

压缩机簧片阀的 数学模拟与设计

吴丹青 丛敬同 著

机械工业出版社

压缩机簧片阀的数学 模拟与设计



机械工业出版社

(京) 新登字054号

压缩机簧片阀广泛应用于微型空气压缩机和小型制冷压缩机, 量大面广。本书系统地介绍了簧片阀的基本数学模型, 分别用振型叠加法、有限元法、当量矩形板模型和卷绕模型求解; 介绍簧片阀流量系数、推力系数、阀片刚度系数和固有振型、固有频率的实验装置和实验方法; 介绍压缩机簧片阀新的工程设计方法及样机试验的计算机数据采集、处理系统。全书内容丰富, 既有一定理论水平, 更具有工程推广的应用价值。

本书可供压缩机、制冷及化工机械等专业的工程技术人员参考, 也可作为高等院校相关专业的研究生、本科生的教科书或教学参考书。

压缩机簧片阀的数学模拟与设计

吴丹青 丛敬同 著

*

责任编辑: 蒋有彩 版式设计: 胡金瑛

封面设计: 方 芬 责任校对: 熊天荣

责任印制: 路 琳

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码: 100037

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $7^{3/4}$ ·字数 166 千字

1993年2月北京第1版·1993年2月北京第1次印刷

印数 0,001—2,100·定价: 7.40元

*

ISBN 7-111-03490-2/TB·173

前 言

压缩机簧片阀是指条状、舌簧状、圆环形和马蹄状的柔性自弹阀片组成的气阀。它广泛应用于微型空气压缩机和小型制冷压缩机，量大面广。特别是在冰箱、空调器等家用电器飞跃发展的当今时代，希望了解和学习簧片阀的理论与设计知识的人员越来越多，为了满足这一社会需要，根据我们近十年来从事压缩机簧片阀的理论与实验研究的成果，搜集到的这方面重要资料，撰写成“压缩机簧片阀的数学模拟与设计”这本专著，奉献给压缩机、制冷机和化工机械的工程技术人员，以期促进压缩机簧片阀的研究、技术开发的发展。

本书系统地介绍了簧片阀的基本数学模型，分别用振型叠加法、有限元法、当量矩形板模型和卷绕模型求解；介绍簧片阀流量系数、推力系数、阀片刚性系数和固有振型、固有频率的实验装置和实验方法；介绍压缩机簧片阀新的工程设计方法以及样机试验的计算机数据采集、处理系统。全书内容丰富，既有一定理论水平，更具有工程推广的应用价值。

本书一共七章，丛敬同撰写第一章的第四节、第三、四章，附录；吴丹青撰写绪论，第一章的第一、二、三、五节及第二、五、六、七章。

本书由缪道平教授进行了认真、仔细的主审，提出了许多建设性的宝贵意见，在此表示衷心的感谢。吴兆祯高级工

43045/06

程师对本书稿的抄写、描图等作了大量工作，一并表示谢意。

基于我们水平有限，书中难免有缺点或错误。敬请读者批评指正。

著者

1992 年 4 月于西安

符 号 表

x	活塞位移
l	连杆长度
r	曲柄半径; 滑片式转子半径; 滚动活塞半径
θ	曲柄转角; 滑片转角; 滚动活塞转角
$\lambda = \frac{r}{l}$	曲柄旋转半径与连杆长度比
ω	旋转角速度
c, c_m	活塞运动瞬时速度及平均速度
V_0	气缸余隙容积
F_p	活塞面积
V	气缸瞬时工作容积
V_h	气缸行程容积
$\varepsilon = \frac{V_0}{V_h}$	气缸相对余隙容积
e	滑片式转子偏心距; 滚动活塞偏心距
R	滑片式压缩机气缸半径; 滚动活塞式压缩机气缸半径
$\varepsilon = \frac{e}{R}$	滑片式转子相对偏心距
$V(\theta)$	转角 θ 时滑片式气缸工作容积
H	滑片式转子轴向高度; 滚动转子轴向高度
V_1	滑片式、滚动活塞式吸气腔部分工作容积
V_2	滑片式、滚动活塞式压缩腔部分工作容积
c_{RC}	滚动活塞气缸内表面与转子之间间隙
r_K	滚动活塞压缩机滑板下端弧形半径

b	滚动活塞压缩机滑板宽度 (第一章), 簧片 阀片宽度
$\dot{m}_v$	通过气阀的瞬时质量流量变化率
$\dot{m}$	气缸内瞬时质量流量变化率
$\dot{m}_{v, \text{吸}}$	通过吸气阀的瞬时质量流量变化率
$\dot{m}_{v, \text{排}}$	通过排气阀的瞬时质量流量变化率
n	多变过程指数; 压缩机转速 (第六章)
p_0, T_0, ρ_0	初始状态压力、温度、密度
p, T, ρ	气缸内瞬时压力、温度、密度
p_s, p_d	进、排气腔的名义压力
a_v	气阀的流量系数
A_v	气阀阀隙通道面积
K	工质的绝热指数
$w(x, y, t)$	弹性薄板 (簧片阀) 的挠度 (位移) 函数
$P(x, y, t)$	阀片单位面积上所受外载荷
C	阀片的阻尼系数
E	阀片材料的弹性模量
μ	材料的泊桑比
$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$	阀片的抗弯刚度
G	阀片材料的剪切弹性模量
I	阀片横截面惯性矩
$\bar{m}$	阀片单位面积的质量
$\delta, \delta_s, \delta_d$	分别表示阀片厚度; 进气阀片和排气阀片厚度
h_s, h_e	阀片的特征升程, 最大升程
h_i	阀片第 i 个阀孔处的平均升程
h_{cp}	阀片所有阀孔处升程的平均值即平均升程
$F_g(t)$	作用在阀片上气流顶推力, 与时间 $t(\theta)$

有关

$B(h)$	阀片有效作用力面积, 与升程 h 有关
$\Delta p(t)$	阀片前后压力差, 与时间 $t(\theta)$ 有关
A_{pi}	阀座第 i 个阀孔出口处迎风面积
A_p	阀片对应各阀孔迎风面积之和的等效面积
A_{ri}	阀片第 i 个微元表面积
A_r	阀片总的表面积
$\beta, \beta(h_0)$	阀片推力系数, 与特征升程 h_0 有关
$\phi_m(x, y)$	阀片的固有振型
$q_m(t)$	阀片的“振型参与因子”或称为“广义坐标”
ω_{m1}, ω_{m2}	分别表示进气、排气阀片第 m 阶的固有频率
ρ_r	阀片材料的质量密度
S	表示阀片的表面积
u_s, u_d	分别表示进、排气阀片固有振型阶数
k_s, k_d	分别表示进、排气阀片的微元数目
n_s, n_d	分别表示进、排气阀片对应阀孔的数目
M	阀隙气流平均马赫数
K_t, K_{ta}, K_{tb}	阀片在 t, t_a, t_b 时刻的动能
U_t, U_{ta}, U_{tb}	阀片在 t, t_a, t_b 时刻的形变势能
$A _{t_a}^t, A _{t_b}^t$	气体推力在 t_a (或 t_b) 至 t 这段时间内所做的功
ΔK_{tb}	在 t_b 时刻, 阀片与升程限制器相碰撞所损失的动能
δ	节点位移 (第三章), 阀片厚度
$\{R\}^e$	有限单元的结点力列阵, 上标“ e ”表示单元, 下同
$[K]^e$	单元刚度矩阵
$\{\delta\}^e$	单元的结点位移列阵
$\{Q\}$	整体结构的结点载荷列阵

$[K]$	整体刚度矩阵
$\{\delta\}$	整体结构的结点位移列阵
R_{12}	具有 12 个自由度数的矩形单元
T_9	具有 9 个自由度数的三角形单元
$\{\delta^*\}^e$	单元结点虚位移列阵
$(\{\delta^*\}^e)^T$	单元结点虚位移列阵的转置矩阵, 上标“T”表示转置
$\{M\}_{3 \times 1}$	单元的内力 (弯矩和扭矩) 列阵
$\{Q\}_P^e$	单元内任一点法向集中力 P 的等效结点载荷列阵
$\{Q\}_q^e, \{Q\}^e$	单元内法向分布面力 q 的等效结点载荷列阵
δU^*	单元内力所作的虚功
$(\delta W^*)_1, (\delta W^*)_2,$ $(\delta W^*)_3$	单元所受气体力、惯性力、阻尼力所作虚功
$[C]^e$	单元的阻尼矩阵
$[M]^e$	单元质量矩阵
$\omega_i^2, \{\phi_i\}$	特征值及特征矢量, 合称为特征对, 特征矢量又称为振型或模态
ω_i	第 i 阶固有频率
$[\Phi]$	特征矢量矩阵
F_s	作用于阀片特征升程 h_0 处的阀片弹性力
K_0	单位宽度阀片的刚性系数
K_1, K_2	已有的 (模型) 阀片和新设计阀片的刚性系数
F_s	阀片弹簧力
c_0	阀隙中气流瞬时速度
v_s	阀片当量撞击速度
μ, μ_s, μ_d	气阀弹簧力设计准则和进、排气阀弹簧力设计准则

目 录

绪论	1
第一章 簧片阀的基本数学模型	11
第一节 概述	11
第二节 压缩机级的工作过程	13
第三节 簧片阀的流动微分方程式	26
第四节 薄板理论基础及簧片阀阀片的运动微分方程式	29
第五节 作用在阀片上的气流推力	47
第二章 薄板模型的振型叠加法求解	51
第一节 用振型叠加法求解时的阀片运动微分方程式	51
第二节 簧片阀数学模型的微分方程组	56
第三节 模型的数值解	59
第四节 模拟程序的设计	68
第三章 薄板模型的有限元解法	70
第一节 概述	70
第二节 选择位移函数	74
第三节 单元刚度矩阵	86
第四节 整体刚度方程	90
第五节 等参数单元	101
第六节 有限元法中的阀片运动微分方程式	109
第七节 阀片的固有动力特性分析	118
第四章 当量矩形板模型和卷绕模型	137
第一节 当量矩形板模型	137
第二节 卷绕模型	146

第五章	簧片阀组件的试验	154
第一节	有效通流面积与升程的函数关系	154
第二节	簧片阀有效通流面积和流量系数的测量	159
第三节	簧片阀阀片刚性系数与应变量的测量	167
第四节	簧片阀有效作用力面积和推力系数的测量	171
第五节	阀片固有振型和固有频率的测量	175
第六章	簧片阀的工程设计	181
第一节	概述	181
第二节	阀隙气流平均马赫数	182
第三节	簧片阀升程	186
第四节	阀片厚度的确定	193
第五节	簧片阀工程设计计算举例	193
第七章	样机试验的自动测试系统	207
第一节	概述	207
第二节	自动测试系统	209
第三节	压缩机动态参数的自动测试系统举例	211
附录		219
附录 A	R_{12} 单元和 T_9 单元的刚度矩阵显式	219
附录 B	R_{12} 单元和 T_9 单元的质量矩阵显式	225
附录 C	有限元法中两个常用公式的证明	228
参考文献		233

绪 论

活塞式压缩机广泛应用于机械、冶金、制冷、国防、化工等工业部门。用途广泛，品种繁多，因而保证其运转可靠性、提高经济性就至关重要。气阀是活塞式压缩机中的关键部件，又是易损坏的部件之一，它的好坏影响压缩机排气量和功率消耗以及运行可靠性。一个好的气阀既要有高的寿命，又要有高的效率。

气阀的效率问题，主要是指机器在正常运转时，产生的流动阻力损失。在设计较好的气阀中，流动阻力损失约为压缩机级指示功率的（4~8）%，而设计不好的气阀，其流动阻力损失可以高达指示功率的（15~20）%。减少流动阻力损失的主要方法，是增加气阀的有效通流面积，以降低气体流经气阀时的流速，因为流动阻力损失是和速度的平方成正比的。但是，增加有效通流面积，将受到机器结构和气阀寿命的限制。例如：升程不能太高，否则寿命显著下降。此外，在计算的有效通流面积较大情况下，有时因阀片启、闭不合理，使实际的通流面积小于计算值，造成附加的流动阻力损失。这一附加的阻力损失，有时甚至会达到惊人的程度。

为了保证气阀有高的寿命和效率，曾进行了大量的研究。发现气阀中各个零件损坏几率相差很大，易损坏的零件，主要是那些不断运动着的零件——阀片和弹簧。阀片在运动时，不断撞击升程限制器、阀座和弹簧，因此它们所受到的是撞击载荷。撞击载荷的大小与其运动规律有关。研究还发

现,气阀的流动阻力损失也受到阀片运动规律的影响。因此,国内外在研究气阀时,除了研究其材质、工艺等方面的原因外,着重开展了对气阀运动规律的理论研究和实验,取得了良好的结果。

气阀的结构如图0-1所示,主要由阀座、阀片、弹簧和升程限制器4个零件组成。

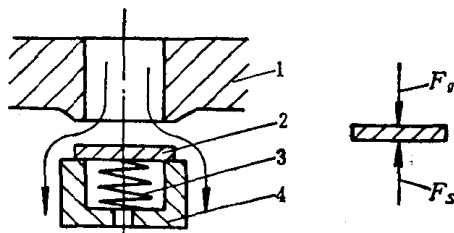


图0-1 气阀主要组成部分

1—阀座 2—阀片 3—弹簧

4—升程限制器

阀座：它具有能被阀片覆盖的气流通道，是与阀片一起闭锁进气（或排气）通道，并承受气缸内外压力差的零件。

阀片：它是交替地开启与关闭阀座通道的零件，通常制成片状，故称为阀片。

弹簧：是气阀关闭时推动阀片落向阀座的零件，并在阀片开启时，减少阀片撞击升程限制器。对于簧片阀，阀片本身具有弹性，并起着一定的弹簧作用，故有时两者合而为一。

升程限制器：是限制阀片的升起高度，并往往作为承座弹簧的零件。

按阀片的结构型式，气阀可区分为环状阀、网状阀、簧片阀、碟阀、直流阀等。环状阀和网状阀主要用于大、中型压缩机上，阀片形状为环形或网状形，阀片厚度一般在1mm以上。运动中阀片变形很小，属于刚性阀片，有弹簧支承，构成单自由度的质量弹性系统，阀片的运动方程式比较简单。环状阀运动规律的理论研究和设计方法可参考文献〔3〕。

簧片阀广泛用于微型空压机（排气量小于 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ ）、小型制冷压缩机（制冷量小于 58 kW ）上，量大面广。簧片阀的阀片本身是柔性的启闭元件，具有弹性，可不另设弹簧，阀片厚度一般在 0.5 mm 以下。在运动中，阀片不是单自由度，而是无限多自由度的弹性系统。

图 0-2 为我国微型 $2\text{V}-0.6/7$ 型空气压缩机的进、排气簧片阀的结构图。

图 0-3 为两级中压微型空压机 $3\text{W}-0.75/14$ 型第一级进、排气簧片阀的结构图。气缸直径为 90 mm ，进气阀片两侧各带一个凸舌部的环形阀片。阀片开启后，凸舌部落入气缸上相应的凹槽内，限制簧片升起高度。环形阀片靠上下对称两侧翼定位，并利用其中的导槽插在气缸体上的两个圆柱销上滑动。排气阀片为圆弧工字形，中间靠螺钉定位。与图 0-2 簧片阀结构相比，它具有下列优点：在相同的气缸直径条件下，环形簧片阀可布置更多阀孔通道，使阀隙通道面积增加；可以适当选用较小升程，簧片悬臂长度缩小一半。这些都有利于提高簧片阀的寿命，降低噪声。采用这种簧片阀结构，排气腔被进气腔所包围。若气缸盖采用特殊皇冠形结构型式，可以减少排气对进气的加热，有利于提高压缩机的容积效率。

图 0-4 是缸径 50 mm 的全封闭制冷压缩机簧片阀及缸盖结构图。其中进、排气阀片形状见图 0-4 a、b。进气阀片为带两侧翼的环形、没有升程限制器，两侧翼为定位端。排气阀片为圆环形刚性阀片，其上有三片缓冲弹簧片（图 0-4 c），设有升程限制器。

图 0-5 是另一种带舌部环形簧片阀结构，也是使用在全封闭制冷压缩机中，其进、排气阀片在中心处用铆钉与阀

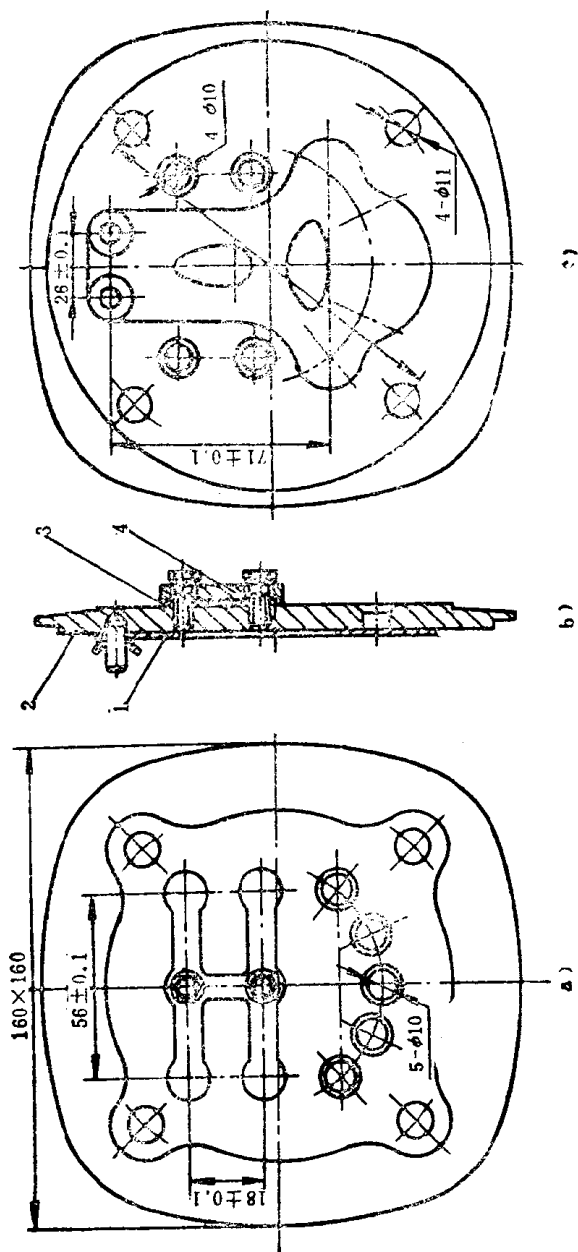


图0-2 2V-0.6/7 型空压机进、排气簧片阀

a) 缸盖侧视图 b) 主视图 c) 气缸侧视图

1—树叶状进气阀片 2—阀板 3—工字,形

排气阀片 4—排气升程限制器

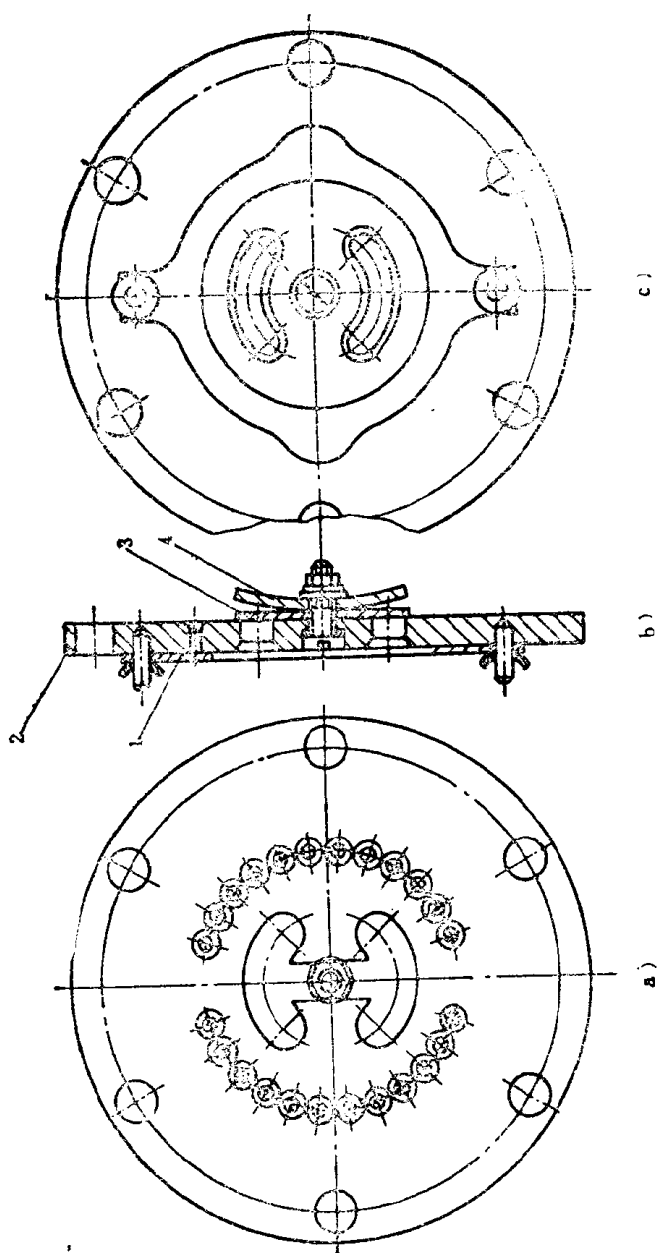


图0-3 3W-0.75/14型空压机进、排气簧片阀

a) 缸盖侧视图 b) 主视图 c) 气缸侧视图

1—环片进气阀片 2—阀板 3—圆弧
工字形排气阀片 4—升程限制器

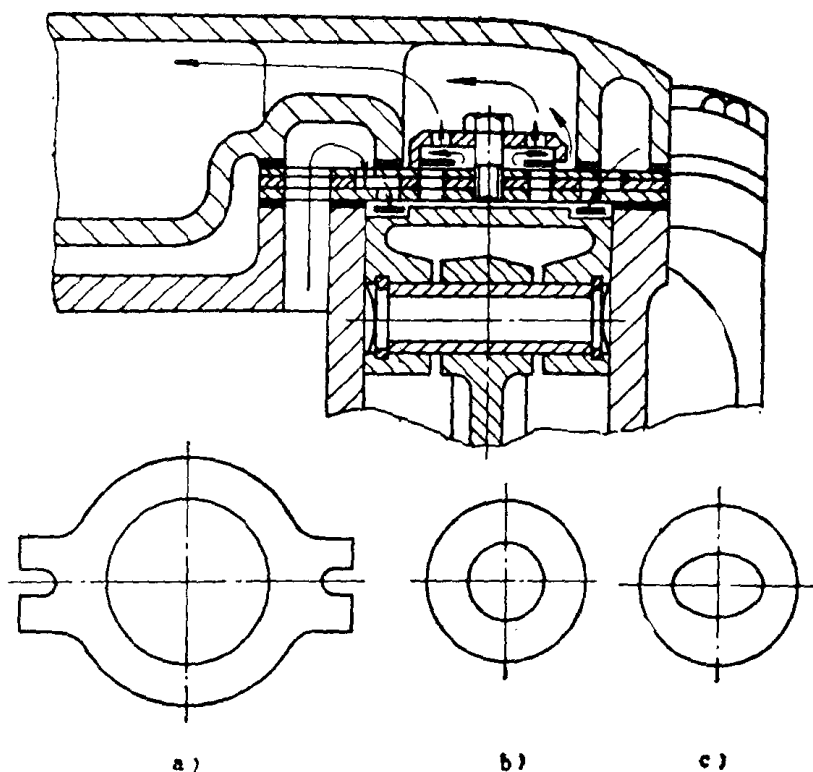


图0-4 2FV5Q型全封闭制冷压缩机的簧片阀结构

a) 进气阀片 b) 排气阀片 c) 缓冲弹簧片

板、排气阀升程限制器铆在一起。进气阀片升程受环形外圆上的凸舌和气缸壁上相应的凹槽深度所限制。

图0-6所示为我国中小型系列中3FW5B型半封闭制冷压缩机的进、排气簧片阀结构图。排气阀呈马蹄形，两端用螺钉5将缓冲弹簧片6、升程限制器3和阀片2一起固紧在阀板1上。排气通道为四个按弧形分布的小孔。进气阀片为一端固定，另一端自由的簧片。阀片用2个定位销钉与阀板定