

文章编号: 1000-8055(2005)01-0044-05

考虑雷诺数、湿度等影响因素 的涡扇发动机小偏差模型

吕建伟, 李 军

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 建立了一个考虑雷诺数、湿度等影响因素的涡扇发动机小偏差模型。通过分析, 得到了雷诺数、湿度对涡扇发动机特性的影响系数及影响系数矩阵。以涡扇发动机为例进行计算, 结果表明: 该模型可以定量、定性的分析各个影响因素对涡扇发动机特性的影响。

关键词: 航空、航天推进系统; 雷诺数; 湿度; 小偏差; 发动机特性

中图分类号: V 231

文献标识码: A

Reynolds Number and Humidity Effect on the Small Deviation Model of Turbofan Engines

LÜ Jian-wei, LI Jun

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University,
Xi'an 710038, China)

Abstract: Effect of Reynolds number and humidity on the performance of turbofan engines was investigated, and a small deviation model was established which was used to analyze the performance of certain turbofan engines. The influence coefficient matrix was obtained. The result provides a numerical reference for the quantitative and qualitative analysis of the Reynolds number and humidity effects on turbofan engine performance.

Key words: aerospace propulsion system; Reynolds number; humidity;
small deviation model; engine performance

雷诺数、湿度对发动机使用特性的影响历来是研究发动机性能所关心的问题之一^[1]; 在发动机稳定性评定过程中更需要定量的评估雷诺数、湿度对发动机稳定性的影响^[2]。小偏差法是一种研究发动机特性的重要近似方法^[3]; 当表征发动机各部件性能的参数与初始值偏差不大时, 利用已知的微分关系是可以相当准确的求出这些偏差量之间的关系。而文献[3]中该方法没有考虑雷诺数、湿度等因素对发动机特性的影响, 但整台压气

机、发动机特性的理论和试验研究表明^[4, 5], 雷诺数、湿度对发动机的特性和稳定性有重要的影响。

本文的目的是进一步发展一种分析影响发动机特性因素的小偏差模型, 并通过某型涡扇发动机为算例, 计算分析了雷诺数、湿度对涡扇发动机的特性影响关系。

1 小偏差模型

小偏差法的基本原理是略去了非线性方程中

收稿日期: 2004-01-18; 修订日期: 2004-04-22

联系人: 李军

作者简介: 吕建伟(1978-), 男, 河北秦皇岛人, 空军工程大学工程学院硕士生, 主要从事航空发动机使用性能与稳定性研究

的高阶小量后得到的工程化模型。应用小偏差法建模的步骤为: 首先建立各工作过程小偏差关系, 并根据需要编成小偏差方程组; 其次求得小偏差方程组的通解; 再根据通解, 确定使用某一因素对压气机及发动机特性参数影响的定量关系的小偏差模型。

1.1 小偏差基本方程组的描述

本文计算采用涡扇发动机小偏差模型, 分析雷诺数、湿度影响下的压气机特性影响和涡扇发动机特性变化。

$$\delta Y = [\delta \pi_{r1} \quad \delta \pi_{rh} \quad \delta \pi_r \quad \delta \pi_{cl} \quad \delta \pi_{ch} \quad \delta \pi_c \quad \delta \pi_e \quad \delta \pi_t \quad \delta \pi_v \quad \delta B \quad \delta T_2 \quad \delta T_3$$
$$\delta T_4 \quad \delta T_5 \quad \delta T_6 \quad \delta T_7 \quad \delta n_1 \quad \delta F \quad \delta W_f \quad \delta f_c]^T$$
$$\delta X = [\delta \sigma \quad \delta \delta \quad \delta \delta \quad \delta \delta \quad \delta \eta_l \quad \delta \eta_h \quad \delta \eta_l \quad \delta \eta_h \quad \delta A_{nb1}$$
$$\delta A_{nb2} \quad \delta A_8 \quad \delta Re \quad \delta I]^T$$

1.2 雷诺数影响的数学模型

雷诺数对压气机特性产生影响, 这种影响通过以下 3 个方程确定:

$$\delta W_{accr} = K_W \times \delta Re \qquad \delta \eta_l = K_\eta \times \delta Re \qquad \delta \pi_c = K_p \times \delta Re$$

式中: K_p , K_W 和 K_η 分别为雷诺数对压气机增压比、流量、效率的影响系数。

文献[1]给出了雷诺数对压气机流量、效率的影响关系:

$\overline{n}_{cor} = 1$ 时:

$$\overline{\lambda} = 0.799 + 0.208 \left(\frac{Re}{10^5} \right) - 0.0784 \left(\frac{Re}{10^5} \right)^2 + 0.0104 \left(\frac{Re}{10^5} \right)^3 \tag{1}$$

$$\overline{\eta} = 0.8997 + 0.0873 \left(\frac{Re}{10^5} \right) - 0.0287 \left(\frac{Re}{10^5} \right)^2 + 0.0104 \left(\frac{Re}{10^5} \right)^3 \tag{2}$$

$\overline{n}_{cor} = 0.8$ 时:

$$\overline{\lambda} = 0.66 + 0.288 \left(\frac{Re}{10^5} \right) - 0.0836 \left(\frac{Re}{10^5} \right)^2 + 0.0083 \left(\frac{Re}{10^5} \right)^3 \tag{3}$$

$$\overline{\eta} = 0.8539 + 0.1165 \left(\frac{Re}{10^5} \right) - 0.034 \left(\frac{Re}{10^5} \right)^2 + 0.0036 \left(\frac{Re}{10^5} \right)^3 \tag{4}$$

式中: $\overline{\lambda} = \lambda/\lambda_0$ 流量相对值; $\overline{\eta} = \eta/\eta_0$ 效率相对值; λ_0 和 η_0 是 $Re > 3.5 \times 10^5$ 时的 λ 和 η 值, 而 λ 和 η 是 $Re < 3.5 \times 10^5$ 时的值。

根据式(1)或(3)确定雷诺数对流量的影响系数:

$$K_W = \frac{[q(\lambda_0) - q(\lambda_0) \times Re_0]}{q(\lambda_0) \times (Re - Re_0)}$$

根据式(2)或(4)确定雷诺数对流量的影响系数:

$$K_\eta = \frac{(\overline{\eta} - 1) \times Re_0}{Re - Re_0}$$

雷诺数对压气机增压比的影响通过压气机功的平衡关系, 假设 $\delta I = 0$ 。其影响系数为:

$$K_p = K_\eta / K_1$$

$$\delta Y = A \times \delta X$$

式中: A 代表影响系数矩阵; δX 代表影响因素的相对变化量; δY 代表发动机性能的相对变化量。

发动机性能的相对变化量为: 涡轮落压比 π_r 、压气机增压比 π_c 、尾喷管膨胀比 π_e 、空气流量 W_a 、涵道比 B 、各截面温度 T 、推力 F 、耗油率 sf_c 、燃油消耗 W_f 等 20 个量, 影响因素: 雷诺数 (Re)、总压恢复系数 (σ)、效率 (η)、导向器面积 A_{nb} 和喷口面积 A_e 等。其表示形式如下:

计算 $\overline{n}_{cor}$ 在 0.8~1.0 之间的状态时, 相关的部件特性值需插值得到。

1.3 湿度影响的数学模型

湿度变化影响工质热物理性质, 工质热物理性质的改变将影响压气机的特性。工质热物理性质的改变对压气机特性影响通过以下方程确定:

$$\delta W_{accr} = K_{RW} \times \delta R + K_{kW} \times \delta k$$

$$\delta \pi_c = K_{kp} \times \delta k$$

$$\delta \eta_l = K_{k\eta} \times \delta k$$

由文献[1]可以计算以上系数 K_{RW} , K_{kW} , K_{kp} 和 $K_{k\eta}$

空气湿度对工质热物理性质 (k, R) 的影响如图 1。

图 1 横坐标表示空气湿度的变化量, 单位是 $d \times 10^{-3} (\text{g/kg})$; 纵坐标表示 C_p, R 和 k 随空气湿度变化而变化的相对值(单位: %):

$$\bar{C}_p = \frac{\Delta C_p}{C_p} \quad \bar{R} = \frac{\Delta R}{R} \quad \bar{k} = \frac{\Delta k}{k}$$

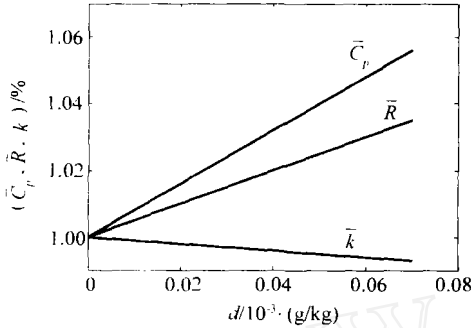


图 1 $\bar{k}, \bar{C}_p$ 和 $\bar{R}$ 随空气湿度变化的关系曲线

Fig 1 The relative curve between $\bar{k}, \bar{C}_p, \bar{R}$ and humidity d

根据上图可以确定及其系数:

$$\delta k = K_{dk} \times \delta d$$

$$\delta R = K_{dR} \times \delta d$$

综上所述, 湿度的影响通过工质物理性质(k, R)的变化表现出来, 对压气机特性的影响由下式确立:

$$\delta W_{\text{acorr}} = (K_{dk} K_{kW} + K_{dR} K_{RW}) \times \delta d$$

$$\delta \eta = K_{dk} K_{k\eta} \times \delta d$$

$$\delta \tau_c = K_{dk} K_{kp} \times \delta d$$

2 算 例

以某型涡扇发动机的最大状态为例, 说明应用。

2.1 影响系数矩阵(A)

系数 $K \sim K_{17}$ 确定根据计算发动机工作点的参数计算^[3], 雷诺数、湿度对发动机工作点影响系数 $K_p, K_w, K_\eta, K_{dk}, K_{dR}, K_{k\eta}, K_{kp}$ 和 K_{kW} 确定依据上述。因而, 可以得到影响矩阵A, 见表 1。

2.2 雷诺数的影响

小偏差模型按照发动机最大状态进行高空雷诺数分布计算可知, 雷诺数对发动机影响的非自动模化区范围。见图 2 阴影部分。

以高空 $H = 18 \text{ km}, 19 \text{ km}$ 为例, 雷诺数随着飞行速度的变化如图 3 所示, 根据雷诺数对发动机性能的影响系数, 可以得出在高空小速度范围内由于雷诺数影响而使得发动机推力的减小量和

燃油消耗率的增大量, 其随飞行速度的变化结果示于图 4、图 5 中。可见, 随着飞行速度的减小, 雷诺数的影响加剧, 在飞行包线左边界, 最大可使得发动机推力减小 6.79% (18 km) 和 9.86% (19 km), 燃油消耗率增大 1.58% (18 km) 和 1.92% (19 km)。

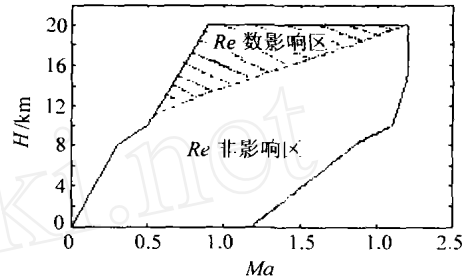


图 2 雷诺数影响范围

Fig 2 The influencing region of Reynold

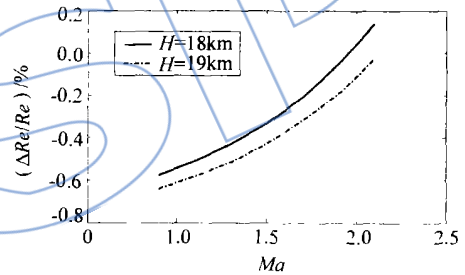


图 3 雷诺数随马赫数变化关系

Fig 3 The relation curve between the Reynold number and Mach number

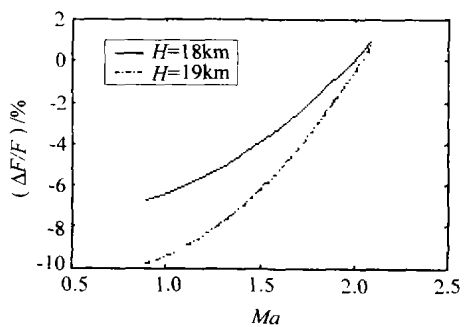


图 4 推力损失随马赫数变化关系

Fig 4 The relation curve between the thrust loss and Mach number

2.3 空气湿度的影响结果

以在地面最大状态为例, 推力、耗油率损失与湿度影响关系见图 6。

表 1 影响系数矩阵A

Table 1 The coefficient matrix A

	$\delta\pi$	$\delta\pi_b$	$\delta\pi_c$	$\delta\pi_e$	$\delta\eta_{cl}$	$\delta\eta_{ch}$	$\delta\eta_{cl}$
$\delta\pi_{r1}$	- 0.000	- 0.478	0.961	1.727	0.494	0.251	- 0.185
$\delta\pi_{r1h}$	0.000	1.505	- 0.071	- 0.128	- 0.063	0.775	- 0.045
$\delta\pi_r$	- 0.000	1.027	0.890	1.598	0.431	1.026	- 0.229
$\delta\pi_{cl}$	- 0.000	1.445	0.040	0.072	0.640	0.710	0.025
$\delta\pi_{ch}$	0.000	2.236	- 1.105	- 1.986	- 0.972	1.460	- 0.694
$\delta\pi_c$	- 0.000	3.681	- 1.065	- 1.913	- 0.332	2.170	- 0.669
$\delta\pi_e$	1.000	2.394	- 0.277	- 0.499	0.021	0.884	- 0.174
$\delta\pi_{\bar{e}}$	0.000	- 1.260	1.677	2.013	0.784	- 0.260	0.265
δV_a	0.000	2.972	- 0.845	- 1.518	- 0.138	1.748	- 0.530
δB	- 0.000	- 4.712	1.555	2.794	0.558	- 2.838	0.976
$\delta\Gamma_2$	- 0.000	0.499	0.014	0.025	0.012	0.245	0.009
$\delta\Gamma_3$	- 0.000	0.722	- 0.097	- 0.174	- 0.085	0.183	- 0.061
$\delta\Gamma_4$	0.000	0.842	- 0.512	- 0.921	- 0.450	- 0.420	- 0.322
$\delta\Gamma_5$	- 0.000	0.408	- 0.298	- 0.535	- 0.262	- 0.704	- 0.187
$\delta\Gamma_6$	- 0.000	0.506	- 0.495	- 0.890	- 0.363	- 0.756	- 0.311
$\delta\Gamma_7$	0.000	1.451	- 2.329	- 1.164	- 0.358	0.129	- 0.407
$\delta\eta_1$	0.000	0.843	- 0.156	- 0.281	- 0.137	0.470	- 0.098
δF	1.429	3.422	- 0.397	- 0.713	0.030	1.264	- 0.249
δV_f	- 0.000	3.939	- 1.787	- 3.211	- 0.967	0.704	- 1.122
δf_c	- 1.429	0.517	- 1.390	- 2.498	- 0.997	- 0.560	- 0.873

	$\delta\pi_{nb2}$	$\delta\pi_{nb1}$	$\delta\eta_{ch}$	$\delta\pi_{\bar{e}}$	$\delta\pi_e$	$\delta\pi$
$\delta\pi_{r1}$	- 0.636	- 0.608	0.427	1.727	0.039	0.153
$\delta\pi_{r1h}$	0.017	1.545	1.011	- 0.128	0.073	- 0.855
$\delta\pi_r$	- 0.619	0.937	1.438	1.598	0.112	- 0.702
$\delta\pi_{cl}$	0.998	0.415	0.775	0.072	0.175	- 0.834
$\delta\pi_{ch}$	1.316	1.800	1.708	- 1.986	0.104	- 1.149
$\delta\pi_c$	2.315	2.215	2.483	- 1.913	0.424	- 2.599
$\delta\pi_{\bar{e}}$	1.837	0.778	0.873	- 1.499	0.314	- 1.382
$\delta\pi_e$	- 1.096	- 0.500	- 0.172	2.013	0.003	0.515
δV_a	1.872	1.773	1.998	- 1.518	0.279	- 1.604
δB	- 2.925	- 3.026	- 3.262	2.794	- 0.330	2.516
$\delta\Gamma_2$	0.345	0.143	0.268	0.025	0.061	- 0.288
$\delta\Gamma_3$	0.476	0.323	0.438	- 0.174	0.071	- 0.403
$\delta\Gamma_4$	1.107	0.144	- 0.412	- 0.921	0.079	- 0.415
$\delta\Gamma_5$	0.851	- 0.206	- 1.053	- 0.535	0.059	- 0.192
$\delta\Gamma_6$	0.982	- 0.081	- 1.140	- 0.890	0.051	- 0.224
$\delta\Gamma_7$	1.370	0.597	- 0.043	- 1.164	0.120	- 0.749
$\delta\eta_1$	0.547	0.420	0.530	- 0.281	0.058	- 0.441
δF	2.626	1.112	1.249	- 0.831	0.449	- 1.975
δV_f	3.631	1.732	0.707	- 3.211	0.367	- 2.345
δf_c	1.005	0.620	- 0.541	- 2.380	- 0.082	- 0.369

图 6 横坐标表示空气湿度的变化量 d , 单位是 (g/kg); 纵坐标表示推力、燃油消耗率随空气湿度变化而变化的相对值, 单位是: %。

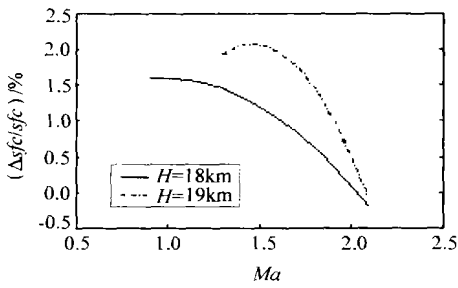


图 5 耗油率增量随马赫数变化关系

Fig 5 The relation curve between sfc and Mach number

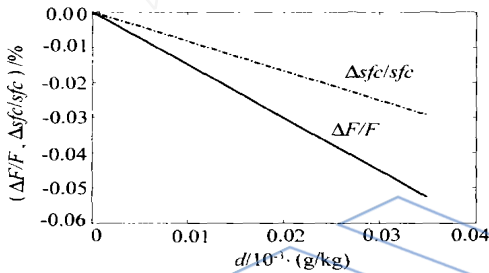


图 6 推力、耗油率随湿度变化关系

Fig 6 The relation curve of the thrust and sfc with humidity

从图 6 可以知, 随着空气湿度的增大, 发动机推力减小。地面状态最大湿度 ($d=0.035 \times 10^{-3}$ g/kg) 时, 可使得发动机推力损失 1.507%, 燃油消耗率减小 0.838%。

2.4 雷诺数、空气湿度对涡扇发动机稳定裕度的影响量如表 2 所示

通过计算, 可以得到空气湿度对发动机稳定裕度的影响量。在地面条件下, 换算转速为 1.0 时, 低压压气机稳定裕度减少 4.292%, 高压压气机稳定裕度减少 2.286%。

2.5 其他因素影响

通过影响系数矩阵可以分析其他使用因素对

发动机的定量、定性的影响。

表 2 雷诺数对发动机稳定裕度的影响量
换算转速 $n=1.0$ 时估算结果

($H=18\text{ km}$)

Table 2 The effect of Reynold on engine stability margin

the result of the corrective rev $n=1.0$

($H=18\text{ km}$)

稳定裕度	δRe	
	低压压气机	高压压气机
$Ma=0.9$	0.327	0.719
$Ma=1.1$	1.306	0.598
$Ma=1.3$	16138	0.547
$Ma=1.5$	1.084	0.547
$Ma=1.7$	0.862	1.269

3 结论

(1) 发展了一个考虑雷诺数、湿度影响的涡扇发动机小偏差模型。

(2) 计算了由于雷诺数、湿度的影响, 使涡扇发动机的推力性能下降, 经济性差; 稳定裕度下降。其结果为其性能、经济性评定提供了定性的数值参考。

(3) 通过影响系数矩阵, 可定量分析其它使用因素变化对发动机特性的影响。

参考文献

[1] 李特维诺夫 尤·阿 航空涡喷发动机的特性和使用性能 [M] 北京: 国防工业出版社, 1986

[2] 刘大响 航空发动机设计手册(第 7 册 进排气装置) [M] 北京: 航空工业出版社, 2000

[3] 刘万学 涡轮风扇和双转子发动机使用维修中小偏差法的应用 [R] 西安: 西安空军工程学院, 1979

[4] Wassell A B. Reynolds Number Effect in Axial Compressors [J] ASME Journal of Engineering for Power, April, 1968, 90(2): 149~155

[5] 李建榕 雷诺数对压气机双轴涡喷发动机性能的影响 [J] 航空发动机, 1993, 5: 1~15