

文章编号:1000-8055(2013)07-1517-09

一种实现轴流压气机试验特性关联的经验方法

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: 采用系统研究思想, 对 10 余台轴流压气机稳态性能试验数据进行了整理分析, 在统计层次上探索了现有气动/结构设计体系下离散试验数据之间的内在关联规律. 详细阐述了关联基准点的选取、关联基准线的构造、稳定工作边界的预估、特性线的泛化拟合和关联基准点的求解等环节, 成功构建了一种实现多级轴流压气机试验特性有效关联的经验分析方法. 结果表明: 该经验方法对于大流量低速压气机变工况特性具有较好的预估能力, 总体相对误差小于 $\pm 10\%$. 该方法可应用于同类型新设计压气机变工况特性表征关系的经验重构和先期性能评定, 为压气机离散试验数据的挖掘、利用提供技术支持.

关 键 词: 轴流压气机; 性能特性; 相关性; 曲线拟合; 经验预估

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Experiential method for realizing correlation of experimental characteristics of axial flow compressors

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

(China Gas Turbine Establishment,
Aviation Industry Corporation of China, Jiangyou Sichuan 621703, China)

Abstract: Steady state performance experimental data of more than ten axial flow compressors were arranged and analyzed based on systematic idea. The inherent correlative law of the discrete experimental data in existing aerodynamic and structural design systems was explored statistically. Based on selection of the correlation reference point, estimation of the stability boundary, generalized fitting of the characteristics, solution of the correlation reference point and other aspects, an experiential analysis method for correlating the experimental characteristics of multistage axial flow compressors were built successfully. The results show that the experiential method has good prediction ability for large flow low-speed compressor off-design characteristics, with its general relative error less than $\pm 10\%$. This analysis method can be applied to experiential reconstruction and advanced evaluation of the off-design characteristics of same type newly designed compressor, providing a technical support for discrete experimental data mining of axial flow compressors.

Key words: axial flow compressor; performance characteristic;
correlative relationship; curve fitting; experiential evaluation

试验特性曲线是评估压气机气动性能的主要依据, 也是发动机总体性能热力计算的必要输入

收稿日期: 2012-11-20

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130711.1810.201307.1517_015.html

作者简介: 向宏辉(1979—), 男, 湖南沅陵人, 工程师, 硕士, 主要从事叶轮机性能评定与试验技术研究.

E-mail: xhh6243@sina.com

条件,在航空发动机研制阶段具有重要作用.压气机试验特性线由不同转速不同质量流量(以下简称流量)下离散状态点组成,通常点越多,曲线形状描述越精确,但试验时间会随之增长,导致试验费用上升,高密度试验特性线的获取面临高试验成本的压力.另一方面,当压气机气动或几何参数发生变化时,一般需对特性线进行重新测定,也将导致试验次数和试验成本的增加.因此,如何用尽量少的测量点数和试验次数以获取足够精确且适应不同需求的特性线,已成为压气机试验研究人员需要认真思考和努力解决的科学问题.

压气机试验特性线的表达形式与以下几类因素相关:①外部边界条件.包括大气环境的真实模拟(如雷诺数、湍流度、湿度等),进口气流在时间和空间尺度上的变化(如压力/温度畸变);②几何特征条件.主要指压气机设计参数改变导致的压比、绝热效率(以下简称效率)随流量变化的曲线关系发生变化,如高压比压气机特性不同于低压比压气机特性,跨声速压气机特性区别于亚声速压气机特性等;③台架试验条件.主要指设备能力对试验结果的影响,如设备功率、转速或节流程度的限制,导致被试对象可能只有慢车转速以上特性线,或部分转速区间特性线数量有限、等转速线测点数不足等.如果能够利用某些数学或物理方法,将不同类型压气机特性线进行相互关联,基于关联关系构造的特性线仅与关联对象的样本数据质量相关,以替代或模化某类因素的影响作用,那么就可以利用已有试验数据,仅对其中某型压气机进行时间和次数较少的试验,便可推导出具有类似特征和相当可信度的完整特性线.这种数据关联分析方法有望满足提高试验效率和降低试验费用的要求,同时,预估得到的经验特性线还能用于新型压气机设计方案筛选、试验流程优化与试验结果评定等.

国外在压气机试验数据关联分析研究方面做了大量有意义的探索工作,在过去长达60多年的压气机研制历程中,不断有人尝试用各种方法对压气机试验数据进行量化关联,在统计分析各类试验数据分布趋势和关联程度的基础上,能够把看似独立的离散试验数据进行相互联系,从而为压气机性能试验结果影响因素修正和变化规律预测提供重要技术支撑,获得的经验性规律被逐步纳入压气机设计与试验评估体系中^[1-7].相比之下,国内以往所采用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性能

评估工作,较少采用系统研究思想来审视已有试验结果之间的内在关联规律和开发利用问题,对试验数据的挖掘进行得不够^[8-11].

本文在借鉴美国NASA(National Aeronautics and Space Administration)早期提出的压气机性能简化估算方法的基础上,通过对10余台不同结构特征和设计参数的轴流压气机试验数据的收集整理和关联分析,尝试初步探索现有气动/结构设计体系下离散试验数据之间的内在相关性,寻求构建具有工程普通适用性的关联图谱、经验数学模型或统计关系式,可望为国内压气机试验数据的挖掘、管理和开发利用提供技术支持.

1 关联统计对象的基本认识

本文研究所选取的关联对象包括单级跨声速轴流风扇、多级亚声速轴流风扇、多级跨声速轴流风扇、小流量多级跨声速轴流高压压气机(设计流量小于10 kg/s)、大流量多级跨声速轴流高压压气机、高负荷多级跨声速轴流高压压气机等诸多类型,图1给出了各台压气机在地面标准大气条件下的主要设计参数.高压压气机在进行特性试验时,往往伴随进口导叶/静叶角度的动态调节和级间放气以适应非设计转速匹配工作的需要.出于设备输出功率和排气参数限制,部分压气机高转速试验数据的录取在进口节流条件下进行,但保证进口雷诺数处于自动化模化区.另外,压气机进口流场品质由设备稳压整流装置严格控制,保证进气湍流度和不均匀度满足设计要求.对于压气机稳定工作边界(不严格区分旋转失速和喘振)的录取,则通过动态压力监视系统和数据采集系统

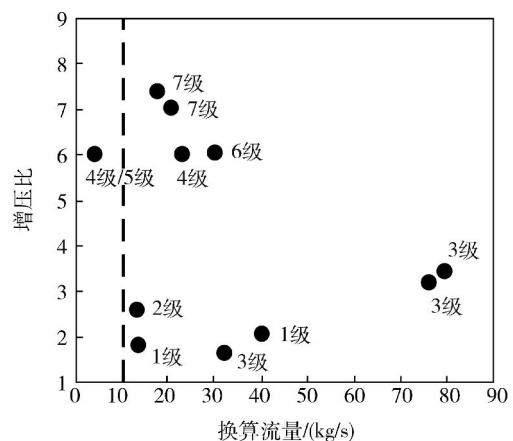


图1 关联统计对象的性能参数

Fig. 1 Performance parameters of correlative statistical objects

的瞬间采集模块来完成,即用高频响应动态压力探针和传感器感受气流脉动失稳的工作边界,然后离线回放采集数据历程,选取性能参数或出口参数出现明显波动的状态点作为最终稳定边界。

2 关联分析方法的建立

2.1 关联基准点的选取

要关联不同类型压气机特性线,首先需选取对比参考基准。对压气机全工况特性线而言,无论是设计状态性能参数,还是非设计状态性能参数,其实质均为压气机级间匹配效应和三维流动作用的宏观外在表征。通常情况下,级间关系匹配得越好,流动结构组织得越好,压气机气动损失就越小,绝热效率就越高,因此,国内外研究人员大多将压气机所能达到的最高效率点作为衡量评价性能的典型状态。从国内外多型压气机效率特性变化规律来看,其设计转速下气动设计点并非最高效率点,最高效率点所对应的转速往往低于设计转速。本文选取各型压气机试验真实录取的最高效率点作为关联基准点,而将其他工况点(含设计点)统一作为最高效率点的被关联对象。图2给出了各型压气机最高效率点的统计结果,可知不同压气机最高效率点大致落在90%或95%设计转速,反映所选取的关联对象具有一定相似性,体现了跨声速轴流压气机气动设计参数选取的一般特征。

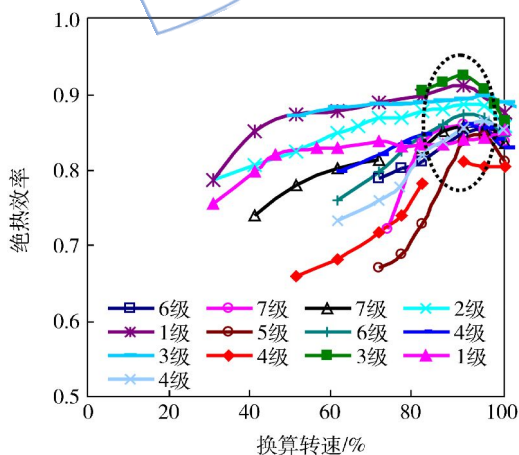


图2 统计对象变工况最高绝热效率变化趋势
Fig. 2 Change trend of peak adiabatic efficiency of statistical objects in variable conditions

2.2 关联基准线的构造

关联基准点表征各型压气机全工况范围内的最高效率点,而压气机在不同等转速特性线上均

存在一个最高效率点,随着压气机转速变化,最高效率点参数相对于基准点参数随之发生变化,这种转速跟随变化关系与基准点是否存在某种联系,如果能够将各型压气机等转速线最高效率点与基准点关联起来,那么在基准点已知条件下,就可直接预测任意转速下最高效率点。本文将各型压气机不同转速最高效率点与基准点之间的统计关系曲线称之为关联基准线。图3~图5分别给出了基准线上参数(流量、压比、效率)随基准点压比的变化,图中纵坐标采用相应基准点进行无量纲化。从图3、图4中可知:在40%~100%设计转速范围内,各型压气机不同转速最高效率点下的流量、压比与基准点压比存在明显统计意义上的变化规律,采用最小二乘法对各转速离散数据点进行

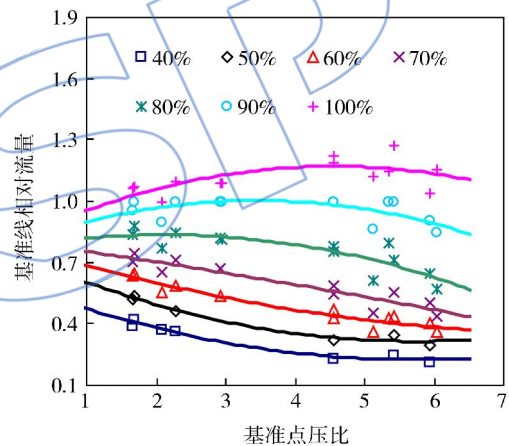


图3 基准线流量随基准点压比的变化关系
Fig. 3 Relationship of mass flow in reference line versus reference pressure ratio

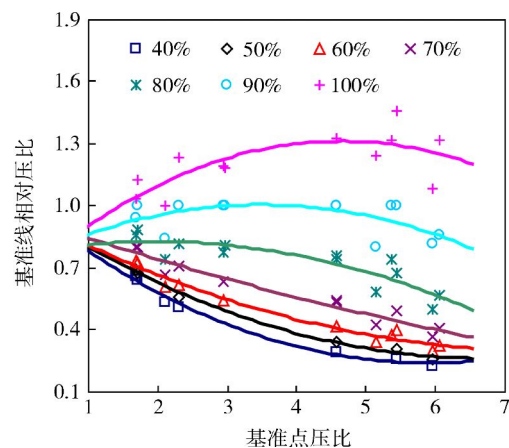


图4 基准线压比随基准点压比的变化关系
Fig. 4 Relationship of pressure ratio in reference line versus reference pressure ratio

行回归拟合,可进一步得出不同转速任意基准点压比对应下的基准线.从图5中可知:不同转速下基准线效率随基准点压比近似呈线性关系,与流量和压比的拟合情况相比,不同压气机效率参数离散度增大,使得部分转速下由简单线性关系拟合出的预测结果与试验结果存在一定偏差,但基准线上效率变化趋势的预测基本正确.

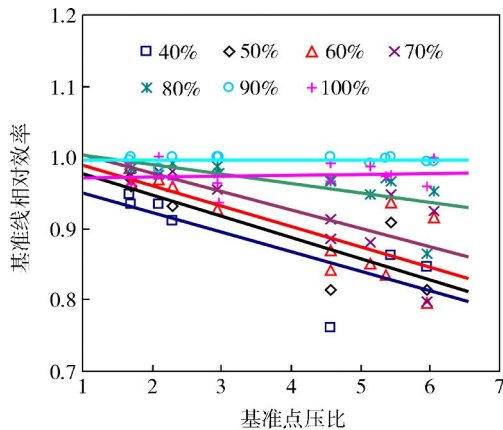


图5 基准线效率随基准点压比的变化关系

Fig. 5 Relationship of adiabatic efficiency in reference line versus reference pressure ratio

2.3 稳定边界的关联构建

按照关联基准线的构造思想,利用各型压气机稳定边界性能参数(流量、压比)和基准点,可以统计得出稳定边界压比随基准点压比的变化关系,如图6所示,图中纵坐标仍用基准点压比进行无量纲化,试验数据通过稳定边界流量(统一换算成基准点流量百分数)进行关联.曾尝试在不同相对换算转速下进行稳定边界流量、压比分别和基

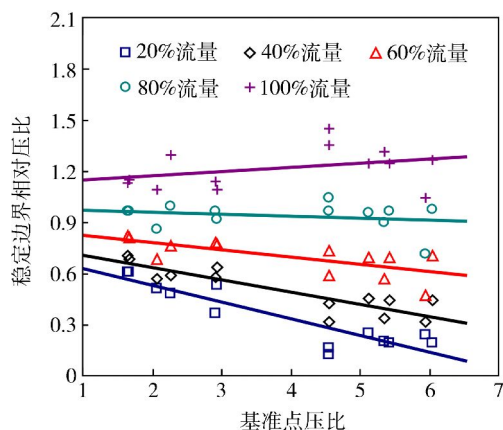


图6 稳定边界压比随基准点压比的变化关系

Fig. 6 Relationship of pressure ratio in surge line versus reference pressure ratio

准点压比关联构造,但结果并不理想,在现有统计数据范围内没有表现出明显规律.从图6中可知,不同相对换算流量下稳定边界压比和基准点压比之间的关联变化关系具有较明显的统计特征,相同换算流量条件下稳定边界压比和基准点压比基本符合线性关系.对于低压比压气机,稳定边界参数之间的关联度较好,统计数据基本落在拟合直线附近.对于高压比压气机,稳定边界上参数离散度似乎有增大趋势,总体误差有所增大.从图中也发现个别数据出现较大偏差,如100%基准点流量下的稳定边界压比值.

2.4 变工况特性线的拟合

国内外对压气机特性线拟合和建模问题进行大量研究,提出了多种处理方法,如插值法、最小二乘回归法、神经网络法、遗传算法等^[12-15],为提高拟合和建模精度,也有人提出新的改进方法,如针对工程上运用最广泛的传统最小二乘回归法,发展出偏最小二乘法、滑动最小二乘法等^[16-17].对试验特性线进行拟合和建模,其最终目的是为寻找合适的函数表达式来构造特性方程,从而提炼出研究对象的抽象数学模型.本文要实现多型压气机试验特性线的有效关联,也需构造出能够适应不同类型不同工况压气机通用标准特性方程.鉴于统计关联的试验数据量较大(共13台,约3000个数据点),在大样本条件下通过传统最小二乘回归法可以获得适应性较好的函数表达式(曲线拟合精度与样本数据量成正比),并且具有简单、快速、易于实现等优点.因此,本文在这里采用最小二乘法进行压气机通用特性线方程的拟合构造.

首先尝试对各型压气机所有试验数据进行整体归一化拟合的可行性,转速范围为50%~100%设计转速,特性线范围从下堵塞点至近失稳点.在拟合试验数据时,对常规特性线的表达方式进行一定转换,即用温升-流量曲线代替压比-流量曲线,对温升特性曲线,选用二次多项式进行拟合,而对效率特性曲线,选用三次多项式进行拟合.综合分析各型压气机试验数据归一化拟合效果,可以发现:基于全工况试验数据的拟合经验函数关系能够大致反映特性线的变化趋势;对于跨声速压气机试验数据拟合结果,中低转速拟合精度较高,高转速拟合精度较差,特别是跨声速压气机特有的垂线形特性无法正确表达;对于亚声速压气机试验数据拟合结果,归一化拟合具有较好的泛化能力,能够正确反映各项参数之间的内在联系.将各型压气机拟合得到的特性方程进行归集,可生成类似标准曲线

簇的经验特性图谱(如图 7、图 8 所示),当需要预估某台新设计压气机特性线时,可以尝试选取平均标准曲线来近似表征特性线的基本形状。

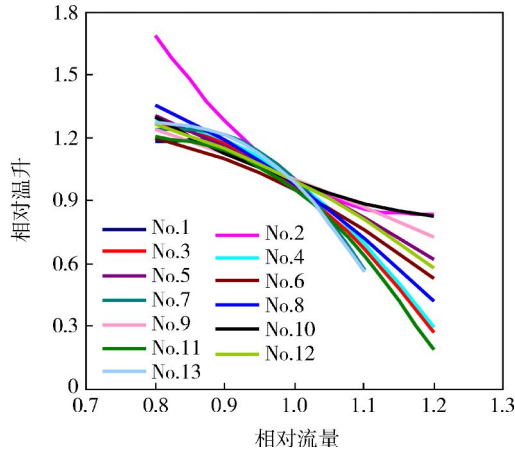


图 7 基于泛化拟合的温升特性曲线簇

Fig. 7 Generalized temperature rise characteristics based on the extensive fitting process

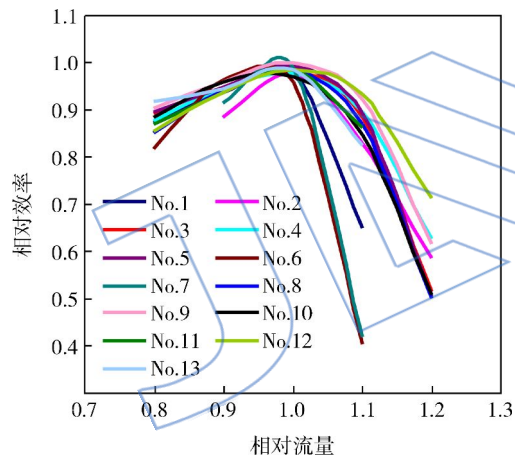


图 8 基于泛化拟合的效率特性曲线簇

Fig. 8 Generalized efficiency characteristics based on the extensive fitting process

在全转速范围内对各型压气机试验数据进行整体归一化拟合,虽然能够得到统计意义上的泛化关联曲线,且对于大部分试验数据具有较好包容性,但是,针对部分高跨声速压气机,由于忽略了亚声速流动和超声速流动的本质差别,导致经验拟合特性方程无法很好地表征跨声速压气机高转速区内特有垂线形特性分布特点。本文进一步尝试采用分区拟合思想,将中低转速与高转速做适当区分,使拟合结果在较好表征亚声速特性线变化的同时,也能够有效反映跨声速特性线变化。根据上述全转速范围归一化拟合情况,认为选取 90 % 设计转速作为分区转速较合适。图 9、图 10 给出了 90 % 设计转速以下各型压气机试验数据关联统计拟合

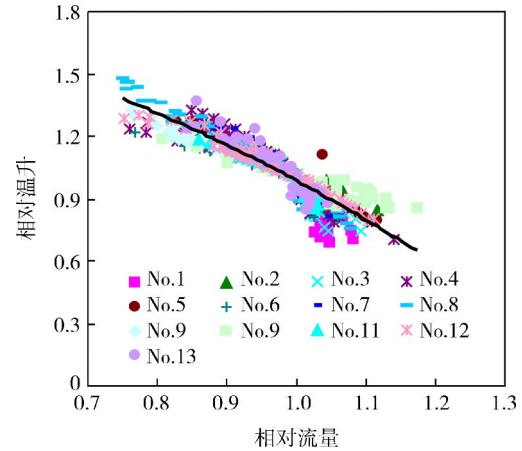


图 9 温升特性关联统计结果(中低转速区)

Fig. 9 Correlative statistical results of temperature rise characteristics (low and medium speed range)

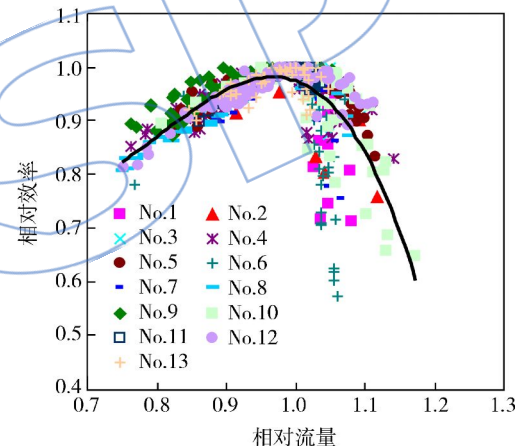


图 10 效率特性关联统计结果(中低转速区)

Fig. 10 Correlative statistical results of efficiency characteristics (low and medium speed range)

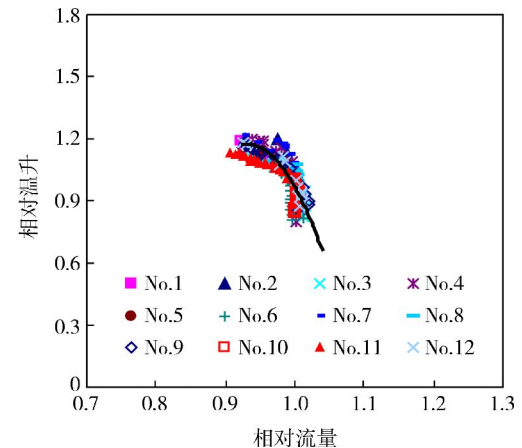


图 11 温升特性关联统计结果(高转速区)

Fig. 11 Correlative statistical results of temperature rise characteristics (high speed range)

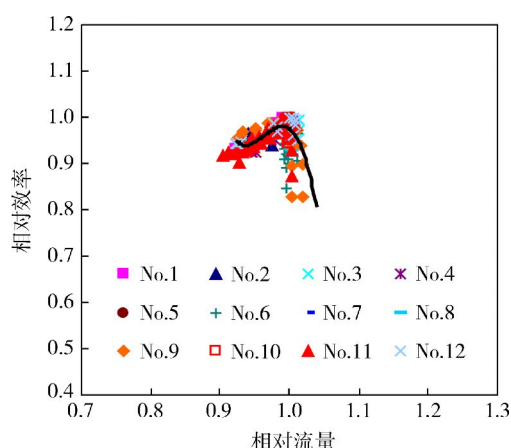


图 12 效率特性关联统计结果(高转速区)

Fig. 12 Correlative statistical results of efficiency characteristics (high speed range)

结果,图 11、图 12 给出了 90 % 设计转速以上各型压气机试验数据关联统计拟合结果. 可以看出:两个转速区间内,温升特性试验数据相关性较好,采用二次多项式进行拟合可以得到较满意结果. 效率特性左支试验数据的相关性要好于右支,采用三次多项式进行拟合可得到较理想的左支特性,但右支特性的数据离散度较大.

2.5 关联基准点的求解

综合以上分析不难发现:无论是关联基准线和稳定边界的构建,还是变工况特性线的拟合,均是通过基准点来进行众多离散数据的相互关联. 一台全新设计压气机在没进行性能试验前,其真实关联基准点参数是未知的,要实现试验数据的有效联系,需要解决关联基准点的求解问题,即建立基准点与设计点之间的量化对应关系. 图 13~图 15 给出了各型压气机基准点与设计点之间的统计关系,可以看出:基准点流量与设计点流量具有较为理想的统计线性关系,两者之间的线性关联度较高;基准点压比与设计点压比也基本具有线性特征(仅有一台压气机试验数据关联度较差);基准点效率与设计点效率之间的数值离散度明显增大,但仍具有一定的变化区间,其误差范围约为 $\pm 5\%$,假如该误差对于同类型压气机效率具有代表性,那么所统计出的线性关系仍具有参考使用价值.

需要补充说明的是,将基准点参数与设计点参数进行直接关联是假设各型压气机真实性能达到或接近设计要求,即气动设计本身是成功的. 表 1 给出了本文 13 台轴流压气机各设计点压比下流量和绝热效率的相对误差,其定义为:(试验值

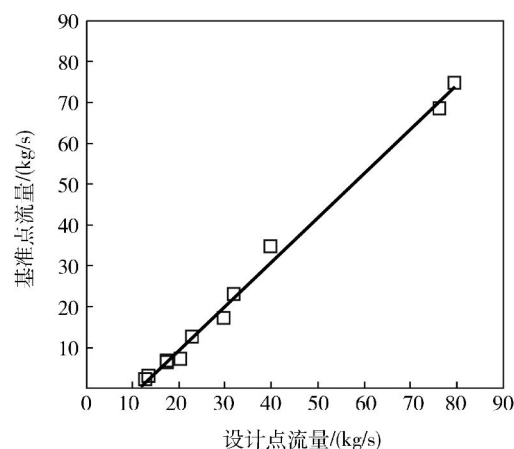


图 13 基准点流量与设计点流量的统计关系

Fig. 13 Statistical relationship between reference mass flow and design mass flow

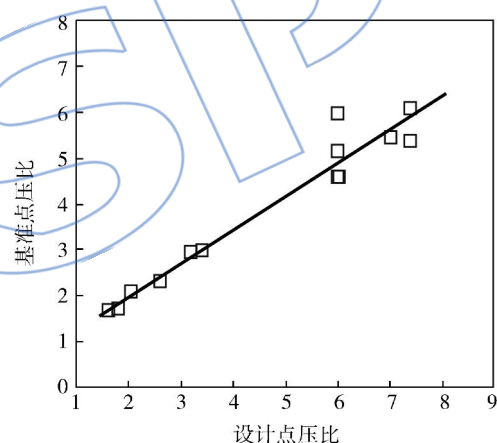


图 14 基准点压比与设计点压比的统计关系

Fig. 14 Statistical relationship between reference pressure ratio and design pressure ratio

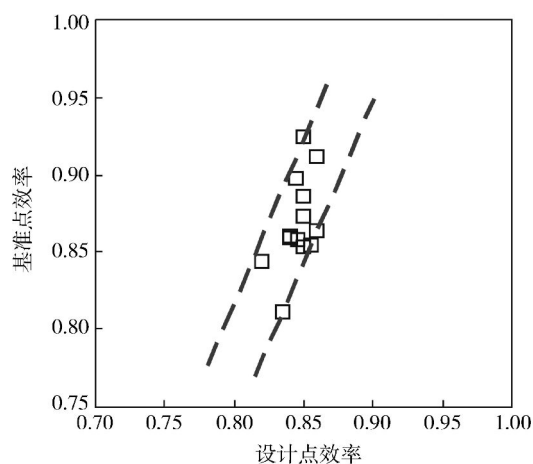


图 15 基准点效率与设计点效率的统计关系

Fig. 15 Statistical relationship between reference adiabatic efficiency and design adiabatic efficiency

—设计值)/设计值 $\times 100\%$ 。从表中可知,本文所选取的各型压气机总体设计情况良好,在相同设计点压比下,流量和效率相对误差总体处于可接受的误差范围内。如果某台新设计压气机性能参

数偏离目标值较远,采用本文关联分析方法进行基本特性的预估就会出现很大偏差。因此,预估对象真实性能与设计目标之间的接近程度将直接影响关联分析方法的应用效果。

表 1 统计对象设计点相对误差

Table 1 Relative error of design points of the statistical objects

对象序号	1	2	3	4	5	6	7
流量相对误差/%	6.65	0.99	1.11	-0.82	-1.29	-2.66	0.23
效率相对误差/%	-0.31	-0.54	-2.39	-0.12	-0.84	-3.61	-0.71
对象序号	8	9	10	11	12	13	
流量相对误差/%	1.84		4	4.31	1.58	3.26	
效率相对误差/%	-4.16		-3.74	0.95	0.23	1.05	

3 关联分析方法的验证

通过关联基准点的选取、关联基准线的构造、稳定工作边界的预估、变工况特性泛化拟合及关联基准点求解等步骤,初步实现了不同试验条件

不同类型轴流压气机性能试验数据之间的有效联系,在统计层次上解析了离散试验数据的内在关联特征,建立了可快速量化预估轴流压气机特性曲线的经验方法。图 16 示出了本文经验关联分析方法构建的流程图。

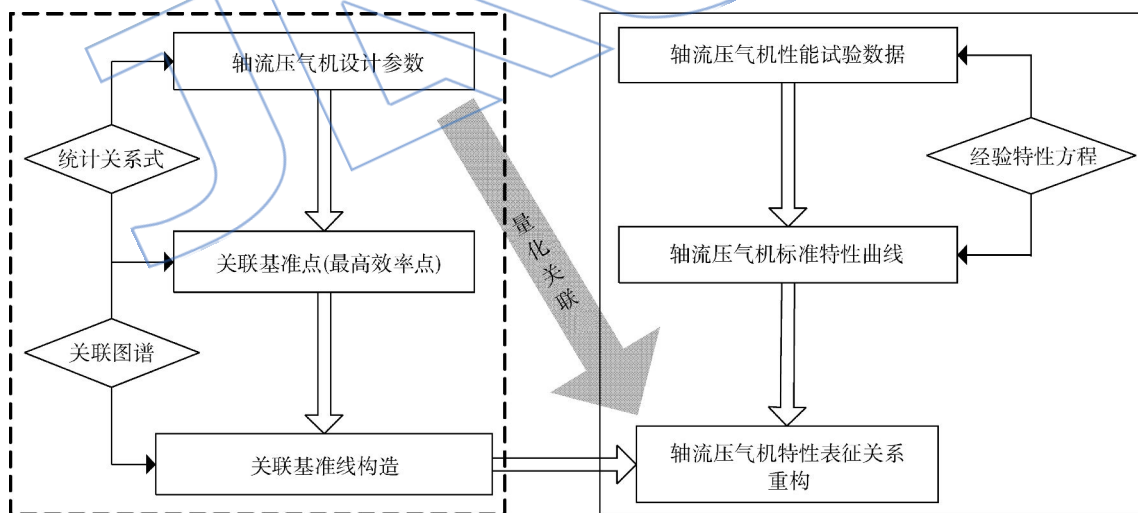


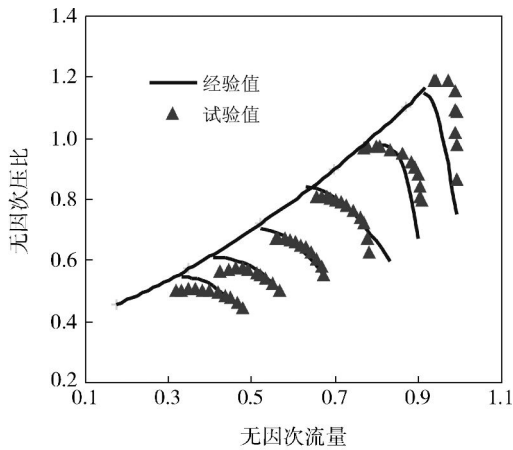
图 16 关联分析方法构建的流程图

Fig. 16 Flow chart of correlative analysis method

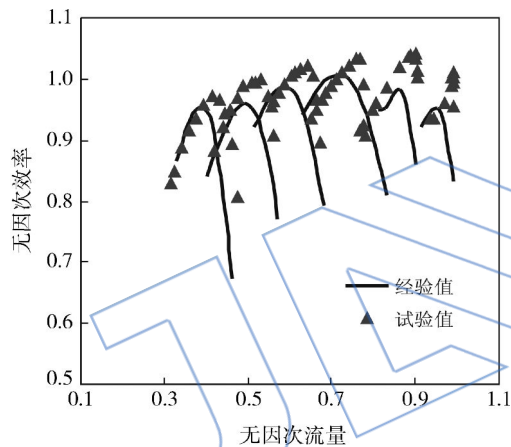
为考察关联分析方法的准确性与适应性,本文通过逆向重构出各型压气机完整经验特性的表征关系,以对比验证变工况预估特性与原始试验数据的吻合品质。根据图 16 所描述的分析逻辑思路,对比了各型压气机特性线的预估结果,发现经验预估结果基本能够正确描述特性线的主要变化关系。从压比特性和效率特性的重构情况看,除小流量多级跨声压气机外,其余各型压气机压比线

与效率线的变化趋势可以得到正确表征(如图 17 所示)。从稳定边界重构情况看,出现了过高或过低预估稳定工作范围的随机变化,目前还无法准确判定稳定边界预估随机性与压气机设计参数之间究竟存在何种相关性。总体上看,本文所建立的关联分析方法对大流量轴流压气机的预估结果要好于小流量轴流压气机,等转速线预估结果要优于稳定边界。

为进一步量化关联分析方法的预估效果,选取典型工况点对比统计了各性能参数预估结果与试验结果的偏差范围.图 18~图 20 分别给出了



(a) 压比-流量特性



(b) 效率-流量特性

图 17 某压气机预估特性与试验特性的对比

Fig. 17 Comparison between evaluated and experimental performance characteristic of a compressor

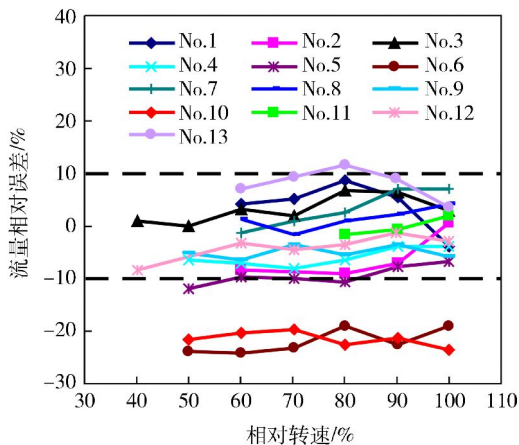


图 18 流量预估相对误差统计

Fig. 18 Statistical relative error of evaluated mass flow

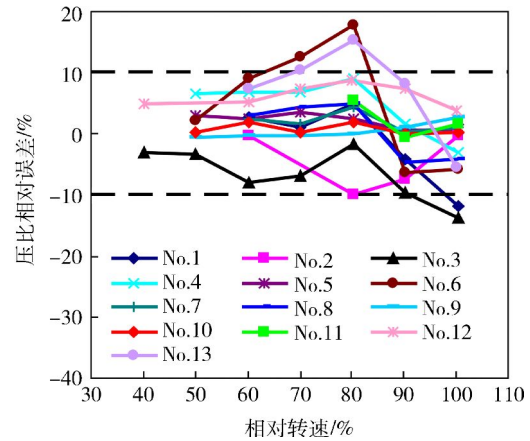


图 19 压比预估相对误差统计

Fig. 19 Statistical relative error of evaluated pressure ratio

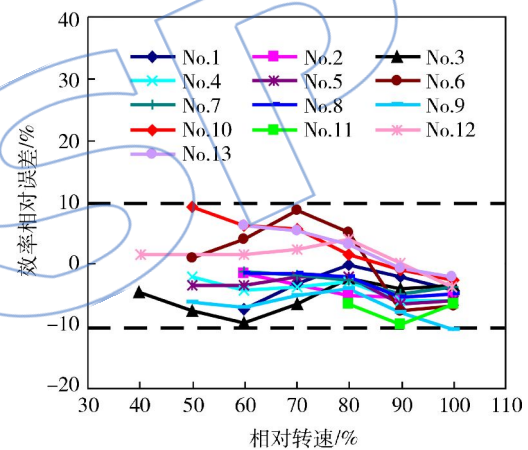


图 20 效率预估相对误差统计

Fig. 20 Statistical relative error of evaluated adiabatic efficiency

各型压气机流量、压比和效率参数相对误差分析结果.如图所示,在不考虑小流量跨声速压气机预估结果情况下,其流量、压比和效率的相对误差范围均在 $\pm 10\%$ 以内,表明所构建的关联分析方法具有一定精度,可应用于同类型新设计压气机特性表征关系的经验重构.

4 结 论

采用系统研究思想,对 10 余台轴流压气机稳态性能试验数据进行归纳整理,在统计层次上探索了现有气动/结构设计体系下离散试验数据之间的内在相关规律.基于关联基准点选取、关联基准线构造、稳定边界预估、特性线泛化拟合和关联基准点的求解等环节的详细阐述,成功构建了一种实现压气机试验特性有效关联的经验分析方法,该方法在大流量轴流压气机变工况特性预估

方面取得较好效果.采用本文构建的关联分析方法,能够进行同类型新设计压气机变工况特性的表征关系重构和先期性能评定,为压气机离散试验数据的挖掘、利用提供了新的技术途径.本文关联分析方法旨在探究轴流压气机变工况特性的共有基本属性,统计对象包括了多种类型,忽视了气动/几何设计参数对压气机性能特征表征关系的固有影响,导致部分关联统计结果的分散度较大,这是制约该经验方法预估精度和适用范围的主要瓶颈.在现有基础上,采用分类统计的思想,或者将主要气动或几何设计参数模化成一类影响修正系数,进而对关联分析方法进行改进,有望进一步提高该类经验方法的预估能力.

参考文献:

- [1] Irving A, Johnsen, Robert O, et al. Aerodynamic design of axial flow compressors[R]. NASA N65-23345, 1965.
- [2] Wassell A B. Reynolds number effects in axial compressors [R]. ASME WA/GT-2, 1967.
- [3] Kurzke J, Riegler C. A new compressor map scaling procedure for preliminary conceptional design of gas turbines [R]. ASME Paper 2000-GT-0006, 2000.
- [4] Kong C D, Ki J Y. A new scaling method for component maps of gas turbine using system identification[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines Power, 2003, 125(4): 979-985.
- [5] Drummond C, Davison C R. Capturing the shape variance in gas turbine compressor maps[R]. ASME Paper GT-2009-60141, 2009.
- [6] Cravero C, Macelloni P. A new model for the prediction of compressor performance maps[R]. ISABE-2009-1133, 2009.
- [7] Kurzke J. Correlations hidden in compressor maps[R]. ASME Paper GT-2011-45519, 2011.
- [8] 张娜, 林汝谋, 蔡睿贤. 压气机特性通用数学表达式[J]. 工程热物理学报, 1996, 17(1): 21-24.
ZHANG Na, LIN Rumou, CAI Ruixian. General formulas for axial compressor performance estimation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1996, 17(1): 21-24. (in Chinese)
- [9] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机设计手册: 压气机[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- [10] XIANG Honghui, REN Minglin. Discussion of several questions with efficiency assessment in axial flow compressor experiment[R]. JSASS-2009-5537, 2009.
- [11] 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)
- [12] Drummond C, Davison C R. Improved compressor maps using approximate solutions to the Moore Greitzer model [J]. ASME Paper GT-2009-60148, 2009.
- [13] 王志涛, 李淑英, 谭智勇. 基于 BP 和 RBF 神经网络压气机特性曲线拟合方法的研究[J]. 汽轮机技术, 2009, 51(2): 94-96.
WANG Zhitao, LI Shuying, TAN Zhiyong. Comparing study on the fitting method of compressor characteristic curve based on BP and RBF neural network [J]. Turbine Technology, 2009, 51(2): 94-96. (in Chinese)
- [14] 蒋爱武, 谢寿生. 基于支持向量机和粒子群算法的压气机特性计算[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2571-2577.
JIANG Aiwu, XIE Shousheng. Method to achieving compressor characteristics based on support vector machine (SVM) and particle swarm optimization (PSO) [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11): 2571-2577. (in Chinese)
- [15] 尹大伟, 李本威, 王永华, 等. 基于 Kriging 方法的航空发动机压气机特性元建模[J]. 航空学报, 2011, 32(1): 99-106.
YIN Dawei, LI Benwei, WANG Yonghua, et al. Aero-engine compressor characteristics metamodeling using Kriging method [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(1): 99-106. (in Chinese)
- [16] 刘喜超, 唐胜利. 基于偏最小二乘法的压气机特性曲线的拟和[J]. 汽轮机技术, 2006, 48(5): 327-329.
LIU Xichao, TANG Shengli. Mathematical model of compressor characteristic map based on the partial least square theory [J]. Turbine Technology, 2006, 48(5): 327-329. (in Chinese)
- [17] 杨欣毅, 沈伟, 刘海峰, 等. 一种应用滑动最小二乘求取压气机特性的方法 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(8): 1741-1746.
YANG Xinyi, SHEN Wei, LIU Haifeng, et al. Compressor characteristics generation method using moving least square [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(8): 1741-1746. (in Chinese)