

文章编号: 1000-8055(2004) 04-0433-05

旋转进气畸变对轴流压气机 气动稳定性影响实验研究

李传鹏, 胡 骏

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 利用 RB-199 5 级高压压气机, 实验研究了进口旋转总压畸变对其性能和气动稳定性的影响, 获得了总压畸变的旋转频率对高压压气机喘振裕度损失的影响结果。结果表明: 正转时, 减少了压气机的喘振裕度, 并且存在 2 个危险频率, 出现损失峰值; 反转时, 对喘振裕度影响较小, 甚至提高了压气机的喘振裕度。

关键词: 航空、航天推进系统; 压气机; 旋转畸变; 喘振裕度损失

中图分类号: V 231. 3

文献标识码: A

Effects of Rotating Inlet Distortion on a 5-Stage HP-Compressor Stability

LI Chuan-peng, HU Jun

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The inlet flow rotating distortion effects in a five-stage HP compressor have been investigated experimentally. For co-rotating distortions, the results exhibited significant loss in stability margin and there were two peaks in surge margin degradation corresponding to two distortion rotating frequencies; For counter rotational distortions, the tests showed minimal loss of stability margin, especially in some cases. The range of stable operations was even enlarged.

Key words: aerospace propulsion system; compressor; rotating distortions; surge margin degradation

目前在民用和军用飞机中, 广泛采用双轴或多轴结构的涡轮风扇或涡轮喷气发动机。对于这种结构的航空发动机, 存在着高低压压气机之间的相互影响问题, 尤其对失速边界或喘振裕度的影响。在高低压压气机的相互影响中, 低压压气机出口非均匀的压力波动对高压压气机稳定性的影响是一个非常突出的问题。80 年代中期, Schaeffler 和 Miatt 首先对三轴结构的 RB-199 发动机的高低压压气机的相互影响进行了初步的实验和理

论研究^[1, 2]。其研究结果表明, 在低压压气机出口存在着非均匀的压力波动, 而且随着低压压气机向其失速边界趋近, 这种波动的强度不断增大。当低压压气机进入旋转失速状态时, 高压压气机的进口更是处于一种高强度的非均匀压力波动状态。另外, 高低压压气机在发动机中共同工作时, 虽然其节流特性表现为, 随着流量的减少, 低压压气机的工作点向其失速边界趋近, 而高压压气机的工作点相对较稳定。但由于随着低压压气机工

作点向其失速边界趋近,其出口非均匀压力波动的强度不断增大,而这种压力波动可使其下游的高压压气机的失速边界下移(喘振裕度的损失可高达 20%),故可使全台发动机的高低压压气机全部进入失速状态,造成严重后果。剑桥、MIT 和 GE 公司曾联合在 4 台低速轴流压气机上开展了旋转总压畸变对压气机气动稳定性影响的实验研究,所得结果表明总压畸变的旋转频率对压气机的气动稳定性的影响很大^[3]。本文第二作者与德国慕尼黑国防大学的 Fottner 教授合作,开展了“进气畸变对 RB-199 5 级高压压气机性能和稳定性影响”的实验研究,获得了有关旋转进气畸变的详细而又宝贵的实验数据。本文借助该实验数据分析了压气机进口旋转总压畸变特性以及进口总压畸变旋转频率对高压压气机气动稳定性的影响。

1 实验设备及仪器

该实验的压气机为 RB-199 发动机的研究用 5 级高压压气机。为了实验研究旋转总压畸变对下游压气机气动稳定性的影响,对 5 级高压压气机实验器进行改造,在压气机上游安装了旋转总压畸变发生器。畸变发生器旋转盘在 120 扇形区内分布 26 根 5 mm 的杆组成栏栅,气流流过栏栅时有总压损失,形成 120 周向范围内的低总压区,产生压气机进口总压畸变。在交流电机的驱动下畸变发生器可以在 $\pm 9000 \text{ r/min}$ (负号表示畸变发生器的旋转方向与压气机的旋转方向相反) 的范围内旋转,从而在压气机进口处形成旋转总压畸变流场。有关实验设备和测量仪器详细描述请见文献[4],这里不再赘述。

2 实验结果及分析

2.1 压气机进口流场特性

畸变发生器旋转盘的设计希望在 120 扇形区内产生低总压区,从而在压气机进口形成总压畸变。图 1 给出了压气机转速为 80%,畸变发生器旋转盘与压气机转子的转速比 n_d/n_c 为 0.1, 0.4, 0.7 时,压气机总压沿周向分布的实验结果。图中结果表明,当畸变发生器旋转盘转速较低时,在压气机进口处存在 120 扇形区的低总压,即周向畸变角为 120 的总压畸变。当旋转盘转速增大时,压气机进口总压分布由原来较为规则的矩形变成不规则的波形。

边界的工作点上运转时,不同转速比 n_d/n_c 对应的畸变指数(DC60)。从表中可以看出,当压气机转速一定时,随着 n_d/n_c 增大,畸变指数先减小,然后

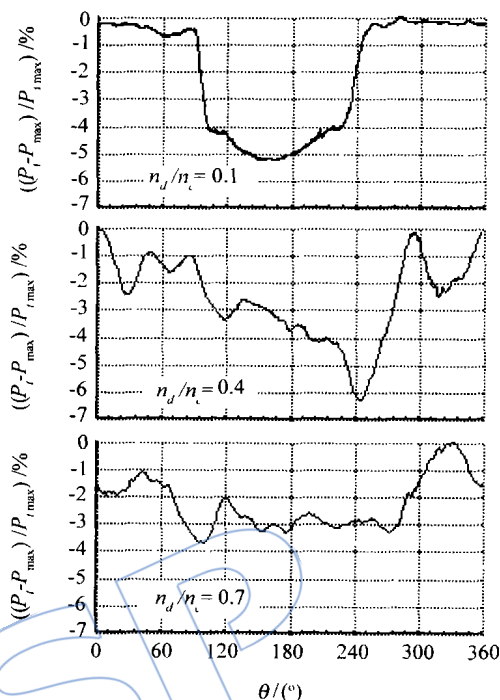


图 1 80% 设计转速时进口总压周向分布

Fig. 1 Total pressure distribution at 80% design speed

维持在某一数值上。究其原因,这与畸变发生器的结构有关。气流流过畸变发生器的栏栅时有总压损失,然而与此同时,杆状的栏栅要对气流做功,使总压增加。当压气机工况相同时,进口的气流速度基本不变。此时,畸变发生器旋转盘转速增加(n_d/n_c 从 0.1 增加到 0.5),气流与组成栏栅的杆的相对速度增大,杆与气流之间的粘性阻力增加,总压损失增加;同时,旋转盘转速增加,杆对气流作用力的周向分量增加,杆对气流的加工量也增加,使总压增加,损失相对减少,当畸变发生器旋转盘高速旋转时,增强了杆对气流的掺混,使进口总压的波形由规则的矩形转变成不规则的波形,且使得 60 度低压区的平均总压随旋转盘转速变化甚微,畸变指数基本不变。另外,当畸变发生器旋转盘的转速不变时,例如 n_d/n_c 等于 0.6,压气机相对转速为 50% (简记 0.6-50%) 与 0.5-60%,此时畸变发生器旋转盘的转速均为 30% 压气机设计转速,它们对应的畸变指数分别为 0.260 和 0.288。可见,随着压气机转速的增加,畸变指数也增加,这可能缘于压气机转速增加,靠近

表 1 列出了压气机各个转速下,在靠近失速

表 1 压气机进口畸变指数(DC60)
Table 1 Distortion coefficients at compressor inlet (DC60)

n_d/n_c	转速 50%	转速 60%	转速 70%	转速 80%	转速 86. 7%	转速 93. 3%
0. 1	0. 678	0. 692	0. 718	0. 725	0. 697	0. 717
0. 2	0. 605	0. 621	0. 653	0. 669	0. 681	0. 699
0. 3	0. 510	0. 524	0. 557	0. 577	0. 579	0. 604
0. 4	0. 426	0. 454	0. 489	0. 548	0. 611	0. 622
0. 5	0. 228	0. 288	0. 312	0. 396	0. 451	0. 500
0. 6	0. 260	0. 230	0. 225	0. 255	0. 278	0. 305
0. 7	0. 214	0. 194	0. 184	0. 165	0. 249	0. 318
0. 8	0. 268	0. 252	0. 227	0. 311		
0. 9	0. 321	0. 324				
1. 0	0. 283	0. 295				

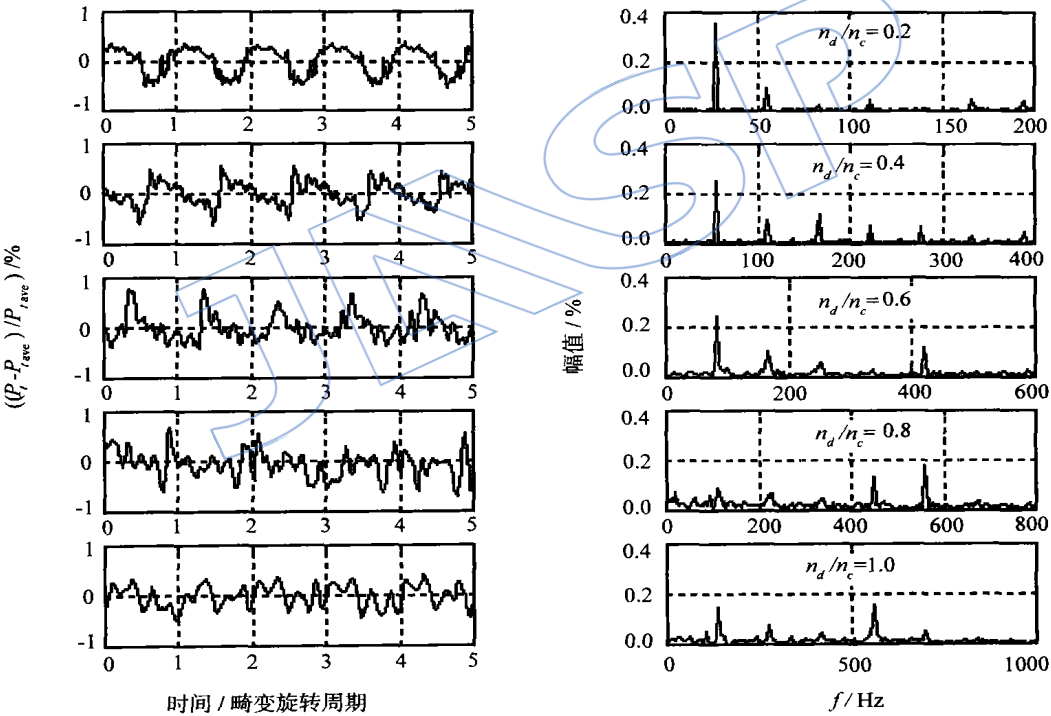


图 2 60% 设计转速 p_{t0} 变化及各阶谐波幅值分布情况

Fig. 2 Inlet total pressure variation and frequency chart at 60% design speed

失速点处的压气机的流量增加, 气流的速度增加, 总压损失增大。

图 2 是压气机转速为 60% 设计转速, 不同畸变发生器旋转速度时, 测量获得的总压波形图和对应的频谱图。可以看出, 当 n_d/n_c 比值较小时, 总压呈现出明显的周期性, 且其旋转频率等于畸变发生器的旋转频率, 从频谱图中可以得知, 一阶谐波分量(频率为畸变发生器旋转频率的谐波)占了

绝对优势。随着 n_d/n_c 的增加, 总压波形变得紊乱, 其一阶谐波分量的幅值下降, 部分高阶谐波分量的幅值与之相当, 甚至超出其幅值。这时畸变发生器旋转频率 f_g 只是总压畸变的基频, 不再代表总压畸变的旋转频率。例如, 当 $n_d/n_c=0.8$ 时, 总压畸变的频率可用 $5f_g$ 表示, 因为对应 $5f_g$ 的幅值最大。对其他压气机转速进行分析, 得到的结果与 60% 相同。

2.2 总压畸变旋转频率对压气机 气动稳定性的影响

关于进口总压畸变旋转频率对压气机气动稳定性的影响,人们最为关注的是旋转频率对压气机喘振裕度的影响。压气机喘振裕度的定义通常有“等转速”和“等流量”两种。这里采用等流量定义来描述,如图 3 所示。

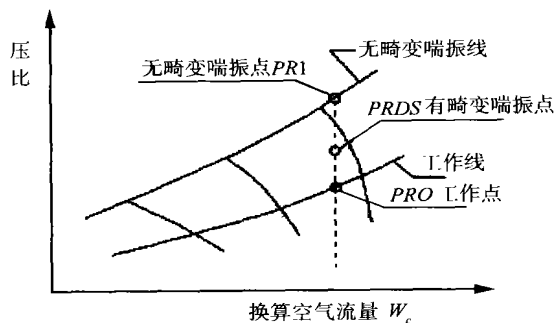


图 3 喘振裕度示意图

Fig.3 Sketch map of surge margin

在等换算流量条件下,无畸变和存在畸变的喘振裕度定义分别为:

$$SM_{UND} = \frac{PR1 - PR0}{PR0} \times 100\%$$

$$SM_{DIS} = \frac{PRDS - PR0}{PR0} \times 100\%$$

喘振裕度损失为:

$$\Delta SM = \left[\frac{SM_{DIS}}{SM_{UND}} - 1 \right] \times 100\%$$

图 4 给出了压气机转子转速 n_c 为 60% 设计转速时,畸变发生器旋转速度 n_d 对压气机喘振裕度损失的影响。图中结果表明在 n_d/n_c 等于 0.20 和 0.80 附近压气机喘振裕度损失最大,对应的畸变发生器旋转频率分别为: $f_g = 13860 \times 60\% \times 0.20/60 = 27.7 \text{ Hz}$ 和 110.9 Hz ,这也表明此时存在 2 个危险频率,使得压气机出现喘振裕度损失峰值。图中纵向虚线的左半部分为畸变发生器旋转方向与压气机转子旋转方向相反的区域。图中结果表明,此时进气畸变旋转频率对压气机喘振裕度的影响比正转时小得多,而当畸变发生器反向旋转转速 n_d 大于 $0.5n_c$ 时,进气畸变不但使压气机喘振裕度减小,反而提高了压气机的喘振裕度。

图 5 为不同压气机转速时,畸变发生器旋转速度对压气机喘振裕度的影响。除了转速 n_c 为 93.3% 设计转速外,压气机都存在两个喘振裕度

损失峰值。第二个损失峰值比第一个损失峰值大很多。当压气机低速旋转时,反向旋转的总压畸变有可能提高压气机的喘振裕度,这与 Longley 等人由低速压气机实验获得的结果类似。

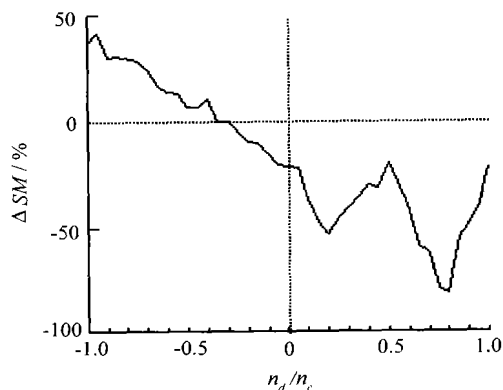


图 4 60% 设计转速时 ΔSM 随 n_d/n_c 变化曲线

Fig.4 Surge margin degradation vs distortion to rotor speed ratio at 60% compressor design speed

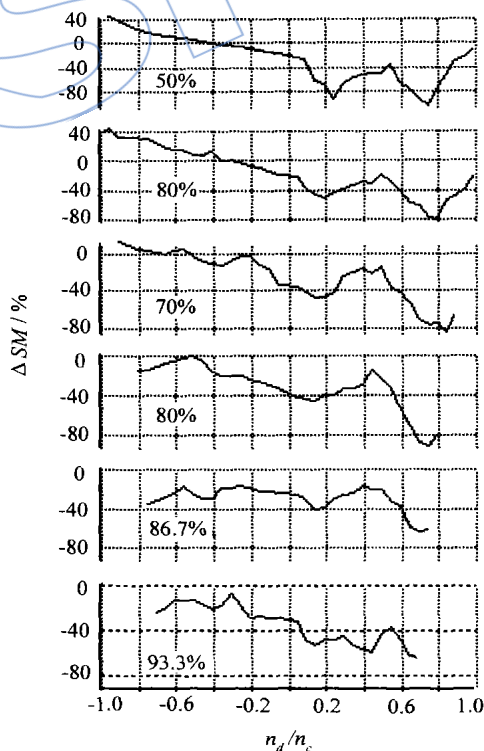


图 5 喘振裕度损失 ΔSM 随 n_d/n_c 变化

Fig.5 Surge margin degradation vs distortion to rotor speed ratio

对于第一个损失峰值,计算出具体频率,会发现它们其实相差不大。从表 2 中我们可得到这

样一个结论,喘振裕度损失第一个峰值和压气机的转速无关,只与畸变发生器的旋转频率有关。可以认为这个旋转频率是该压气机的一个特征频率,当进口畸变旋转频率与此一致时,发生了耦合,因而在这儿,压气机出现了喘振裕度损失峰值。

表 2 喘振裕度损失的第一个峰值对应数据

Table 2 Frequency of first significant loss of surge margin

压气机转速	n_d/n_c	旋转频率 f_g
50%	0.25	28.9
60%	0.20	27.7
70%	0.15	24.3
80%	0.13	24.2
86.7%	0.14	28.0
93.3%	0.14	30.2

对于第二个峰值,除了压气机转速为 93.3% 外,都集中在转速比(n_d/n_c)为 0.7 至 0.9 之间。这时畸变发生器的转速已相当高,由上面对压气机进口总压的频谱分析知道,此时波形相当紊乱,其受高阶谐波分量影响较大。相应地,对应第二个损失峰值的畸变发生器的旋转频率不再能代表总压畸变的真实旋转频率。

3 结 论

本文结果直接来源于 RB-199 研究用 5 级高压压气机的实验数据,对于型号研制中分析旋转进气畸变对多级压气机性能和气动稳定性的影响有着重要的参考价值。

(1) 采用这种栏栅状的畸变发生器形成进口旋转总压畸变时,畸变发生器的旋转频率不一定代表着总压畸变的旋转频率。当畸变发生器旋转盘转速较低时,进口总压波形基本符合矩形,旋转频率与畸变发生器的旋转频率一致;高速旋转时,

总压波形非常紊乱,其高阶谐波分量影响显著,进口总压畸变的旋转频率不能继续用畸变发生器旋转频率来表示。

(2) 进口总压畸变旋转频率对压气机气动稳定性影响很大。正转时,减小了压气机的喘振裕度;反转时,对压气机喘振裕度的负面影响较小,甚至有可能提高气动稳定性。

(3) 畸变发生器正转时,存在 2 个危险频率,压气机出现喘振裕度损失峰值,使发动机稳定工作范围大为减少,喘振裕度的损失可达到 84%。

(4) 在进行双轴或多轴发动机的设计时,应考虑高低压压气机转子的转速匹配问题,尽量保证低压压气机出口非均匀的压力波动的旋转频率远离使得高压压气机出现喘振裕度损失峰值的危险频率。

(5) 由于反向旋转的总压畸变有可能提高压气机喘振裕度,在多轴发动机的设计中,可以考虑采用对转的结构形式来改善压气机的气动稳定性。

参考文献:

[1] Schaeffler A, Miatt D C. Experimental Evaluation of Heavy Fan-High-Pressure Compressor in a Three-Shaft Engine: Part I - Experimental Setup and Result[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 1985, 107: 828- 832.

[2] Schaeffler A, Miatt D C. Experimental Evaluation of Heavy Fan-High-Pressure Compressor in a Three-Shaft Engine: Part II - Analysis of Distortion and Fan Loading[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 1986, 108: 171- 174.

[3] Longley J P, Shin H W, Plumley R E, et al. Effects of Rotating Inlet Distortion on Multistage Compressor Stability[J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1996, 118: 181- 188.

[4] Peters T, Fottner L. A Coupled Steady-Unsteady State Data Acquisition System for the Investigation of Rotating Inlet Distortion at a Multistage Compressor Test Facility[R]. *Firenze, Italy: Proceedings of the 15th Bi-Annual Symposium on Measuring Techniques in Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines*, September 21- 22, 2000.