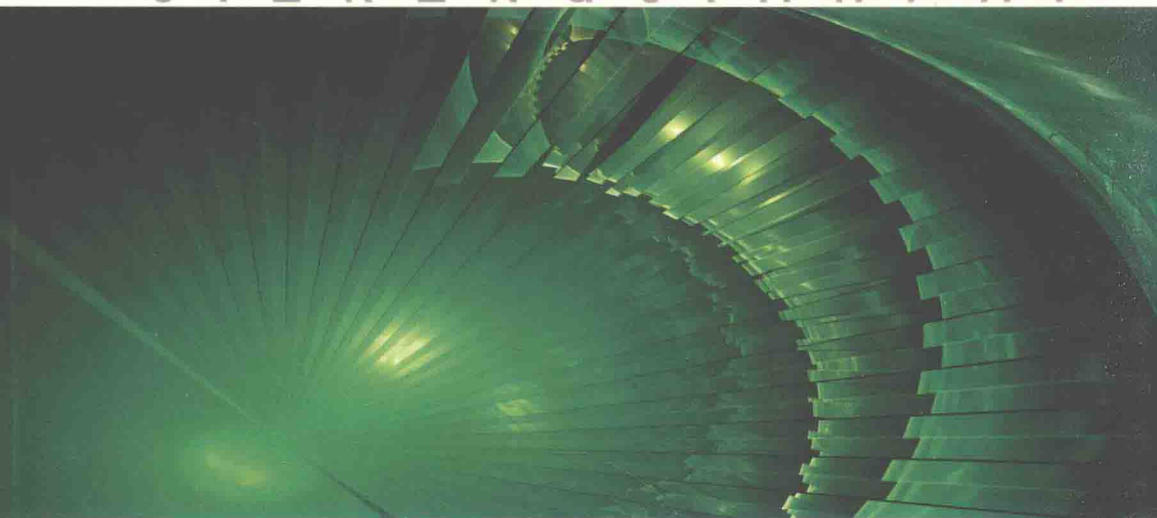




节能减排技术丛书

J I E N E N G J I A N P A I



压缩空气节能 增压技术

石岩 蔡茂林 许未晴 著

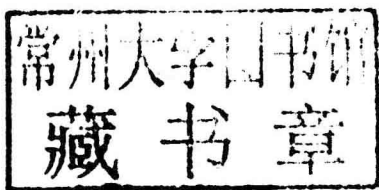


 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

节能减排技术丛书

压缩空气节能增压技术

石 岩 蔡茂林 许未晴 著



机械工业出版社

本书是由作者结合近年来的科研成果编写而成的,系统地介绍了压缩空气高效、大流量节能增压技术的实现问题。全书共分为6章。第1章介绍写作背景及国内外增压器技术现状;第2章介绍IPR增压器基本工作特性及EEU增压器方案设计;第3章介绍增压器数学建模、仿真与实验;第4章介绍EEU增压器工作特性的无因次化;第5章介绍EEU增压器的优化及样机优化设计;第6章介绍局部增压气动系统的优化;后记归纳了全书内容,并对未来的工作提出展望。

全书的主要特点在于提出了一套完整的压缩空气节能增压技术研究的方法,开发了一种高效、大流量的压缩空气节能增压技术。

本书可供从事气动系统领域工作的工程技术人员、研究人员阅读,也可供高等院校相关专业研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

压缩空气节能增压技术 / 石岩, 蔡茂林, 许未晴著. —北京: 机械工业出版社, 2016.11

(节能减排技术丛书)

ISBN 978-7-111-55395-3

I. ①压… II. ①石… ②蔡… ③许… III. ①压缩空气—节能—研究
IV. ①TH41 ②TK018

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第276500号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑: 张秀恩 责任编辑: 张秀恩

责任校对: 张薇 封面设计: 陈沛

责任印制: 李飞

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2017年3月第1版第1次印刷

169mm×239mm·9.5印张·134千字

0001—1500册

标准书号: ISBN 978-7-111-55395-3

定价: 59.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

序

PROLOGUE

采用增压技术对气动系统进行局部增压,以降低空压机供给压力,是气动系统节能的一项重要措施。与电动增压技术相比,气动增压技术以压缩空气为动力,无须电源,避免了由于频繁启停对工厂的电网、气动管道的冲击。另外,气动增压装置结构简单、体积小、价格低,易于使用,在一些需要少量高压气体的场合得到了广泛的推广。

《压缩空气节能增压技术》一书针对气动增压技术能量转换效率低、输出空气流量小的问题,建立了一套气动增压技术能效评价与优化设计理论,提出了多种提高气动增压技术能效和流量的方法,是我国第一本专门系统论述气动增压技术的专著。

该书深入地研究了影响气动增压技术能效与输出流量的各种因素,建立了气动增压装置工作过程的数学模型,并进行无因次化研究,揭示了增压过程中压缩空气能量转换与能量损失的机理,明确了关键参数对增压装置能效及输出流量的影响规律,并提出了气动增压装置优化设计的方法。本书所呈现的研究成果不仅具有重要的理论价值,而且具有重要的工程实际意义,特别是在工程实践中的成功应用与实施,体现了我国在气动增压领域的理论水平与技术实力。

本书大量引用相关领域的国际前沿文献,结合作者的研究成果,经系统分析、整理而著成,对于从事气动系统领域工作的工程技术人员、研究人员以及高等院校相关专业研究生具有很高的参考价值。



博导/教授

长江学者/杰出青年基金获得者/973 首席科学家

前言

P R E F A C E

随着能源需求量不断攀升而自给量日渐降低，我国能源形势日益严峻。空压机作为重要的工业耗能设备，2007年耗电高达2000亿kW·h，约占全国总耗电量的6%。压缩空气系统由于效率低、浪费严重，对其进行节能优化势在必行。采用局部增压的方法，降低空压机的输出压力是压缩空气系统节能技术体系重要的组成部分，具有重要的节能效果。

目前常见的压缩空气增压技术由于输出流量小、效率低，限制了其在工业现场的推广应用。为了提高压缩空气局部增压技术及装置的输出流量和效率，满足工业现场的需要，本书提出一种能够有效利用驱动腔膨胀能的增压技术，该技术具有输出流量大、效率高的特点，具有较好的推广前景，为气动系统节能提供了重要的技术支持。

本书从介绍常用的输入减压式增压器（Input Pressure Reduced Booster，简称IPR增压器）工作特性开始，主要介绍如下几个方面的内容。

1) 在介绍IPR增压器的结构分析及工作原理的基础之上，引入了气动功率的概念，IPR增压器不同工作阶段能量损失的无因次化，揭示了IPR增压器能量损失机理及规律。在此基础上，提出了膨胀能利用式增压器（Expansion Energy Used Booster，简称EEU增压器）的设计方案，利用现有的较为成熟的气动元器件，组装制作EEU增压器样机。

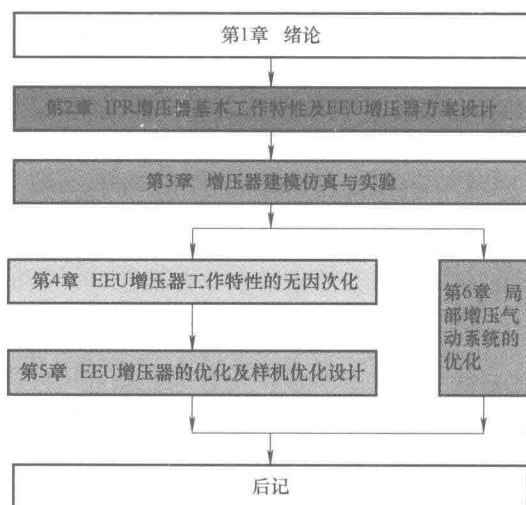
2) 介绍了如何建立增压器工作过程的数学模型并进行仿真，活塞的作动特性以及各腔室内空气状态的变化特性分析，揭示了EEU增压器的工作性能优于IPR增压器的工作机理。基于虚拟仪器技术，对两类增压器的输出流量特性进行实验，验证了书中所建数学模型的准确性，并得出：EEU增压器在最佳工作状态下，其输出流量与IPR增压器的输出流量均随着增压器比的增大而减小，EEU增压器的输出流量约为IPR增压器输出流量的1.4~4倍；在相同的输入压力时，为输出相同压力、相同流量的压缩空气，EEU增压器的功率效率比IPR增压器的功率效率大11%。

3) 选择了适当的基准量, 对原数学模型进行无因次化, 并对无因次化的数学模型进行模拟仿真, 分析了各无因次参数对增压器工作特性的影响程度, 得出: 增压器的无因次平均输出流量、功率效率主要受到无因次活塞设定行程、无因次输出压力、无因次驱动腔活塞面积的影响, 其他无因次参数的影响可以省略。

4) 介绍了无因次活塞设定行程、无因次输出压力、无因次驱动腔活塞面积对增压器的无因次输出流量、功率效率的影响, 以及如何确定各无因次参数的最优值。以大的输出流量及高的工作效率为原则, 如何确定增压器的优化方法。最后, 介绍根据研究确定的优化方案对增压器样机如何进行结构参数、工作参数优化, 书中介绍的模拟仿真方法及实验研究结果验证了优化方案的准确性。

5) 对由增压器、气罐、管道、吸振器组成局部增压气动系统进行优化的介绍, 揭示了气罐容积、管道长度和内径、排气口有效截面积、吸振器容积以及吸振器接入位置等参数对压缩空气压力脉动及压损的影响, 最后介绍了该局部增压气动系统的优化原则: 在允许的情况下, 应尽量增加气罐的容积、降低气罐的输出压力, 适当增大管道内径、缩短管道长度, 尽量增加吸振器的容积以及增加其上游管道的长度; 在保证输出压力波幅在一定范围内时, 应适当降低上游管道的输入压力脉动频率。

本书的组织方式如下图。



各章内容如下。

第1章 绪论

本章介绍该书的写作背景,并对压缩空气高效大流量增压技术的发展以及国内外研究状况进行综述。

第2章 IPR 增压器基本工作特性及 EEU 增压器方案设计

本章首先介绍 IPR 增压器的结构、工作原理及其工作性能。之后,基于气动有效能、气动功率概念,介绍 IPR 增压器工作过程中的能量损失及增压器不同阶段及总的能量损失率计算公式。选择适当基准量,对能量损失计算公式进行无因次化,从而得出 IPR 增压器工作过程中的能量损失机理。最后,提出 EEU 增压器的设计方案,并加工制造样机。

第3章 增压器建模仿真与实验

本章首先对两类增压器的相关参数进行定义,基于其工作原理分析,建立增压器工作过程的数学模型。利用 MATLAB/simulink 仿真环境进行仿真运算。通过对所建数学模型的理论分析、仿真,分析活塞的作动特性以及各腔室内空气的压力、流量、温度变化特性,指出 EEU 增压器输出流量大于 IPR 增压器的原因。之后,基于虚拟仪器技术,搭建试验台,对两类增压器的输出流量特性进行实验,验证所建数学模型的可靠性。最后,本章对两类增压器的工作特性进行介绍,证明 EEU 增压器的工作性能优于 IPR 增压器。

第4章 EEU 增压器工作特性的无因次化

本章首先选择适当的基准量,对第3章建立的增压器工作过程的数学模型进行无因次化,并理论分析影响增压器工作特性的主要因素。经过对无因次化的数学模型的仿真,介绍各无因次参数对增压器的无因次输出流量及功率效率的影响特性,确定影响增压器的无因次输出流量及功率效率的主要因素,为第5章 EEU 增压器工作性能的优化奠定基础。

第5章 EEU 增压器的优化及样机优化设计

本章首先介绍无因次活塞设定行程、无因次输出压力、无因次驱动腔活

塞面积对增压器的无因次平均输出流量及增压器的功率效率的影响特性，并确定无因次活塞设定行程、无因次驱动腔活塞面积的最优值。以大的输出流量及高的工作效率为原则，得出有效提高增压器工作性能的方法。最后，以前期设计的实验样机为对象，根据确定的优化方案对其进行优化，通过模拟仿真及实验验证优化方案的准确性。

第6章 局部增压气动系统的优化

本章首先建立气罐的数学模型，选择增压器的基准量作为其基准量，对该数学模型进行无因次化，并对无因次化后数学模型进行仿真。另外，建立管道气流动态模型，采用逆风差分格式对其进行离散化，并对由增压器、气罐、吸振器及管道组成的系统进行模拟仿真，得到气罐、管道、吸振器的主要参数对压缩空气压力脉动波幅及压力损失的影响特性，并总结得出该局部增压气动系统的优化方法。

后记

本书最后一部分对本书的内容进行了系统的总结并对本书内容的创新之处进行阐述和归纳。此外，对将来的研究工作进行探讨和展望，指出压缩空气增压技术未来的研究方向和重点。

本书的主要内容为作者近年来的研究成果，内容新颖，属于当前气动增压技术领域的前沿问题，具有理论与应用价值。

本书的撰写得到了北京航空航天大学焦宗夏教授、王少萍教授，清华大学何枫教授、徐文灿教授，北京理工大学张百海教授的指导，在此表示由衷的感激。

本书的出版得到了国家自然科学基金（项目编号 51205008）和中央高校基本科研业务费的资助，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，热诚欢迎读者与同行批评指正。

符号表

1. 物理量符号

A : 活塞面积, $[\text{m}^2]$

A_e : 节流口有效面积, $[\text{m}^2]$

C : 运动阻尼系数, $[\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}]$

D : 直径, $[\text{m}]$

c_V : 质量定容热容, $=718[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$

c_p : 质量定压热容, $1007[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$

E : 能量, $[\text{J}]$

F_c : 库伦摩擦力, $[\text{N}]$

F_f : 摩擦力, $[\text{N}]$

F_s : 最大静摩擦力, $[\text{N}]$

k : 传热系数, $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$

κ : 等熵指数

L : 活塞行程, $[\text{m}]$

m : 空气质量, $[\text{kg}]$

M : 活塞质量, $[\text{kg}]$

p : 压力, $[\text{Pa}]$

Q : 热量, $[\text{J}]$

q_m : 质量流量, $[\text{kg}/\text{s}]$

q_V : 体积流量, $[\text{m}^3/\text{s}]$

R : 气体常数, $=287[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$

S : 传热面积, $[\text{m}^2]$

T : 热力学温度, $[\text{K}]$

t : 时间, $[\text{s}]$

u : 运动速度, $[\text{m/s}]$

V : 体积, $[\text{m}^3]$

W : 功, $[\text{J}]$

x : 活塞位移, $[\text{m}]$

2. 下角符号

a: 大气状态

A: 腔室 A

b: 增压腔

B: 腔室 B

d: 驱动腔

h: 上流

l: 下流

o: 输出

s: 供气侧

0: 平衡状态

目录

CONTENTS

前言	
序	
符号表	
第 1 章 绪论	1
1.1 写作背景	1
1.2 气体增压技术概述	3
1.2.1 电动增压技术	3
1.2.2 气动增压技术	4
1.3 压缩空气高效大流量增压技术概述	8
1.3.1 国外高效大流量增压技术现状	8
1.3.2 国内高效大流量增压技术现状	11
1.3.3 目前存在的主要问题	13
第 2 章 IPR 增压器基本工作特性及 EEU 增压器方案设计	15
2.1 概述	15
2.2 IPR 增压器的结构及工作原理	16
2.2.1 IPR 增压器的结构组成	16
2.2.2 IPR 增压器的工作原理	17
2.3 IPR 增压器的输出流量特性	17
2.4 IPR 增压器的功率效率特性	19
2.4.1 气动系统能量评价体系	19
2.4.2 IPR 增压器的功率效率特性	24
2.5 IPR 增压器工作过程中能量损失机理分析	26
2.5.1 IPR 增压器工作过程分析	26
2.5.2 减压阀减压过程分析	27
2.5.3 活塞做功压缩过程分析	28
2.5.4 增压器有效能总损失率分析	30
2.5.5 IPR 增压器有效能损失率无因次化	32
2.6 EEU 增压器的结构、工作原理及样机设计制造	35

2.6.1	EEU 增压器的结构组成	36
2.6.2	EEU 增压器的工作原理	36
2.6.3	EEU 增压器的设计及制作	37
2.6.4	两种增压器的工作性能初步比较	38
2.7	小结	39
第 3 章 增压器建模仿真与实验		41
3.1	相关定义	41
3.2	增压器的建模	42
3.3	增压器工作过程仿真	46
3.3.1	IPR 增压器仿真	47
3.3.2	EEU 增压器仿真	49
3.3.3	两类增压器工作特性比较	52
3.4	实验仪器及测试软件	53
3.4.1	虚拟仪器简介	54
3.4.2	实验装置	54
3.4.3	虚拟仪器设计	55
3.5	数学模型的实验验证及误差分析	56
3.6	增压器工作特性的实验	58
3.6.1	增压器设定输出压力特性	58
3.6.2	增压器输出流量特性	59
3.6.3	增压器的功率效率	62
3.6.4	增压器最优工作状态下的性能	62
3.7	小结	63
第 4 章 EEU 增压器工作特性的无因次化		65
4.1	概述	65
4.2	基准量及无因次参数	65
4.2.1	基准量	66
4.2.2	无因次参数	67
4.3	增压器数学模型的无因次化	68
4.4	增压器输出流量的无因次化	70
4.4.1	增压器的无因次工作特性	70

4.4.2	各无因次参数对增压器输出流量的影响	72
4.4.3	各无因次参数对增压器功率效率的影响	77
4.5	小结	79
第5章	EEU 增压器的优化及样机优化设计	81
5.1	概述	81
5.2	主要影响参数对增压器工作特性的影响	81
5.2.1	无因次活塞设定行程对增压器工作特性的影响规律	82
5.2.2	无因次驱动腔活塞面积对增压器工作特性的影响规律	83
5.2.3	无因次输出压力对增压器工作特性的影响规律	85
5.3	基于主要影响参数的增压器优化	86
5.3.1	基于无因次活塞设定行程最优值的增压器优化	86
5.3.2	基于无因次驱动腔活塞面积最优值的增压器优化	88
5.4	EEU 增压器样机优化及验证	91
5.5	小结	93
第6章	局部增压气动系统的优化	95
6.1	概述	95
6.2	气罐主要参数对系统压力脉动的影响	96
6.2.1	气罐充放气过程的数学模型	97
6.2.2	气罐充放气过程的无因次化数学模型	97
6.2.3	气罐充放气过程的模拟仿真	98
6.3	管道参数对系统压力脉动的影响	104
6.3.1	管道气流动态模型的建立	104
6.3.2	管道气流动态的仿真	110
6.4	吸振器对系统压力脉动的影响	116
6.4.1	吸振器主要参数对下游管道输出压力脉动的影响规律	118
6.4.2	吸振器主要参数对下游管道输出压力脉动的影响率	119
6.4.3	上游管道输入压力脉动频率对下游管道输出压力的影响规律	121
6.5	各主要元件对局部增压系统性能的影响	123
6.6	小结	124
后记		126
参考文献		129

绪 论

1.1 写作背景

流体传动技术利用流体压力和流体动能进行能量的传递，是机电产品向高速化、自动化、高效率、高精度、高可靠性、轻量化、多样化方向发展的关键技术之一^[1]。气压传动具有成本低、无污染、易维护等优点，不仅在机电、纺织、化工等传统领域中市场广阔，从 20 世纪 70 年代开始在工业自动化领域的应用逐步扩大，至今已形成全球年销售约 110 亿美元的市场规模，在信息技术、生物医药、精细加工、节能环保等新兴产业中也发挥着越来越重要的作用。

2005 年 11 月，国家“十一五”规划首次确立节能目标：到“十一五”期末，国内万元生产总值能耗从 1.22t 标准煤下降到 0.9t 标准煤，比“十五”期末降低 20% 左右。为实现这个目标，各产业都在对现有的能耗情况进行调查，并着手实施切实的节能方案，有计划有步骤地降低能量消耗。以此为背景，在工业生产中占据工厂总耗电量 10%~20%，有些工厂甚至高达 35% 的气动系统不可避免地会成为节能改造的首要对象^[2]。

生产压缩空气是现代工业生产中的主要耗能作业之一，如图 1-1 所示，2007 年我国压缩机的耗电量约占全国发电量的 6%，达到 2000 亿 kW·h。然而，在我国大多数企业中，气动系统的能源利用率很低，普遍存在着严重的浪费，据统计，当前我国的气动系统节能空间高达 10%~30%^[3-5]。

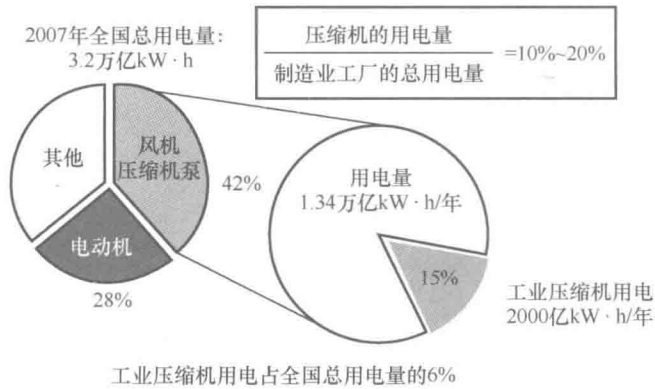


图 1-1 2007 年我国工业压缩机用电量统计情况

在气动系统节能的研究和实施上，日本走在了世界的前列。自 1997 年防止地球温室效应的京都协议签订以来，日本开始了声势浩大的节能运动^[6-7]，这其中就包括对气动系统实施的节能活动。根据 2002 年日本流体动力工业会的调查，各企业实施节能后，气动能耗削减了 10%~30%，如以日本气动系统总耗电量 400 亿 kW·h 为基数来计算的话，每年就可节省用电 40~120 亿 kW·h^[8-10]。

气动增压技术是压力调节技术的重要组成部分，目前成熟的气动增压技术主要掌握在国外少数的几家气动企业手中，我国还处于起步阶段。随着气动系统节能技术的研究与发展，业内人士达成共识，认为“采用气动增压技术实施气动系统局部增压，以降低空压机供给压力”是气动系统节能的一条重要的途径，其意义如下：

- 1) 降低供给压力可以降低空压机的耗能、减少空气消耗量，供给压力每降低 0.1MPa 空压机耗能就可减少 7%以上，系统耗气量减少 10%以上。
- 2) 降低供给压力可以降低输气管道因泄漏引起的损失。
- 3) 降低供给压力可以减少因减压阀减压引起的能量损失。
- 4) 实施局部增压可以减小设备投入费用，避免管道重复敷设，安装使用方便，有利于工业现场的应用与推广^[11-12]。

在我国, 2007 年压缩机用电量为 2000 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 供给压力每降低 0.1MPa 每年即可节约用电 $90 \sim 190$ 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 折合人民币 72 亿 ~ 152 亿元。另外, 压力由 0.7MPa 降低为 0.6MPa , 可以减少由泄漏造成能量损失的 18% 左右。

中国企业对气动系统的节能改造工作正逐步开展, 降低供给压力、实施局部增压作为一个行之有效的节能技术却因没有先进的气动系统局部增压技术而受到限制。今后随着国家节能力度的加大、企业节能意识的提高, 气动系统的节能作为企业节能的重要项目会被逐步重视, 而高效、大流量压缩空气增压技术定将为企业节能减排、我国实现总体节能目标做出重要的贡献。本书的出版总结了作者多年研究增压节能技术的成果, 它能直接促进我国企业气动系统节能工程的实施, 可为我国带来可观的经济效益以及重要的社会效益。

1.2 气体增压技术概述

气体增压技术是一种较为实用化的技术, 广泛应用于气动系统、低温工程、真空器械、石油化工等多种领域^[13-23]。目前气体增压主要有电动增压与气动增压两种方式, 下面对此两种增压技术分别进行介绍。

1.2.1 电动增压技术

电动增压技术利用电力为气体增压提供所需能量, 如各种空气增压机, 涡轮增压器及其他电动增压装置^[24-28]。应用于工业现场气动系统的设备主要为电力驱动的增压机, 目前对此种技术研究的文献很少, 但产品较多, 国外知名的产品有日本岩田公司生产的增压机。在我国, 许多空压机制造厂都生产增压机, 如上海纬洋机电设备有限公司、安庆市佰联无油压缩机有限公司等, 此类增压机大多是对压缩机的改装而成, 体积大, 容易产生电火花, 不

适用于易燃易爆场合^[29-32]。

电动增压机输出空气流量大，压力高，大多用于对特种气体（例如：氧气、氮气、二氧化碳、氦气、氩气等）进行增压。电动增压机工作时，原低压气体具有的有效能未被利用，其工作效率较低。另外常见的空气增压机缺少控制器，工作时频繁起停，对工厂的电网、气动管道的冲击以及对设备本身的损坏很大，不利于在工业现场进行推广与应用。

1.2.2 气动增压技术

根据帕斯卡原理，通过压力传递与转换，利用活塞对气体进行压缩，通过改变气体回路，达到持续增压的目的。在实现较高压力输出时，往往增加驱动腔活塞的面积或者增大驱动腔输入空气的压力^[33-49]。与电动增压设备相比，气动增压装置以压缩气体为动力，不需电源，结构简单、体积小，易于使用，在一些需要少量高压气体的场合下得到了广泛的推广。气动增压装置的名称较多，常见的有气动增压器、增压阀、增压泵等，本书用（气动）增压器来代表气动增压装置，在未加特殊说明时，增压阀、增压泵也同样代表气动增压装置。

气动增压主要分为单行程增压与双程增压两种方式，单程增压方式主要用于大压缩比、输出较高压力的增压装置，双程增压方式主要用于输出压力相对较低、流量相对较大的增压装置。

1. 单程增压器

单程增压器的结构原理如图 1-2 所示，当换向置于右位，从一次侧吸入的压缩空气经过换向阀充入驱动腔，驱动活塞向右运动，对增压腔内空气进行压缩，驱动腔内的空气压力超过二次侧压力时，驱动腔内压缩空气自二次侧排出。当活塞行至右行程终点撞击换向阀，换向阀置于左位，驱动腔内的压缩空气经过换向阀排往大气，增压腔内空气驱动活塞向左运动，当驱动腔的