

# 活塞式压缩机 气流脉动与 管道振动

党锡洪 陈守五 主编

OSHISHI YASUT  
LIUMAI DONG YU  
ANDAO ZHENDONG

西安交通大学出版社

TH457

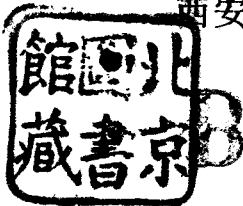
6

3

# 活塞式压缩机 气流脉动与管道振动

党锡洪 陈守五 主编

西安交通大学出版社



233771

## 内 容 简 介

本书叙述活塞式压缩机装置中气流脉动和管道振动的原理、计算和测试方法,分析气流脉动和管道振动对压缩机工作的影响,提出消除脉动和振动的措施。书中附有应用实例。

本书可作为活塞式压缩机及其装置的设计、研究以及操作维修人员,高等学校有关专业师生参考书。

## 活 塞 式 压 缩 机 气 流 脉 动 与 管 道 振 动

党锡洪 陈守五 主编

责任编辑 杨绍侃

\*

西安交通大学出版社出版

西安咸宁路 28 号

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西新华书店发行·各地新华书店经售

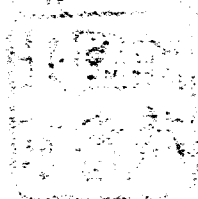
\*

开本: 787×1092 1/32 印张: 11.6875 字数: 234 千字

1984 年 8 月第一版 1984 年 8 月第一次印刷

印数: 1—60000

统一书号: 15340·009 定价: 2.42 元



## 前 言

无论是空气压缩机，或是各类流程用压缩机的气流脉动和管道振动，均妨碍正常生产活动。过大的气流脉动引起压缩机功率消耗的增加，气阀工作可靠性下降以及造成管道及其附件的振动。为此，西安交通大学于一九七四年成立气流脉动与管道振动研究组，对这方面的问题（包括气流脉动和管道振动的理论、计算、测试以及消除方法等）进行了研究，并深入现场解决这类问题。经过若干年的工作，建立了气流脉动和管道振动有关的计算程序，并为一些新设计的活塞压缩机装置和已在运行的装置进行了计算，针对不同特点的运行装置，提出了各种消除气流脉动和管道振动的措施，并取得令人满意的效果。

本书就是在上述背景下撰写的。希望能较系统地总结十年来的工作；为国内压缩机行业的技术人员、化工设计人员以及高等学校有关专业的师生提供一本有用的书籍，同时也希望管道的按装、操作和维修人员从本书的若干现场消振实例中得到有益的启示。

本书共分十一章，党锡洪、陈守五两位同志主编。其中第七章由夏永源撰写；第六章由孙嗣莹撰写；第八～十章由徐稼轩撰写。其他章节均由党锡洪、陈守五撰写，最后由陈克明、杨绍侃对全书进行了审阅。

国内外对气流脉动和管道振动的研究尽管已取得相当多

的成果，但这项工作并没有结束。目前，正为进一步弄清其机理和建立更精确的计算模型，选择更合适的计算方法而继续努力。

限于作者理论水平和实践经验，书中必然存在不少缺点甚至错误，衷心盼望读者提出宝贵意见，以便进一步修改。

党锡洪 陈守五

一九八四年五月于西安交通大学

## 主要符号表

### 符 号 量 的 名 称

- $\alpha$  —— 对应于平均温度时的声速；相对余隙容积  
 $\bar{\alpha}_i$  —— 介质的瞬时声速  
 $\alpha_0$  —— 参考声速  
 $\alpha_A$  —— 度熵声速  
 $a_n, b_n, a_m, b_m, A_n, B_n$  —— 富氏分析系数  
 $a_i, b_i, c_i, a'_i, b'_i, c'_i, e_i, f_i, g_i, e'_i, f'_i, g'_i$   
     —— 转移系数法第  $i$  点上 12 个实系数  
 $A$  —— 无因次声速；管壁的截面积  
 $A^*, B^*$  —— 复数常数  
 $A_i^*$  —— 分支点上沿分支之压力波的复数振幅  
 $A_1^*, B_1^*, B_2^*$  —— 分别为主管道上入射波，反射波，透射  
     波复数振幅  
 $c$  —— 弹簧的柔性系数  
 $c_p$  —— 气体的定压比热  
 $c_v$  —— 气体的定容比热  
 $c_e$  —— 电容  
 $d$  —— 孔板内径  
 $D$  —— 管道内径  
 $e$  —— 比内能  
 $E$  —— 弹性模量；电源电压

$f$ ——固有频率(赫兹); 流体摩擦系数

$f_i$ ——第  $i$  阶固有频率

$f_{ex}$ ——激发频率(赫兹)

$F$ ——激发力

$g$ ——重力加速度

$G$ ——剪切弹性模量

$h$ —— $\pi$  型滤波器中间管长

$I$ ——截面惯性矩

$j$ ——虚数单位

$J_x, J_y, J_z$ ——截面对  $x, y, z$  各轴之惯性矩

$J_0$ ——圆形截面对圆心的极惯性矩

$k$ ——绝热指数

$K$ ——波常数( $K = \frac{\omega}{c}$ ); 弹簧刚性系数

$k_i$ ——第  $i$  阶固有刚度

$[K]$ ——总刚度矩阵

$[K_e]$ ——单元刚度矩阵

$l$ ——管长; 连杆长度

$L_e$ ——电感

$L_0$ ——参考长度

$m$ ——均质管或梁的总质量; 激发谐量的阶次

$m_i$ ——第  $i$  阶的固有质量

$m_{ef}$ ——等效质量

$M$ ——集中质量

$M_P$ ——等截面管的转移矩阵  
 $M_R$ ——体积元件的转移矩阵  
 $M_J$ ——汇流点的转移矩阵  
 $M_L$ ——迴路的转移矩阵  
 $[M]$ ——总质量矩阵,有脚注  $e$  者为单元质量矩阵  
 $n, n_1$ ——多变指数  
 $N$ ——曲轴转速; 主谐量的阶次  
 $N_d$ ——实际指示功率,  $N_{ed}$  计算指示功率  
 $\{N_e\}$ ——结点力列向量  
 $o$ ——坐标原点  
 $\bar{p}_t$ ——瞬时压力  
 $\bar{p}_{\max}, \bar{p}_{\min}$ ——最大, 最小压力  
 $p_t$ ——瞬时脉动压力  
 $p_o$ ——平均压力, 参考压力  
 $p^*$ ——脉动压力复数振幅  
 $p_i^*$ ——脉动压力复数谐和量  
 $p$ ——脉动压力大小  
 $p_1, p_2$ ——管道进口, 出口脉动压力大小  
 $p_s, p_d$ ——吸、排气压力(绝对)  
 $p_i^*, p_r^*, p_t^*$ ——分别为入射, 反射, 透射脉动压力  
 $P$ ——无因次压力  
 $q$ ——单位质量单位时间的传热量; 电量  
 $r$ ——管道通流半径; 曲柄半径  
 $r_s$ ——气阀开启时间与曲轴旋转一周所需时间之比



$R$ ——气体常数；无因次密度；阻尼系数；阻尼

$R_e$ ——电阻

$s$ ——活塞行程；比熵

$S$ ——管道通流面积

$t$ ——温度 $^{\circ}\text{C}$

$[t]$ ——变换矩阵

$T$ ——系统动能

$T_i$ ——瞬时脉动温度

$T_0$ ——平均绝对温度 $K^{\circ}$

$\bar{T}_i$ ——瞬时绝对温度

$u$ ——位移

$\{u\}_i$ ——第 $i$ 阶的位移；固有振型

$u_i$ ——第 $i$ 结点沿 $x$ 方向的位移

$\bar{u}_i$ ——瞬时速度

$u_i$ ——瞬时脉动速度

$u_0$ ——平均速度

$u^*$ ——脉动速度复数振幅

$u_i^*$ ——脉动速度复数谐和量

$u$ ——脉动速度大小

$u_1, u_2$ ——管道进口，出口脉动速度的大小

$\bar{U}_i$ ——瞬时容积速度

$U_i$ ——脉动容积速度

$U^*$ ——脉动容积速度复数振幅

$U_0$ ——平均容积速度

$U_1^*$ ,  $U_2^*$ ,  $U_3^*$ ——分别为入射容积脉动速度, 反射容积脉动速度, 透射容积脉动速度

$U_1^*$ ——分支点处分支上的脉动容积速度

$u_i$ ——瞬时速度

$[U]$ ——模态矩阵

$v$ ——单元内任意点的速度

$v_i$ ——第  $i$  结点沿  $y$  方向的位移

$V$ ——容积; 单元体积; 总势能

$V_c$ ——余隙容积

$V_D$ ——气缸行程容积

$V_s$ ——单元势能

$V_T$ ——缓冲器容积

$V_s$ ——每行程的吸入气体容积

$w_i$ ——第  $i$  结点沿  $z$  方向的位移

$x$ ——坐标; 从上死点算起的活塞位移

$x/s$  或  $x_1/s$ ——活塞相对位置

$X$ ——无因次坐标; 声抗

$y_i$ ——主坐标,  $\{y\}$  主坐标列向量

$\{x\}$ ——位移向量

$\{X\}$ ——振幅列向量

$Z^*$ ——无因次时间; 阻抗

$Z_T^*$ ——分支处无限长后继主管道进口阻抗

$Z_b^*$ ——分支管进口阻抗

$\alpha$ ——黎曼变量; 曲柄转角

$\alpha_r$ ——透射系数                       $\alpha_r$ ——反射系数  
 $\alpha_n$ ——富氏谐量分析中第  $n$  阶谐量的相位角  
 $\beta$ ——黎曼变量; 连杆与气缸中心线的夹角  
 $\gamma$ ——脉动振幅指数常数  
 $\delta$ ——压力不均匀度  
 $\delta_{st}$ ——静变形量  
 $[\delta]$ ——许用压力不均匀度  
 $\{\delta_n\}$ ——结点位移向量  
 $s$ ——压力比                       $\theta$ ——转角  
 $\lambda$ ——波长                       $\lambda_L$ ——曲柄与连杆比  
 $\mu$ ——物体在介质中的阻尼系数  
 $\bar{\xi}_t$ ——质量流量     $\xi_t$  脉动质量流量  
 $\xi^*$ ——脉动质量流量复数振幅  
 $\bar{\xi}$ ——平均排气量(质量),  $\xi$  计算排气量  
 $\rho_t$ ——脉动密度  
 $\rho_0$ ——平均密度  
 $\bar{\rho}_t$ ——瞬时密度  
 $\tau_w$ ——管壁摩擦切应力  
 $\delta_v$ ——流体微团体积  
 $\omega$ ——圆频率(1/秒)  
 $\omega_{ex}$ ——激发圆频率(1/秒)  
 $\{\phi\}_i$ ——第  $i$  阶的正规化振型  
 $[\phi]$ ——正规化的模态矩阵  
 $\zeta_k$ ——第  $k$  阶模态阻尼比

# 目 录

## 第一章 概论

- 一、气流脉动和管道振动造成的危害……………( 1 )
- 二、振源分析……………( 2 )
- 三、研究气流脉动与管道振动的任务和现状…( 2 )

## 第二章 平面波动理论

- 一、平面波动方程……………( 7 )
- 二、等截面管的转移矩阵……………( 17 )
- 三、声、力、电的模拟概念……………( 20 )
- 四、线性阻尼情况下的平面波动方程……………( 24 )
- 五、滤波概念、阻抗、反射系数与透射系数…( 29 )

## 第三章 一维非定常气流的基本方程

- 一、一维非定常气流的守恒型方程组……………( 33 )
- 二、一维非定常守恒型方程组的数值解法  
——两步法……………( 40 )
- 三、匀熵修正理论……………( 45 )
- 四、匀熵修正理论特征线法的插值公式……………( 49 )
- 五、一维非定常气流的特征型方程组……………( 51 )

## 第四章 气柱固有频率与共振管长

- 一、气柱共振现象……………( 57 )
- 二、简单管道共振管长的计算……………( 61 )
- 三、复杂管道系统气柱固有频率的计算……………( 65 )
- 四、气柱固有频率的计算机程序框图及算例…( 77 )
- 五、试验研究……………( 79 )

## 第五章 压力脉动分析

- 一、压力不均匀度……………( 81 )
- 二、气阀的开启角和关闭角 多列压缩机  
曲柄的滞后角……………( 83 )
- 三、吸、排气过程的谐量分析 激发主频率…( 87 )
- 四、简单管道内压力脉动的计算……………( 90 )
- 五、脉动压力计算的转移系数法……………( 96 )
- 六、刚度矩阵法……………( 113 )
- 七、一维非定常气流方程组的数值解方法……( 125 )
- 八、管道系统脉动分析的模拟方法……………( 140 )

## 第六章 气流脉动对活塞压缩机经济性及可靠性的影响

- 一、气流脉动对压缩机排气量的影响……………( 144 )
- 二、气流脉动对压缩机功率消耗的影响……………( 150 )
- 三、气流脉动对气阀工作的影响……………( 159 )

## 第七章 消减气流脉动的方法

- 一、压力不均匀度及振幅的许用值……………( 165 )
- 二、气流脉动消减效果的评价方法……………( 168 )
- 三、气缸对管道的激发作用……………( 172 )
- 四、调整气柱固有频率避开气柱共振……………( 175 )
- 五、缓冲器……………( 179 )
- 六、气流脉动衰减器……………( 186 )
- 七、孔板……………( 198 )
- 八、集管器……………( 203 )
- 九、干涉消振器……………( 204 )
- 十、现场消振实例……………( 206 )

## 第八章 简单管系的结构固有频率

- 一、基本概念……………( 212 )

|                                           |         |
|-------------------------------------------|---------|
| 二、单跨管道的固有频率·····                          | ( 215 ) |
| 三、悬臂直角弯管的固有频率·····                        | ( 221 ) |
| 四、两端固定的弯管之固有频率·····                       | ( 222 ) |
| <b>第九章 复杂管系的有限元分析</b>                     |         |
| 一、有限单元法的主要步骤·····                         | ( 228 ) |
| 二、单元的划分·····                              | ( 230 ) |
| 三、单元刚度矩阵 $[K_e]$ 和单元质量矩阵 $[M_e]$<br>····· | ( 232 ) |
| 四、坐标变换·····                               | ( 264 ) |
| 五、管系的总刚度矩阵、总质量矩阵和<br>运动微分方程·····          | ( 277 ) |
| <b>第十章 复杂管系的结构固有频率和动力响应计算</b>             |         |
| 一、复杂管系固有频率的计算·····                        | ( 284 ) |
| 二、复杂管系的结构动力响应计算·····                      | ( 314 ) |
| 三、各阶模态阻尼比的半功率点测定法·····                    | ( 322 ) |
| 四、管道振动的消减·····                            | ( 328 ) |
| 五、实例·····                                 | ( 331 ) |
| <b>第十一章 压力脉动和管道振动的测量</b>                  |         |
| 一、对压力脉动测量装置的要求·····                       | ( 338 ) |
| 二、压力脉动测量中的主要问题·····                       | ( 341 ) |
| 三、差压传感器简介·····                            | ( 342 ) |
| 四、桥臂电阻平衡法·····                            | ( 343 ) |
| 五、管道结构振动及固有频率的测量·····                     | ( 348 ) |
| <b>附录 参考文献</b> ·····                      | ( 353 ) |

# 第一章 概 论

## 一、气流脉动和管道振动造成的危害

如果活塞压缩机装置管道内气体的流动是定常的，则管道内指定点气流的压力和速度（以及密度）是不随时间变化的。但是，由于活塞压缩机吸、排气的间歇性，使气流的压力和速度呈周期性的变化。这种现象，称为气流脉动。

气流脉动会造成许多危害：降低压缩机容积效率；引起额外的功率消耗；气阀工况变坏；控制仪表失灵；引起管道振动等。

管道振动对安全生产造成很大的威胁。强烈的管道振动会使管路附件，特别是管道的连接部位和管道与附件的连接部位等处发生松动和破裂，轻则造成泄漏，重则由破裂而引起爆炸，造成严重事故。

在国内，由于管道振动而造成的泄漏和爆炸事故，迭有发生。例如某厂管道因振动疲劳，在使用中突然断裂，大量气体泄入室内，冲破照明灯，引起空间爆炸，被迫停产；某煤矿空气压缩机站管道振动剧烈，与之相连的储气罐爆炸，碎片飞出数十米，砖墙被气浪推倒；某厂 4D12—55/220 型

二氧化碳压缩机的四级缓冲器进口管及四级气缸出口管经常振裂，最短的只能运转 36 小时，最长的也不过 360 小时，在一九七八年八月份至十月份三个月中就出故障十六次，成为尿素正常生产的严重障碍。一九八二年八月，某化学公司有机合成厂因放空管振裂，泄出乙烯气，立即引起大火，烧化和烧垮了厂房屋顶，损坏了设备和管道，酿成重大事故。当然，不能把泄漏和破裂事故一概归因于振动。

## 二、振源分析

引起压缩机机组和管路振动的原因通常有二：一是由于运动机构的动力平衡性差或基础设计不当而引起；另一由气流脉动引起。

实践表明：生产中遇到的压缩机装置振动绝大多数是气流脉动引起的。气流脉动激发管道作机械振动。管道振动反过来又会引起机组的振动。所以，要消除管道振动，首要的问题是消除气流脉动。

## 三、研究气流脉动与管道振动的任务和现状

由气流脉动引起的管道振动的问题从两方面来解决：一是合理地设计管系；二是现场采取适当的消振措施。前者要求设计出气流脉动和管道振动值都在容许范围内运转平稳的管道。后者则是对于已经存在有较大气流脉动和振动的管



道，采取适当的消振措施，达到保证安全生产的目的。

管系设计问题，就是对设计中的管道进行气体动力特性（包括气柱固有频率，压力脉动幅度）和管道结构动力特性（结构固有频率，振幅，应力等）的计算，并对各种不同配管方案进行核算，选择压力脉动和管道机械振动都符合要求的管系。这样的管系在运行中是平稳可靠的。

对于已经发生振动的管道，可以根据不同情况，分别采取下列措施来消除或缓和：设置缓冲器或调整缓冲器在管系中的位置；在管道中的特定位置设置阻力元件——孔板；改变管道结构尺寸或布置等；由于管道结构发生共振而引起的振动，可以采取添加支承和改变支承方式来消除。

研究由气流脉动引起的管道振动时，将遇到两个同时存在的振动系统。一是气柱振动系统。管路内所充满的气体，称为气柱。因为气体可以压缩、膨胀，所以气柱本身是一个具有连续质量的弹性振动系统。这个系统，受到一定的激发之后，就会发生振动。压缩机气缸的周期性排气与吸气，就是对气柱的激发（或称干扰）。气柱振动的结果是管道内的压力发生脉动。另一是机械振动系统，由管路（包括管道本身、管道附件和支架等）结构系统构成。只要有激发力作用于这个系统上，它就会作出机械振动的响应。压力脉动作用在管路的转弯处或截面变化处的不平衡力，是激起管道作机械振动的激发力。

通常按平面波动理论来研究气柱的动力特性，据此计算气柱的固有频率以及管系内各点的压力脉动值等。这里用到