

文章编号: 1000-8055(2003) 04-0546-03

失速起始检测的平均数值差分方法

张 朴, 祝雪平, 李应红
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 为在压气机整机进入深度失速前检测到失速起始信号, 提出了一种基于平均数值差分的短周期扰动检测方法。应用该方法对某轴流式压气机压力测量数据进行了分析。结果表明, 平均数值差分方法可准确地在该压气机深度失速前 0.02~0.05 s 检测到失速起始信号, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 航空、航天推进系统; 发动机; 失速起始; 差分; 短周期扰动

中图分类号: V 231. 3

文献标识码: A

An Averaged Numerical Difference Method for Detection of Stall Inception

ZHANG Pu, ZHU Xue-ping, LI Ying-hong
(Airforce Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To detect stall inception signal before the whole compressor running into deep rotating stall, a method based on averaged numerical difference is developed to detect short length scale disturbance. While the method is used to analyze measured pressure data of certain axial flow compressor, corresponding analysis results demonstrate that the method can detect stall inception signal of the compressor 0.02~0.05 second before the start of deep rotating stall, and that the method has certain engineering application value.

Key words: aerospace propulsion system; engine; stall inception; difference; short length scale disturbance

1 引 言

在航空发动机试验研究领域, 失速和喘振研究大多是在实验室的压气机试验台架上完成的。就公开发表的文献而言, Freeman C 在 Viper MK522 型八级单轴涡喷发动机上、姜涛等在某型涡喷发动机上所进行的试验^[1,2]是为数较少的直接在定型的航空发动机上完成的失速/喘振试验。Freeman、姜涛的试验和其它许多在多级压气机上进行的试验^[3,4]表明, 高速多级轴流式压气机在

中低转速的失速起始总是表现为短周期扰动的形式。

在试验室条件下, 通过在沿压气机轴向不同环面上布置大量的高响应动态压力传感器, 可以准确地检测到作为失速起始的短周期扰动。然而, 受费用和压气机机匣结构强度等因素的限制, 在装机的航空发动机上布置数量众多的压力传感器是不现实的。因此, 发展一种基于单一压力传感器, 而又能准确、快速和可靠地检测到作为失速起始的短周期扰动的算法, 无疑对压气机扩稳和失

速控制具有重要意义。

2 失速起始检测的平均数值差分方法

短周期扰动在最终导致压气机整机压力坍塌前,一般要经历一到数个转子周期。整机压力坍塌前的最近几个短周期扰动尖峰强度较大,或者说,置于压气机失速级后的压力传感器在短周期扰动到达时将检测到持续一定时间的较大幅度的压力降。本文提出的失速起始检测的平均数值差分方法旨在检测短周期扰动引起的较大幅度的压力降。

2.1 算法的思路

设压气机某两级之间的级间压力为 $p(t)$, 数据采集速率 F_s , $p(t)$ 在采集速率 F_s 下的离散时间序列 $p[n]$, 当前时刻为 n , 定义差分:

$$D[n] = P_{\text{avg}}[n] - P_{\text{avg}}[n - 1] \tag{1}$$

其中:

$$P_{\text{avg}}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=n-N+1}^n p[k]$$
$$N = 0.01 F_s \tag{2}$$

则 $P_{\text{avg}}[n]$ 是时间序列 $p[n]$ 最近 0.01 s 的平均值。 $P_{\text{avg}}[n - 1]$ 是在 0.01 s 前以同样方法计算得到的平均值:

$$P_{\text{avg}}[n - 1] = \frac{1}{N} \sum_{k=n-N+1}^n p[k]$$
$$N = 0.01 F_s \tag{3}$$

则 0.01 s 压力平均的差分 $D[n]$ 实际上代表了压力信号的变化率。当传感器检测到较强的短周期扰动尖峰时, $D[n]$ 取负值, 且绝对值迅速增大, 可以据此检测短周期扰动。

2.2 失速起始检测的平均数值差分判据

各变量和符号的定义如 2.1 所示。当压力传感器检测到短周期扰动时, 压力信号有一个急剧、较大幅度的下降(负斜率), 表征压力变化率的 $D[n]$ 值取绝对值较大的负值。当 $D[n]$ 的绝对值超过某一预先给定的阈值 C_0 时, 认为检测到了短周期扰动。

3 算例分析

对某型高速七级单轴涡轮喷气发动机失速试验的数据分析表明, 该型发动机在中低转速失速时, 在压气机整机失速前能观察到 1~4 个短周期

扰动尖峰。图 1 显示了采用平均数值差分方法对该型发动机失速试验试车压力数据文件 Prob4.dat 的第 4 通道数据进行计算分析的结果。

图 1 由上至下依次为相对压力信号、 $D[n]$ 值随时间的变化曲线、压力坍塌点附近一段时间的相对压力信号和该段时间内相应的 $D[n]$ 值曲线, 并用短竖线标出了检测到短周期扰动的时间点。在图 1 所示的情况下, 可以在压气机全局压力坍塌前约 0.05 s 检测到较强的短周期扰动。由 $D[n]$ 值曲线可以看出, 在深度旋转失速区内 $D[n]$ 值有较大的脉动, 而在该区间外, $D[n]$ 值则小得多且相当平稳。

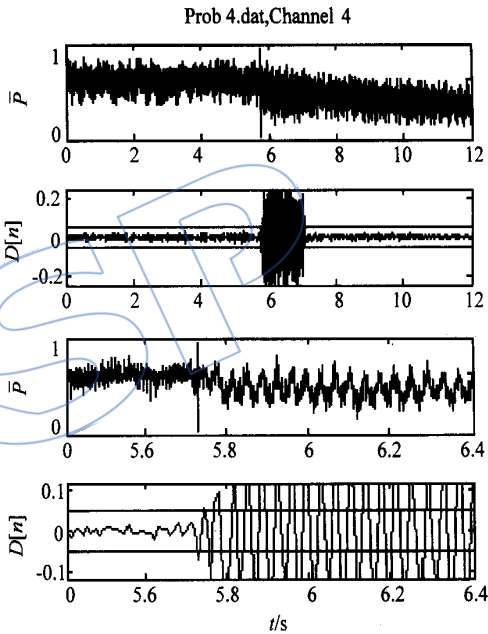


图 1 相对压力及差分值 $D[n]$ 随时间的变化曲线
Fig. 1 Variation of relative preesure and $D[n]$ with t

尤其重要的是, 在进入深度失速后收油门停车的减速过程中, $D[n]$ 值仍十分平稳。收油门停车显然是比较剧烈的减速过程, 但尽管如此, 压力的变化速率仍远小于由于短周期扰动而引起的压力降的变化速率, 也远小于深度旋转失速区间内压力周期性脉动的变化速率。由此可以推断, 平均数值差分方法检测旋转失速信号可以有效排除发动机减速的干扰, 具有较高的可靠性。

4 结 论

由于平均数值差分方法仅对压力信号作简单的加、减运算, 算法的速度能满足实时检测的要求。对时间序列求平均值的过程已经可以平滑掉

一部分来自数据采集系统的干扰;但在实际应用中,为确保算法的可靠性,可以先对数据窗内的数据进行滤波,然后再对滤波后的数据运用平均数值差分方法,以更好地排除干扰信号的影响。

对同一组试验的大量数据处理结果表明,使用平均数值差分方法可以稳定地在压气机整机失速前 0.02 s~0.05 s 检测到短周期扰动。考虑到压气机整机进入深度失速后退出失速相当困难,因此能在整机失速前检测到失速起始信号无疑具有重要意义。

必须强调指出的是,试验数据是在发动机进口流场均匀的条件下获得的。进一步的工作应根据发动机进口流场畸变的条件下压气机内流场的

变化特征对算法作必要的改进。

参考文献:

[1] Freeman C. Stall in Axial Flow Aero Engine Compressors [A]. Axial Flow Compressor Lecture Series [C]. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1992: 2- 24.

[2] 姜涛, 李应红, 李军. 某型发动机压气机最先失速级判定的试验研究 [J]. 航空动力学报. 2002, 17(1): 80- 82.

[3] Escuret J F, Garnier V. 高速多级压气机失速的测量 [A]. 航空发动机测试技术专题文集 [C]. 成都: 中国燃气涡轮研究院, 1998: 1- 14.

[4] Day I J. Stall and Surge in Axial Flow Compressors [A]. Axial Flow Compressor Lecture Series [C]. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1992: 7- 8.

