

# 往复压缩机及管线系统气流脉动控制技术

## 1 背景及意义

压缩机及管路振动主要有4种类型：①由压缩机本身的动不平衡而引起的机体和与其相连管道的振动；②由压缩机吸气和排气管内的气柱共振引起的机体和相连管道的振动；③由气流压力脉动激起管道局部结构共振；④由气流压力脉动而激起的机体、管道的受迫振动。

**第④种类型，由气流压力脉动而激起的机体、管道的受迫振动，是目前大量存在的，国内工程界没有很好解决的问题。往复压缩机气流脉动危害极大。**

### (1) 国外方面

国外的工业化比国内起步早、规模大，压缩机行业的工程师也较早的认识到气流脉动对压缩机经济性和可靠性的显著影响。上世纪中叶，部分发达国家已经着手开展往复式压缩机管线气流脉动的研究。

- ✓ 1962年，金和弗雷教授大胆假设：阻尼与速度成正比；介质的密度、压力还有速度在相同截面上相等；管线里面的压力脉动值比小于8%；管径和管长之比较小，从而获得平面波动理论方程组。
- ✓ 1964年，冶山真冶等人把共振区域进行调整，将阻尼与速度的关系调整为成二次方正比关系。这样处理使得平面波理论的计算值得到一次修正，相对误差小了许多，大体上使该理论能够满足工程实际设计的要求。
- ✓ 1972年，埃尔森等学者发现了影响气流脉动的一个新因素即气缸阀门运动和气缸阀门的质量流量。这对以后的数学建模起到了重要的作用。使气柱的分析更加准确。
- ✓ 1981年，Cbaelli 和 Shepherd 研究了不同几何参数时弯头对声波的反射和向前传播，通过利用有限元方法对方程进行求解，得到相关的传递矩阵。

美国西南研究院(SWRI)开发了一个完整的一维时域流场求解(TAPS)方法—2008年报道，瞬态流动求解算法包括控制方程的所有项，能更准确地计算压缩机歧管和管道设计上的脉动问题；在数值模拟过程中，综合考虑管线出口和入口的边界条件以及流体动态特性，使得计算结果更接近真实值。图1表达了在1000m长管的入口和出口处，纳威—斯托克斯方程与平面波理论解的差异；在弱脉动条件下，摩擦阻力的影响相对较小，在管道末端两种理论的计算结果差异也较小，如图2所示。

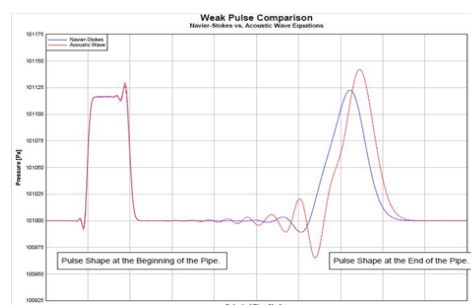
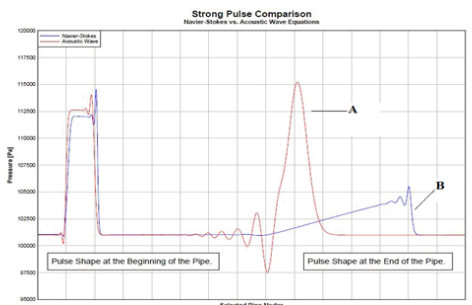


图 1 强脉动条件下平面波理论解与 TAPS 脉动测试对比 图 2 弱脉动条件下平面波理论解与 TAPS 脉动测试对比

## (2) 国内方面

- ✓ 上世纪七十年代,西交大党锡淇等人率先在国内开展往复式压缩机气流脉动与管线振动的研究,以平面波理论为基础,在一些压缩机装置和计算程序上取得了令人满意的效果。同时期西交大学者陈守五使用一维非稳态气流方程组模拟气流脉动,该方程组能够计算大振幅气流脉动,通过与实验对照也取得了不错的模拟结果。但该方法对复杂管系的模拟精度存在问题。对压缩机管道系统进行了研究,对气流脉动、缓冲器、孔板等方面作了详细讨论。
- ✓ 上世纪 90 年代初,西交大学者黄幼玲、陈守五等成功编制了与气流脉动和结构振动软件包,为全国几十个厂家解决了生产问题,并因此获得了国家科技进步二等奖。但该软件通用性还不够,后处理及可视化功能不强,没有市场化。
- ✓ 21 世纪初,西交大李志博、彭学院在前人研究的基础上,建立了复杂管系气流脉动的数学模型,寻求可行的离散化方法并对数学模型进行求解,编制出界面友好的通用软件,并建立气流脉动试验台,通过实测复杂管系的气流脉动验证软件分析结果。与国外同类软件比较,无论是软件的建模交互性功能的方便性,还是分析手段以及与标准的衔接等各方面都相差甚远。
- ✓ 2010 年《压缩机技术》报道,沈阳鼓风机集团有限公司技术中心的郭文涛团队对浩良河化肥分公司 33t/日甲醇项目压缩机管线振动进行了治理。应用德国的 DIGMO 计算机声模拟软件进行分析后,对进出口缓冲罐的容积、位置进行重新设计,获得了较好的效果,这是目前国内公开报道的处理最完美的压缩机振动治理项目。

**结论:国内自主开发的压缩机气流压力脉动分析软件还没有实现工业化和商业化;工程界对压缩机气流压力脉动问题认识不够,处理此类问题的技术力量严重不足。**

## 2 技术路线

主要以国外气流脉动分析软件为工作平台,对往复式压缩机及其管道系统进行气流脉动分析,优化往复式压缩机进出口管道的尺寸、走向,有效降低气流脉动指标至 API 规定值以下。同时保证压缩机进出口管嘴许用载荷及整个管路上管道应力满足其许用要求。具体为:

- ✓ 对往复式压缩机及其管道系统进行气流脉动分析,调整进出口管道的尺寸、走向,气流脉动指标降低至 API 规定值以下。
- ✓ 应用管道应力分析软件进行管道应力分析,保证压缩机进出口管嘴许用载荷及整个管路上管道应力满足其许用要求;
- ✓ 重新设计、制造和安装往复式压缩机管道系统,使得气流脉动指标降低至 API 规定值以下。

## 3 本单位研究情况

### (1) 实验系统

为研究往复式压缩机气流压力脉动规律，搭建了压缩机管路系统实验平台，如图3所示。实验系统主要由往复式压缩机、三相异步电机、管道系统、缓冲罐、高频动态压力传感器、温度传感器、高速数据采集仪、质量流量计等组成。其中高速数据采集仪（图2右上）性能为1MHZ 采样率，16位 A/D 分辨率；压力传感器（图3右下）采样率 600KHZ，可测得管线内动态压力信号。实验原理为压缩机使管道内产生气流压力脉动，压力传感器将管道内的脉动压力以电压信号形式输入进数据采集仪，采集仪将电压信号转变为数字信号导入计算机，计算机利用配套软件将信号进行收集、滤波、显示以及储存。



图3 往复式压缩机气流压力脉动实验平台

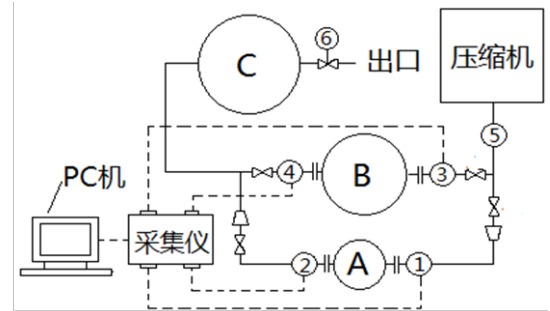


图4 实验系统示意图

实验平台布置如图4所示，图中标号1、2、3、4为压力传感器，分别置于A、B两只缓冲罐前后，与数据采集仪连接；C为排气缓冲罐；5为温度传感器，6为带质量流量计的电控阀门。

## (2) 测试结果

图5显示了四组压力传感器采集的管道内气体压力随时间的变化情况，显示压力呈周期性变化，也即是气流压力脉动。

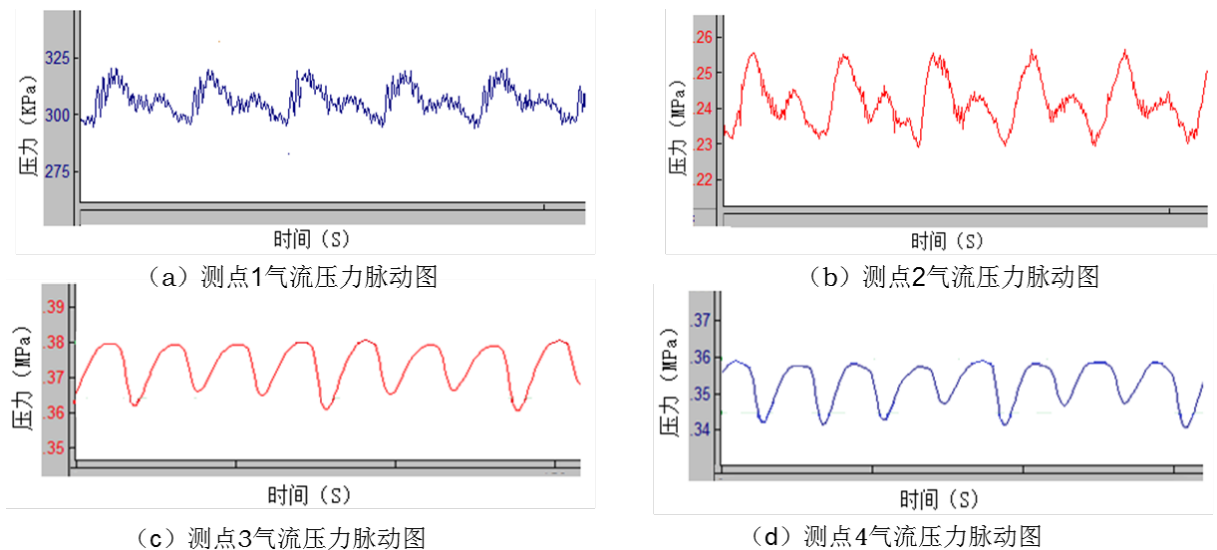


图5 4个测量点处气流压力脉动波形

甄选出每组脉动中的若干个波峰值与波谷值，各自求取平均值后相减得到每组脉动的平均脉动压力值。分别得到图 13 所示测点 1、2、3、4 对应的四组脉动压力值：26kPa、25kPa、18kPa、15kPa。

### (3) 模拟计算

根据往复式压缩机实验平台的实际尺寸，采用国外先进气流压力脉动分析软件，建立数值计算模型，如图 6 所示。

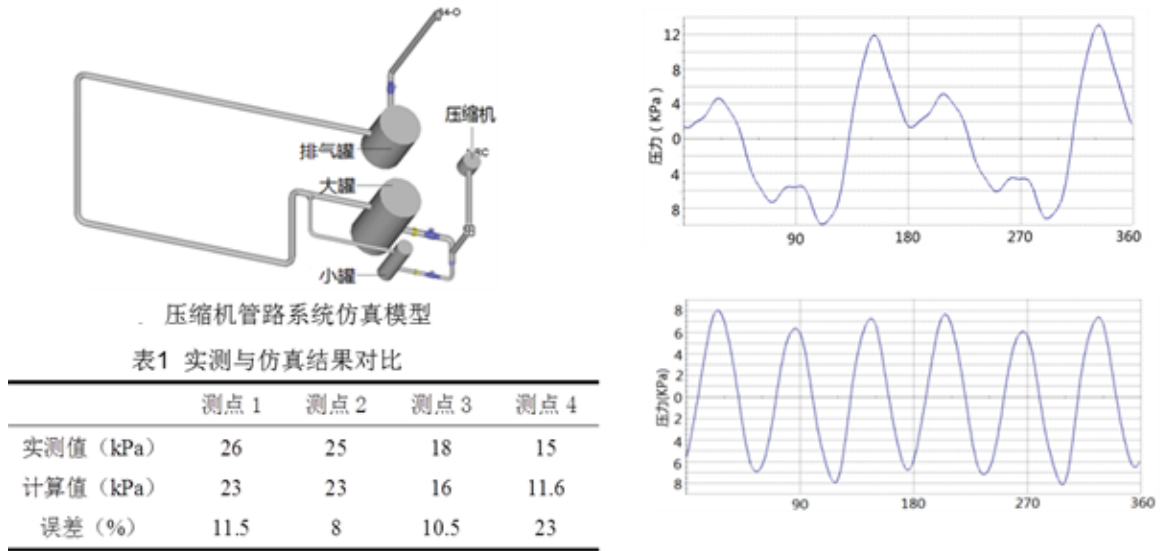


图 6 模拟计算与实验测试结果对比

分别计算模型中与实验台内位置相对应的 4 个测点的压力脉动值，在压缩机曲柄旋转一周内的气流压力脉动，其中测点 1、3 的计算结果如图 6 所示。

### (4) 模拟计算与实验测试结果对比

将实测气流压力脉动波形图与模拟计算得到的波形图放到同一个坐标系下进行对比，如图 7、图 8 所示。

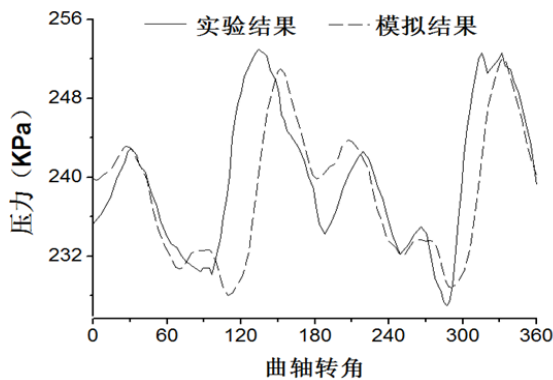


图 7 测点 1 处模拟计算与实验波形对比

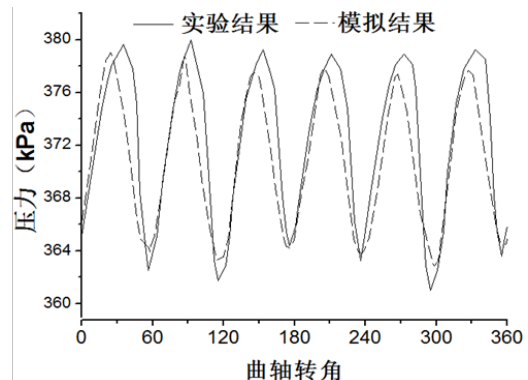


图 8 测点 3 处模拟计算与实验波形对比

结果表明，对往复式压缩机排气管路系统气流压力脉动的模拟计算结果，与实验测量得到的气流压力脉动规律基本一致。证明所建立的气流压力脉动计算模型正确。

### 3 推广应用

- ✓ 中国石油化工股份有限公司北京燕山分公司高科公司“二高压装置压缩机振动分析项目”，解决了六级缓冲罐底脚螺栓疲劳断裂问题。
- ✓ 中国石油化工股份有限公司北京燕山分公司“化工一厂乙二醇装置 C110 压缩机管线应力分析及支吊架修复”项目。
- ✓ 中国石油化工股份有限公司北京燕山分公司东方石油化工有限公司有机化工厂项目“乙烯第一、第二增压机管线减振技术开发及其实施”项目，改造后增压机管道振动烈度由最大值 21mm/s 将至 4.0mm/s。

### 4 对接联系

联系人：张卫义（机械工程学院副教授）

邮 箱：zhangweiyi@bipt.edu.cn