

## 基于统计特征的轴流风扇/压气机性能试验 数据相关性分析

向宏辉, 侯敏杰, 刘志刚

(中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院, 四川 江油 621703)

**摘 要:** 采用关联统计的系统研究思想, 收集整理了国内 14 台轴流风扇/压气机性能试验数据, 在分析、识别大流量风扇与高压比压气机变工况特性曲线形状结构特征的基础上, 提出了表征风扇/压气机气动性能的两类基本属性。通过尝试构建多种无量纲物理参数, 在统计层次上探索了风扇/压气机特性曲线变转速偏移程度和等转速工作范围的量化关联关系。结果表明: 大流量风扇非设计转速特性曲线的偏移程度和有效流量工作范围均要大于高压比压气机; 风扇/压气机最高效率线上相对压比、相对流量、相对流量-转速比和相对加功量-转速比 4 个物理参数之间存在明显统计规律; 所构建的经验数学模型可以对性能试验数据做统一相关性分析。

**关 键 词:** 轴流风扇; 轴流压气机; 特性曲线; 统计分析; 相关性; 经验数学模型

**中图分类号:** V231.3

**文献标志码:** A

## Correlative analysis of performance experimental data of axial flow fans/compressors based on statistical characteristic

XIANG Hong-hui, HOU Min-jie, LIU Zhi-gang

(China Gas Turbine Establishment,

Aviation Industry Corporation of China, Jiangyou Sichuan 621703, China)

**Abstract:** Using correlative statistical study idea, performance experimental data of 14 units of domestic axial flow fans and compressors were collected. Two kinds of basic attributes were presented to describe aerodynamic performances of fan and compressor based on analysis and identification of shape structure of off-design characteristic curves of high mass flow fan and high pressure ratio compressor. In an attempt to build a number of non-dimensional physical parameters, the quantitative correlative relationship between shift degree under variable speed and operating range under constant speed of characteristics of fans and compressors was explored in the statistical level. The results show that offset degree of non-design rotating speed characteristic lines and operating range of effective mass flow of fans are greater than that of high pressure ratio compressors, and the relative pressure ratio, relative mass flow, relative mass flow-speed ratio and relative work-speed ratio on peak efficiency line of fans and compressors exhibit obvious statistical regularity. The uniform correlative analysis of performance experimental data can be conducted by means of some empirical mathematical models presented.

**Key words:** axial flow fan; axial flow compressor; characteristic curve; statistical analysis; correlative; empirical mathematical model

低压风扇和高压压气机作为航空发动机的主要压缩部件,其设计点气动性能直接决定了发动机的设计性能指标,不仅如此,风扇/压气机非设计状态气动性能(即变工况特性曲线)更是对发动机的可靠性和稳定性产生重要影响.在进行风扇/压气机气动设计和性能试验时,获取完整准确的特性曲线是压缩部件研制流程中的关键技术环节.依靠理论计算方法(包括一维特性计算方法<sup>[1]</sup>、二维轴对称特性计算方法<sup>[2]</sup>和全三维数值计算方法<sup>[3-4]</sup>)可以得到压缩部件特性曲线数据,但是目前工程上所采用的各类计算方法尚无法给出足够精确的部件特性,特别是计算得到的喘振边界通常无法满足使用要求.因此,要获得满足工程应用精度要求的部件特性数据,仍然需要依靠试验方法.

与各种理论计算方法相比,依靠试验测试获取的特性曲线数据更为真实、准确,但试验必须在风扇/压气机试验件加工完成后才能进行,所以,在风扇/压气机早期设计方案的筛选阶段无法依靠试验方法获取需要的性能数据,影响了对设计方案的筛选和优化.在风扇/压气机性能试验过程中,为了合理设计试验方案,准确配置设备系统参数和降低试验运行风险,需要在试验之前充分了解被试对象的变工况特性.另外,当风扇/压气机试验工作完成后,在评定部件气动性能试验结果时,通常也需要参考和借鉴同类型压缩部件特性曲线进行对比分析.为了更有效地开展压缩部件性能试验,在引入先进测试手段的同时,充分利用已有试验结果,通过数据挖掘技术和关联分析方法,深入研究离散试验数据的内部联系和变化规律,改进和完善风扇/压气机试验评估体系,成为国内航空发动机压缩部件试验研究领域有待解决的技术问题.

采用系统整体研究思想对不同压缩部件试验数据进行相关性研究是实现试验数据挖掘管理和开发利用的有效途径,并且得到了国外各发动机研究机构的长期重视<sup>[5-12]</sup>.相比之下,国内以往所采取的研究方法主要是针对单个特定试验对象的试验数据孤立地开展分析和评估工作,没有考虑不同结构特征和设计参数的风扇/压气机试验数据之间的相互联系,缺乏对不同类型部件之间数据关联机制的深入认知.由于在风扇/压气机常规性能特性曲线表征关系中,不同几何结构和设计条件下的特性曲线具有各自独特的形状与变化特征,通过常规表达形式很难直接获取离散试验数

据之间的相互关联关系.

多年来,在航空发动机预先研究和型号研制项目的牵引下,中国燃气涡轮研究院开展了十多台轴流风扇/压气机性能试验测试工作,积累了大量的原始试验数据,由于数据测试方案与数据处理程序基本固化,使得各型不同性能等级风扇/压气机的试验数据具有较好的关联基础<sup>[13-15]</sup>.基于关联统计的研究思想,本文收集、整理了中国燃气涡轮研究院共14台轴流风扇/压气机性能试验数据,以风扇/压气机变工况特性曲线数据为研究对象,通过构建无量纲复合物理参数,以寻求不同性能参数之间特有的内在相关性,探索特性试验数据在不同复合参数表现形式下的规律和特征,筛选统计风扇/压气机特性试验数据的有效关联方法,以实现主要性能表征参数的量化关联.

## 1 关联统计对象

本文关联统计对象的主要设计性能参数(流量、压比)如图1所示,共包括6台单多级轴流风扇和8台多级轴流高压压气机,风扇级数从1级变化到4级,压气机级数从4级变化到7级.对比图中风扇和压气机的分布情况可知,风扇设计流量的变化范围较大,设计压比要明显低于压气机设计压比;而压气机主要集中位于图中左上区域,具有较小的流量变化范围和较高的设计压比.图中14台统计对象的设计流量综合变化范围达到4~80 kg/s、设计压比综合变化范围达到1.6~8.8.

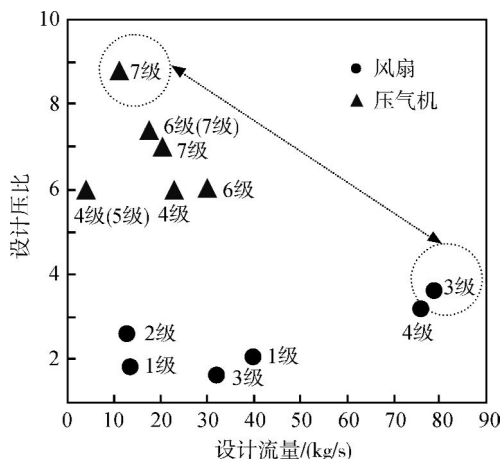


图1 关联统计对象的性能参数

Fig. 1 Performance parameters of correlative statistical objects

## 2 特性曲线的两类属性

为进一步认识统计对象中不同类型气动性能

表征关系的基本属性,依据上述风扇和压气机总体设计参数的不同特点,分别选取设计流量最大的风扇和设计压比最高的压气机进行性能特性曲线的详细对比,所选对象在图1中用虚线标出.为了能够直观量化风扇和压气机变工况特性曲线的结构性差异,对工程上应用的常规性能参数进行无量纲转化,采用设计转速下最高效率点作为基准点.图2和图3分别给出了3级大流量风扇和7级高压比压气机的相对压比-相对流量特性曲线,共包含8条等转速特性曲线,同时标出了最高效率线(各等转速特性曲线上最高效率点的连线).图中横坐标为相对流量  $W_{rel} = W_i / W_{ref}$ , 式中  $W_i$  为各状态点流量,  $W_{ref}$  为基准点流量;纵坐标为相对压比  $\pi_{rel} = (\pi_i - 1) / (\pi_{ref} - 1)$ , 式中  $\pi_i$  为各状态点压比,  $\pi_{ref}$  为基准点压比.以最高效率线为例,当

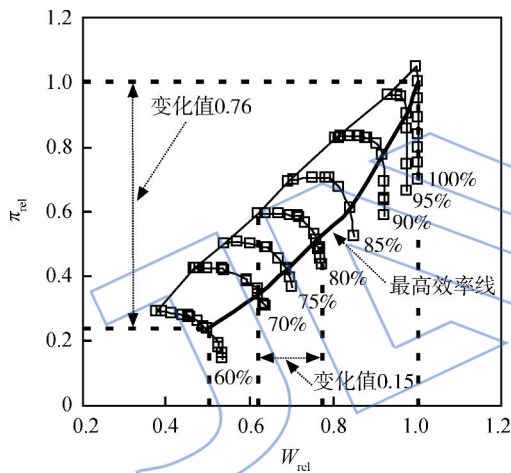


图2 3级风扇特性曲线形状

Fig. 2 Shape of characteristic curve of three-stage fan

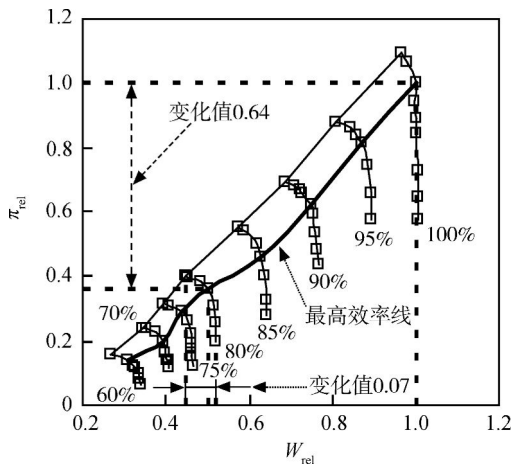


图3 7级压气机特性曲线形状

Fig. 3 Shape of characteristic curve of seven-stage compressor

相对流量减小50%时,风扇相对压比下降了0.76,而压气机相对压比下降了0.64,表明风扇非设计转速特性曲线的偏移程度(相对于设计转速)要大于压气机.以80%设计转速完整特性曲线为例,风扇相对流量从下堵点变化到近喘点时减小了0.15,而压气机相对流量减小了0.07,说明风扇非设计转速特性曲线的有效流量工作范围要大于压气机.

对比图2和图3中大流量风扇和高压比压气机特性曲线的形状还可以发现,在高转速区域,均出现了部分或者整体垂线形状特性曲线的情况,此时流量不发生变化.通常情况下,风扇/压气机进口第1级转子叶片通道产生激波或者出口末级静子叶片通道产生堵塞均会导致垂线形状的特性曲线,通过分析相对加功量的变化可以有效判定垂线形状特性曲线的形成机理.图4和图5分别给出了大流量风扇和高压比压气机相对加功量随相对压比的变化曲线,图中纵坐标为相对加功量  $H_{rel} = H_i / H_{ref}$ , 式中  $H_i$  为各状态点加功量,  $H_{ref}$  为基准点加功量.对应着高转速垂线形状特性曲线区域,无论是风扇还是压气机,相对加功量均随着相对压比的提高而增大,这是由于风扇和压气机进口第1级转子叶片通道内为超声速流动,产生了通道激波,随着出口背压的提高,激波位置向前移动,导致转子出口绝对气流速度增大,由于此时圆周速度和轴向分速度不变(流量系数不变),由速度三角形的变化关系可知,出口绝对速度的周向分速度必然增大,即扭速增大,导致相对加功量随之增大.设想如果是风扇和压气机出口末级

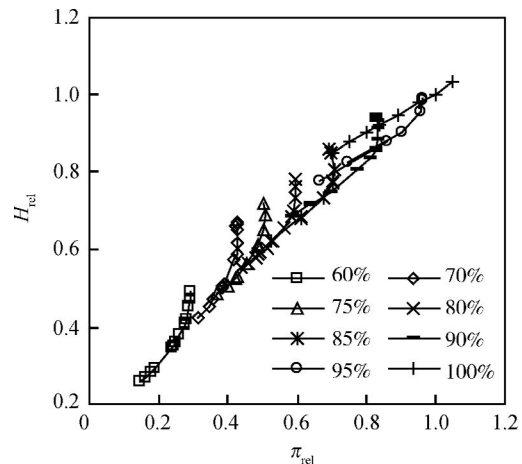


图4 不同转速下相对加功量随相对压比的变化  
(3级风扇)

Fig. 4 Relative work versus relative pressure ratio under different speeds (three-stage fan)

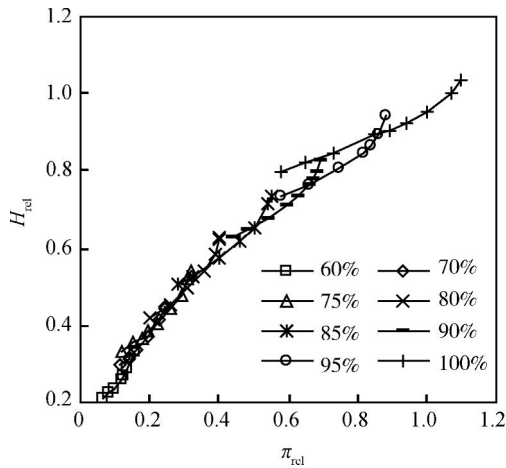


图 5 不同转速下相对加功量随相对压比的变化  
(7 级压气机)

Fig. 5 Relative work versus relative pressure ratio under different speeds (seven-stage compressor)

静子叶片通道内形成堵塞,此时应该只有转子对气流做功,并且当出口背压提高时,转子流场不发生改变,因此相对加功量应保持不变。

通过以上分析可知,关联统计对象中的 3 级大流量风扇和 7 级高压比压气机同属跨声速设计类型,在变工况特性曲线的偏移程度和流量工作范围上均存在明显差异。特性曲线的变转速偏移程度和等转速工作范围是表征压气机气动性能的两类重要属性,因此,本文在后续分析中将尝试构建风扇/压气机变工况特性曲线两类属性的量化关联关系。

### 3 关联参数构建与相关性分析

为了描述风扇/压气机变工况特性曲线相对偏移位置属性,本文以最高效率线为研究对象,通过构建不同的无量纲物理参数,以揭示风扇/压气机最高效率线上各项参数内部所隐含的关联规律。这里重点分析以下 4 个参数:相对压比  $\pi_{rel}$ 、相对流量  $W_{rel}$ 、相对流量-转速比  $W_{rel}/N_{rel}$  和相对加功量-转速比  $H_{rel}/N_{rel}$ 。

图 6 给出了各类风扇/压气机相对压比随相对流量的统计变化情况,如图所示,相对压比与相对流量存在明显的统计性规律,并且风扇和压气机在数据分布趋势上没有显著差异,用一段过点  $\{0,0\}$  和点  $\{1,1\}$  的圆弧线可以较好地表征所有统计对象相对压比与相对流量 2 个参数之间的关联特性。图 7 给出了相对流量-转速比随相对流量的变化情况,从统计结果中可以发现:所有统计对象的相对流量-转速比与相对流量之间基本符合线

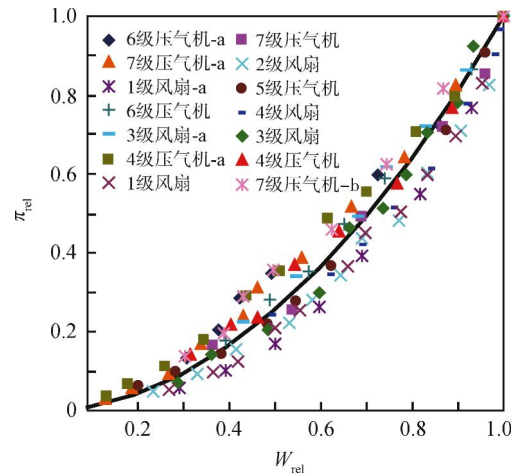


图 6 相对压比随相对流量的变化规律

Fig. 6 Change rules between relative pressure ratio and relative mass flow

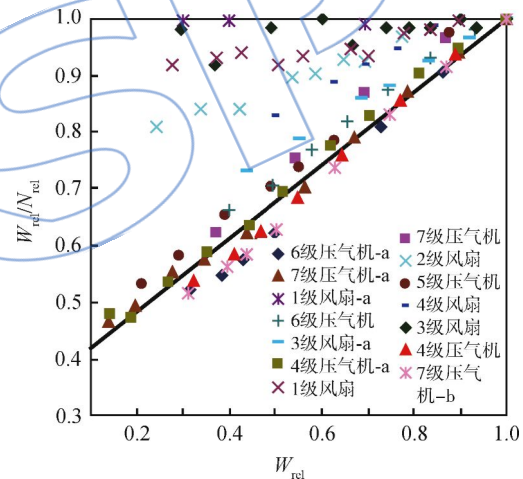


图 7 相对流量-转速比随相对流量的变化规律

Fig. 7 Change rules between relative mass flow-speed ratio and relative mass flow

性关系,表明压气机流量与转速是呈正比关系变化的;相比之下,风扇的相对流量数据较为分散,所显示的变转速线性化特征具有不同的斜率,而高压压气机的相对流量数据分布较为集中,所统计的 8 台高压压气机相对流量数据基本可以进行归一化拟合,这可能与风扇/压气机流量设计指标的不同特点有关。图 8 给出了相对加功量-转速比随相对流量的变化情况,从图中也可以看出,所有统计对象的相对加功量-转速比与相对流量之间同样具有较好的线性关系。

通过对各型风扇/压气机最高效率线上相对压比、相对流量、相对流量-转速比、相对加功量-转速比 4 个无量纲物理参数的建立与分析,初步证实了各项参数之间具有明显的变化规律,在统

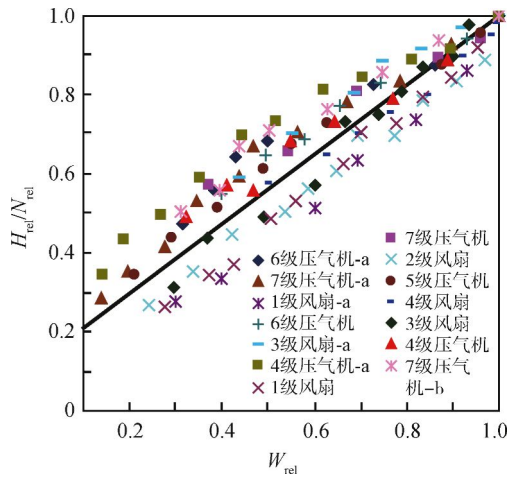


图 8 相对加功量-转速比随相对流量的变化规律

Fig. 8 Change rules between relative work-speed ratio and relative mass flow

计层次上有效揭示了风扇/压气机变工况特性曲线偏移位置的关联属性. 尽管统计对象的总体性能设计指标存在差异, 但是, 由于同类型风扇/压气机在设计流程和设计方法上相近, 使得性能特性曲线的主要结构特征与变工况流动机制遵循一定的变化规律, 这也是本文关联统计分析的主要理论依据.

统计对象最高效率线上无量纲物理参数之间具有统计规律, 因此, 只需已知其中某个状态点数据, 便可以利用统计规律所建立相应经验数学模型逆向求解其余所有状态参数. 本文参考文献[7]的处理方法, 对各类风扇/压气机最高效率线上 50% 相对流量所对应的试验数据做相关性分析, 将基准点压比作为统一关联对象参数. 图 9~图 11 依次给出了 50% 相对压比  $\pi_{\text{ref}, 50\% W_{\text{rel}}}$ , 50% 相对流量-转速比  $(W_{\text{rel}}/N_{\text{rel}})_{50\% W_{\text{rel}}}$  和 50% 相对加功量-转速比  $(H_{\text{rel}}/N_{\text{rel}})_{50\% W_{\text{rel}}}$  的相关性分析结果. 从图中可知, 各类参数与基准点压比之间具有较为明显的关联关系; 随着基准点压比的提高, 相对压比和相对加功量-转速比均不断增大, 基本满足对数函数关系; 而相对流量-转速比随着基准点压比提高而不断减小, 总体上满足幂乘函数关系. 图 9 和图 10 也相应给出了文献[7]的拟合结果(基于德国 MTU (Motor and Turbine Union) 公司压气机数据库的统计分析, 共包括 43 台各型轴流压气机). 对比可知, 本文得到的拟合结果与 MTU 公司的拟合结果非常接近, 表明本文相关性分析结果是可信的. 文献[7]也针对 50% 相对加功量-转速平方比进行关联分析, 但没有得出明显的统计性规律.

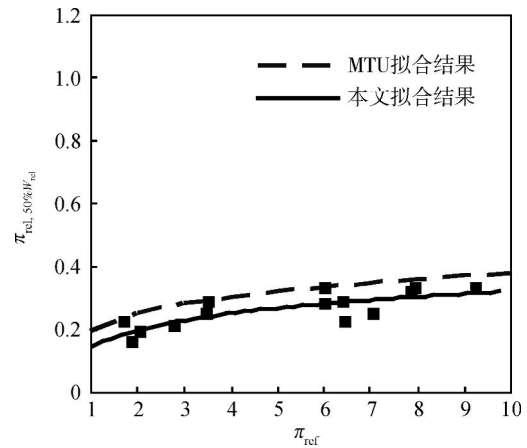


图 9 相对压比关联统计结果

Fig. 9 Correlative statistical results of relative pressure ratio

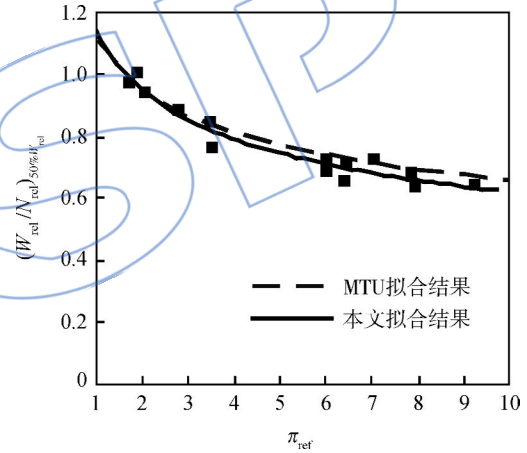


图 10 相对流量-转速比关联统计结果

Fig. 10 Correlative statistical results of relative mass flow-speed ratio

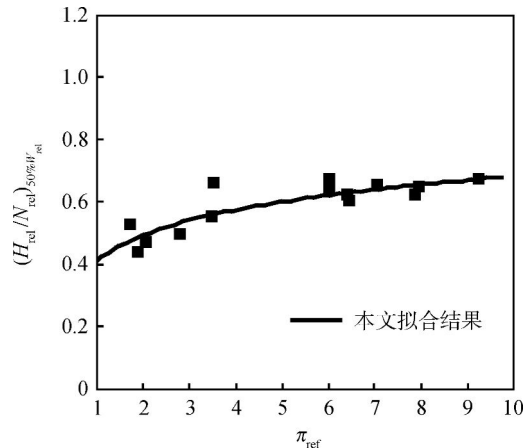


图 11 相对加功量-转速比关联统计结果

Fig. 11 Correlative statistical results of relative work-speed ratio

为了描述风扇/压气机变工况特性曲线流量工作范围属性,本文选取80%相对转速为研究对象,对该转速下的流量变化范围做相关性分析,关联对象参数仍为基准点压比.图12给出了流量变化范围( $W_{rel,range}^{80\%N_{rel}}$ )的相关性分析结果,可以看出,随着基准点压比的提高,流量范围逐步减小,总体上逼近指数函数关系变化,曲线拟合结果也与MTU公司的拟合结果吻合得较好.通过对基准点压比参数做统一相关性分析,本文得到以下4个重要的关联经验数学模型:

$$\pi_{rel,50\%W_{rel}} = 0.0767 \times \ln(\pi_{ref}) + 0.1462 \quad (1)$$

$$(W_{rel}/N_{rel})_{50\%W_{rel}} = 1.1401 \times \pi_{ref}^{-0.2636} \quad (2)$$

$$(H_{rel}/N_{rel})_{50\%W_{rel}} = 0.1176 \times \ln(\pi_{ref}) + 0.413 \quad (3)$$

$$(W_{rel,range})_{80\%N_{rel}} = 0.1733 \times e^{(-0.1514\pi_{ref})} \quad (4)$$

利用本文得到的经验数学模型,可以有效评定轴流风扇/压气机变工况特性曲线的两类基本属性(偏移程度和工作范围).通过对试验数据做统一相关性分析,可以帮助试验研究人员直观判定典型试验结果的合理性,并在满足一定精度条件下提前预估试验数据的变化趋势和分布规律,在风扇/压气机气动性能试验中具有较高应用价值.

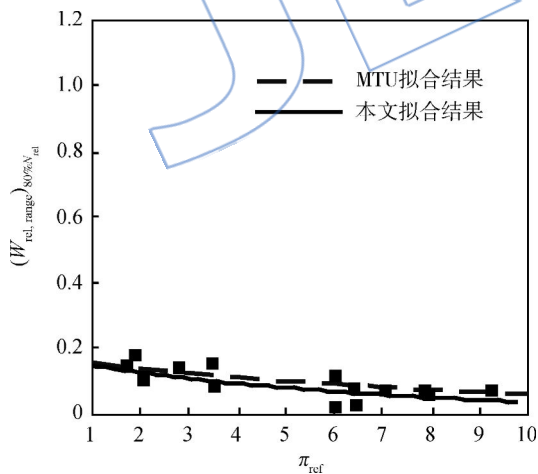


图12 流量变化范围关联统计结果

Fig. 12 Correlative statistical results of mass flow range

## 4 结 论

本文采用关联统计的系统研究思想,收集整理了国内14台轴流风扇/压气机性能试验数据,在分析、识别大流量风扇与高压比压气机变工况特性曲线形状结构特征的基础上,提出了表征风扇/压气机气动性能的两类基本属性,通过尝试构

建多种无量纲物理参数,在统计层次上探索了风扇/压气机变工况特性曲线基本属性的量化关联关系,从中得到以下结论:

1) 特性曲线变转速偏移程度和等转速工作范围可以作为表征风扇/压气机气动性能的两类重要基本属性.大流量风扇非设计转速特性曲线的偏移程度和有效流量工作范围均要大于高压比压气机.

2) 风扇/压气机最高效率线上相对压比、相对流量、相对流量-转速比和相对加功量-转速比4个物理参数之间存在明显的统计性规律.

3) 将风扇/压气机设计转速最高效率点压比作为统一关联对象,可以对非设计转速状态参数做相关性分析,所总结出的关联经验数学模型与国外研究结果基本相符.

## 参考文献:

- [1] Steinke R J. A compute code for predicting multi-stage axial-flow compressor performance by a meanline stage stacking method[R]. NASA TP-2020,1982.
- [2] 程荣辉,雷丕霓,刘波,等.一种工程实用的多级轴流压气机特性二维数值计算方法[J].航空动力学报,2007,22(6):955-960.
- CHENG Ronghui, LEI Pini, LIU Bo, et al. A two dimension numerical method for multi-stage axial compressor performance in engineering applications[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(6): 955-960. (in Chinese)
- [3] Mansour M, Hingorani S, Dong Y. A new multistage axial compressor designed with the APNASA multistage CFD code; Part 1 code calibration[R]. ASME Paper 2001-GT-0349, 2001.
- [4] Dong Y, Mansour M, Hingorani S, et al. A new multistage axial compressor designed with the APNASA multistage CFD code; Part 2 application to a new compressor design [R]. ASME Paper 2001-GT-350, 2001.
- [5] Johnsen I A, Ullock R O. Aerodynamic design of axial flow compressors[R]. NASA N65-23345, 1965.
- [6] Wassell A B. Reynolds number effects in axial compressors [R]. ASME Paper WA/GT-2, 1967.
- [7] Kurzke J, Riegler C. A new compressor map scaling procedure for preliminary conceptional design of gas turbines [R]. ASME Paper 2000-GT-0006, 2000.
- [8] Kong C D, Ki J Y. A new scaling method for component maps of gas turbine using system identification[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines Power, 2003, 125(4): 979-985.
- [9] Nezym V Y, Polupan G P. A new statistical-based correlation for the compressor tandem cascade parameters effects on the loss coefficient[R]. ASME Paper GT2007-27245, 2007.
- [10] Drummond C, Davison C R. Capturing the shape variance

- in gas turbine compressor maps [R]. ASME Paper GT2009-60141, 2009.
- [11] Cravero C, Macelloni P. A new model for the prediction of compressor performance maps [R]. International Society for Air Breathing Engines, ISABE-2009-1133, 2009.
- [12] Kurzke J. Correlations hidden in compressor maps [R]. ASME Paper GT2011-45519, 2011.
- [13] XIANG Honghui, REN Minglin. Discussion of several questions with efficiency assessment in axial flow compressor experiment [R]. Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, JSASS-2009-5537, 2009.
- [14] 向宏辉, 葛宁, 任铭林. 基于试验数据的轴流压气机喘振边界经验预估方法[J]. 燃气轮机技术, 2011, 24(1): 40-44.
- XIANG Honghui, GE Ning, REN Minglin. Empirical prediction method of the surge line of axial flow compressors based on statistical experimental data [J]. Gas Turbine Technology, 2011, 24(1): 40-44. (in Chinese)
- [15] 向宏辉, 侯敏杰, 刘志刚. 一种实现轴流压气机试验特性关联的经验方法[J]. 航空动力学报, 2013, 28(7): 1517-1525.
- XIANG Honghui, HOU Minjie, LIU Zhigang. Experiential method for realizing correlation of experimental characteristics of axial flow compressors [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(7): 1517-1525. (in Chinese)