

[美] A. 埃利·尼森费尔德 著

离心式压缩机

操作与控制原理

12



机械工业出版社

本书较系统、全面地阐述了各种型式压缩机的工作原理、结构特点；重点地探讨了离心式压缩机的结构、效率、喘振和特性；详细地介绍了压缩机系统的设备、仪器；结合控制学原理，深入地论述了压缩机控制系统中的变量、流量和反馈控制系统、压缩机系统的动力学模拟、压缩机控制系统的设计和执行程序。

本书可供从事离心式压缩机工作的科研、设计、教学人员以及石油、化工、冶金等使用单位的操作人员参考。

Centrifugal Compressors

Principles of Operation and Control

A. Eli Nisenfeld

• Instrument Society of America •

1982

离心式压缩机操作与控制原理

〔美〕A. 埃利·尼森费尔德 著

夏斌 等译

李超俊 校

责任编辑：沈红

封面设计：王伦

机械工业出版社出版（北京阜成门内大街25号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

中国农业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 787×1092 1/32·印张 6·字数 127 千字
1988年6月北京第一版·1988年6月北京第一次印刷
印数 0,001—4,001·定价：1.95 元

ISBN 7-111-00059-5/TH·13

译者的话

各种型式的压缩机在运转中都有操作与控制问题，而离心式压缩机则由于它固有的特点，在操作与控制方面比其它型式的压缩机更为复杂、难度更大。离心式压缩机广泛应用于石油、化工、冶金、食品等工业部门，故在操作与控制方面必须考虑各工艺流程的特点，它的操作与控制问题，一直为设计者与操作者所重视。

在一般的离心式压缩机著作中，主要述及压缩机本身的理论基础、结构、强度等，对于操作与控制涉及甚少，远不能满足实际工程需要，而控制学方面的著作，则主要述及控制数学等方面的问题，对工艺流程及各自的特点涉及很少，实用价值不大。《离心式压缩机操作与控制原理》一书，正是这两方面有机结合的专著，为从事离心式压缩机研究、设计与操作方面的技术人员所关注。

《离心式压缩机操作与控制原理》一书的作者A.埃利·尼森费尔德，是美国控制工程咨询公司主席，是控制工程学方面的权威人士，一直从事石油、化工、气体等工程方面高性能控制系统的设计，又任美国仪器协会专门著作编辑主任。他作为国际自动控制基金委员会主席，在组织大型工业技术性程序方面颇有影响。本书可视为作者在这方面的技术总结，不失为一部权威之作。作者将离心式压缩机的理论与控制学理论溶为一体，进而付诸工程实践，进行了系统、全面、详细的阐述，使之具有很高的实用价值，是从事离心式

压缩机研究、设计、教学人员的一本重要参考书。

本书由原机械工业部通用机械研究所夏斌（第二章、第六章、第九章、附录）、刘厚福（第三章、第四章、第十章）、张道兴（序言）、吴进发（第一章、第五章、第七章、第八章）等同志翻译，由夏斌同志进行了全书的统稿工作。西安交通大学李超俊同志对全书进行校订。由于我们水平有限，译文中难免有错误之处，请读者批评指正。

译 者

1986年6月

序 言

控制工程学是一门包括许多工程和科学专业环节的学科。但是几乎每部有关这一主题的书，只集中于论述一种学科，使读者仅限于一小部分从事控制工程的工程学界，从而降低了书的价值。特别是许多书，只论述控制理论和控制数学，偶尔才提到工艺过程。对于通晓工艺过程的工程师来说，如果他具有一定的从工艺过程转到控制理论的基础知识，这类书还是有一定价值的。

另一方面，大部分叙述工艺过程或机组工作原理如压缩过程的教科书，其重点均放在工作原理或流程设计上。在这类书中，对工艺流程控制只不过是作了些简单的议论。

本书把有关工艺流程方面的论述和有关控制原理、控制问题及控制实践的全面论述结合起来。一个缺乏机械工程或压缩机基础知识的控制工程工程师，将会读到有关压缩机理论，包括热力学、操作和设备方面的论述，从而了解压缩机原理，并把压缩气体理论扩充为全面的工艺流程控制理论。这种转化是全面的，使控制工程工程师能从他所熟悉的角度观察压缩机系统。

近来，懂得压缩机的工程师已发现有关控制的论述，实际上是有关压缩原理论述的必然扩展。压缩机控制是一个涉及改善操作方面十分活跃的领域。通过对压缩机整个论题及压缩机操作环境的全面探讨，本书将使越来越多的人，真正了解并能解决压缩机控制的问题。

本书一个重要的部分是论述模拟装置，并把它作为评价与设计压缩机系统和控制系统的手段。J.M. Eskes（专用模拟计算机系统协会的主席）所写的第九章便是这一主题的综述。

本书的出版使笔者感到非常高兴，因为笔者认为自己能解决曾使工业部门花费大量资金的工艺流程控制问题方面做出了一定贡献。

A. 埃利·尼森费尔德

目 录

译者的话

序言

第一章 压缩机的种类	1
一、工作原理	1
二、压缩机的型式	3
三、往复式压缩机	3
四、回转式压缩机	7
五、离心式压缩机	7
六、轴流式压缩机	10
七、根据使用条件选择压缩机	10
八、工艺流程问题	11
参考文献	12
第二章 离心式压缩机的特性	13
一、结构	13
二、效率	20
三、喘振	21
四、系统曲线	27
参考文献	33
第三章 压缩机系统中的设备	34
一、排气口到进气口的循环管线	34
二、循环气冷却器	35
三、进气分离罐	37
四、多级压缩机的循环气管线	37
五、逆止阀的位置	42
六、气体组份的改变	44
七、气体预冷器	47

八、中间冷却器.....	47
第四章 压缩机的仪器设备.....	49
一、润滑系统.....	49
二、润滑油保护系统.....	51
三、密封油系统.....	53
四、轴承温度监控.....	56
五、振动监控.....	57
六、其它的监控系统.....	57
七、汽轮机转速控制.....	58
参考文献.....	59
第五章 控制工艺过程用的压缩机仪器设备.....	60
一、流量测量.....	61
二、压力.....	63
三、压缩机的差压.....	65
四、气体温度.....	67
五、排气流量测量.....	68
六、循环气阀的动力学.....	69
参考文献.....	71
第六章 压缩机控制系统中的变量.....	72
一、控制变量.....	72
二、独立变量.....	75
三、调节变量.....	83
第七章 流量和反喘振控制系统.....	92
参考文献.....	112
第八章 复杂的压缩机系统.....	113
参考文献.....	122
第九章 压缩机系统的动力学模拟.....	124
一、模型执行的准备和初始化.....	125
二、动力学部分.....	125

三、执行过程.....	126
四、确定问题.....	127
五、模拟结果.....	127
六、反喘振控制系统分析.....	127
七、复杂性.....	129
八、模拟方法的益处.....	129
九、临界设计参数的测定.....	130
十、“宏观世界”实例.....	130
十一、并联机组间的交互作用.....	131
十二、过程的交互作用.....	131
十三、多米诺效应.....	132
第十章 压缩机控制系统的设计和执行程序.....	133
第一步，确定控制目标.....	133
第二步，调节变量与控制变量的配对问题.....	133
第三步，扰动分析.....	134
第四步，确定影响控制的流程约束.....	134
第五步，推导控制方程式.....	134
第六步，建立流程的动力学要求.....	135
第七步，操作者接口设计.....	135
第八步，设备选择.....	135
第九步，执行.....	136
第十步，操作人员培训.....	136
第十一步，启动和协调.....	136
第十二步，资料文件.....	136
结论.....	137
附录一 国际单位制和英制单位换算.....	138
附录二 热力学方程式.....	138
附录三 模拟方法.....	147
参考文献.....	171
附录四 特殊的控制系统.....	172

附录五 实例 173
附录六 术语汇编 176
参考文献 180

第一章 压缩机的种类

早在铁器时代之前，就需要输送气体。象任何流体一样，气体是从高压流向低压的。实际上所有需要气体运动的系统，必须有一个产生驱动力即高压的方法。这个把气体压力提高的设备就叫压缩机，韦氏词典定义压缩机是“加压或挤压的机器”。气体压力是通过对气体分子的压缩或挤压形成的。

人类最早使用的压缩机，是简单的手工操作的动物皮囊风箱。随着工业的发展，需要气体的压力越来越高，经常遇到处理有危险性和不易控制的气体，而需要气体的量也越来越大。时至今日，人们在设计新的、精密和高效的压缩机时，一直在设法满足这些要求。

一、工作原理

1. 减容压缩过程

所有压缩机都按两种基本原理中的一种工作。第一种原理是压缩机将一定容积的气体聚集在容器中，通过减少容器的容积以增加气体的压力。所产生的压力和初始容积与终了容积之比成正比，即

$$P_d = P_s \left(\frac{V_s}{V_d} \right) \quad (1-1)$$

式中 P_d ——排出压力；

P_s ——吸入压力；

V_d ——排出容积；

V_s ——吸入容积。

然后气体进入系统中。这个压缩循环步骤用符号表示在图1-1中。

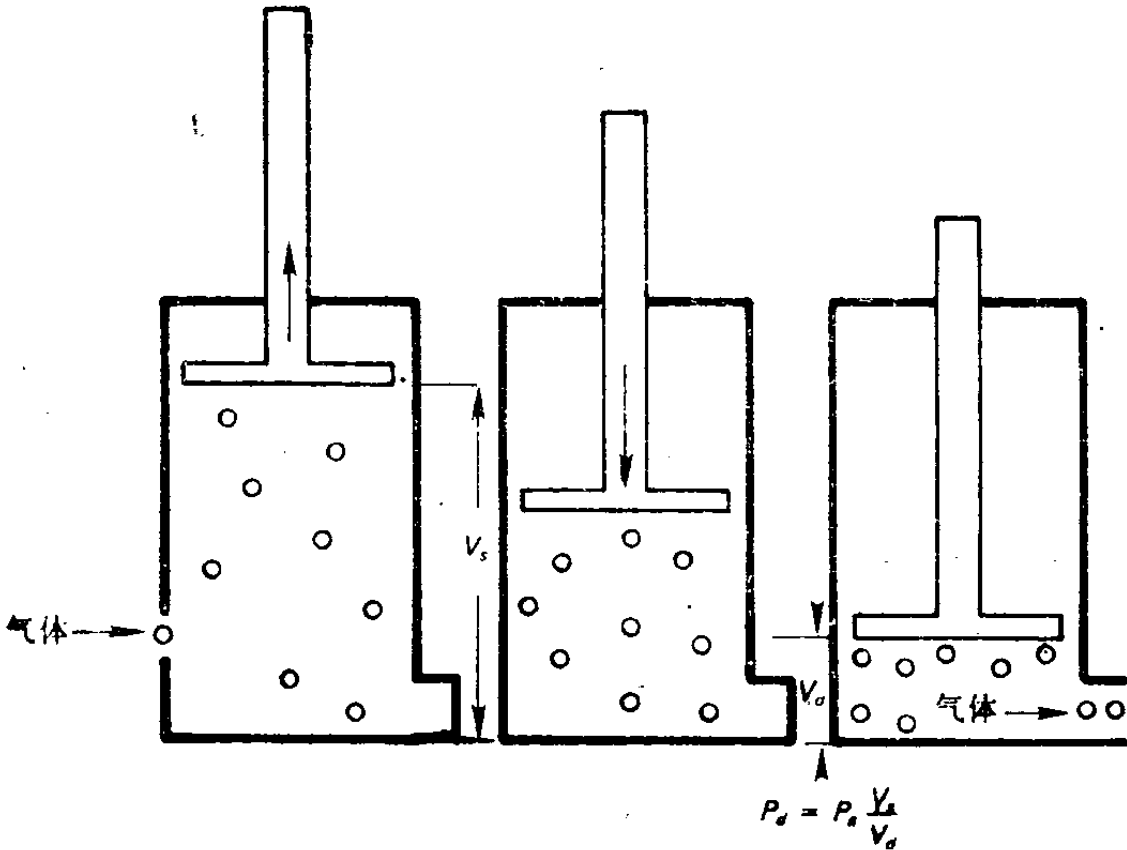


图1-1 一定质量的气体通过容积减小使压力提高

2. 加速流体压缩过程

压缩气体的第二种方法，是根据动能转换为势能的原
理，将流体加速到高速，然后降低速度，通过改变它的流
向，把它所具有的动能转换成势能。

这个从动能（速度）到势能（压力）的转换，可用伯努
利定理中的能量守恒定律来解释。这个定理是能量守恒定律
用于流体的一个特殊例子。

3. 伯努利定理

根据这个定理，流体所具有的能量是三种能量的总和；

高位（势）头是一个在基准点之上（或之下）高度的函数；速度头是线速度平方和重力常数 g_0 的函数；压头是对气体所做的功和比容的函数。伯努利定理表明，在一个状态点上，这些能量的总和等于另一个状态点上的能量和。这就是“能量守恒”的概念。

$$X_1 + \frac{u_1^2}{g_0} + P_1 V_1 = X_2 + \frac{u_2^2}{g_0} + P_2 V_2 \quad (1-2) \ominus$$

式中 $X_{1,2}$ ——高位头；

$u_{1,2}$ ——线速度；

$P_{1,2}$ ——压力；

$V_{1,2}$ ——比容。

二、压缩机的型式

压缩机有四种通用型式：往复式、回转式、离心式和轴流式压缩机。往复式和回转式压缩机，是按减容压缩方式工作的。离心式和轴流式压缩机，是根据把气体加速再减速，使动能转换成势能的原理工作的。本章其余部分将讨论这四种压缩机的工作原理和结构，以及用于指定使用场合下压缩机型式选择的准则。

三、往复式压缩机

往复式压缩机按下述方式工作：通过阀门、气缸吸入一定容积的气体，驱动活塞在气缸内运动以减少容积，并按公式 (1-3) 增加压力，然后在高压下排出气体。

⊖ 完整的伯努利公式有更多的项数，为了讨论方便，这里先把它们忽略掉。在以后的章节中将会看到，公式 (1-2) 所表示的理想状态还要加上损失项。

$$P_d = P_s \left[\left(\frac{V_s}{V_d} \right)^k \right] \quad (1-3)$$

式中 P_d ——排气压力；

P_s ——吸气压力；

V_s ——吸入容积；

V_d ——排气容积；

k ——定压比热与定容比热比。

每完成一次这种循环，就压缩出同样容积的气体。加快循环进行的速度就提高了气缸的排量。在最简单的情况下，活塞式压缩机的排量正比于活塞在气缸中运动的速度。定速运转时，往复式压缩机基本上是定排量的。第七章将讨论定速往复式压缩机改变排量的方法。图 1-2 所示为一台定速单级往复式压缩机的性能曲线。如果在理想状态下，压缩机部件又使用了高强度的材料，往复式压缩机单级压缩就能满足所有工况的要求。然而，根据公式 (1-4)，压缩气体时温度增加，这种温升对单级所能完成的压缩过程带来了很大的限制。在单级情况下可按下式计算：

$$T_d = T_s \left(\frac{V_s}{V_d} \right)^{k-1} \quad (1-4)$$

式中 T_d ——排气温度；

T_s ——吸气温度。

公式 (1-5) 表示绝热过程中压力和温度之间的关系。

$$P_d/P_s = (T_d/T_s)^{\frac{k}{k-1}} \quad (1-5)$$

由于 P_d/P_s 是已知的压缩比，由公式 (1-5) 就可求出排气温度。

$$T_d = T_s (P_d/P_s)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1-6)$$

V_p ——活塞容积排量。

理论容积效率 E_c 为：

$$E_c = 100 - (R^{\frac{1}{k}} / f - 1) C \quad (1-8)$$

式中 R ——压力比 ($R = P_d / P_s$)；

f ——可压缩性系数比，即 $f = Z_d / Z_s$ ；

C ——气缸余隙容积。

在给定气缸容积和压缩比情况下， k 值越高，容积效率就越高。

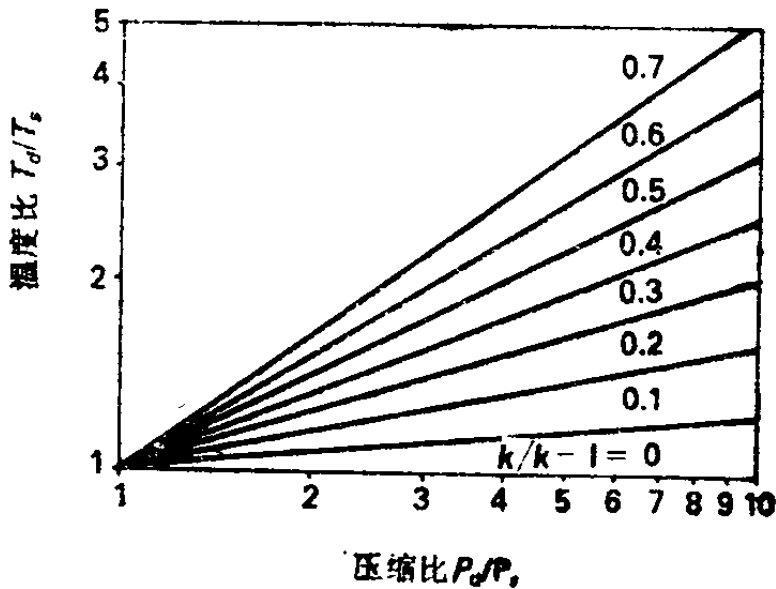


图1-3 在给定 $k/(k-1)$ 情况下，温度比(T_d/T_s)与压缩比(P_d/P_s)的变化关系

1. 往复式压缩机的结构

压缩机的气缸、驱动机构以及诸如中间冷却器、中间接管和中间冷却器水管等附属设备，都装在一个机架（或机架组）上。机架组根据速度限定值和负载能力来设计。大多数压缩机制造厂家，都有许多标准的机架来满足所有设备的应用范围。对许多往复式压缩机来说，机架的选择和压缩机系统的设计是一门相当严谨的学问。然而，用户的使用要求，

如工作能力，气体参数等的准确和全面性却是最根本的。

2. 脉动

根据定义就知道，往复式压缩机会把脉动传入工艺流程系统。此外，由于它的循环过程规律，造成在压缩机的吸气侧压力不足而排气侧压力过剩。这些问题可以用脉动过滤器或缓冲室来解决。根据系统设计和使用的情况，可以不采用脉动过滤器，然而，如果省去缓冲室，总会造成压力不足或压力过载的状况。脉动过滤器和缓冲室，通常由压缩机制造厂家设计并作为压缩机的一部分供给用户。

四、回转式压缩机

回转式压缩机，是靠二个转动部件间形成的空腔中，引入一定容积的气体来工作的。这些部件连续运转时，空腔容积减少，按照与往复式压缩机相同的公式增加气体的压力。

$$P_d = P_s (V_s / V_d) \quad (1-9)$$

最后，将转动部件依次配置好，就可以把气体排入气体接受器。这种形式的压缩机，尽管有许多值得注意的优点，而在工业上所使用的各种压缩机中，它却是用得最少的。它的优点是流量和压缩比变化范围大，转速低并且具有良好的维修性能；它最重要的优点还是可以压缩不干净的或腐蚀性的气体。

回转式压缩机有五种基本型式：螺旋螺杆式；轴向螺旋式；直叶片式；滑动叶片式；液环式。

每种型式几乎都有某种独特的用途。例如液环式回转压缩机，就是用来压缩氢气的。

五、离心式压缩机

离心式压缩机是先加速气体，然后把气体的速度能（动