

温升法测量压气机等熵效率的不确定度

马宏伟^{1,2}, 李 赫¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 100191)

摘 要: 基于 Rotor37 单转子压气机性能试验数据, 分别使用蒙特卡洛法与不确定度传播率法对温升法测量压气机等熵效率的不确定度进行评定, 对不同转速、流量工况下等熵效率的测量不确定度进行分析, 对等熵效率测量不确定度分配方法进行研究。结果表明, 两种方法评定的最佳估计值、标准不确定度基本相同, 但蒙特卡洛法评定的 95% 包含概率的最短包含区间比不确定度传播率法更窄, 在输入量为非正态分布时差距更大, 因此在输入量为非正态分布时应慎重使用不确定度传播率法。同一转速下, 随着流量增大, 等熵效率测量不确定度增大; 不同转速下, 随着转速降低, 等熵效率测量不确定度增大, 低转速时温升法测得高精度压气机等熵效率的难度大大增加。等熵效率测量不确定度分配方法研究结果表明, 等作用分配方法对总温测量精度要求比等精度分配方法高, 更难以实现。所研究的压气机在 70% 设计转速最大流量工况下, 给定等熵效率测量相对不确定度为 0.5%。按等精度分配方法分配总压、总温测量不确定度需分别达到 35 Pa 和 0.083 K。通过增加径向测点数、采用铂电阻总温探针和气流总温校准方法可以提高总温测量精度, 进而提高等熵效率的测量精度。

关 键 词: 温升法; 等熵效率; 蒙特卡洛法; 不确定度; 最短包含区间

中图分类号: V235.1

文献标志码: A

Uncertainty of measuring isentropic efficiency of compressor by temperature rise method

MA Hongwei^{1,2}, LI He¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on Rotor37 single rotor compressor performance experiment data, Monte Carlo method and guide to the uncertainty in measurement method were used for uncertainty evaluation of measuring the compressor isentropic efficiency by temperature rise method, the measurement uncertainty of isentropic efficiency under different rotational speed and flow rate conditions were analyzed, and the allocation scheme of isentropic efficiency measurement uncertainty was studied. Results showed that the best estimate value and standard uncertainty evaluated by these two kinds of methods were basically the same, but the shortest inclusion interval of 95% inclusion probability evaluated by Monte Carlo method was narrower than that evaluated by guide to the uncertainty in measurement method, and the gap was bigger in case of non-normal distribution of input, so guide to the uncertainty in measurement method should be carefully used in such case. At the same speed, the measurement uncertainty of isentropic efficiency increased with the increase of flow rate. At different rotational speeds, the measurement uncertainty of isentropic efficiency increased with the decrease of rotational speed. It became a lot more difficult to measure the compressor isentropic efficiency of high accuracy by temperature rise method at

收稿日期: 2022-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(51776011); 国家科技重大专项(2017-V-0016-0068, J2019-V-0002-0093)

作者简介: 马宏伟(1968—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 研究领域为内流试验与测试技术。E-mail: mahw@buaa.edu.cn

引用格式: 马宏伟, 李赫. 温升法测量压气机等熵效率的不确定度[J]. 航空动力学报, 2022, 37(10): 2242-2252. MA Hongwei, LI He. Uncertainty of measuring isentropic efficiency of compressor by temperature rise method[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(10): 2242-2252.

low rotational speed. The results of isentropic efficiency measurement uncertainty allocation showed that higher accuracy of total temperature measurement was required for equal action allocation, making it more difficult for realization. Under the maximum flow condition of 70% designed rotational speed of the compressor studied, given that the relative measurement uncertainty of isentropic efficiency was 0.5%, the measurement uncertainty of total pressure and total temperature should reach 35 Pa and 0.083 K, respectively, according to equal accuracy allocation. Increasing radial measurement points, and using platinum resistance total temperature probe and gas flow total temperature calibration method can improve the measurement accuracy of both total temperature and isentropic efficiency.

Keywords: temperature rise; isentropic efficiency; Monte Carlo method; uncertainty; shortest inclusion interval

压气机作为航空发动机五大部件之一,其性能好坏对整个发动机的经济性和可靠性有着重要的影响,而总压比、效率等参数是衡量压气机性能优劣的重要指标,其精确测量对于压气机设计工作意义重大。压气机性能参数尤其是等熵效率的测量涉及的考虑因素众多,对航空发动机测试技术提出挑战。在压气机性能测试中,一般考虑实际情况,选择温升法或扭矩法计算压气机的等熵效率。测量多级压气机的单级效率,目前只能采用温升法。用温升法测量等熵效率需要测量压气机级进出口的总温升,在级温升较低的工况下,温升测量的精度要求高、难度大^[1-2]。

在 1994 年颁布的《压气机气动性能试验》标准中,压气机性能测试精度评定采用误差分析的手段^[3],但由于真值难以获取,评定结果往往不能反映真实情况。

针对误差分析手段由于试验中测量参数的真值不可知带来的缺陷,国际标准化组织(ISO)于 1995 年颁布不确定度传播指南,并提出不确定度传播率(guide to the uncertainty in measurement, GUM)方法作为标准不确定度的合成方法。国外一些学者通过合理的假设,对 GUM 方法的使用进行简化,提高其工程应用价值^[4-5]。我国随后也引入了测量不确定度的概念以及 GUM 评估方法。朱理、廖文豪等^[6-8]基于 GUM 方法,分别对压气机流量、效率和超燃冲压发动机性能参数进行了测量不确定度评定和分析。

GUM 方法类似于误差传递的方式,需要对不确定输入量分别进行 A 类、B 类评定,得到其标准不确定度,然后通过对数学模型做一阶泰勒展开近似或者更高阶近似来求取灵敏度系数,将输入量的不确定度传递到输出量中,这种方法在数学模型非线性时误差较大。

我国于 2013 年颁布实施的 JJF 1059.2-2012^[9]引入了蒙特卡洛法(Monte Carlo method, MCM)作

为 GUM 法的补充和验证。MCM 基于“分布传播”的概念,对输入量的概率密度分布而非输入量分布的期望和标准偏差进行传播,得到输出量概率密度分布,进而得到输出量的所有统计量。

2020 年颁布的《航空燃气涡轮发动机压气机气动性能试验方法》^[10],作为旧版试验规范的更新和替换文件,将“性能参数误差分析”改为了“性能参数不确定度分析”,但只介绍了 GUM 不确定度评定方法。

一些不同测试领域的国内外学者对比分析了 GUM 和 MCM 两种不确定度评定方法的差异,发现 MCM 评定他们关心的测量参数时适用范围更广,结果更可信^[11-13]。在航空发动机领域,劳贤豪等^[14]使用 MCM 对发动机台架试验空气流量不确定度进行了分析,但采用 MCM 如何评定压气机总压比及温升效率或评定效果如何,鲜见文献报道。

为了研究温升效率测量不确定度评定方法的适用性、准确性和科学性,本文分别使用 MCM 和 GUM 方法,基于 Rotor37 单转子压气机性能试验数据,对压气机等熵效率测量不确定度进行评定,并分析了两种方法评定结果的差异性;其次基于输入量服从均匀分布的假设,对不同转速、流量工况下等熵效率的测量不确定度进行评定和分析;最后,研究了等熵效率测量不确定度的分配方案,即给定等熵效率测量不确定度的目标值,计算各相关测量参数的不确定度值,为测量相关参数的传感器选型、改进温升法测试方案、提高等熵效率测量精度提供理论和方法。

1 温升法等熵效率数学模型

压气机等熵效率^[10]定义为压气机在等熵压缩气流的情况下对气体做功与实际情况下对气体做功之比,表达式为

$$\eta_c^* = \frac{c_p T_1^* \left[\left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{W} \quad (1)$$

式中 η_c^* 为压气机等熵效率, c_p 为空气的比定压热容, γ 为比热比, p_1^* 、 p_2^* 分别为压气机进口截面总压, T_1^* 为压气机进出口截面总温, W 为实际情况下压气机对气体做的功, 称为实际功。在压气机性能测试中, 一般考虑实际情况, 选择温升法或扭矩法获取实际功。测量多级压气机的单级效率, 目前只能采用温升法。本文只对温升法测量等熵效率进行讨论, 用温升法计算实际功的公式为

$$W = c_p (T_2^* - T_1^*) \quad (2)$$

式中 T_2^* 为压气机出口总温。

综合式(1)、式(2)可得温升法计算等熵效率的计算公式

$$\eta_c^* = \frac{T_1^* \left[\left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{(T_2^* - T_1^*)} \quad (3)$$

对于单转子压气机效率测试, 即使进口来流均匀, 也需要在进出口径向布置多个测点, 以保证测试结果更加精确; 在进行级效率测试时, 还要考虑出口总温、总压沿周向的不均匀性。假设进出口总压径向等环面测点数量为 m_1 、 m_2 , 进出口总温径向等环面测点数量为 n_1 、 n_2 , 由于本文获取的 Rotor37 单转子压气机试验数据均为无量纲的总压比、总温比, 而且它们本身就是压气机重要的性能参数, 这里将温升法测量的等熵效率数学模型改写为总压比和总温比的函数

$$\eta_c^* = \frac{(\pi_c^*)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\delta_c^* - 1} \quad (4)$$

其中 π_c^* 为压气机总压比, δ_c^* 为压气机总温比, 用 i

表示等环面测点序号, 其计算公式为

$$\pi_c^* = \frac{\frac{1}{m_2} \sum_{i=1}^{m_2} p_{2i}^*}{\frac{1}{m_1} \sum_{i=1}^{m_1} p_{2i}^*} \quad (5)$$

$$\delta_c^* = \frac{\frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} p_{2i}^*}{\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} p_{2i}^*} \quad (6)$$

2 不确定度评定方法

测量不确定度评定方法目前主要有 GUM 和 MCM 两种方法, 两者的主要区别在于标准不确定度的合成过程。实际上, GUM 方法的不确定度传递公式与误差传递公式类似, 只是在评定直接测量参数的测量精度时, 使用标准不确定度代替误差, 使得评定结果更准确。不确定度传递理论的主要问题在于传递过程中用泰勒公式的线性项对原始模型进行近似, 导致可能在模型非线性时评定结果失真。MCM 不确定度评定方法通过数值仿真, 能够消除上述缺陷, 但也存在采样点不足带来的结果失真问题。下面对本文采用不同方法评定压气机等熵效率测量不确定度的流程作简要介绍。

2.1 GUM 方法

使用 GUM 方法进行不确定度评定, 要求数学模型是显式的, 即被测量 y 可以表示成如下形式:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (7)$$

其中 x_1 、 x_2 、 $\dots$ 、 x_n 分别为影响被测量 y 结果的输入变量, 它们的不确定度也通过类似于 y 的方式进行评定。借助泰勒展开式, 略去高阶项, 得到被测量 y 的合成标准不确定度可表示如下:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j)} \quad (8)$$

其中 $\partial f / \partial x_i$ 为被测量 y 的数学模型对输入量的偏导数, 称为灵敏度系数; $r(x_i, x_j)$ 为输入量的相关系数, 当输入量之间相互独立时, 相关系数为 0。式(8)在模型线性时是准确的, 但在模型非线性时, 需要保留泰勒展开式的高阶项, 但由于计算较为复杂, 一般仍通过式(8)来近似。

式(8)中的 $u(x_i)$ 和 $u(y_i)$ 为直接测量参数的标准不确定度, 包括 A 类和 B 类不确定度。A 类标准不确定度是指对被测量进行独立重复的观测,

通过所得到的 n 个测得值, 用统计分析方法获得试验标准偏差 $s(x)$, 当用算术平均值作为被测量估计值时, 用 $s(x) / \sqrt{n}$ 表示被测量估计值的 A 类标准不确定度。B 类评定的方法是根据有关的信息或经验, 判断被测量的可能值区间 $[\bar{x} - a, \bar{x} + a]$, 假设被测量值的概率分布, 根据概率分布和要求的概率 P 确定 k , 则用 a/k 表示 B 类标准不确定度, 其中 a 为被测量可能值区间的半宽度, k 称为包含因子, 假设为正态分布时, 根据要求的概率分

布查表 1 得到 k , 假设为非正态分布时, 根据概率分布查表 2 得到 k 。

表 1 输入量为正态分布时的包含因子

Table 1 Inclusion factor of normally distributed inputs

P	0.68	0.90	0.95	0.954 5	0.99	0.997 3
k	1	1.645	1.960	2	2.576	3

表 2 输入量为其他分布时的包含因子

Table 2 Inclusion factor of other distributed inputs

分布类别	P	k
三角	1	$\sqrt{6}$
均匀	1	$\sqrt{3}$
反正弦	1	$\sqrt{2}$
两点	1	1

因此, A 类不确定度评定需要获取重复性测量数据, 由于本文获取的数据有限, 均采用 B 类不确定度进行评定。本文压气机等熵效率以及总压比、总温比的数学模型如式(4)~式(6)所示, 据此推导的等熵效率及总压比、总温比的不确定度传递公式为

$$u(\eta_c^*) = \sqrt{[c(\pi_c^*)u(\pi_c^*)]^2 + [c(\delta_c^*)u(\delta_c^*)]^2} \quad (9)$$

$$u(\pi_c^*) = \frac{1}{p_1^*} \sqrt{\frac{1}{m_1} [-\bar{\pi}_c^* u(p_1^*)]^2 + \frac{1}{m_2} [u(p_2^*)]^2} \quad (10)$$

$$u(\delta_c^*) = \frac{1}{T_1^*} \sqrt{\frac{1}{n_1} [-\bar{\delta}_c^* u(T_1^*)]^2 + \frac{1}{n_2} [u(T_2^*)]^2} \quad (11)$$

其中

$$c(\pi_c^*) = \frac{1}{\delta_c^* - 1} \cdot \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \pi_c^{*-1} \quad (12)$$

$$c(\delta_c^*) = \left(1 - \pi_c^{*\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right) \cdot \frac{1}{(\delta_c^* - 1)^2} \quad (13)$$

式中量符号上的“—”表示平均值, 下文同。

2.2 MCM

文献 [11] 中提出, 在 GUM 方法不适用的情况下可用 MCM 传播概率分布评定和表示测量不确定度。由于等熵效率为非线性模型, 为保证评定精度, 使用 MCM 对 GUM 方法进行验证。

MCM 评定测量不确定度是利用对输入量的概率分布随机抽样而进行分布传播的一种近似数值方法, 理论基础包括概率论中的大数定理和中心极限定理。采用 MCM 评定压气机等熵效率测量不确定度的流程如图 1 所示。从 N 个输入量的 PDF (probability density function, 记为 $g_s(\mu)$) 中分别随机抽样 M 次, 通过数学模型获得相应的 M 个输出量 Y 的值。根据中心极限定理, 如 Y 的标

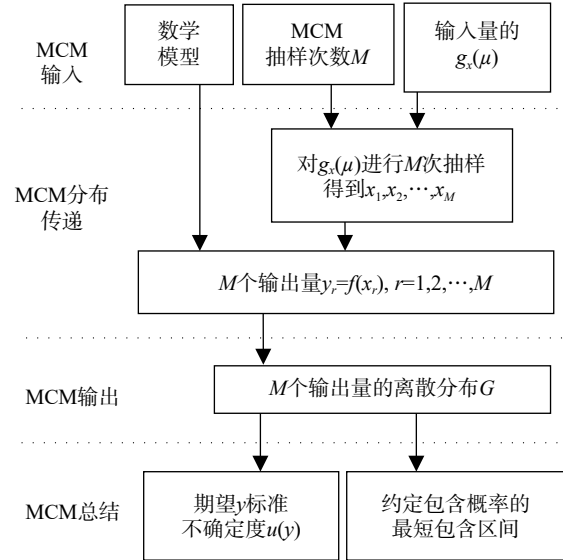


图 1 MCM 评定等熵效率测量不确定度的流程

Fig. 1 Evaluation process of measurement uncertainties for isentropic efficiency based on MCM

准偏差存在, 则 Y 的平均值以阶 $O(M^{-1/2})$ 的速度收敛为期望。

M 的取值为不小于 $1/(1-q)$ 的 10^4 倍, q 为包含概率, 一般选为 95%。将得到的 M 个输出量按递增顺序排列, 得到输出量的频率分布函数, 当 M 满足要求时, 其等同于输出量的概率分布函数, 即得到输出量的概率分布直方图。此外, 还可以进一步计算输出量的最佳估计值、标准不确定度、3 阶矩偏态系数 S 、4 阶矩峰态系数 K 等统计量, 如式(14)~式(17)所示, 其中 l 为抽样次数, $\bar{y}$ 为输出量的数学期望, 正态分布的偏态系数 $S=0$, 峰态系数 $K=3$ 。

$$\bar{y} = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M y_l \quad (14)$$

$$u^2(\bar{y}) = \frac{1}{M-1} \sum_{l=1}^M (y_l - \bar{y})^2 \quad (15)$$

$$S = \frac{\frac{1}{M} \sum_{l=1}^M (y_l - \bar{y})^3}{\left[\frac{1}{M} \sum_{l=1}^M (y_l - \bar{y})^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (16)$$

$$K = \frac{\frac{1}{M} \sum_{l=1}^M (y_l - \bar{y})^4}{\left[\frac{1}{M} \sum_{l=1}^M (y_l - \bar{y})^2 \right]^2} \quad (17)$$

使用 MCM 评定不确定度时, 无需求取传递公式, 也不存在线性化假设, 这是优于 GUM 方法的地方。但由于 MCM 通过频率分布近似替代概

率分布, 抽样次数过小, 也可能会引起误差, 造成评定失效。而抽样次数越大, 样本能越好地表征总体, 但是对计算资源的要求较高。本文采用自适应 MCM 不确定度评定方法, 试验次数不断增加, 直至所需要的测量结果输出量的各种特征量达到稳定, 例如当某个参数输出量的两倍标准差小于输出量的数值容差时认为计算结果在统计意义上已经稳定, 以此对评定流程进行优化, 可以有效降低抽样数带来的误差。

3 评定对象

基于文献 [15-16] 提供的 Rotor37 单转子压气机性能试验数据, 试验在 70%、90%、100% 设计转速的不同流量工况下进行, 测量数据包含了从最大流量点到近失速状态之间的五个以上的流量工况, 得到的特性线如图 2 所示。根据测量探针、

传感器和测试系统精度的评估, 进出口总温、总压的测量最大误差限如表 3 所示。由于文献 [15-16] 没有给出进口来流测量参数的具体值, 本文假设进口来流总温为 288 K、总压为 101 325 Pa, 根据文献 [14-15] 提供的总压比和总温比试验数据, 以此换算得到出口总温、总压具体值。本文基于压气机进口、出口的这些数据进行测量不确定度评定。

表 3 参数测量最大误差限

Table 3 Maximum error limit of parameter measurement results

流场参数	最大误差限
总温/K	±0.6
进口总压/Pa	±100
出口总压/Pa	±1 700

4 不同输入量分布的评定结果

以 100% 设计转速下等熵效率峰值点为例, 使用 MCM 和 GUM 方法对不同输入量分布下的等熵效率进行不确定度评定。根据前面的讨论, 要对压气机总压比、总温比和等熵效率进行不确定度评定, 需要先评定总压、总温测量标准不确定度作为输入量。总压、总温等参数按照不同分布估计的标准不确定度如表 4 所示。

表 4 输入量不同分布下估计的标准不确定度

Table 4 Estimated standard uncertainty under different distribution of inputs

输入分布	进口总压/Pa	出口总压/Pa	总温/K
均匀分布	58	981	0.35
正态分布	50	850	0.30
三角分布	41	694	0.25

表 5、表 6 分别给出了不同输入量分布下, 使用 MCM 和 GUM 方法评定的等熵效率最佳估计值、标准不确定度和 95% 包含概率的最短包含区间。可以看到不同输入量分布下, MCM 和 GUM 方法评估的等熵效率最佳估计值和标准不确定度基本一致, 但 95% 包含概率的最短包含区间存在明显差异。可以看到输入量不同分布下 MCM 评估的最短包含区间均比 GUM 方法评估的要窄, 也就是说 GUM 方法评定的 95% 包含概率区间更加保守, MCM 评定的 95% 包含概率区间更加准确。输入量为正态分布时采用 GUM 方法比 MCM 评定的包含区间范围宽 1.8%, 在三种分布中最小, 均匀分布采用 GUM 方法比 MCM 评定的包含区间范围宽 3.9%, 在三种分布中最大。为保险起见, 一般假设输入量为均匀分布, 即认为测量结果在

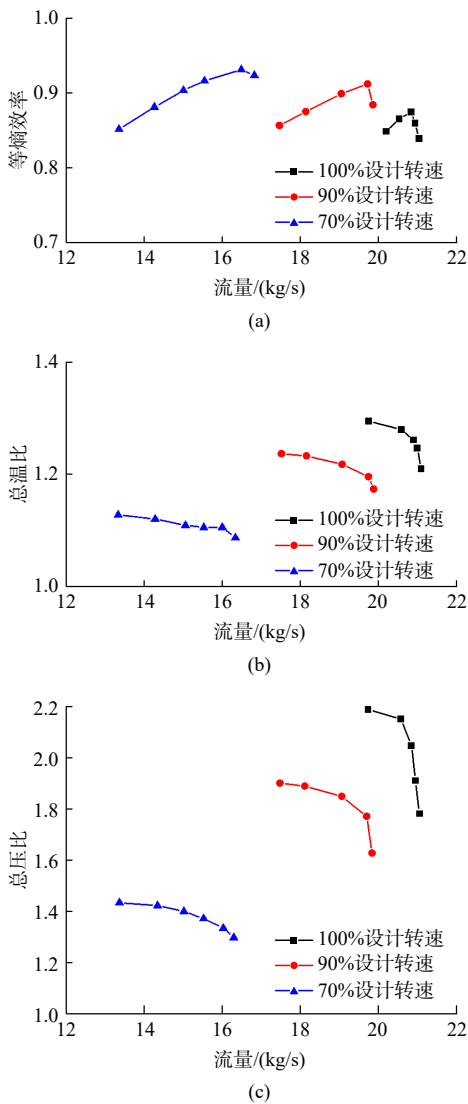


图 2 Rotor37 单转子压气机特性曲线

Fig. 2 Rotor37 single rotor compressor characteristic curves

表 5 等熵效率最佳估计值及标准不确定度
Table 5 Best estimate value and standard uncertainty of isentropic efficiency

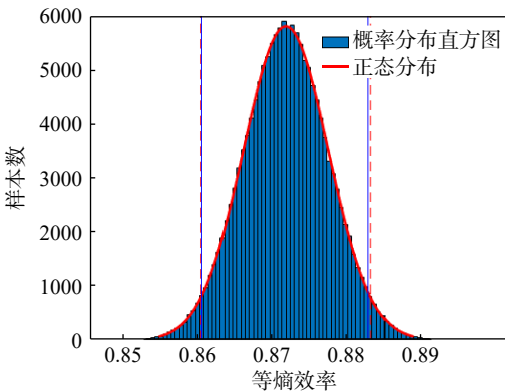
输入分布	MCM-最佳估计值/%	MCM-标准不确定度/%	GUM-最佳估计值/%	GUM-标准不确定度/%
均匀分布		0.91	87.03	0.91
正态分布	87.02	0.79	87.03	0.79
三角分布		0.64	87.02	0.64

表 6 等熵效率 95% 包含概率的最短包含区间
Table 6 Shortest inclusion interval of 95% inclusion probability of isentropic efficiency

输入量分布	95% 概率最短包含区间/%	
	MCM	GUM
均匀分布	(85.29, 88.79)	(85.20, 88.84)
正态分布	(85.46, 88.56)	(85.45, 88.60)
三角分布	(85.77, 88.26)	(85.74, 88.31)

可能值区间内出现的机会是均等的。

图 3 为输入量不同分布下的 MCM 输出的等熵效率概率分布直方图。概率分布直方图被划分为了 100 个子区间, 子区间的数量决定了其间距, 进一步决定了直方图的分辨率, 当抽样次数足够多时, 输出量 Y 的频率密度分布可以看作是概率密度分布的近似。图中用红色实线标明了与 MCM



(c) 输入量为三角分布

图 3 输入量不同分布下的等熵效率概率分布直方图
Fig. 3 Probability distribution histogram of isentropic efficiency with different input distributions

得到的输出量分布具有相同均值和标准偏差的正态分布曲线, 蓝色竖实线为基于自适应的 MCM 进行不确定度评定得到的 95% 包含概率的最短包含区间的边界线, 红色竖虚线为正态分布曲线 95% 包含概率的最短包含区间的边界线, 可以将其视为 GUM 方法评定的 95% 包含概率的最短包含区间。

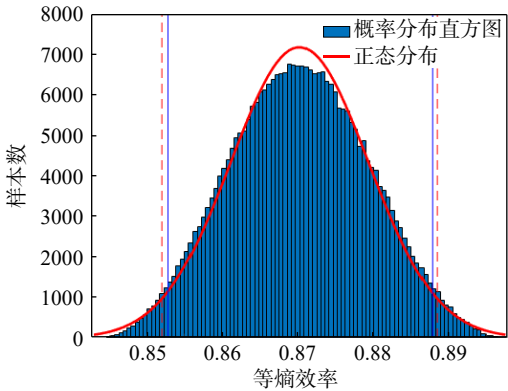
从图 3 中可以看出, 输入量为正态分布时, 输出量非常接近正态分布, MCM 与 GUM 方法得到的最短包含区间基本上重合; 输入量为其他分布时, 输出量分布在峰值区域与正态分布相比存在一定的亏损, MCM 与 GUM 方法得到的最短包含区间也存在较大差距。因此, 进行等熵效率不确定度评定, 输入量为非正态分布时, 需要慎重使用 GUM 方法。

表 7 为不同输入量分布下, 自适应的 MCM 输出的等熵效率概率分布的偏态系数和峰态系数, 可见不同输入分布下偏态系数均大于零, 为右偏态, 输出量分布不是关于最佳估计值对称的, 因此尽管表 5 中 GUM 与 MCM 方法评定的最佳估计值、标准不确定度相同, 表 6 中 95% 包含概率的最短包含区间却是不同的。此外, 输入量为正态分布时等熵效率的峰态系数非常接近 3, 其他

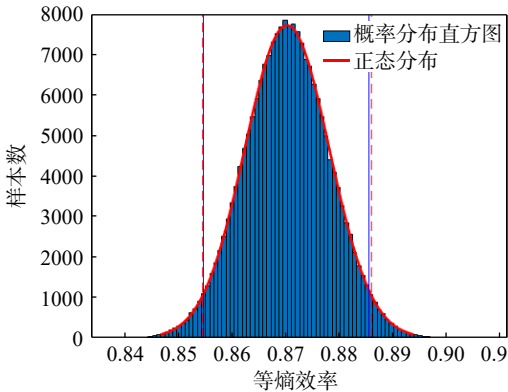
表 7 等熵效率概率分布的峰态与偏态系数

Table 7 Kurtosis and skewness coefficients of probability distribution of isentropic efficiency

输入量分布	峰态系数	偏态系数
均匀分布	2.552 9	0.028 8
正态分布	2.996 8	0.012 4
三角分布	2.775 3	0.022 0



(a) 输入量为均匀分布



(b) 输入量为正态分布

分布均小于 3, 表明在概率分布直方图上顶部与正态分布相比存在一定亏损。

5 不同工况的评定结果

本节基于第 3 节给出的 Rotor37 单转子压气机性能数据, 假设输入量为均匀分布, 对不同转速、流量下总压比、总温比及等熵效率测量标准不确定度进行评定, 结果如图 4~图 6 所示。

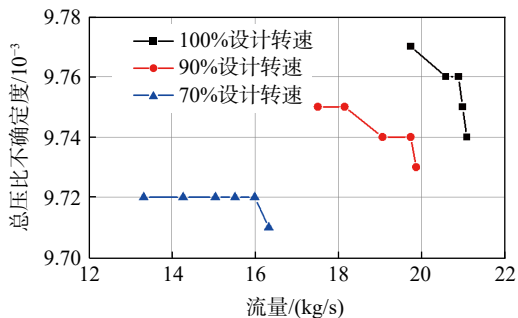


图 4 不同转速下评定的总压比测量不确定度

Fig. 4 Evaluated measurement uncertainty of total pressure ratio at different rotational speeds

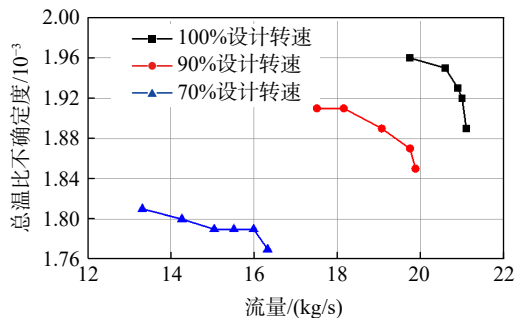


图 5 不同转速下评定的总温比测量不确定度

Fig. 5 Evaluated measurement uncertainty of total temperature ratio at different rotational speeds

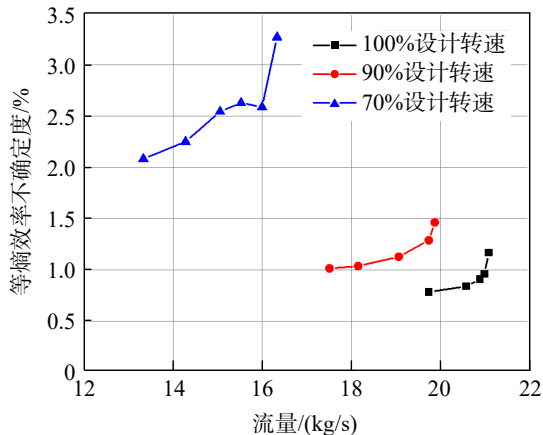


图 6 不同转速下评定的等熵效率测量不确定度

Fig. 6 Evaluated measurement uncertainty of isentropic efficiency at different rotational speeds

图 4 表明不同转速下评定的压气机总压比测量不确定度与压气机总压比特性线有着相似的变化趋势。100% 设计转速下, 不同流量工况总压比的平均值为 2.01, 总压比测量标准不确定度的平均值为 9.75×10^{-3} ; 70% 设计转速下, 不同流量工况下总压比的平均值为 1.38, 总压比测量标准不确定度的平均值为 9.72×10^{-3} 。随转速从 100% 降低到 70%, 总压比降低 31.34%, 但总压比的测量不确定度仅减小 0.37%。根据总压比的测量不确定度传递公式 (式 (10)), 在进口总压不变的情况下, 转速降低导致总压比显著降低, 但最终要除以进口总压, 导致总压比测量不确定度变化很小。

在同一转速下, 随着流量减小, 压气机从最大流量点向喘点逼近, 总压比不断升高, 其测量不确定度也随之升高, 其中 100% 设计转速下总压比测量不确定度升高 0.27%, 70% 设计转速下总压比测量标准不确定度仅升高 0.06%, 说明高转速下流量降低导致的总压比测量不确定度升高更加明显。

图 5 表明不同转速下评定的压气机总温比测量不确定度与总温比特性线也有着相似的变化趋势。100% 设计转速下, 不同流量工况总温比的平均值为 1.26, 总温比测量标准不确定度的平均值为 1.93×10^{-3} ; 70% 设计转速下, 不同流量工况总温比的平均值为 1.11, 总温比测量标准不确定度的平均值为 1.79×10^{-3} 。随着转速从 100% 降低到 70%, 总温比降低 11.9%, 总温比的测量不确定度减小 7.12%。根据总温比的测量不确定度传递公式 (式 (11)), 在进口总温不变的情况下, 转速降低导致总温比降低, 进而导致总温比测量不确定度降低。

在同一转速下, 随着流量减小, 压气机从最大流量点向喘点逼近, 总温比不断升高, 其测量不确定度也随之升高, 其中 100% 设计转速下压气机总温比测量标准不确定度升高 4.22%, 70% 设计转速下压气机总温比测量标准不确定度升高 2.07%。说明高转速下流量降低导致的总温比测量不确定度升高更加明显。

图 6 表明不同工况下评定的压气机等熵效率测量不确定度与总压比、总温比测量不确定度变化趋势完全相反。100% 设计转速下, 不同流量工况等熵效率测量标准不确定度的平均值为 0.9%; 70% 设计转速下, 不同流量工况等熵效率测量不确定度的平均值为 2.6%。随着转速从 100% 降低到 70%, 等熵效率测量不确定度增大近 2 倍, 根据

等熵效率的测量不确定度传递公式(式(9)), 总压比、总温比测量不确定度仅降低 0.37% 和 7.12%, 而总压比、总温比的灵敏度系数分别增大 2.11 倍和 1.48 倍, 在两者的综合作用下, 等熵效率的测量不确定度大大增加。

在同一转速下, 随着流量减小, 压气机从最大流量点向喘点逼近, 等熵效率测量不确定度不断升高, 其中 100% 设计转速下等熵效率测量不确定度升高 49%, 70% 设计转速下等熵效率测量不确定度升高 57%。说明低转速下流量降低导致的等熵效率测量不确定度升高更加明显。

综上所述, 不同工况下压气机总压比、总温比测量不确定度变化趋势相同, 转速越高、流量越小, 测量不确定度越大, 只是总温比测量不确定度的变化更加明显; 不同工况下压气机等熵效率测量不确定度变化趋势与总压比、总温比变化趋势完全相反, 转速越低、流量越大, 等熵效率测量不确定度越大。由此可见, 测量不确定度是随着试验工况动态变化的, 不能只针对某一转速、流量工况进行测量不确定度评定, 尤其是等熵效率, 如果只对设计工况效率进行评定, 会大大低估其他工况实际的测量不确定度。

6 温升效率测量不确定度分配方法

为了提升温升效率的测量精度, 也就是降低温升效率的测量不确定度, 需要分析影响温升效率测量不确定度的因素, 找出最大的影响因素, 从而针对性地采用有效措施, 最终提高温升效率的测量精度。这就需要研究温升效率测量不确定度的分配方法。

基于前面的分析, GUM 方法与 MCM 评定的最短包含区间不同, 但标准不确定度基本一致, 而 MCM 难以从输出量的不确定度反推到输入量的不确定度, 因此本节采用 GUM 方法的不确定度传递公式, 根据给定的等熵效率不确定度反算输入量不确定度。首先需要将不确定度无量纲化, 将式(9)改写为相对量形式:

$$\frac{u(\eta_c^*)}{\eta_c^*} = \sqrt{\left[c(\pi_c^*) \cdot \frac{u(\pi_c^*)}{\pi_c^*} \right]^2 + \left[c(\delta_c^*) \cdot \frac{u(\delta_c^*)}{\delta_c^*} \right]^2} \quad (18)$$

其中

$$c(\pi_c^*) = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{1}{1 - \pi_c^{*\frac{1-\gamma}{\gamma}}} \quad (19)$$

$$c(\delta_c^*) = \frac{\overline{\delta_c^*}}{1 - \delta_c^*} \quad (20)$$

由输出量测量不确定度, 反算输入量测量不确定度, 涉及到输出量不确定度的分配方法, 本文对比分析等精度分配方法和等作用分配方法。

1) 等精度分配方法

要求输入量各分项相对不确定度值相等, 即

$$u(\pi_c^*) = u(\delta_c^*) \quad (21)$$

则各分项相对不确定度为

$$\frac{u(\pi_c^*)}{\pi_c^*} = \frac{u(\delta_c^*)}{\delta_c^*} = \frac{u(\eta_c^*)}{\eta_c^*} \cdot \frac{1}{\sqrt{[c(\pi_c^*)]^2 + [c(\delta_c^*)]^2}} \quad (22)$$

2) 等作用分配方法

要求分配给各分项的相对不确定度对总的测量相对不确定度的(影响)作用相等, 即

$$\left| c(\pi_c^*) \cdot \frac{u(\pi_c^*)}{\pi_c^*} \right| = \left| c(\delta_c^*) \cdot \frac{u(\delta_c^*)}{\delta_c^*} \right| \quad (23)$$

则各分项测量相对不确定度为

$$\frac{u(\pi_c^*)}{\pi_c^*} = \frac{u(\eta_c^*)}{\eta_c^*} \left/ \left(\sqrt{2} |c(\pi_c^*)| \right) \right. \quad (24)$$

$$\frac{u(\delta_c^*)}{\delta_c^*} = \frac{u(\eta_c^*)}{\eta_c^*} \left/ \left(\sqrt{2} |c(\delta_c^*)| \right) \right. \quad (25)$$

类似地, 可以对总压比、总温比测量相对不确定度按照式(26)、式(27)继续向下分配给总压、总温等参数的测量, 具体计算过程不再赘述。

以本文讨论的工况范围内等熵效率测量难度最大的 70% 设计转速下的最大流量点工况为例, 总压比为 1.30, 总温比为 1.09, 出口平均总压为 131 688 Pa、总温为 312.74 K, 由两种分配方法计算等熵效率测量相对不确定度目标值分别为 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 时, 得到相应的总压比、总温比、总压、总温的测量相对不确定度, 即分配结果, 参见表 8 和表 9。

表 8 等熵效率测量不确定度的等精度分配

Table 8 Equal accuracy allocation of measurement uncertainty of isentropic efficiency

等熵效率相对 不确定度/ %	总压相对 不确定度/ %	总压 不确定度/ Pa	总温相对 不确定度/ %	总温 不确定度/ K
0.5	0.027	35	0.027	0.083
1.0	0.053	70	0.053	0.167
1.5	0.080	105	0.080	0.250
2.0	0.107	141	0.107	0.334

表 9 等熵效率测量不确定度的等作用分配

Table 9 Equal action allocation of measurement uncertainty of isentropic efficiency

等熵效率相对 不确定度/%	总压相对不 确定度/%	总压不确 定度/Pa	总温相对不 确定度/%	总温不确 定度/K
0.5	0.063	83	0.020	0.062
1.0	0.126	166	0.040	0.124
1.5	0.189	249	0.059	0.186
2.0	0.253	333	0.079	0.247

$$\frac{u(\pi_c^*)}{\pi_c^*} = \sqrt{\left[\frac{u(p_1^*)}{p_1^*}\right]^2 + \left[\frac{u(p_2^*)}{p_2^*}\right]^2} \quad (26)$$

$$\frac{u(\delta_c^*)}{\delta_c^*} = \sqrt{\left[\frac{u(T_1^*)}{T_1^*}\right]^2 + \left[\frac{u(T_2^*)}{T_2^*}\right]^2} \quad (27)$$

由表 8、表 9 计算结果, 要保证温升效率测量相对不确定度达到 0.5%, 按等精度分配, 需要控制总压和总温测量相对不确定度在 0.027% 之内, 按等作用分配, 需要控制总压和总温测量相对不确定度分别在 0.063% 和 0.02% 之内。相比之下, 等作用分配略微提高对总温测量不确定度的要求, 但大大放宽了对总压测量不确定度的要求, 综合来看更科学, 但在等熵效率测试中, 总压测量精度比总温测量精度高得多, 等作用分配对总温测量的精度要求虽然比总压测量的精度要求低, 实际上却更难实现。因此, 对于压气机等熵效率的高精度测量, 等精度分配更为合理、更易实现, 但仍需大幅度提高总压、总温的测量精度, 尤其是总温测量, 当前常用的热电偶总温探针仍很难达到中低转速下等熵效率测量不确定度 0.5% 所需的总温测量精度。

需要注意的是, 上述表格中总压、总温测量不确定度是指截面参数的测量不确定度, 由式(9)~式(11)可知, 通过增加测点数量理论上可以放宽对测点参数不确定度的要求。

图 7 给出了 70% 设计转速不同流量工况下, 径向等环面测点数量对要求的压气机进出口总温/总压测量相对不确定度(Δ)的影响。随着测点增多, 测量不确定度提高的幅度减小, 等环面测点数量从 5 点增加到 9 点和从 9 点增加到 13 点, 不同流量下要求的总温/总压测量不确定度分别提高 34% 和 20%。在同一转速下随着流量增大, 增加测点数量使得要求的总温/总压测量不确定度的相对增大率相同, 由于测量不确定度本身是减小的, 因此绝对增大量减小。

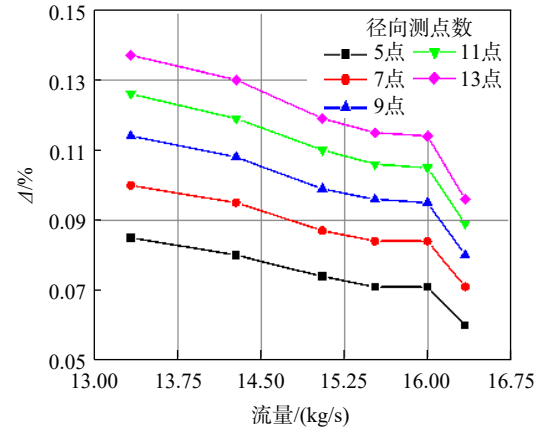


图 7 测点数对要求的单点测量不确定度的影响

Fig. 7 Influence of the number of measuring points on the required single point measurement uncertainty

假设每个测点测量不确定度相同, 按等精度分配计算目标等熵效率相对不确定度为 0.5% 时, 截面不同径向等环面测点数下, 要求的总压、总温测量不确定度, 如表 10 所示。可以看到当前 70% 设计转速最大流量工况下, 要使等熵效率测量相对不确定度达到 0.5%, 需要总温测量标准不确定度达到 0.2 K。考虑到测点数量增加对流场的干扰, 会在一定程度上降低测量精度, 需要限制测点数量, 因此亟需提高单测点参数测量精度。

表 10 不同径向测点数量下等熵效率测量不确定度的分配

Table 10 Allocation of measurement uncertainty of isentropic efficiency at different radial measuring points

径向测 点数	总压相对 不确定度/%	总压 不确定度/Pa	总温相对 不确定度/%	总温 不确定度/K
5	0.060	79	0.060	0.187
7	0.071	93	0.071	0.221
9	0.080	105	0.080	0.250
11	0.089	117	0.089	0.277

对于总压测量, 来流是非定常的, 气流方向会有较大变化, 有可能在总压受感部附近无法完全滞止, 会导致一定的速度误差; 此外, 压力传感器和测试系统不确定度也是总压测量不确定度的主要来源。

实际上在现有条件下, 总温测量精度相比于总压测量精度更难实现。气流在总温受感部附近也不可能完全滞止, 同样会引起速度误差; 受感部和周围环境以及工质之间的辐射换热会引起辐射误差; 受感部向支杆导热会引起导热误差。现有研究已形成了总温探针的速度误差校准方法^[17],

对于本文所研究的低温升压气机, 进出口温度不高, 其滞止罩也能够发挥一定的屏蔽辐射的作用, 辐射误差较小。采用的热电偶总温探针偶丝长径比大于 10, 且支杆温度与主流温度相差不大时, 导热误差也较小^[18]。

传感器和测试系统测量不确定度也是总温测量不确定度的主要来源。在以往的压气机性能测试中, 出口总温测量一般采用热电偶探针。仅就传感器精度而言, 测量范围在 273.15~373.15 K 之内, 工业 I 级热电偶测量允差在 0.5 K 以上^[19], 附加上探针速度误差、导热和辐射误差, 导致当前总温探针的测试精度难以满足要求。

在相同的测量范围内, 工业 I 级铂电阻测量精度可以达到 0.35 K, 作者通过研究发现, 由于铂电阻温度-阻值特性曲线稳定、简明、容易修正, 可以通过标准温度装置以及高精度电阻表, 将静态传感器精度修正到 0.1 K 以内。文献 [20] 提出一种提高温度传感器测量气流总温精度的方法, 通过校准试验建立总温感受系数与气流马赫数、气流偏转角、气流俯仰角之间的映射关系, 利用校准数据和相关流场信息, 把温度传感器测得的数据换算出气流总温。使用这种方法能够减少传感器测量总温的速度误差, 有效提高温度传感器测量气流总温的精度。采用铂电阻总温探针进行压气机进出口总温测量是提高温升效率测量精度的技术方案之一。

7 结 论

本文基于 JJF 1 059.201 2, 分别使用 MCM 和 GUM 方法对温升法测量压气机等熵效率的不确定度进行评定, 对不同输入量分布和试验工况下等熵效率的测量不确定度进行分析, 对等熵效率不确定度分配方案进行研究, 得到如下结论:

1) 基于 Rotor37 单转子压气机性能试验数据, 对比分析不同输入量分布下, MCM 和 GUM 方法评定的压气机等熵效率测量不确定度, 结果表明两种方法评定的最佳估计值、标准不确定度基本相同, 但 MCM 评定的 95% 包含概率的最短包含区间比 GUM 方法更窄, 其中正态分布下差距最小, 均匀分布下差距较大, 因此输入量为非正态分布时需要慎重使用 GUM 方法。

2) 在输入量为均匀分布假设下, 对不同转速及流量工况下压气机总压比、总温比和等熵效率测量不确定度进行了评定, 发现不同工况下压气

机总压比、总温比测量不确定度变化趋势相同, 转速越高、流量越小, 测量不确定度越大, 只是总温比测量不确定度的变化更加明显。不同工况下压气机等熵效率测量不确定度变化趋势与总压比、总温比完全相反, 转速越低、流量越大, 等熵效率测量不确定度越大。因此, 在评定等熵效率测量不确定度时, 如果只对设计工况效率进行评定, 会大大低估其他工况实际的测量不确定度。

3) 研究了等熵效率测量不确定度的分配方法, 在给定目标等熵效率测量不确定度下, 利用不确定度传递公式反算要求的总压和总温测量不确定度, 发现等精度分配更合理、更易于实现。截面测点数量增多能在一定程度上提高截面参数测量精度, 但仍需解决单点参数测量尤其是总温高精度测量难题, 本文提出了使用铂电阻总温探针和气流总温校准方法的解决方案。

参考文献:

- [1] 任铭林, 向宏辉. 有关轴流压气机效率问题的探讨[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2009, 22(4): 9-14.
REN Minglin, XIANG Honghui. Exploration of efficiency in axial compressor[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2009, 22(4): 9-14. (in Chinese)
- [2] 向宏辉, 王掩刚, 高杰, 等. 轴流压气机效率测量两类影响因素的试验研究[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2019, 32(3): 1-7.
XIANG Honghui, WANG Yangang, GAO Jie, et al. Experimental investigation of two effect factors on axial flow compressor efficiency measurement[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2019, 32(3): 1-7. (in Chinese)
- [3] 赵全春, 段连丰, 沈培英, 等. 压气机气动性能试验: HB7115-1994[S]. 北京: 中国航空工业总公司, 1995: 12-13.
- [4] TAYLOR B N, KUYATT C E. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results[M]. Gaithersburg, MD, US: US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 1994.
- [5] COLEMAN H W, STEELE W G. Engineering application of experimental uncertainty analysis[J]. *AIAA Journal*, 1995, 33(10): 1888-1896.
- [6] 朱理, 单晓明. 某压气机空气流量测量不确定度的评定[C]//2007航空试验测试技术学术交流会议论文集. 乌鲁木齐:《测控技术》编辑部, 2007: 647-652.
- [7] 朱理, 吴伟力. 某型压气机效率测量不确定度的评定[C]//2011航空试验测试技术学术交流会议论文集. 西安:《测控技术》编辑部, 2010: 414-418.
- [8] 廖文豪, 郭金鑫, 刘小勇, 等. 超燃冲压发动机性能参数测量不确定度分析[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(11): 2421-2428.
LIAO Wenhao, GUO Jinxin, LIU Xiaoyong, et al. Uncertainty analysis in scramjet performance parameters measurements[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(11): 2421-2428. (in Chinese)
- [9] 周桃庚, 叶德培, 沙定国, 等. 用蒙特卡洛法评定测量不确定度: JJF1059.2-2012[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 2013: 1-39.

- [10] 刘晓鹏, 王鑫, 王长溪, 等. 航空燃气涡轮发动机压气机气动性能试验方法: HB 7115-2020 [S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2020: 14.
- [11] HERRADOR M A, GUSTAVO GONZÁLEZ A. Evaluation of measurement uncertainty in analytical assays by means of Monte-Carlo simulation[J]. *Talanta*, 2004, 64(2): 415-422.
- [12] 刘园园, 杨健, 赵希勇, 等. GUM法和MCM法评定测量不确定度对比分析[J]. *计量学报*, 2018, 39(1): 135-139.
LIU Yuanyuan, YANG Jian, ZHAO Xiyong, et al. Comparative analysis of uncertainty measurement evaluation with GUM and MC M[J]. *Journal of Metrology*, 2018, 39(1): 135-139. (in Chinese)
- [13] 曹芸, 陈怀艳, 韩洁. 采用MCM对GUM法测量不确定度评定的验证方法研究[J]. *宇航计测技术*, 2012, 32(2): 75-78.
CAO Yun, CHEN Huaiyan, HAN Jie. Research about validating GUM uncertainty evaluation using MCM[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2012, 32(2): 75-78. (in Chinese)
- [14] 劳贤豪, 朱银方. 发动机台架试验空气流量测量不确定度分析[J]. *航空精密制造技术*, 2022, 58(2): 23-26.
LAO Xianhao, ZHU Yinfang. Uncertainty analysis of gas flow measurement in gas turbine rig test[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2022, 58(2): 23-26. (in Chinese)
- [15] REID L, MOORE R D. Design and overall performance of four highly loaded, high speed inlet stages for an advanced high-pressure-ratio core compressor[R]. NASA TP-1337, 1978.
- [16] REID L, MOORE R D. Experimental study of low aspect ratio compressor blading[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1980, 102(4): 875-882.
- [17] 刘超, 文信, 易维. 某型压气机温度传感器恢复特性研究[J]. *电子测试*, 2018(18): 5-8, 12.
LIU Chao, WEN Xin, YI Wei. Study on the recovery characteristics of temperature sensor of a compressor[J]. *Electronic Test*, 2018(18): 5-8, 12. (in Chinese)
- [18] 蔡静, 杨永军, 廖理, 等. 导热误差对温度测量的影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, 34(11): 1353-1355, 1363.
CAI Jing, YANG Yongjun, LIAO Li, et al. Conductive error influence on temperature measurement[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(11): 1353-1355, 1363. (in Chinese)
- [19] 游伯坤. 温度测量与仪表[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1990.
- [20] 北京航空航天大学. 一种提高温度传感器测量气流总温精度的方法: CN105890804A[P]. 2016-08-24.

(编辑: 陈 越)