

深度喘振倒流在离心压缩机系统中的发生特征

中科院工程热物理研究所 戴冀^{*}

西安交通大学 谷传纲 苗永淼

【摘要】 建立了一个低压离心压缩机喘振实验台,使用热线风速仪等动态测试手段在级出口管段及储气槽部位,对各流量工况下的喘振脉动波形进行了测量,观察了喘振发生倒流的部位及特点,从而解释了深度喘振倒流的发生机理。同时也证实在深度喘振工况下,气流的可压缩性是非常重要的流动特征。

主题词: 离心式压缩机 系统 喘振 实验

分类号: TK474.82

1 前言

压缩系统喘振早期的理论模型基本上是一维不可压的小扰动分析,其目的在于确定喘振发生点。自从 80 年代以来,美国的 Greitzer 与 Moore 合作,先后建立了喘振与旋转失速的二维动态模型^[1-3],成功地模拟了两种不稳定现象发生和发展的动态过程。但这种预测的定量准确性依然较差,有待于进一步改进。在以上模型中,考虑到了储气槽的特点而视其为可压缩流动,同时对于压缩机的级使用了轴对称准稳态特性线,可以综合考虑部分压气机的实际效应,故在一定程度上压缩机级可以引入可压性的影响。这样只有管路中的流动是完全按不可压来处理的。本文就此假设,采用实验手段在不同的喘振条件下进行了分析,从而为建立更加准确的理论模型提供依据。

2 离心压缩机喘振实验台及测试系统

本实验系统由进气管、离心叶轮、叶片扩压器、蜗壳、出口管、储气槽、流量调节阀组成。热线测量在 A、B、C 三点进行,A、B 分别位于出口管进、出口,C 位于储气槽出口。实验时制做了一个前向型离心叶轮,外径是 0.090 m。级中采用了有叶扩压器,外径是 0.150 m。叶轮由可控硅无级调速的直流电机驱动,本实验的转速为 16 kr/min,测量时将转速波动控制在 ± 50 r/min 之内。出口管道内径为 40 mm,测量点 A 与 B 间的距离为 0.45 m,储气槽的容积为 0.01662 m³。实验时通过调节出口蝶阀可改变系统的工况点。且文中阀门开度是指蝶阀阀板与管道截面的夹角,即 90 对应全开工况,而 0 则对应了完全关闭的状态。

在进行喘振实验之前,需确定本装置的稳态性能,因而采用了常规的气动测试手段^[4]。静

压由级进、出口管上的静压孔测量,并由 U 型管读数。流量的测量由进口标准喷嘴进行。

由于喘振实验中要测量动态特性,因此本实验重点采用了动态测量手段进行研究。为了反映系统中流量的波动,在实验台出口管道内,使用了 TSI 智能热线风速仪测试系统,探头是热膜直单丝,由于本热线系统在同采集和分析两路信号时存在困难,因此,在另一测点使用了 DISA 热线风速仪,探头是直单丝热线。对两路热线信号使用了 TEAC R81 型磁带记录仪进行记录,而后由 CF-920(FFT)动态信号分析仪进行波形、频谱及相位等的分析。使用此测试系统实现了对两路信号的分析 and 比较。喘振测量前还使用了 TSI 配套的 1125 型热线校正仪,对两只测量探头进行了标定。由于喘振动态变化的频率相对较低,因此,数据采集的采样率为 5×10^3 Hz,每次采样的时间为 1 秒。

在不装有储气槽的情况下,通过静态测试,可得到图 1 的级稳态特性,且其中的各实验点都按标准大气条件进行了折算。现取的标准大气条件为温度 20°C ,压力 1×10^5 Pa。图 1 还给出了在 $n = 16$ kr/min 的转速下,发生喘振时的时均特性,且本文中经典喘振是单指系统中未发生倒流,深度喘振则是指系统中发生了倒流的较强喘振。由图的结果可以看出,在本实验台位上,经典喘振只在很小的阀门开度范围内发生,且对应了很窄的流量范围,而深度喘振则是系统发生不稳定的主要形式。由图 1 的测量结果还可知,本系统的压比较低,故认为符合低速离心压缩机系统的条件。

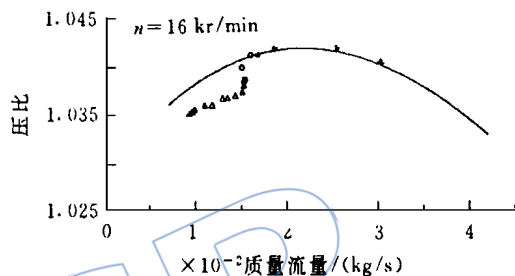
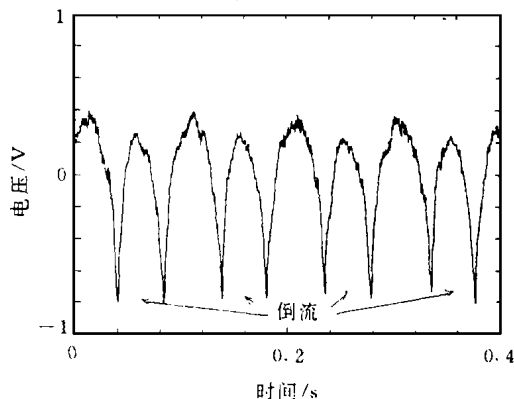


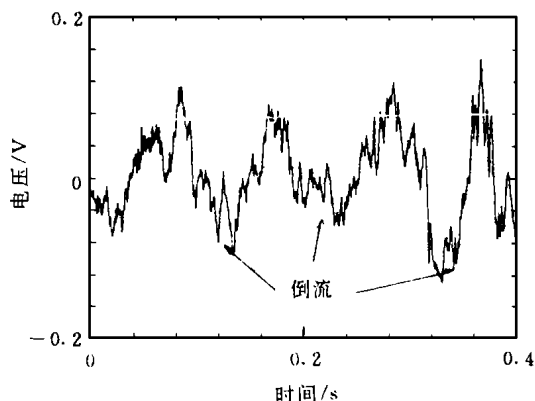
图 1 压缩机性能曲线

3 储气槽对喘振脉动的反应、级出口管中的流动特征

作为对本实验装置及测试系统可靠性的检验,在位置 B 和 C 进行了热线测量,以观察储气槽对大幅度气流脉动的作用。测量显示:在进入深度喘振之后,C 点的脉动较小,其幅度远远小于 B 点。图 2 是阀门开度 5 时深度喘振工况下 A 点和 B 点的热线信号波形比较。由于单丝



(a) 槽进口 B 点波形



(b) 槽出口 C 点波形

图 2 阀门开度 5 时储气槽进出口波形比较

热线无法区别气流方向,故在热线波形上,倒流成份表现为正流脉动同样的形状,但在波幅上

随工况点的不同而区别较大,这一现象可以使用其它手段例如压力或温度的测量加以判别。图中标出了倒流部分的波形。

从图 2 来看,槽进口的喘振强度很大,倒流速度已接近正流速度;而与此同时的槽出口,只检测到很小的倒流量。同时通过改变工况点进行的观察显示:当深度喘振增强至一定程度时,槽出口处的倒流并未随进口脉动的增大而出现同步增大现象。这也进一步说明了储气槽对于气流脉动具有较大的稳定作用,即使在有很大倒流量的强烈喘振状态下仍是如此。

图 3 中在位置 A 和 B 各插入一根热线探针,得到在各阀门开度下, B 点与 A 点热线信号喘振频率的相位差,发现在稳定工况及经典喘振工况均难以得到一个固定的值,而从阀门开度 22.5 开始能够明确地测出相位差,这时正处于经典喘振向深度喘振的过渡工况点。随着阀门的进一步关闭,深度喘振的倒流不断增强,相位差的绝对值也逐步增大了,且均为 A 点超前 B 点。通常认为:喘振是透平压缩系统在流动方向上的一维脉动。由图 3 的结果来看,若按不可压缩模型描述喘振时,只能勉强适用于经典喘振,这时只就一维气动方程组的质量守恒方程来说,设管中的流速为 $u(x, t)$, 则有 $\partial u / \partial x = 0$; 而当深度喘振时,这一方程显然无法反映图 3 中具有相位差的波动性流动,唯一合理的解释是管路中的流动是可压缩的,这时的质量守恒方程为 $\partial \rho / \partial t + \partial (\rho u) / \partial x = 0$, 且由于 $\rho(x, t)$ 的波动性造成了 $u(x, t)$ 沿 x 在时间上的传播性。另外,本实验的喘振频率为 10.25 Hz, 而不同阀门开度下 B 点与 A 点间相位差的不同,说明这一喘振频率在不同流量的工况下存在微小的变化。

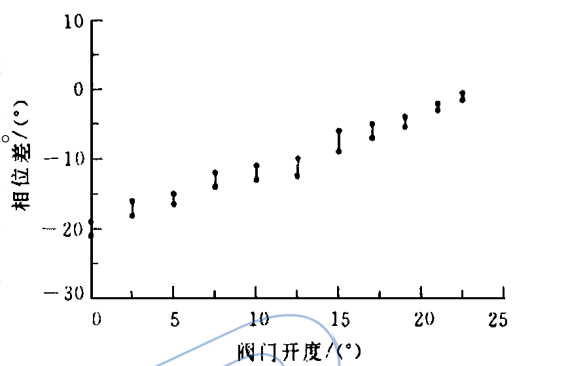


图 3 深度喘振工况下 B 与 A 点间的相位差

测量还发现:在经典喘振向深度喘振过渡的工况,出口管中存在一个倒流发生点,而不是在深度喘振发生的瞬时在整个系统突发倒流。阀门开度为 22.5 时的图 4, 就清楚地说明了这

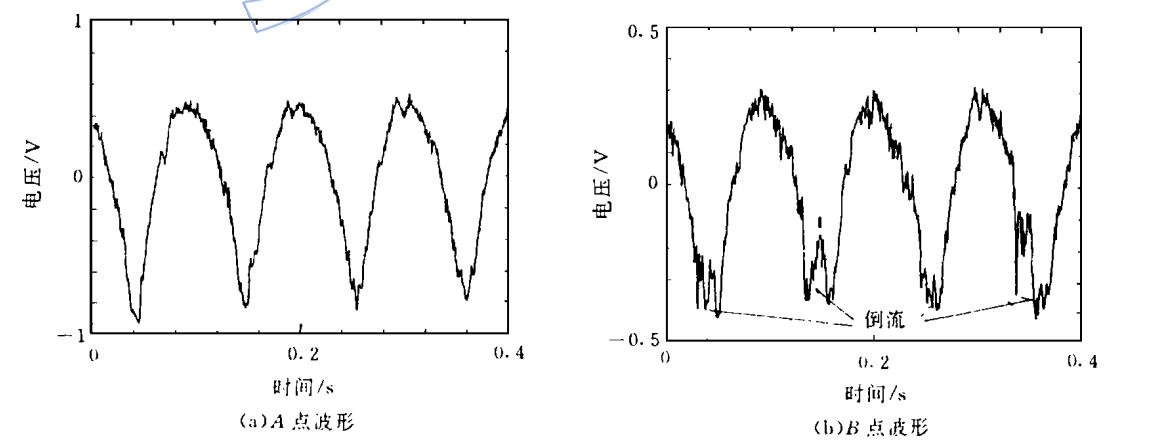


图 4 过渡工况波形沿出口管长的比较

一特点。在此工况下,级的出口已测出倒流速度,而与此同时在管远端的 B 点却未发现倒流成份的存在,直到再稍减小阀门开度时, B 才与 A 一样能检测出倒流速度。这也同时说明:在经

典喘振向深度喘振发展的过程中,倒流点由级出口处向储气槽发展。此特性也充分地反映了出口管段内流动的可压缩性。

以上测量结果也对有关深度喘振倒流的传统物理解释提供佐证,即当压缩机处于压力特性线的正斜率区时,出口阀门关小至某一程度的瞬时,流量的减小使得压缩机级的压升也减小了。这样,压缩系统下游压力与级内下降了的压力的瞬时差值,为发生倒流提供了动力。因从本文的实验观察来看,倒流确实先发生于引起压力下降的级出口处,且倒流随流量的减小有很快从压缩机向储气槽传播的趋势,当然,这种传播是在很小的流量范围内发生的。

4 结 论

(1) 按照通常的认识储气槽使得喘振易于发生,但在深度喘振工况下,槽在出口处大大减弱了进口的强烈脉动,这又表现了储气槽平稳气流的作用。

(2) 随着经典喘振向深度喘振的发展,倒流点是从级出口向下游管段发展的,但此过程是在很窄小的流量工况范围内发生的。

(3) 当深度喘振较强时,在出口管段测得固定的相位差,这表明在此工况下管段内的流动所表现出的可压缩性是很强的。

综合以上分析,可以认为:在离心压缩机系统中,深度喘振是可压缩性起非常重要作用的非定常流动现象,即使对于低压系统在出口管中也表现出了较强的可压缩性特征。因此,其动态特性的准确描述还有赖于进一步考虑到这一流动特性。

参 考 文 献

- 1 Moore F K, Greitzer E-M. A Theory of Post Stall Transients in Axial Compressor Systems, Part I: Development of the Equations. ASME J. of Eng. for Gas Turbines and Power, 1986, 108: 68- 76 or ASME Paper 85- GT- 171, 1985
- 2 Moore F K. Weak Rotating Flow Disturbances in a Centrifugal Compressor with a Vaneless Diffuser. ASME J. of Turbomachinery, 1989, 111: 442- 449
- 3 Moore F K. Theory of Finite Disturbances in a Centrifugal Compression System with a Vaneless Radial Diffuser. ASME Paper 91- GT- 82, 1991
- 4 西安交通大学透平压缩机教研室. 透平压缩机测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1981

(责任编辑 魏星禄)