系数 $k_g = \frac{\pi/G(\text{稳定工作边界})}{\pi/G(\text{工作线})}$; b) 喘振流量裕度 $k_G = \frac{G(\text{工作线}) - G(\text{喘})}{G(\text{工作线})}$; c) 喘振压比裕度 $k_\pi = \frac{\pi(\text{喘}) - \pi(\text{工作线})}{\pi(\text{工作线})}$ 无论采用哪一种习惯, 母型机在模化点的喘振裕度一定要保证。

五、模化设计修整系数考虑

当模化系数较小或很大时, 需要考虑压比、效率、密度及面积等修正。

1. 将模化点压比 $\pi_{k_m}^*$ 转换成静压比 π_{k_m} , 压比修正值 $\Delta\pi_k = \Delta\psi a \left(1 - \frac{1}{\pi_{k_m} \frac{k-1}{k}}\right)^{3.5}$

得到模化机压比 $\pi_k = \pi_{k_m} (1 + \Delta\pi_k)$, 然后转换成滞止压比 π_k^* 。压比修正系数

$$\Delta\psi a = \frac{\psi_a}{\psi_{a_m}} - 1,$$

$$\psi_{a_m} = 1 - \frac{a_1 + b_1 \delta_m}{l_m} \quad (\delta - \text{径向间隙, } l - \text{叶片高度})$$

$$\psi_a = 1 - \frac{a_1 + b_1 \delta}{l} \quad (\text{经验系数 } a_1 = 1.5\text{mm}, b_1 = 3 \sim 6)$$

2. 把模化点效率 $\eta_{k_m}^*$ 转换成绝热效率 η_{a,k_m} , 乘以修正系数 η_k/η_{k_m} , 得到模化机的绝热效率, 再转换成滞止效率。

$$\text{其中效率修整系数 } \frac{\eta_k}{\eta_{k_m}} = \frac{1 - \frac{a + b\delta}{l}}{1 - \frac{a + b\delta_m}{l_m}}$$

式中系数 a、b 的经验数据 $a = 1\text{mm}$, $b = 2 \sim 4$, 反应度低, b 取小值。

3. 密度修整 $\Delta\delta = \Delta\pi_k - \left(1 - \frac{T_m}{T_k}\right) \cdot (\Delta\psi - \Delta\eta)$

式中 $\Delta\eta = \frac{\eta_a}{\eta_{a,n}} - 1$, T_n 和 T_i 为压气机进出口温度。按密度变化反比修正面积。

六、加级设计

模化加级设计分为二类:

1. 利用母型机的级乘以模化系数

这种加级方便、简单、可靠、是模化设计经常使用的方法。

(1) $\Gamma TY-10$ (高) 模化设计时, 采用末级后加一级, 所加的叶片与末级相同, 只是安装角略有变动, 满足气动要求。59增压器在模化设计时也采用末级后加一级, 通用末级叶片, 把安装角由 $35^\circ 14'$ 改为 49°

(2) $\Gamma T-6-750$ 压气机模化设计时, 采用在第一级前面增加零级, 与第一级类似, 零级工作叶片相对第一级张开 $1^\circ 20'$, 经试验这种方法是成功的。

2. 自行设计加级

自行设计加级往往采用母型机相同的设计方法, 尽量使各项参数变化连续, 以达到原来母型机的水平。这样设计应对母型机参数要很了解, 设计方法很清楚。当然也可用不同方法。

$MGT-2$ 模化 $MGT-1$ 设计时, 按自行设计加级, 在前面增加了零级和零零级。经试验, 性能良好, 达到压比 9。同样, 自行设计加级也可在末级后加级。

七、结束语

模化设计具有很大优点, 是一种有前途的压气机设计方法。其原因主要有:

1. 经过多年轴流压气机的设计、研制, 成熟的先进的母型机在不断增加, 创造了提供模化设计的有利条件。

2. 模化设计是以相似理论为基础, 可在短时间内达到国内外先进母型机性能和参数。

3. 模化设计方法改进, 日趋完善, 模化点选取技术的灵活性, 能够较好满足设计要求。

(1) 可以直接满足压比, 也可用模化压比加级或减级, 满足设计压比。

(2) 模化点选取的灵活性容易满足效率的要求。

(3) 模化点选取的灵活性容易满足转速, 甚至满足模化系数的要求。

4. 加级方法日趋可靠, 模化设计的压气机可能成为新一代的母型机。所以今后用于压力站、电站、机车、船舶、航空等轴流压气机的设计中, 模化设计将越来越受到人们的重视。

参 考 文 献

- (1) 盖洛夫 И.И. 著, 陈丹之译: «燃气轮机及燃气轮机装置», 机械工业出版社, 1959 年
- (2) 帕达布也夫 Ю.О. 谢列兹廖夫 К.П. 著, 李超俊, 朱极桢等译: 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) Шерстюк А.Н.: Осевые компрессоры «Аэродинамический расчёт» Государственное Энергетическое Издательство Москва, 1955, Ленинград

On the Simulative Design of Axial-Flow
Air Compressors

Jin Yongmin

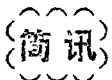
(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

Abstract

Presented in this paper is a brief description of the basis, simulative conditions and correction factor for the simulative design of axial-flow air-compressors. Proper choice of a prototype, selection of simulative points and stage-adding design are discussed. An axial-flow air compressor designed with the simulative method to meet the required performances is described as an example.

Key words: axial-flow air compressor simulative design

第一届国际工业锅炉展览会



由中国电工设备总公司、中国科学技术咨询中心、中国焊接协会、中国机械设备进出口总公司和上海工业锅炉研究所共同主办的第一届国际工业锅炉、辅机、工艺设备及检测设施展览会于十月十八日至二十四日在天津市历史博物馆举行, 机械电子部陆燕逊总工程师参加了开幕式。美国、德意志联邦共和国、英国、法国、苏联、瑞典、奥地利、捷克斯洛伐克、丹麦、意大利、日本、香港等国家和地区的四十家公司以及我国的七十个锅炉设备制造厂家的产品参加了展览。

在本次展览会上, 外国公司展出的主要产品是具有八十年代国际先进水平的燃油、燃气锅炉以及焊接、切割设备。国内厂家的展品则代表了我国工业锅炉特别是燃煤工业锅炉近年来的发展水平。

本次展览会将会对我国工业锅炉技术的发展以及国际间锅炉技术的合作起到积极的推动作用。

— 蓝 芑 —