

小流量离心压气机温度畸变器设计和试验

张 骏, 朱 玲, 石建成, 王国文, 银越千

(中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所

中小型航空发动机叶轮机械湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 利用电加热管设计了小流量压气机温度畸变发生器, 针对某小流量压气机的温度畸变要求, 对温度畸变发生器进行畸变指数标定试验, 得到满足温度畸变指数要求的畸变发生器运行参数、总压恢复系数和总压畸变指数; 将温度畸变发生器安装至压气机试验件, 进行压气机性能试验, 得到压气机在温度畸变条件下的气动性能。结果表明: 满足温度畸变指数要求的电加热管需运行 4~5 根, 单根功率为 3 kW, 进口物理流量需不大于 3 kg/s; 在该畸变发生器运行参数下, 压气机峰值效率最大下降了 1.3%, 喘振边界无明显影响。

关 键 词: 温度畸变发生器; 离心压气机; 电加热管; 畸变指数; 喘振裕度

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Design and test of temperature distortion generator on small flow rate compressor

ZHANG Jun, ZHU Ling, SHI Jiancheng, WANG Guowen, YIN Yueqian

(Hunan Key Laboratory of Turbomachinery on Small and Medium Aero-Engine,

Hunan Aviation Powerplant Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: A small flow compressor temperature distortion generator was designed by using electric heating tubes. The operation parameters of the temperature distortion generator were calibrated with temperature distortion coefficient, and the total pressure recovery coefficient and pressure distortion coefficient were obtained. The temperature distortion generator was installed on the compressor test rig, and the aerodynamic performance of the compressor under the condition of temperature distortion was obtained. The results showed that 4—5 electric heating tubes were required to meet the requirements of temperature distortion coefficient, and the power of a single tube was 3 kW. The inlet physical mass flow must be less than 3 kg/s. Under the operating parameters of the distortion generator, the peak efficiency of the compressor decreased by 1.3% at most, and the surge line had no significant change.

Key words: temperature distortion generator; centrifugal compressor;
electric heating tubes; distortion coefficient; surge margin

航空发动机进气畸变是影响其稳定工作的外部因素之一, 常见的进气畸变主要包括: 压力畸

变、旋流畸变和温度畸变^[1]。发动机抗畸变的能力直接决定了飞机的飞行性能以及任务能力^[2-3]。

收稿日期: 2021-02-15

作者简介: 张骏(1987—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事叶轮机械气动热力学研究。

引用格式: 张骏, 朱玲, 石建成, 等. 小流量离心压气机温度畸变器设计和试验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(1): 173-180. ZHANG Jun, ZHU Ling, SHI Jiancheng, et al. Design and test of temperature distortion generator on small flow rate compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(1): 173-180.

目前,国内外对压力畸变和旋流畸变的产生机理、模拟试验以及对压气机和发动机的影响已积累了大量的经验^[4-9];温度畸变的研究对象大多基于发动机整机^[10-12],而对于压气机部件的进气温度畸变方面的研究较少,温度畸变对压气机的影响机理仍处于起步阶段^[13]。因此,在压气机研制和测试阶段,设计相应的满足温度畸变指数要求的畸变发生器(distortion generator),以开展温度畸变试验,对确定发动机进口温度畸变的临界参数和评定防喘系统有效性具有十分重要的意义。

已有的温度畸变发生器主要分为外部热气导入式(air jet distortion generator)和嵌入燃烧式(in-airstream burner)两种^[14-18]。热气导入式的温度畸变发生器通常在航空发动机气流通道外部,利用加热、燃烧以及换热等方式产生高温气体,然后利用布置的管路将该热气导入发动机通道,最终在发动机气动交界面形成所需要的温度畸变流场,这种发生器将引入外部气流,从而会使发动机进口流量测量变得更复杂,同时,由于外部气流与主气流的掺混情况十分复杂,引气管路、入射角度及引气质量流量(文中简称流量)等参数的设计均变得十分复杂。嵌入燃烧式的温度畸变发生器通常在航空发动机气流通道内部,设置微型燃烧腔,将燃料导入后通过控制微型燃烧腔的燃烧状态实现局部气流加温,从而形成所需要的温度畸变流场,但由于微型燃烧腔位于发动机气流通道内部,对温度畸变参数的准确模拟需要独立控制每一个燃烧腔的供油和火焰稳定,结构复杂,控制难度大,另外,大多数此类发生器采用氢作为燃料,安全隐患大。

本文针对某型小流量涡轴发动机的畸变指数要求,设计了一种基于电加热管的温度畸变发生器,对其进行标定试验以确定满足要求的运行参数,最后在压气机部件试验件上完成验证。

1 温度畸变发生器设计

1.1 温度畸变指数要求

某小流量离心压气机需在进口存在一定温度畸变条件下仍能稳定工作,该温度畸变指数用 $D_{t,120}$ 表示,定义式及要求值如下:

$$D_{t,120} = \frac{t_{t,120,\max} - t_{t,\text{mean}}}{t_{t,\text{mean}}} = 0.02 \quad (1)$$

其中 $t_{t,120,\max}$ 为截面任意 120° 扇形区最大平均总温, $t_{t,\text{mean}}$ 为截面平均总温。

1.2 温度畸变器设计

温度畸变器的设计需要在满足温度畸变指数要求的同时不能产生太大的总压畸变。本文利用电加热管设计了一种温度畸变器,在该畸变器内,12根电加热管采用周向均布,以确保不产生太大的周向总压畸变。同时,12根电加热管可独立控制,通过三维数值模拟加标定试验的方式,得到满足温度畸变指数要求的电加热管运行数量及加热功率。图1给出了温度畸变发生器电加热管示意图,电加热管通过焊接固定到机匣上,单根电加热管额定功率为 3.0 kW。

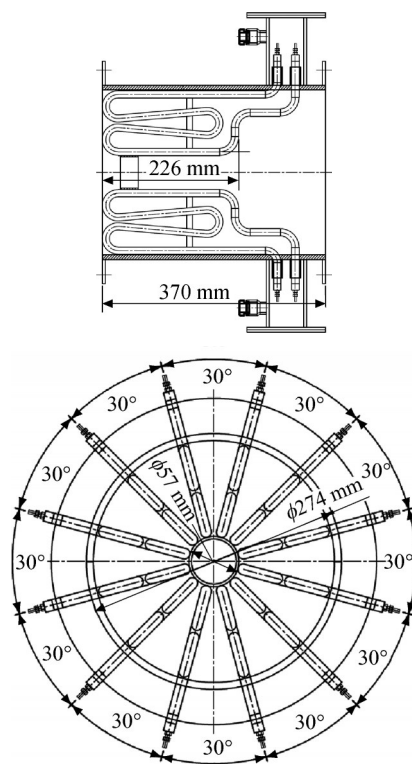


图1 温度畸变发生器电加热管分布图

Fig.1 Distribution diagram of electric heating tubes in the temperature distortion generator

图2给出了带温度畸变发生器的三维计算域示意图,温度畸变发生器安装于该压气机进气段内,温度畸变发生器下游周向均布了4个承力支板,进气段出口截面即为压气机离心叶轮进口截面,本文评判温度畸变指数和压力畸变指数所在的截面均指的是该截面。

分别对无畸变、运行4根电加热管和运行5根电加热管3种情况下的设计点(流量为 4.5 kg/s)流场进行三维数值模拟。进气段畸变发生器部分采用 ANSYS ICEM 完成网格划分,其余部分采用 ANSYS Turbogrid 完成网格划分,带温度畸变

发生器的网格总量为 518 万,不带温度畸变发生器的网格总量为 105 万。采用 ANSYS CFX 对进气段流场进行三维数值模拟,边界条件为进口给定总压、总温及速度方向,出口给定静压,运行的电加热管给定表面功率密度为 7.6 W/cm^2 ,此时,运行的单根电加热管理论功率为 3 kW 。图 3 给出了有无畸变发生器对进气段出口总压场的影响对比图,带畸变发生器与不带畸变发生的进气段总压畸变指数($D_{c,60}$)相差 1.3% ,总压恢复系数相差 0.11% ,且上游支板尾迹分布角度及影响区域相似,同时未发现明显的 12 根电加热管尾迹,由此可见,畸变发生器对进气段出口压力流场影响较小。表 1 给出了设计点时电加热管运行根数与 $D_{tc,120}$ 关系,由表可得,初步判定当电加热管根数为 5 根时,可以满足压气机 $D_{tc,120}$ 的要求。

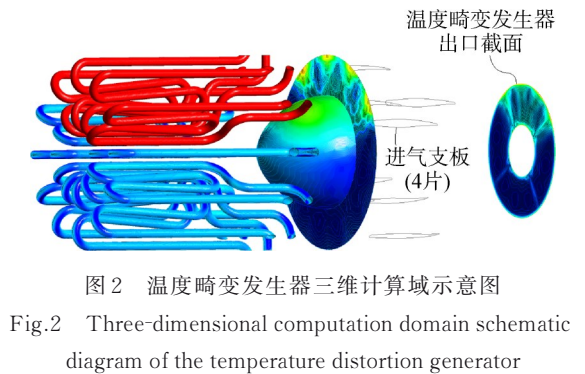


图 2 温度畸变发生器三维计算域示意图
Fig.2 Three-dimensional computation domain schematic diagram of the temperature distortion generator

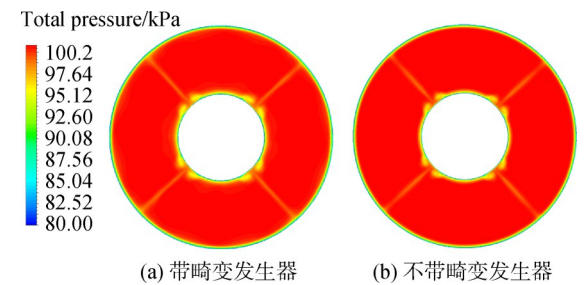


图 3 进气段出口截面总压场
Fig.3 Total pressure flow field of outlet of inlet section

表 1 设计点电加热管运行根数与 $D_{tc,120}$ 关系的
三维计算结果

Table 1 Three-dimensional computation results of relationship between $D_{tc,120}$ and number of electric heating tubes in design mass flow	
电加热管运行根数	$D_{tc,120}$
4	0.018 4
5	0.020 2

1.3 温度畸变发生器控制方式

图 4 给出了温度畸变发生器控制方式示意图,通过控制柜设定单根电加热管功率和电加热管根数,并根据流场实测反馈温度判定是否需要调整电加热管运行根数和功率。

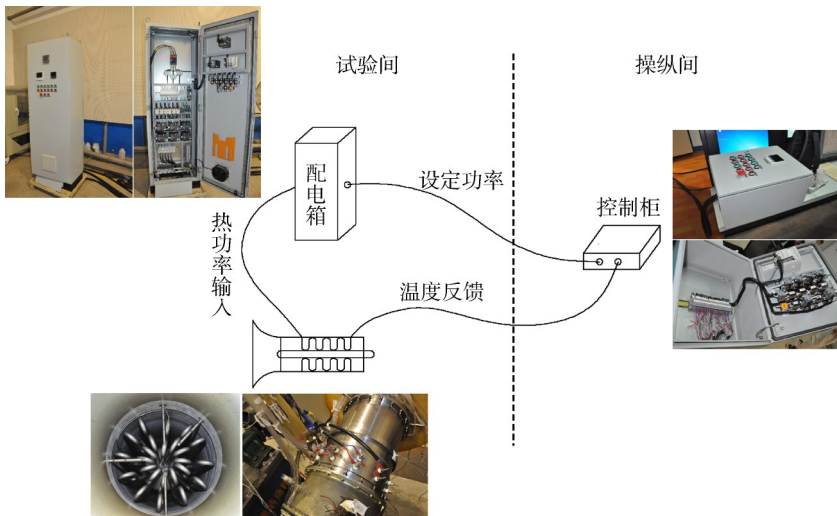


图 4 温度畸变发生器控制示意图
Fig.4 Control schematic diagram of the temperature distortion generator

2 温度畸变指数标定试验

2.1 测试方案

进口测量截面布置 2 支五点梳状总压探针、2

支三点梳状总温探针以及 4 个壁面静压测点。出口测量截面布置了 3 支三点梳状总温探针、4 支六点梳状总压探针及 4 个根尖壁面静压测点,其中总温、总压及静压测点均采用周向均布。出口截

面采用可旋转的方式,每隔 10° 转一次,其中,在总温畸变指数测量时共旋转 110° ,总压畸变指数测量时共旋转 80° ,由此可得到整个截面的周向 36 个位置的总温、总压和根尖静压分布。

按式(1)的 $D_{tc,120}$ 计算公式得到温度畸变指数值,其中

$$t_{t,120,\max} = \max_K \left(\frac{1}{IM} \sum_{i=1}^I \sum_{j=K}^{K+M-1} t_{t,i-j} \right) \quad (2)$$

$$K = 1 \sim J$$

$$t_{t,\text{mean}} = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J t_{t,i-j} \quad (3)$$

式中 M 为 120° 角扇形区内周向测点数 12, I 为径向测量点数 3, J 为周向总测点数 36。当 $K=26$, $j=K+M-1=37>36$ 时, j 应取 1, 即当 K 分别为 26~36 时, 相对应的 j 应为 1~11; $t_{t,\text{mean}}$ 为测量截面上所有总温测点的平均值; $t_{t,i-j}$ 为测点 (i,j) 的总温, i 表示测点径向序号, j 表示 $(j \times 10)^\circ$ 周向角度位置的测点序号。

同时,为了研究该温度畸变发生器对总压分布的影响,标定试验对包含畸变发生器的整个进气段总压畸变指数进行测量,总压畸变指数用 $D_{c,60}$ 表示

$$D_{c,60} = \frac{p_{\min,60} - p_{\text{av}}}{q_{\text{av}}} \quad (4)$$

式中

$$p_{t,\min,60} = \min_K \left(\frac{1}{IN} \sum_{i=1}^I \sum_{j=K}^{K+N-1} p_{t,i-j} \right) \quad (5)$$

$$K = 1 \sim J$$

$$q_{\text{av}} = p_{\text{av}} - p_{\text{st}} \quad (6)$$

$$p_{\text{av}} = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{t,i-j} \quad (7)$$

$$p_{\text{st}} = \frac{p_{\text{ss}} + p_{\text{sh}}}{2} \quad (8)$$

$$p_{\text{ss}} = \frac{1}{36} \sum_{x=1}^{36} p_x \quad (9)$$

$$p_{\text{sh}} = \frac{1}{36} \sum_{y=1}^{36} p_y \quad (10)$$

式中 $p_{t,\min,60}$ 为任意 60° 角扇形区内平均总压的最小值, N 为 60° 角扇形区内周向测点数 6, I 为径向测量点数 6, J 为周向测点数 36。当 $K=32$, $j=K+N-1=37>36$ 时, j 应取 1, 即当 K 分别为 32~36 时, 相对应的 j 应为 1~5; q_{av} 为测量截面上的平均动压; p_{av} 为测量截面上所有总压测点的平均值, $p_{t,i-j}$ 为测点 (i,j) 的总压, p_{st} 为测量截面上根、尖静压的平均值, p_x 为机匣各周向位置静压测量值,

p_y 为轮毂各周向位置静压测量值。

2.2 单根管加热功率对设计点温度畸变指数的影响

在设计点时,运行 5 根电加热管,分别研究了单根 2.5 kW 和 3.0 kW 加热功率对温度畸变指数的影响,两者除输入功率不同,其他条件均保持一致。表 2 给出了单根输入功率与 $D_{tc,120}$ 的关系,由表可得,此时运行 5 根电加热管时,单根电加热管输入功率为 2.5 kW 和 3.0 kW 的 $D_{tc,120}$ 均未达到 0.02,单根电加热管输入功率为 3.0 kW 时的 $D_{tc,120}$ 与表 1 中的仿真结果(0.020 2)差异较大,原因是仿真时机匣采用绝热边界,而实际运行时,由于机匣与外界存在换热,使得加热区域的温度减小,从而减弱了温度畸变。由于单根加热功率为 3.0 kW 时的温度畸变指数值更接近要求值,因此,后续均采用单根加热功率为 3.0 kW 进行试验。

表 2 设计点时输入功率与 $D_{tc,120}$ 的关系

Table 2 Relationship between $D_{tc,120}$ and input power in design mass flow

单根输入功率/kW	$D_{tc,120}$
2.5	0.013 2
3.0	0.015 3

2.3 电加热管根数对温度畸变指数的影响

在物理流量为 2.0、2.5、4.5 kg/s 时,每根电加热管功率为 3.0 kW,分别运行 4 根和 5 根电加热管,研究电加热管根数对温度畸变指数的影响,每个流量工况除电加热管根数不同,其他条件均保持一致。表 3 给出了电加热管根数与 $D_{tc,120}$ 的关系,由表可得,在相同物理流量时,运行 5 根电加热管比 4 根获得的 $D_{tc,120}$ 更大,考虑到 5 根电加热管能覆盖的满足 $D_{tc,120}$ 要求的流量范围更宽,

表 3 电加热管根数与 $D_{tc,120}$ 的关系

Table 3 Relationship between $D_{tc,120}$ and the number of electric operating tubes

物理流量/(kg/s)	电加热管根数	$D_{tc,120}$
2.0	4	0.026 8
	5	0.027 8
2.5	4	0.022 9
	5	0.023 2
4.5	4	0.014 4
	5	0.015 3

因此,确定后续均采用单根加热功率为3.0 kW、运行5根电加热管进行试验。

2.4 不同流量下的温度畸变指数

分别完成物理流量为2.0~4.5 kg/s时,运行5根电加热管,单根功率为3 kW的温度畸变指数测量试验。图5给出了不同流量下的温度畸变指数变化图,由图可得,在该加热器运行参数条件下,物理流量从2~4.5 kg/s变化时, $D_{tc,120}$ 由0.027 8减小至0.015 3, $D_{tc,120}=0.02$ 对应的物理流量约为3 kg/s。因此,后续开展温度畸变条件下的压气机试验时,应对物理流量为3.0 kg/s以上的状态进行节流,使物理流量保持在3.0 kg/s以下,从而维持 $D_{tc,120}$ 在0.02以上。

图6给出了物理流量为3.0 kg/s时的出口截面总温分布云图,此时 $D_{tc,120}=0.019 7$,接近0.02的畸变指数需求,由图可得,此时进气段出口截面最大温差约为12℃。

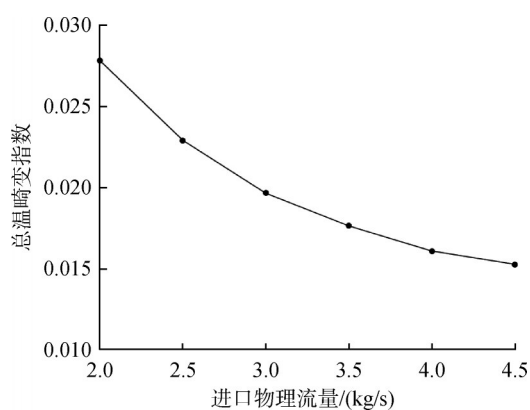


图5 不同流量下的 $D_{tc,120}$

Fig.5 $D_{tc,120}$ of variable mass flow

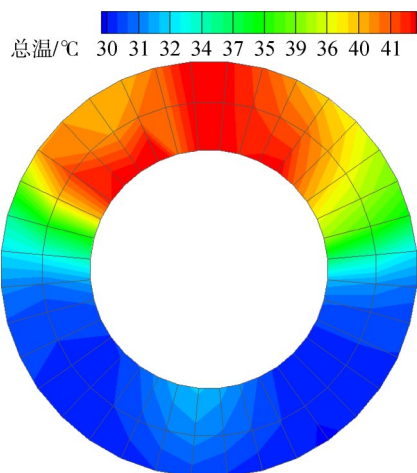


图6 物理流量为3.0 kg/s时的出口总温分布云图

($D_{tc,120}=0.019 7$)

Fig.6 Distribution of outlet total temperature in physical mass flow of 3.0 kg/s($D_{tc,120}=0.019 7$)

2.5 温度畸变发生器对总压恢复系数的影响

图7给出了无温度畸变发生器和带温度畸变发生器状态下,进气段的总压恢复系数对比图,总压恢复系数与进口换算流量相关,无畸变发生器在进口换算流量2.5~5.0 kg/s范围内进气段的总压恢复系数为99.55%~99.89%,带畸变发生器在进口换算流量2.1~5.2 kg/s的总压恢复系数为97.19%~99.52%,由此可得,安装温度畸变发生器后,在2.0~5.0 kg/s进口换算流量范围内的总压恢复系数减小0.77%~3.11%。

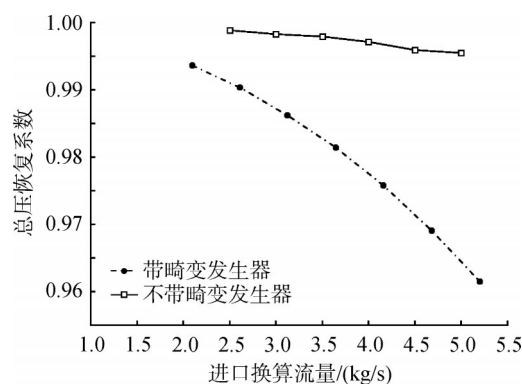


图7 进气段总压恢复系数随流量的变化关系

Fig.7 Variation of total pressure recovery coefficient with mass flow of inlet section

根据试验得到的总压恢复系数随进口换算流量关系,可将其拟合如下二次多项式:

无温度畸变发生器

$$\sigma = -0.000 2 q_{m,cor}^2 - 0.000 2 q_{m,cor} + 1.000 8 \quad (11)$$

带温度畸变发生器

$$\sigma = -0.001 6 q_{m,cor}^2 - 0.001 3 q_{m,cor} + 0.997 9 \quad (12)$$

式中 $q_{m,cor}$ 为进口换算流量,单位为kg/s。

图8给出了进气段总压恢复系数拟合曲线与试验结果对比图,由图8可见,拟合曲线与试验曲

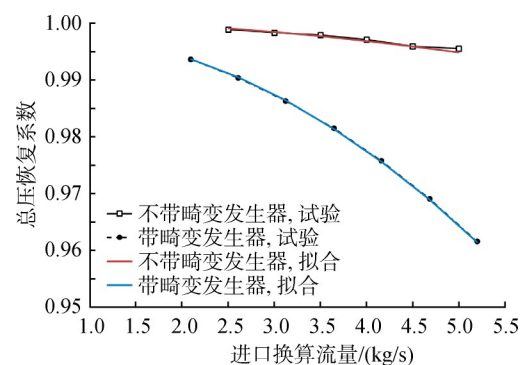


图8 进气段总压恢复系数拟合值与试验结果对比

Fig.8 Comparison between fitted and test values of inlet section total pressure recovery coefficient

线吻合较好。在压气机试验时,由于受到结构和测试的限制,进气段出口不再布置测点,此时,可根据进气段进口的换算流量,得到该进气段的总压恢复系数,从而可计算得到进气段出口(即离心叶轮进口)的总压。

2.6 温度畸变发生器对总压畸变指数的影响

图9分别给出了带温度畸变发生器和无温度畸变发生器时的进气段总压畸变指数随进口换算流量的变化曲线,由图9可得,无温度畸变发生器的进气段值 $D_{c,60}$ 为 $-0.0127 \sim -0.0083$,带温度畸变发生器的进气段 $D_{c,60}$ 值增加至 $-0.0762 \sim -0.0572$ 。总压畸变指数试验值与三维计算值差异较大,主要原因是实际加工的12根电加热管之间差异较大,且周向存在分布不均匀的情况,与理想状态下的三维计算模型存在一定的差异。因此,在压气机试验时,为排除总压畸变影响因素,应对带温度畸变发生器且不加温的情况下,单独录取一轮试验特性。

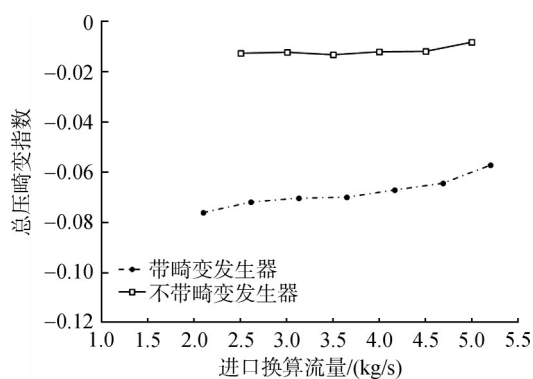


图9 进气段 $D_{c,60}$

Fig.9 $D_{c,60}$ of the inlet section

3 压气机温度畸变试验

3.1 测试方案

进口测量截面与标定试验一致。压气机出口测量截面布置8支单点总温探针、8支单点总压探针及5个根尖壁面静压测点,其中,总温和总压测点按一个轴向扩压器叶片栅距等分,并布置在不同的叶片通道;静压采用周向均布,总温、总压和静压均处于同一轴向位置。

3.2 试验方案

根据标定试验结论,采用运行5根电加热管、单根输入功率为3.0 kW、进口物理流量节流至3.0 kg/s以下的压气机温度畸变试验方案,同时与电加热管不运行、相同节流比的情况进行对比。

温度畸变对于压气机性能的影响主要来自两个方面,其一是其温升带来的压气机换算转速下降,其二是温度不均匀对压气机性能造成不利影响。为了分别研究这两个因素的影响程度,分别开展了有无温度畸变以及换算转速计算是否考虑加热温升的对比试验,见表4所示。

表4 压气机试验方案

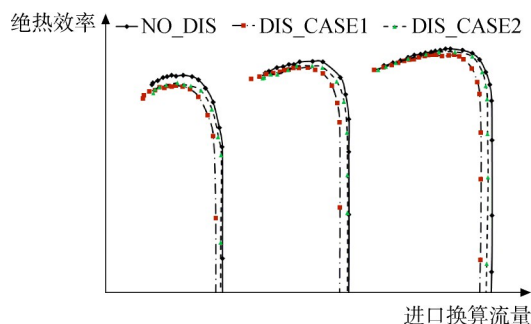
Table 4 Programmes of compressor test

编号	试验方案
NO_DIS	电加热管不加温、无温度畸变
DIS_CASE1	运行5根电加热管、换算转速的计算 不考虑加热温升
DIS_CASE2	运行5根电加热管、换算转速的计算 考虑加热温升

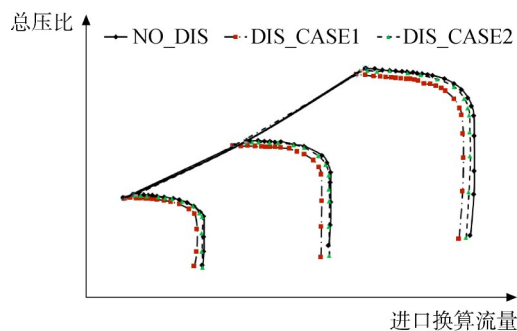
3.3 试验结果

3个试验方案的验证思路为:NO_DIS与DIS_CASE1可对比得到温度不均匀+换算转速下降的叠加影响;NO_DIS与DIS_CASE2可对比得到温度不均匀的单一因素影响;DIS_CASE1和DIS_CASE2可对比得到换算转速下降的单一因素影响。

图10分别给出了3个试验方案的压气机特性



(a) 绝热效率



(b) 总压比

图10 压气机试验特性图

Fig.10 Test characteristic map of the compressor

对比,由图可得,DIS_CASE1与NO_DIS相比,堵点流量减小1.7%~2.5%,峰值效率降低0.7%~1.3%,最高压比减小2.5%~3.7%;DIS_CASE2与NO_DIS相比,高转速堵点流量减小0.6%,中低转速堵点流量无明显差异,峰值效率降低0.4%~1.0%,最高压比减小0.6%~0.9%;DIS_CASE1与DIS_CASE2相比,堵点流量减小1.7%~1.9%,峰值效率降低0.2%~0.3%,最高压比减小1.9%~3.2%。3个方案对比结果说明,温度畸变可以使压气机流量、压比和效率均降低,但流量和压比的降低主要是由于换算转速下降影响,而效率的降低则主要是受到温度分布不均匀的影响。

另外,由图10还可以得到温度畸变对本压气机的喘振边界影响不显著。

4 结 论

利用电加热管设计了小流量压气机温度畸变发生器,对其进行畸变指数标定试验和压气机试验,得到如下结论:

1) 建立了温度畸变发生器标定试验系统,确定了电加热管运行根数和单根管功率等运行参数,并得到符合温度畸变指数要求的物理流量范围。

2) 温度畸变发生器可使进气段的总压恢复系数减小0.77%~3.11%。同时,为排除总压畸变影响因素,建议单独录取一轮带温度畸变发生器但不加温的试验。

3) 温度畸变可以使压气机流量、压比和效率均降低,流量和压比的降低主要是由于换算转速下降影响,而效率的降低则主要是受到温度分布不均匀的影响。

4) 温度畸变对本压气机的喘振边界影响不显著。

参考文献:

- [1] 刘博强.小流量温度畸变发生器设计及温度畸变特性研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
LIU Boqiang. Investigation on design and temperature distortion characteristic of small flow temperature distortion generator[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [2] CHILDS J H, KOCHENDORFER F D, LUBICK R J, et al. Stall and flame-out resulting from firing of armament[R]. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, 1955.
- [3] DIPIETRO A L. Design and experimental evaluation of a dynamic thermic distortion generator for turbomachinery research[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1993.
- [4] 张明川, 张津, 唐狄毅. 均匀和畸变进气条件下轴流压气机失速分析[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(6): 704-706.
ZHANG Mingchuan, ZHANG Jin, TANG Diyi. Analysis of axial flow compressors stall in uniform and distorted inlet flow[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 24(6): 704-706. (in Chinese)
- [5] 王掩刚, 先松川, 国睿. 周向总压畸变对对转压气机影响效应分析[J]. 推进技术, 2015, 36(2): 200-206.
WANG Yangang, XIAN Songchuan, GUO Rui. Effects of circumferential total pressure distortion on flow field in a contra-rotating axial compressor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(2): 200-206. (in Chinese)
- [6] 王勤, 刘世官, 王振华. 某型发动机进气总压畸变流场中涡旋尺度的计算及其变化特征[J]. 航空发动机, 2003, 29(2): 29-33.
WANG Qin, LIU Shiguan, WANG Zhenhua. Characteristic and calculation of eddy scale in total pressure distortion flow at typical engine inlet[J]. Aeroengine, 2003, 29(2): 29-33. (in Chinese)
- [7] DAVE B, SCOTT W, JIM R, et al. Demonstration of a transient total-pressure distortion generator for simulating aircraft inlet distortion in turbine engine ground tests[R]. ASME Paper GT2007-27222, 2007.
- [8] YOGI S, BRUCE B, ROBERT H, et al. A centrifugal compressor operability correlation with combined total pressure and swirl distortion[R]. ASME Paper GT2017-63721, 2017.
- [9] 程邦勤, 王加乐, 冯路宁. 航空发动机进气旋流畸变研究综述[J]. 航空动力学报, 2020, 35(12): 2465-2481.
CHEN Bangqin, WANG Jiale, FENG Luning. Review of aero-engine inlet swirl distortion research[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(12): 2465-2481. (in Chinese)
- [10] 王俊琦, 汪涛, 刘雨, 等. 尾喷流吸入对发动机进气畸变的影响[J]. 航空动力学报, 2021, 36(1): 97-103.
WANG Junqi, WANG Tao, LIU Yu, et al. Influence of exhaust gas ingestion on engine inlet distortion[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(1): 97-103. (in Chinese)
- [11] 滕健. S弯进气道温度畸变特性及其对小流量涡喷发动机的影响[D]. 福建 厦门: 厦门大学, 2018.
TENG Jian. Temperature distortion characteristics in S-duct inlet and its influence on micro jet engine[D]. Xiamen, Fujian: Xiamen University, 2018. (in Chinese)
- [12] 李丹. 进口流场温度畸变对航空发动机性能影响研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
LI Dan. Research of inlet temperature distortion influence on jet engine[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [13] 尤延铖, 滕健, 郑晓刚, 等. 航空发动机进气温度畸变研究综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(3): 283-300.
YOU Yancheng, TENG Jian, ZHENG Xiaogang, et al. Re-

- view of aero-engine temperature distortion research[J]. Nanjing: Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 49(3): 283-300. (in Chinese)
- [14] 罗玛, 李建中, 向立军, 等. 小流量温度畸变发生器工作特性试验研究[J]. 推进技术, 2017, 38(12): 2836-2842.
- LUO Ma, LI Jianzhong, XIANG Lijun, et al. Experimental investigation on operating characteristic of small flow rate temperature distortion generator[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(12): 2836-2842. (in Chinese)
- [15] 王润明, 王惠儒, 侯敏杰, 等. 温度畸变发生器研制[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2002, 15(2): 41-46.
- WANG Runming, WANG Huiru, HOU Minjie, et al. Design and development of temperature distortion generator[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2002, 15(2): 41-46. (in Chinese)
- [16] 刘大响, 叶培梁. 温度畸变发生器的功用及其试验方法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1999, 12(2): 58-62.
- LIU Daxiang, YE Peiliang. Function and test method of a temperature distortion generator[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1999, 12(2): 58-62. (in Chinese)
- [17] 侯敏杰, 刘大响, 王惠儒. 温度畸变发生器的设计与实验[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 361-367.
- HOU Minjie, LIU Daxiang, WANG Huiru. Design and experimental study of the inlet temperature distortion generator[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3): 361-367. (in Chinese)
- [18] 叶培梁, 刘大响. 进口温度畸变对涡扇发动机稳定性影响的试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2001, 14(1): 38-45.
- YE Peiliang, LIU Daxiang. An experiment investigation in effects of inlet temperature distortion on turbofan stability[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2001, 14(1): 38-45. (in Chinese)

(编辑: 王碧珺)