

文章编号:1674-8190(2017)03-315-06

# 环境湿度对民用涡扇发动机性能影响研究

赵运生, 顾卫群, 阙建锋, 严红明

(中国航发商用航空发动机有限责任公司 设计研发中心, 上海 200241)

**摘要:** 环境湿度会对民用涡扇发动机的性能产生影响。在发动机部件匹配方法的基础上, 引入湿度对气体性质和部件特性的修正模块, 建立环境湿度对民用涡扇发动机影响的仿真模型; 定量分析不同湿度对发动机推力、转速、进口流量等性能参数的影响, 得到相应的湿度修正曲线; 按照 CCAR-25 部中有关湿度的考核要求, 计算相应湿度对发动机飞行包线内的六个典型工况的影响; 将本文发展的仿真模型所得结果与文献结果进行对比。结果表明: 发动机高温起飞时受湿度影响最大, 其推力下降了 0.56%; 为了弥补推力损失, 风扇相对换算转速需要提高 0.23%; 本文所得某涡喷和某涡扇发动机的修正曲线与文献结果趋势一致、量级相当, 验证了仿真模型的可靠性。

**关键词:** 涡扇发动机; 环境湿度; 发动机性能; 特性修正; 数值仿真

**中图分类号:** V231.3

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.03.011

## Research on the Ambient Humidity Effect on Civil Turbofan Engine Performance

Zhao Yunsheng, Gu Weiqun, Que Jianfeng, Yan Hongming

(Research & Design Center, AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

**Abstract:** In order to analyze the humidity effect on civil turbofan engine performance parameters, the humidity correction module for gas property and component characteristics are led into the engine based on components match method, and the simulation model of ambient humidity effect on civil turbofan engine is established. The humidity effect on engine thrust, spool speed and inlet mass flow are analyzed, and the correction curves are obtained. According to the humidity requirement stipulated in the airworthiness regulation of CCAR-25, the humidity effect on 6 key operating conditions in the flight envelope is simulated. Results show that the engine will be affected most on the hot day takeoff, and the thrust will be decreased by 0.56 percent. In order to recuperate the thrust loss, the fan relative correct speed should be raised by 0.23 percent. The simulation results are compared with the humidity correction curves provided by the reference, and the same trend and similar order of magnitude verify the reliability of the simulation model.

**Key words:** turbofan engine; ambient humidity; engine performance; characteristic correction; numerical simulation

## 0 引言

航空发动机在设计或计算时,通常假设其进口

工质为理想的干空气;但在实际工作中,发动机吸入的多为含有水蒸气的湿空气。从高温潮湿的南方到寒冷干燥的北方,发动机吸入空气的气体性质,例如气体常数  $R$ 、定压比热  $C_p$ 、绝热指数  $k$  等,会随着其运行环境的不同而发生较大变化,这会对发动机性能产生一定影响<sup>[1-2]</sup>。

满足适航规范是对民用涡扇发动机最基本的要求,CCAR-25 第 25.101 条 b 款规定了发动机性

收稿日期:2017-03-10; 修回日期:2017-04-14

基金项目:工信部民机预研项目(MJ-2014-D-20)

上海市科技人才计划项目(15PJ1432800)

通信作者:赵运生,252505203@qq.com

能考核必须基于的相对湿度<sup>[8]</sup>。发动机交付给用户(例如航空公司)时,需要提供相应的湿度对推力的修正系数,以确保满足飞机使用要求。目前,国内外已开展了大量研究以探索湿度对发动机性能的影响。1995年,北约公布了压气机、涡轮等部件的特性湿度修正方法<sup>[4]</sup>;张赞等<sup>[1]</sup>利用某涡轴发动机的试车数据,获得了环境湿度对发动机轴功率和耗油率的影响参数;唐奇等<sup>[5]</sup>、范强等<sup>[2]</sup>利用相似原理分别推导了湿度对发动机推力和换算转速的修正系数;李大为等<sup>[6]</sup>、张引弦<sup>[7]</sup>和何勇等<sup>[8]</sup>基于部件匹配的性能仿真模型,开展了湿度对涡扇和燃气轮机的性能影响仿真。上述研究多针对军用涡轴、涡喷和小涵道比涡扇发动机,分析湿度对其性能的影响;而对于民用发动机,尤其是大涵道比民用涡扇发动机的研究甚少,也没有涉及试航规范的相关研究。我国的民用涡扇发动机尚处于初步研究阶段,一些试验设备尚未完全建立,因此,利用性能仿真的方法开展相关研究十分重要。

本文建立环境湿度对民用涡扇发动机影响仿真模型,定量分析不同的湿度对发动机推力、转速、进口流量等性能参数的影响;并按照CCAR-25的湿度考核要求,计算相应湿度对发动机典型工况的影响。

## 1 仿真模型

### 1.1 环境湿度

环境湿度是表征环境大气中含有多少水蒸气的物理参数。一定的环境温度和环境下,在一定的空气中只能容纳一定限度的水蒸气,工程上通常用相对湿度和含湿度来表示<sup>[9-10]</sup>。

#### (1) 相对湿度

相对湿度 $\varphi$ 是指单位容积的湿空气中实际所含水蒸气量与在该状态下所含饱和水蒸气量的比值。其定义为

$$\varphi = \frac{\rho_h}{\rho_{h,\max}} = \frac{p_h}{p_{h,\max}} \quad (1)$$

式中: $\rho_h$ 、 $p_h$ 分别为湿空气的密度和压力; $\rho_{h,\max}$ 、 $p_{h,\max}$ 分别为饱和湿空气的密度和压力。

#### (2) 含湿度

含湿度 $d$ 是指单位容积的湿空气中包含的水蒸气质量 $m_h$ 和干空气质量 $m_k$ 的比值,通常也叫

做水气比(Water Air Ratio,简称WAR)。

$$d = \frac{m_h}{m_k} \quad (2)$$

#### (3) 含湿度 $d$ 与相对湿度 $\varphi$ 的关系

湿空气可视为是由水蒸气和干空气组成的理想气体。因此,可通过理想气体状态方程并代入常数,得:

$$d = \frac{m_h}{m_k} = \frac{\rho_h}{\rho_k} = \frac{p_h R_h}{p_k R_k} = 0.622 \frac{p_h}{p_{\text{amb}} - p_h} \quad (3)$$

式中: $\rho_k$ 、 $p_k$ 、 $R_k$ 分别为干空气的密度、压力和气体常数; $R_h$ 为湿空气的气体常数; $p_{\text{amb}}$ 为环境压力。

将式(1)代入式(3),可得含湿度 $d$ 与相对湿度 $\varphi$ 的关系式:

$$d = 0.622 \frac{\varphi p_{h,\max}}{p_{\text{amb}} - \varphi p_{h,\max}} \quad (4)$$

## 1.2 湿度对气体热力性质的影响

将湿空气视为由干空气和水蒸气组成的理想气体,利用计算理想气体混合物的比热容和气体常数的方法,计算湿空气的定压比热 $C_{p,h}$ 和气体常数 $R_h$ ,进而计算出绝热指数 $k_h$ 。计算公式为

$$C_{p,h} = \frac{C_{p,k} + dC_{p,s}}{1 + d} \quad (5)$$

$$R_h = \frac{R_k + dR_s}{1 + d} \quad (6)$$

$$k_h = \frac{C_{p,h}}{C_{v,h}} = \frac{C_{p,h}}{C_{p,h} + R_h} \quad (7)$$

式中: $C_{p,s}$ 、 $R_s$ 分别为水蒸气的定压比热和气体常数; $C_{p,k}$ 为干空气的定压比热; $C_{v,h}$ 为湿空气的定容比热。

海平面状态下,湿空气的气体性质参数随含湿度的相对变化如图1所示。

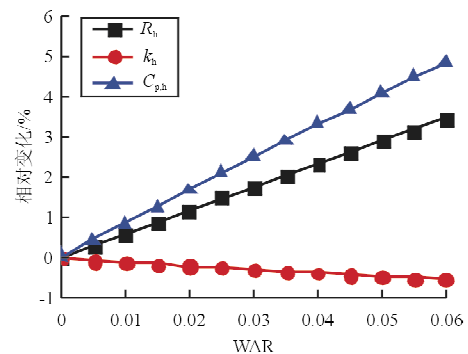


图1 湿度对气体性质的影响

Fig. 1 Effect of humidity on gas property

从图 1 可以看出:湿度会致使定压比热、气体常数增加,绝热指数降低,且基本呈线性变化;对三者的影响量级约等于 9 : 6 : 1。

### 1.3 环境湿度对部件特性的修正方法

当发动机在相似工作状态时,环境湿度会导致热力学性质参数不同,使得发动机参数的绝对值发生变化,但其相似参数仍近似保持不变<sup>[4]</sup>。因此,只要求出干空气条件下发动机换算参数值与湿空气条件下相应换算值的比值,便可得出相应的湿度修正系数  $\xi$ 。

对压气机或涡轮部件,在几何相似条件下,只要进口周向马赫数、轴向马赫数相等,单位功率相等,即可认为其是相似的,并可得到修正公式(式(8)~式(9))<sup>[4]</sup>,下标“N”表示对转速的修正,下标“W”表示对流量的修正。

转速修正:

$$\xi_N = \sqrt{\frac{k_k R_k}{k_h R_h}} \quad (8)$$

流量修正:

$$\xi_W = \sqrt{\frac{k_k R_h}{k_h R_k}} \left(\frac{2}{k_k + 1}\right)^{\frac{k_k + 1}{2(k_k - 1)}} \cdot \left(\frac{k_h + 1}{2}\right)^{\frac{k_h + 1}{2(k_h - 1)}} \quad (9)$$

### 1.4 适航规范对湿度考核的规定

参照 CCAR-25 部的规定,民用涡扇发动机的推力考核必须基于下述相对湿度<sup>[3]</sup>:(1) 在等于和低于标准温度时,相对湿度  $\varphi$  为 80%;(2) 在等于和高于标准温度加 28 °C 时,相对湿度为 34%。在这两种温度之间,相对湿度按线性变化,其表达式如图 2 所示。

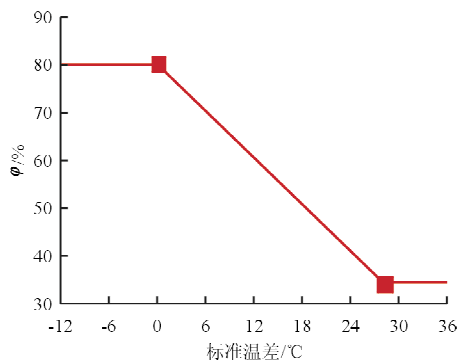


图 2 适航规章中的基准湿度

Fig. 2 Standard humidity in the airworthiness regulation

## 2 仿真方法

民用涡扇发动机中使用最为广泛的是双轴分排构型,其流路如图 3 所示。在计算发动机性能参数时,其数学模型是从进口到出口的单向计算,某些未知参数需要采用先假设再迭代的方法进行求解,通过部件性能匹配来满足发动机正常工作所需的输出要求<sup>[11-12]</sup>。

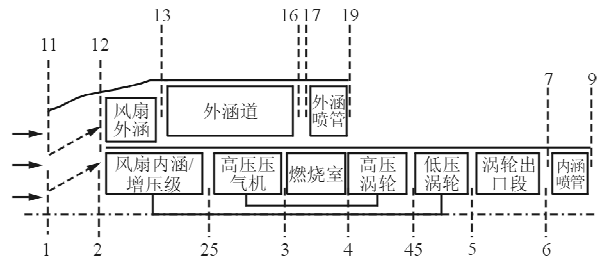


图 3 某民用涡扇发动机流路

Fig. 3 Flow path of a civil turbofan engine

首先根据平衡方程确定迭代的猜测自变量和误差,再通过 Newton-Raphson 方法进行迭代求解。当所有误差都趋于 0 时(收敛精度 eps 取  $10^{-6}$ ),表明选取的猜测值是发动机数学模型的解。针对本文所模拟的民用涡扇发动机,选取的迭代值和误差值个数为 10,其参数如表 1 所示。

表 1 猜测自变量和误差

Table 1 Guess values and error values

序号	猜测自变量	误差
1	进口流量	外涵进口流量误差
2	涵道比	内涵进口流量误差
3	低压轴物理转速	高压压气机进口流量误差
4	高压轴物理转速	高压涡轮进口流量误差
5	风扇外涵 beta 值	高压涡轮功率误差
6	风扇内涵/增压级 beta 值	低压涡轮进口流量误差
7	高压压气机 beta 值	低压涡轮功率误差
8	燃烧室油气比	内涵喷管出口流量误差
9	高压涡轮 beta 值	外涵喷管出口流量误差
10	低压涡轮 beta 值	转速/推力等限定值误差

仿真流程如图 4 所示。除了要求计算程序本身具备考虑含湿度影响的气体性质以外,在根据环境温度和相对湿度计算得到进口空气含湿度后,需要对风扇外涵、风扇内涵/增压级、高压压气机等压气机部件和高压涡轮、低压涡轮等涡轮部件进行特性修正。

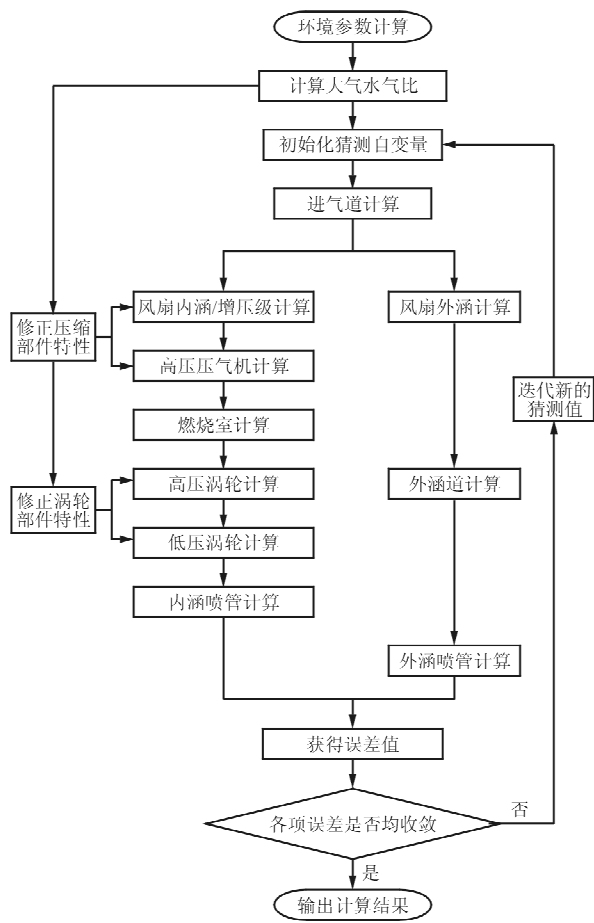


图 4 湿度影响仿真流程

Fig. 4 Flow chart of the humidity effect simulation

### 3 仿真结果与分析

以某发动机地面起飞状态为例(温度包线范围为 $-55\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),环境温度 $T_{\text{amb}}$ 在 $-5\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围变化,相对湿度 $\varphi$ 为 $0\sim 100\%$ 时,对应的含湿度 $d$ 的数值如图 5 所示。

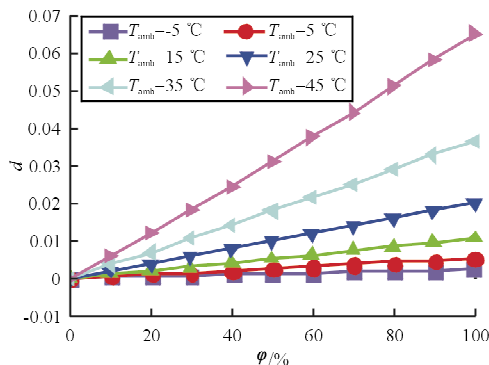


图 5 不同环境温度下  $d$  随  $\varphi$  的变化曲线

Fig. 5 Curve of  $\varphi$ - $d$  at different ambient temperatures

从图 5 可以看出:在同一相对湿度下,环境温度越高,含湿度越大;当环境温度低于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其含湿度 $d$ 约等于 0。

地面起飞状态下,环境温度 $T_{\text{amb}}$ 从 $-5\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时,不同湿度含量的湿空气对发动机推力 $F_n$ 、高压压气机相对换算转速 $N_{2r}$ 和进气流量 $W_{\text{in}}$ 的影响如图 6~图 8 所示。

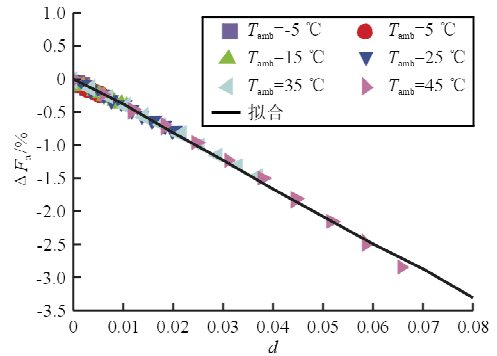


图 6 湿度对推力的影响

Fig. 6 Effect of humidity on thrust

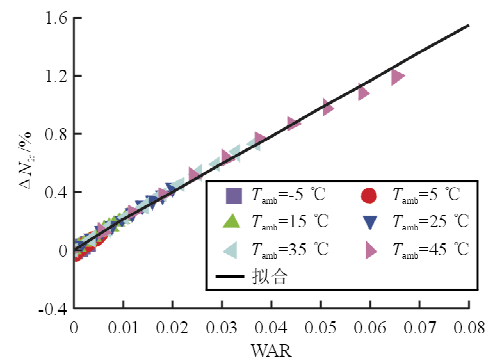


图 7 湿度对高压压气机转速的影响

Fig. 7 Effect of humidity on high pressure compressor spool speed

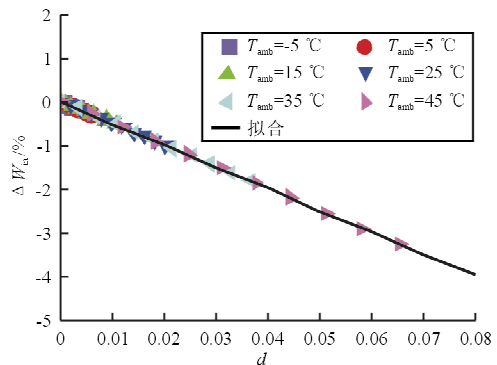


图 8 湿度对进气流量的影响

Fig. 8 Effect of humidity on inlet mass flow

从图 6~图 8 可以看出:在采用含湿度  $d$  作为横坐标参数后,湿度对上述三个性能参数的影响程度可近似拟合成一条直线;在相同风扇相对换算转速  $N_{1r}$  条件下,随着含湿度  $d$  的增大,发动机的推力  $F_n$  有所下降,高压压气机相对换算转速  $N_{2r}$  增大,进气流量  $W_{in}$  减小。

当环境温度  $T_{amb}$  低于  $-5\text{ }^\circ\text{C}$  时,可基本忽略湿度对发动机性能参数的影响。

在相同风扇相对换算转速控制规律下,六个典型状态点按适航规章规定的湿度对发动机推力的影响如表 2 所示,可以看出:高温起飞状态( $30\text{ }^\circ\text{C}$ )受湿度的影响最大,其推力下降了  $0.56\%$ 。

表 2 湿度对典型状态点参数的影响(相同  $N_{1r}$ )  
Table 2 Effect of humidity on different conditions (Constant  $N_{1r}$ )

状态点名称	$\varphi/\%$	$d$	$\Delta F_n/\%$
标准巡航	80.00	$7.80 \times 10^{-5}$	0
最大巡航	63.57	$1.96 \times 10^{-4}$	0.01
最大爬升	63.57	$1.63 \times 10^{-4}$	0.01
最大连续	63.57	$1.68 \times 10^{-3}$	-0.06
标天起飞	80.00	$8.52 \times 10^{-3}$	-0.32
高温起飞	55.36	$1.48 \times 10^{-2}$	-0.56

六个典型状态点  $N_{1r}$  的变化值如表 3 所示,可以看出:为了弥补湿度造成的推力损失,高温起飞状态的  $N_{1r}$  需要上升  $0.23\%$ 。

表 3 湿度对典型状态点参数的影响(相同  $F_n$ )  
Table 3 Effect of humidity on different conditions (Constant  $F_n$ )

状态点名称	$\varphi/\%$	$d$	$\Delta N_{1r}/\%$
标准巡航	80.00	$7.80 \times 10^{-5}$	0
最大巡航	63.57	$1.96 \times 10^{-4}$	0
最大爬升	63.57	$1.63 \times 10^{-4}$	0
最大连续	63.57	$1.68 \times 10^{-3}$	0.03
标天起飞	80.00	$8.52 \times 10^{-3}$	0.13
高温起飞	55.36	$1.48 \times 10^{-2}$	0.23

### 4 仿真模型的验证

李大为等<sup>[6]</sup>给出了某涡喷发动机和某涡扇发动机的湿度修正结果。本文与文献[6]提供的发动机推力  $F_n$ 、高压压气机相对换算转速  $N_{2r}$ 、进气流量  $W_{in}$  修正结果的对比如图 9~图 11 所示,可以看

出:本文的仿真结果与文献[6]的结果趋势一致,修正结果虽有不同,但量级相当,其差异主要是由发动机种类、控制规律以及部件特性不同造成的。

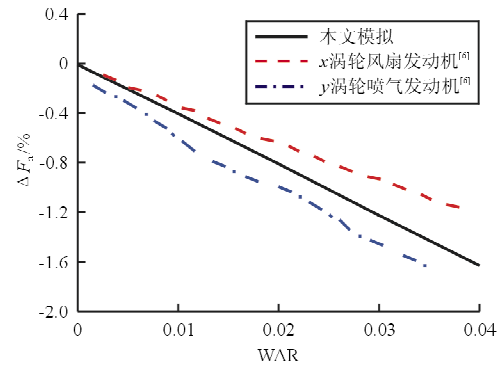


图 9 湿度对推力影响的验证

Fig. 9 Verification of humidity effect on thrust

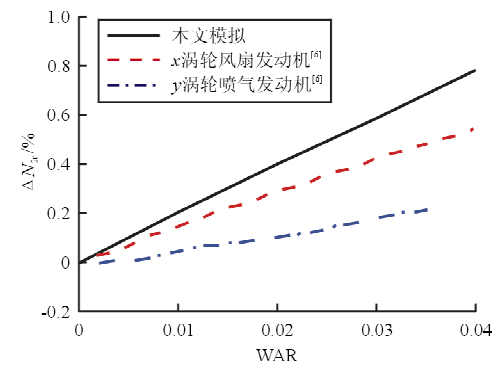


图 10 湿度对高压压气机转速影响的验证

Fig. 10 Verification of humidity effect on high pressure compressor spool speed

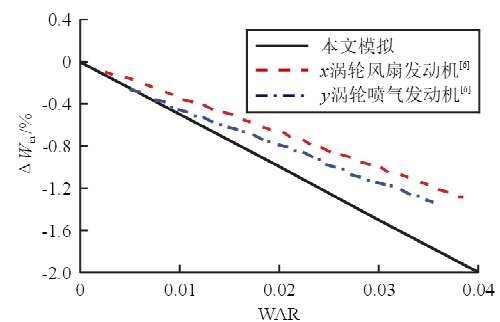


图 11 湿度对进气流量影响的验证

Fig. 11 Verification of humidity effect on inlet mass flow

本文所仿真的某民用涡扇发动机尚处于初步设计阶段,待其进入试验验证阶段后,方可根据相关试验结果进一步完善本文所发展的仿真模型。

### 5 结论

(1) 在同一相对湿度下,环境温度越高,含湿

度越大,对发动机的影响也越大。在采用含湿度作为横坐标参数后,湿度对性能参数的影响程度可近似拟合成一条直线。

(2) 在相同低压转速条件下,随着湿度的增大,发动机的推力有所下降,高压相对换算转速增大,进气流量减小;当环境温度低于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,可基本忽略湿度对发动机性能参数的影响。

(3) 按照适航规定的湿度要求,典型状态点中高温起飞状态受影响最大,为了弥补推力的损失,需要提升其风扇相对换算转速。

(4) 利用本文发展的模型可有效地定量评估湿度对民用涡扇发动机性能参数的影响,并指导制定考虑湿度影响后的推力修正策略。

### 参考文献

- [1] 张贇,林学森,李本威,等. 大气湿度对涡轴发动机地面试车性能的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2016, 29(3): 11-15.  
Zhang Yun, Lin Xuesen, Li Benwei, et al. Effects of atmospheric humidity on turboshaft engine performance in ground test[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2016, 29(3): 11-15. (in Chinese)
- [2] 范强,张金锋. 大气湿度对发动机换算转速的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2002, 15(2): 17-19, 62.  
Fan Qiang, Zhang Jinfeng. Effect of atmospheric humidity on engine corrected speed[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2002, 15(2): 17-19, 62. (in Chinese)
- [3] 中国民用航空局. CCAR-25-R4 运输类飞机适航标准[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.  
Civil Aviation Administration of China. CCAR-25-R4 Transport category airplanes airworthiness standards[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [4] North Atlantic Treaty Organization. Recommended practices for the assessment of the effects of atmospheric water ingestion on the performance and operability of gas turbine engines[R]. AGARD-AR-332, 1995.
- [5] 唐奇,甘在游,吕升林,等. 某型发动机换算推力的湿度修正[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2008, 21(1): 51-53.  
Tang Qi, Gan Zaiyou, Lü Shenglin, et al. Effect of atmospheric humidity on engine conversion thrust[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2008, 21(1): 51-53. (in Chinese)
- [6] 李大为,李兆红,白伟. 环境大气湿度对涡扇发动机性能影响计算分析[C]//第五届中国航空学会青年科技论坛论文集. 南昌: 中国航空学会, 2012: 323-327.  
Li Dawei, Li Zhaohong, Bai Wei. Analysis of atmosphere humidity effect on the performance of turbofan engine[C]//Conference Proceeding of the 5th CSAA Youth Science and Technology Forum. Nanchang: CSAA, 2012: 323-327. (in Chinese)
- [7] 张引弦. 进气湿度对燃气轮机性能的影响[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(11): 67-70.  
Zhang Yinxian. The influence of gas turbine performance consideration different air humidity[J]. Ship Science and Technology, 2011, 33(11): 67-70. (in Chinese)
- [8] 何勇,黄帅,伍逸夫,等. 环境因素对某型发动机性能的影响及其修正[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(6): 110-111, 132.  
He Yong, Huang Shuai, Wu Yifu, et al. Effect of environmental factors on the performance of a certain type of engine and correction[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(6): 110-111, 132. (in Chinese)
- [9] 王博. 某涡轴发动机湿度修正分析[J]. 江苏航空, 2013(1): 2-3.  
Wang Bo. Analysis of humidity's correction on a turboshaft engine[J]. Jiangsu Aviation, 2013(1): 2-3. (in Chinese)
- [10] Walsh P P, Fletcher P. Gas turbine performance[M]. 2nd ed. Oxford: Blackwell Science Ltd., 2004: 565-566.
- [11] 张健. 航空发动机全状态建模技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.  
Zhang Jian. Research on full range modeling technology for Aero-engines[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [12] 廉筱纯,吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.  
Lian Xiaochun, Wu Hu. Aero engine principle[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005. (in Chinese)

### 作者简介:

- 赵运生(1984—),男,博士,工程师。主要研究方向:航空发动机总体性能、气动稳定性等。
- 顾卫群(1970—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:航空发动机总体性能、整机试验等。
- 阙建锋(1990—),男,硕士,工程师。主要研究方向:航空发动机总体性能。
- 严红明(1982—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:航空发动机总体性能、叶轮机械等。

(编辑:马文静)