

节能减排技术丛书



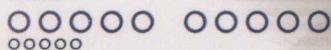
# 气压传动系统排气回收

## 节能技术

石运序 吴莉莉 张建旭 著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



节能减排技术丛书

# 气压传动系统排气 回收节能技术

石运序 吴莉莉 张建旭 著

机械工业出版社

本书全面阐述了气罐式和微型涡轮发电装置排气回收节能技术。主要内容包括,概述目前气动执行元件排气节能的研究现状及需要解决的问题;建立排气回收控制系统数学模型的方法,并对排气回收系统的数学模型进行了动态特性模拟,分析相关参数对气动系统的影响,为研究排气回收效率的评价方法提供理论依据;构建排气回收实验测试系统,并通过实验研究排气回收控制系统的基本特性,以获得附加排气回收装置对气缸动态特性的影响规律;根据排气回收系统的数学模型以及气体热力学基本定律对气缸排气回收控制过程进行深入分析,总结并设计出回收能量较多且对气缸运动特性影响较小的两种排气回收装置,并对其有效性进行了验证;通过对排气回收系统热力学特性以及系统能量传递和转换过程的分析,给出排气回收系统回收效率的评价方法,并进行相关的实测计算。

本书可供气压传动系统研发、设计的工程技术人员使用,也可供高等院校流体传动与控制专业的师生阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

气压传动系统排气回收节能技术/石运序,吴莉莉,张建旭著. —北京:机械工业出版社, 2019. 7

(节能减排技术丛书)

ISBN 978-7-111-62961-0

I. ①气… II. ①石… ②吴… ③张… III. ①气压传动装置-节能-研究 IV. ①TH138.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第114822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:杜雨霏 封面设计:陈 沛

责任印制:李 昂

唐山三艺印务有限公司印刷

2019年8月第1版第1次印刷

169mm×239mm·8印张·163千字

0 001—1 900册

标准书号:ISBN 978-7-111-62961-0

定价:58.00元

电话服务

网络服务

客服电话:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

010-88379833 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-68326294 金书网:www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版 机工教育服务网:www.cmpedu.com



# 前 言

气缸作为气动系统中最重要执行元件在工厂、企业中得到了广泛的应用。但气缸完成一个工作行程后，原工作腔内的气体要排向大气，放掉的这部分有压空气仍然具备做功的能力，若能加以回收利用，对整个工业系统来说，具有重大的节能意义。但若直接用一气罐与气缸排气腔相连进行排气回收，经过几个工作循环后，气罐内压力逐渐升高，可能会对执行元件的运动特性产生不利影响；而若在气缸等执行元件排气侧直接接一微型涡轮发电装置进行能量回收再利用，亦可能会对执行元件的原有动态特性产生影响。针对这些问题，本书给出了两种技术方案，既能对执行元件排气侧压缩空气的压力能尽可能多地回收利用，又对原有系统的动态特性影响较小。为此，本书对气压传动系统排气回收节能所涉及的关键技术问题的深度理论分析和实验研究成果进行了全面阐述，提出了两种创新性的气缸排气能量回收技术途径。

一是通过附加排气回收控制装置将气缸排气腔的有压空气回收至气罐中，并作为中压气源再利用，以实现节能。首先，研究了一种高效的、适合于工业应用的回收系统组成形式；然后建立了相应的系统数学模型；并通过仿真和实验，分析了系统实现所要解决的关键性控制技术问题。为了获得关键性的控制技术指标以控制排气回收过程的起、停切换，给出了气缸排气回收切换控制判据及控制策略。首先，在对排气回收控制过程进行理论分析的基础上，推导出了排气回收切换控制压差的理论表达式。分析表明，排气回收切换控制压差与气源压力等参数有关，气源压力为  $0.2 \sim 0.5 \text{ MPa}$  排气回收时，其变化值约为  $0.02 \sim 0.05 \text{ MPa}$ ；另外，为了简化回收控制策略和控制装置，且使控制压差更加可靠、适用，在实际应用中，建议切换控制压差取一固定值  $0.05 \text{ MPa}$ ，并将该值作为排气回收切换控制判据，这为排气回收控制装置的设计及工程实际应用打下了基础。此外，为了实现排气回收切换控制过程，且使排气回收控制装置能够在实际中便于推广应用，根据气缸排气回收控制判据及控制策略的分析，分别设计了定差减压阀控制和差压开关控制两种排气回收控制装置。实验结果表明，差压开关控制装置相对较好。最后，为了分析排气回收控制系统的回收效果，提出了系统排气回收效率的评价方法。分析表明，系统排气回收效率与气罐内的初始回收压力等参数有关；然后应用该评价方法对排气回收系统的回收效率进行了实测计算。实测计算结果表明，排气回收系统可实现较高的回收效率，如气源压力为  $0.5 \text{ MPa}$ ，回收气罐内的初始压力在  $0 \sim 0.3 \text{ MPa}$  排气回收时，系统排气回收效率可达  $80\%$  以上。

二是设计了微型排气回收高效节能涡轮发电系统，将执行元件排气腔的压力能

转换为电能进行储存、利用。首先,分析了常规气压传动系统的充排气特性,建立了气动系统数学模型以及 AMESim 仿真模型;通过理论分析以及大量的实验验证,利用 SolidWorks 设计了微型涡轮排气回收装置的三维结构以及该装置与原气动系统的连接通用接口;为了分析涡轮发电装置的发电特性以及对其进行改进优化设计,利用 ANSYS/FLUENT 对微型涡轮及蜗壳进行了流场分析和强度校核,分析了不同涡轮结构、叶片数量以及入口导流形式等对涡轮输出转矩的影响规律,定量给出了涡轮叶片数量与输出转矩之间的对应关系;对附加微型涡轮发电装置的气动系统进行实验,验证了所建立的数学模型及仿真模型的有效性,揭示了在不同工作压力下气缸运动特性及微型涡轮发电装置的起动特性和发电特性,为微型排气回收高效节能涡轮发电装置作为节能附件应用到气动系统中打下了基础。

综上,上述两种气缸排气能量回收装置不仅节能效果显著,且具有良好的应用前景。

由于时间仓促,作者水平有限,书中错误在所难免,敬请批评指导。

石运序

# 符 号 表

|                 |                     |                   |
|-----------------|---------------------|-------------------|
| $p_s$           | 气源压力                | MPa               |
| $p_1$           | 气缸进气腔压力             | MPa               |
| $p_2$           | 气缸排气腔压力             | MPa               |
| $d$             | 气缸活塞杆直径             | m                 |
| $D$             | 气缸活塞直径              | m                 |
| $H$             | 焓                   | J                 |
| $I$             | 内能                  | J                 |
| $T$             | 温度                  | K                 |
| $S$             | 气缸行程                | m                 |
| $v$             | 气缸活塞速度              | m/s               |
| $A$             | 活塞面积                | m <sup>2</sup>    |
| $A_e$           | 管道系统总有效面积           | m <sup>2</sup>    |
| $V$             | 容积, 体积              | m <sup>3</sup>    |
| $F$             | 力负载                 | N                 |
| $m$             | 质量                  | kg                |
| $p_{c0}$        | 气罐内的初始压力            | MPa               |
| $q_v$           | 体积流量                | m <sup>3</sup> /s |
| $q_m$           | 质量流量                | kg/s              |
| $\Delta p$      | 气缸排气腔与气罐间的压差        | MPa               |
| $\Delta p_{cr}$ | 排气回收临界切换控制压差        | MPa               |
| $\Delta p_{sw}$ | 排气回收实际切换控制压差        | MPa               |
| $R$             | 气体常数                | N · m/(kg · K)    |
| $\kappa$        | 等熵指数                |                   |
| $c_v$           | 比定容热容               | J/(kg · K)        |
| $c_p$           | 比定压热容               | J/(kg · °C)       |
| $W$             | 附加回收装置后驱动腔所做驱动功     | J                 |
| $W_0$           | 无回收装置时驱动腔所做驱动功      | J                 |
| $\varepsilon$   | 附加回收装置前后驱动腔所做驱动功比值  |                   |
| $\psi$          | 附加回收装置前后驱动腔所做驱动功增加率 | %                 |
| $\eta$          | 排气回收效率, 能量转化效率      | %                 |
| $\gamma$        | 比热比                 |                   |

# 目 录

## 前 言

## 符号表

## 第 1 章 绪论 ..... 1

### 1.1 气压传动系统节能的研究背景和意义 ..... 1

### 1.2 气压传动系统排气节能研究现状 ..... 3

#### 1.2.1 将排气能量转换成其他形式能量的节能研究状况 ..... 3

#### 1.2.2 设计节能回路减少排气腔耗气量以实现节能的研究状况 ..... 4

#### 1.2.3 气罐式排气回收节能研究状况 ..... 6

### 1.3 有待研究解决的问题 ..... 8

#### 1.3.1 气罐式排气回收节能技术 ..... 8

#### 1.3.2 微型排气回收高效节能涡轮发电再利用技术 ..... 10

## 第 2 章 排气回收控制系统的数学建模及仿真 ..... 11

### 2.1 功率键合图法的基本思想及其在气动系统仿真领域的实现 ..... 11

### 2.2 气罐式排气回收控制系统键合图模型的建立 ..... 15

#### 2.2.1 排气回收系统的工作原理 ..... 16

#### 2.2.2 系统键图模型的建立 ..... 17

### 2.3 气罐式排气回收控制系统数学模型的建立 ..... 22

#### 2.3.1 能量方程 ..... 23

#### 2.3.2 气缸活塞的运动方程 ..... 23

#### 2.3.3 流量方程 ..... 24

### 2.4 气罐式排气回收系统仿真模型的建立与实验验证 ..... 26

#### 2.4.1 仿真模型的建立 ..... 27

#### 2.4.2 仿真模型的实验验证 ..... 27

### 2.5 微型排气回收涡轮发电系统相关数学模型的建立与实验验证 ..... 30

#### 2.5.1 基于 AMESim 的气动系统动态特性数学模型的建立 ..... 30

#### 2.5.2 AMESim 仿真模型的实验验证 ..... 31

#### 2.5.3 涡轮叶片受力模型的建立 ..... 32

#### 2.5.4 微型涡轮输出转矩分析 ..... 34

### 2.6 小结 ..... 36

## 第 3 章 排气回收节能系统基本特性的实验 ..... 37

### 3.1 实验内容及方法 ..... 37

#### 3.1.1 气罐式排气回收实验台搭建 ..... 37



|       |                             |    |
|-------|-----------------------------|----|
| 3.1.2 | 气罐式排气回收节能实验内容 .....         | 39 |
| 3.1.3 | 微型排气回收涡轮发电系统实验台搭建 .....     | 39 |
| 3.1.4 | 微型排气回收涡轮发电系统实验内容 .....      | 41 |
| 3.1.5 | 实验数据处理 .....                | 41 |
| 3.2   | 气罐式排气回收时对气缸动态特性的影响 .....    | 44 |
| 3.2.1 | 对气缸两腔压力的影响 .....            | 44 |
| 3.2.2 | 对气缸活塞运动特性的影响 .....          | 47 |
| 3.3   | 气罐式排气回收切换控制压差的理论分析 .....    | 50 |
| 3.3.1 | 数学模型的简化 .....               | 51 |
| 3.3.2 | 回收系统中影响气缸动态特性的因素分析 .....    | 52 |
| 3.3.3 | 排气回收切换控制压差的推导 .....         | 57 |
| 3.4   | 气罐式排气回收切换控制压差的实验 .....      | 59 |
| 3.4.1 | 实验内容及方法 .....               | 59 |
| 3.4.2 | 实验结果及分析 .....               | 59 |
| 3.5   | 气罐式排气回收切换控制判据及控制策略分析 .....  | 62 |
| 3.6   | 微型涡轮发电系统对气缸动态特性的影响 .....    | 62 |
| 3.6.1 | 不同气源压力下对气缸两腔压力的影响 .....     | 62 |
| 3.6.2 | 不同气源压力下对气缸活塞运动特性的影响 .....   | 64 |
| 3.7   | 小结 .....                    | 65 |
| 第4章   | 排气回收装置的设计与实验 .....          | 66 |
| 4.1   | 气罐式排气回收控制装置的设计与实验 .....     | 66 |
| 4.1.1 | 定差减压阀控制装置 .....             | 66 |
| 4.1.2 | 差压开关控制装置 .....              | 70 |
| 4.1.3 | 气罐式排气回收控制装置的比较分析 .....      | 72 |
| 4.2   | 微型排气回收涡轮发电装置的设计与实验 .....    | 74 |
| 4.2.1 | 气缸排气侧冲击能量的分析 .....          | 75 |
| 4.2.2 | 微型涡轮发电系统的性能需求分析 .....       | 76 |
| 4.2.3 | 微型涡轮发电系统的方案设计 .....         | 77 |
| 4.2.4 | 微型涡轮发电装置的详细结构设计与优化 .....    | 78 |
| 4.2.5 | 微型涡轮输出特性数值模拟 .....          | 80 |
| 4.2.6 | 微型蜗壳结构优化设计分析 .....          | 83 |
| 4.2.7 | 微型涡轮系统发电的特性 .....           | 86 |
| 4.2.8 | 微型涡轮发电系统结构优化设计 .....        | 89 |
| 4.3   | 小结 .....                    | 91 |
| 第5章   | 排气回收系统回收效率的评价方法 .....       | 93 |
| 5.1   | 气罐式排气回收系统的能量传递和转换过程分析 ..... | 93 |
| 5.2   | 气罐式排气回收效率评价方法的理论分析 .....    | 94 |
| 5.2.1 | 气缸排气腔初始能量分析 .....           | 94 |



|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 5.2.2 | 回收能量分析 .....               | 95  |
| 5.2.3 | 气缸驱动腔能耗增加率的理论分析及实验 .....   | 97  |
| 5.2.4 | 排气回收效率的评价方法 .....          | 101 |
| 5.3   | 气罐式排气回收效率的实验 .....         | 101 |
| 5.4   | 微型排气回收涡轮发电系统转换效率的分析 .....  | 103 |
| 5.4.1 | 输入能量分析 .....               | 103 |
| 5.4.2 | 输出能量分析 .....               | 104 |
| 5.4.3 | 微型涡轮发电系统效率计算 .....         | 105 |
| 5.4.4 | 效率实测分析 .....               | 105 |
| 5.5   | 小结 .....                   | 106 |
| 后记    | 总结与展望 .....                | 108 |
| 附录    | Matlab/Simulink 仿真程序 ..... | 110 |
| 参考文献  | .....                      | 114 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 气压传动系统节能的研究背景和意义

自 20 世纪 70 年代世界性能源危机以来, 节能问题日益为世人所重视。在防止地球温室化的《京都议定书》中, 也明确了今后“环保节能”的重要性。在我国, 能源一直是国民经济发展的一个制约因素, 节能研究更具有紧迫性和现实意义, 现已成为工业中各行业的一个重要的基本课题。

在现代化国家中, 由于使用压缩空气为工作介质的气动系统具有节能、无污染、高效、低成本、结构相对简单、安全可靠、可用于易燃易爆和有辐射危险场合等优点, 因而被广泛应用于各行业, 尤其是工业自动化领域, 成为各个工业部门中提高生产效率的重要手段, 在国民经济建设中起着越来越重要的作用。据统计, 在工业发达国家中, 随着生产自动化程度的不断提高, 气动技术应用面迅速扩大, 全部自动化设备中约有 30% 使用了气动系统, 90% 的包装机, 70% 的铸造和焊接设备, 50% 的自动操纵机, 40% 的锻压设备和洗衣店设备, 30% 的采煤机械, 20% 的纺织机、制鞋机、木材加工和食品机械使用气动系统; 43% 的工业机器人采用气压传动<sup>[1-22]</sup>。

然而, 作为传递动力的空气介质虽然取之不尽, 但将空气压缩成压缩空气, 并处理成实际使用的洁净干燥的压缩空气, 是需要消耗能量的, 因为压缩空气不同于一次能源和二次能源, 压缩空气是一种耗能工作介质, 它是由一次能源或二次能源(如电或蒸汽等)经空气压缩机转换而来的载能工作介质。生产压缩空气是在工业生产中的重要耗能环节之一, 在我国, 空气压缩机的耗电量占全国发电量的 10% 左右。从节能角度来看, 气动系统要比液压系统和电气系统的效率低很多。1988 年, Mitsuoka 从能量转换的角度对气压传动、液压传动以及电气传动这三种方式驱动系统的效率进行了研究<sup>[14]</sup>, 认为当时气动系统的效率约为 20%, 并估计将来能够达到的可能值为 40%。由此可见, 气动系统中产生压缩空气的动力费用是最大的费用, 而且气动系统的效率较低, 也就是说, 能量损失较大。从这个结果可以看出, 气动系统从节能的角度来说是较差的, 但同时也说明了气动系统节能还有很大的改善空间。国内外很多学者相信, 气动系统的节能还有很大的改善空间, 在气动系统中应用节能技术, 至少可节能 10%, 甚至有可能节能 20% ~ 35%<sup>[17]</sup>。

以上这些数据, 已经充分显示了气动系统的节能对我国现代化经济建设的重要性, 而且在气动系统中应用节能技术可以取得很大的经济效益和社会效益, 对缓解

我国能源供求的矛盾，将起重要的作用。

要想达到节能，首先要知道气动系统的能量是在何处损失的，气动系统能量损失如图 1-1 所示。考虑气动系统的能量损失，要从空气压缩机（后称空压机）开始直到气动执行元件做功为止，主要体现在以下三个方面<sup>[6,17]</sup>。

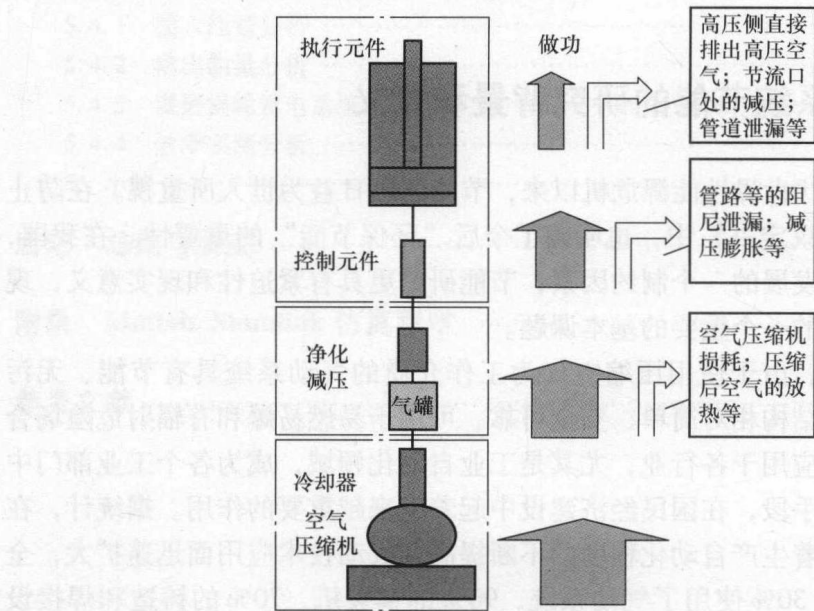


图 1-1 气动系统能量损失图示

- 1) 空气压缩机输出空气冷却产生的能量损失。
- 2) 管道阻尼和泄漏以及节流减压等造成的能量损失。
- 3) 气缸等用气设备的耗气：作为气动系统中应用最广泛的执行元件——气缸来说，其完成一个工作行程后，气缸原工作腔内的压缩空气一般直接排向大气，对长期运转的生产设备来说，造成了很大的能量损失。

以现代化的机械类企业为例，其能源消耗比例中，压缩空气的使用占整体能源消耗的 20%，其中气缸往复动作的排气占整体能耗的 12%<sup>[18]</sup>。因此，气缸排气回收节能的研究，具有重大的节能意义和工程应用价值。

本书介绍了以下两种气缸排气能量回收的方法。

一是基于利用蓄能气罐回收气缸排气腔的部分能量再做功的节能思想出发，提出了一种新的气缸排气回收节能思路，即通过设置排气回收装置将气缸排气腔的压缩空气集中回收起来，当气罐压力达到期望压力值时，把回收气罐作为中压空气源再利用。该节能系统不仅可实现气缸排气腔压缩空气的回收，而且回收到气罐内的压缩空气可不经任何处理直接在气动系统中应用。

二是通过在执行元件排气侧设置微型涡轮发电装置（可作为气动附件进行连接），将排气腔能量进行回收储存，以供工厂弱电系统等场合使用。

由于本课题的研究可望达到气缸排气回收节能的目的,并具有较高的学术价值和广泛的应用前景,因而获得了日本 SMC 筑波技术中心以及山东省自然科学基金(ZR2014EEQ024)的资助<sup>[1,2]</sup>。

## 1.2 气压传动系统排气节能研究现状

目前,气缸排气节能的研究已经得到了足够的重视。对气压传动系统来说,减少耗气量就是节能,因此,气缸排气节能主要应从这几方面考虑:在气动系统中设计一些节能型的气动回路,以实现节能;开发节能气动元件和新的气压传动系统;正确安装、加强维护保养、消除泄漏等等。具体讲,主要有以下几种节能方式。

- 1) 将气缸排气腔的能量转换成其他形式的能量(电能、真空压力能等)再利用。
- 2) 设计节能回路减少耗气量。
- 3) 利用气罐回收气缸排气腔的部分能量再利用等。

### 1.2.1 将排气能量转换成其他形式能量的节能研究状况

日本学者永井提出了一种节能研究思想,如图 1-2 所示,通过设置能量转换装置将气缸排气能量转换成真空再利用,可达到节能的目的<sup>[19]</sup>。但该装置要产生足够的真空度,气缸排气腔的压缩空气必须以足够高的速度流经真空喷嘴,否则气缸排气腔压缩空气相当于还是直接排向大气,造成了能量的浪费。

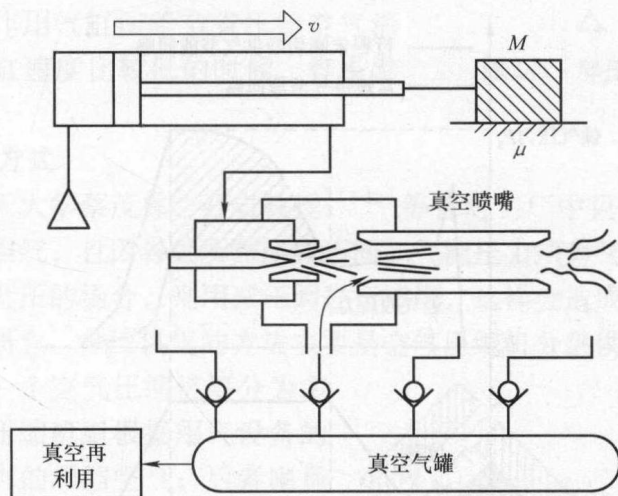


图 1-2 能量转换再利用节能系统

南京理工大学 SMC 气动技术中心提出了一种将排气能量转换成电能的节能思路,即将气缸排气腔排出的压缩空气的压力能转换成电能,以便供给气动系统中需要电能驱动的元器件(如电磁阀等)使用,从而达到节能的目的<sup>[21]</sup>,其节能原理



如图 1-3 所示。但该节能方法中能量转换装置尺寸较大，不能作为附件直接使用。

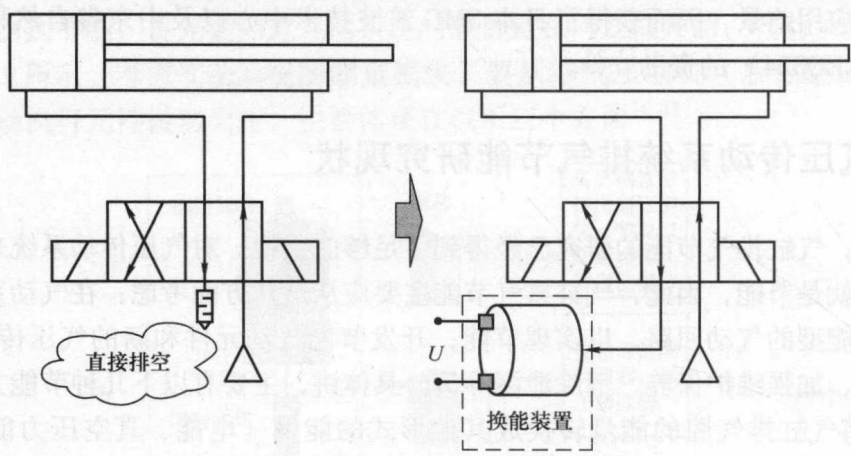


图 1-3 气缸排气能量转换节能回路

1.2.2 设计节能回路减少排气腔耗气量以实现节能的研究状况

1. 活塞到位后停止供气以节省耗气量

日本的河合素直教授在 1996 年提出了用进口节流方式，在活塞到位后切断充气过程，来降低充气侧的压力，减少空气消费量达到节能的目的<sup>[6,16,19]</sup>。其节能思路为：对于往复运动的进气节流气压传动系统，当气缸活塞到达行程末端后，气源仍会向气缸的充气侧充气，造成了不必要的能量损失，如图 1-4 所示行程末端切

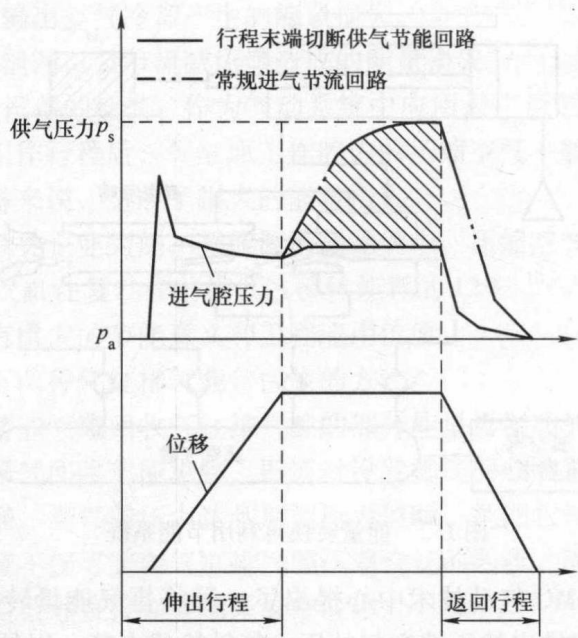


图 1-4 行程末端切断供气节能系统试验曲线示意图

断供气节能系统试验曲线示意图,如果在气缸活塞到达行程终端后,立即切断供气气源向气缸进气腔充气,这样气缸进气腔的压力就可维持在较低的压力下,从而节省压缩空气的消耗。日本明治大学的小山纪也对此种节能方法进行了理论和试验研究,日本 SMC 株式会社对此原理进行改进并开发出了节能阀<sup>[6]</sup>。但该节能方法仅适用于进气节流回路,应用范围较窄。

## 2. 在气动系统中使用不同的工作压力以减少耗气量

在一定温度条件下,一定体积的压缩空气所具有的能量与其绝对压力成正比。在允许的条件下能使用低的工作压力去完成同一工作(例如驱动同一气缸),则可减少能量消耗。因此,气动系统节能的重要途径之一就是对系统的不同部分根据不同情况使用不同的工作压力。例如气压传动系统用高压气源,气动控制系统用低压气源工作;而在气压传动系统中,在很多情况下是正行程有外加负载,回程无外加负载或只有很小的负载,这时就可如图 1-5 所示在换向阀输出端多装一个减压阀或各种节能元件,使气缸活塞在正行程时用高压气源,回程用低压工作。这种系统在正行程用高压气源( $>0.5\text{MPa}$ ),回程用( $0.1\sim0.2$ )MPa 表压工作;节能可达 25%~35%<sup>[20]</sup>。尽管采用降压供气驱动活塞返回可以达到节能的目的,但高压气源在降压过程中也要损失一部分能量。文献[22]中也介绍了一种差动回路即气缸的两个运动方向采用不同压力供气的回路,比一般的双作用气缸回路节省压缩空气消耗量,但是在气缸速度比较低的时候,容易发生爬行现象。

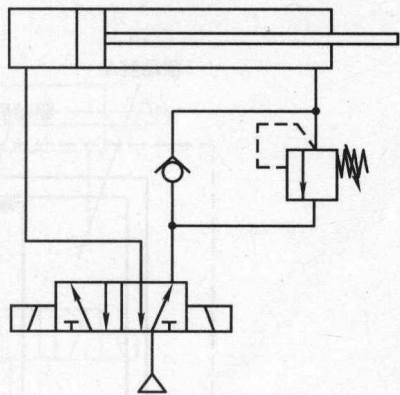


图 1-5 降压驱动节能回路

## 3. 分压供气方式

北京航空航天大学蔡茂林、石岩教授<sup>[7-12]</sup>等针对工厂中只使用一组空压机为全厂区提供压缩空气,且因各处所需压力不同,气源压力须为气动系统所需的最高压力,对于需要低压的场合,则用减压阀进行减压,这样会造成能量损失,据此提出了分压供气的概念。分压供气的方法主要是空气压缩机分组供气和采用局部增压技术。前者是将一个空气压缩机组分为多个组,每个空气压缩机组根据用气设备的需要提供不同压力的压缩空气;后者则是直接使用低压空气作为气源,在气动系统局部采用增压设备对低压气源进行增压,将低压气源的压力增至驱动设备所需压力,主要包括电动增压和气动增压。其中电动增压机结构简图如图 1-6 所示,通过

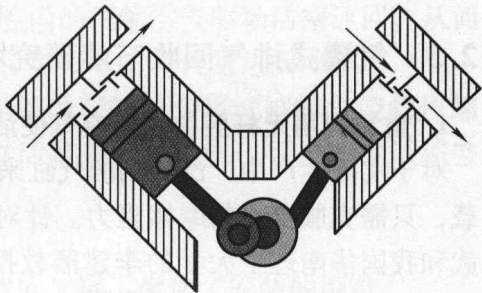


图 1-6 电动增压机结构简图

使用电能使压缩空气增压提供能量,但是由于其效率较低,且对工厂电网、气动回路冲击较大及对设备本身损坏严重,因此并未广泛投入使用。气动增压阀的结构简图如图 1-7 所示,通过改变压缩空气回路,利用活塞对空气进行压缩,实现增压的目的。通过分析对比这两种分压供气的方式,得出两种供气方式的优缺点,见表 1-1。

表 1-1 分压供气方式优缺点对比

| 方式   | 优点           | 缺点                                        | 总结             |
|------|--------------|-------------------------------------------|----------------|
| 分组供气 | 压力可调范围大、供气量大 | 管道需要重复铺设,投入大<br>空气压缩机体积大,不利于维护及保养         | 适用于压缩空气需求量大的场合 |
| 局部增压 | 实施方便,投入小     | 压力可调范围小,供气量小,能量利用率低<br>频繁起停对自身及电网损害严重,效率低 | 适用于压缩空气需求量小的场合 |

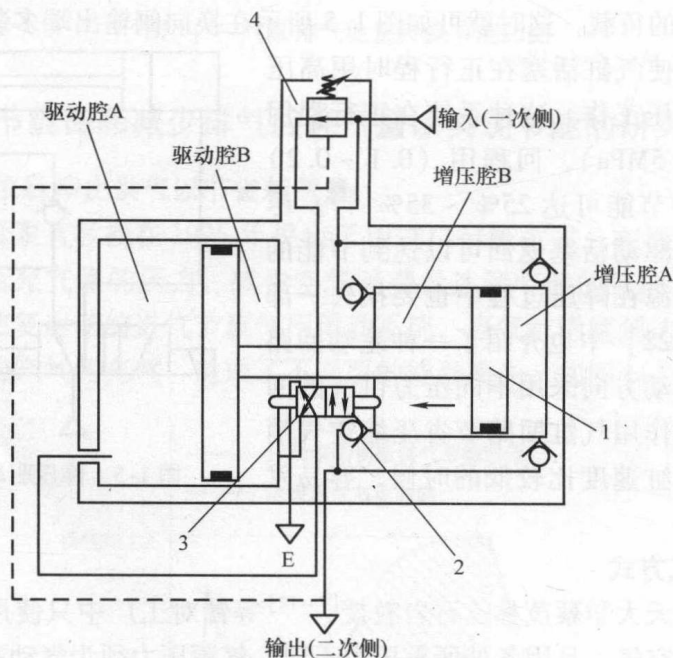


图 1-7 气动增压阀的结构简图

1—活塞 2—单向阀 3—换向阀 4—减压阀

### 1.2.3 气罐式排气回收节能研究状况

1. 重复利用无杆腔中有压空气使活塞退回, 变双程耗气为单程耗气

对于实际生产中广泛使用的气缸来说,许多是正行程有外加负载,回程无外加负载,只需克服自身的摩擦阻力。针对这种情况,日本 SMC 筑波技术中心小根山尚武和我国华南理工大学的李建藩教授分别提出了一种节能气压传动系统(简称 ESPS),如图 1-8a、b 所示<sup>[17,19]</sup>。

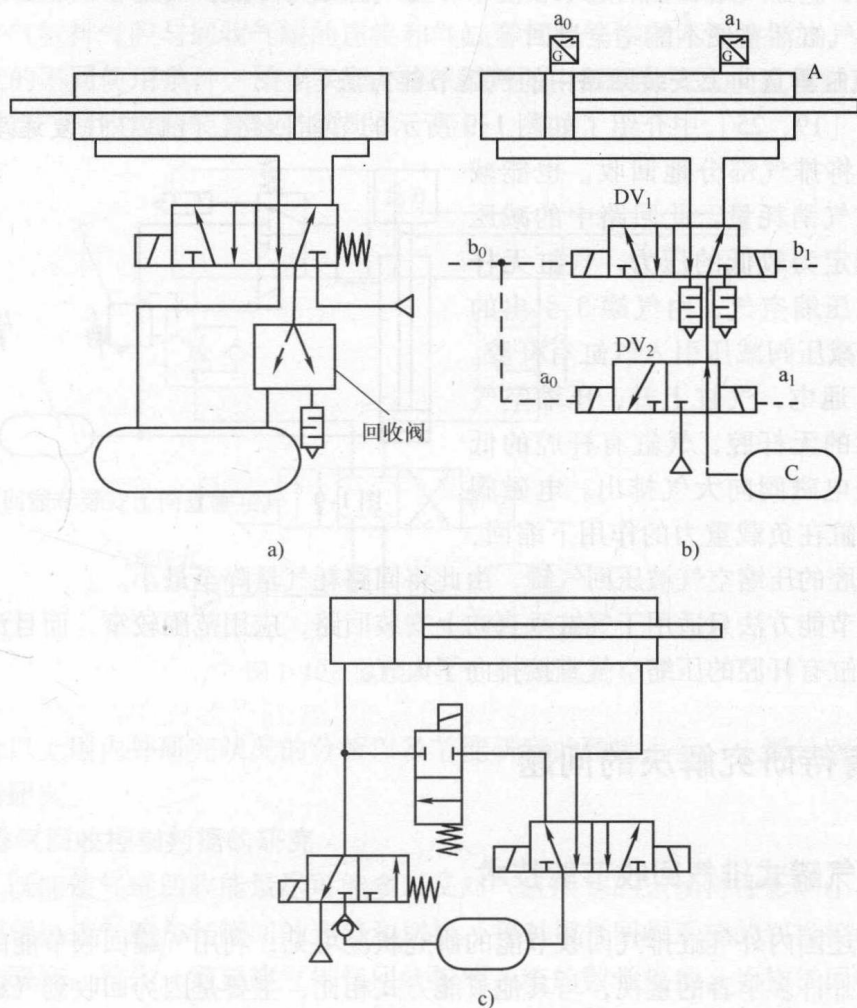


图 1-8 变双程耗气为单程耗气的节能回路

如图 1-8a 所示, 气缸完成一个工作行程后, 重复利用原工作腔内有压空气驱动活塞返回, 以实现节能, 并根据实际需求设计了回收阀。由图 1-8b 可见, 该节能系统由双作用气缸 A, 双控二位五通阀  $DV_1$ 、双控二位三通阀  $DV_2$  和蓄能气罐 C 组成, 通过重复利用活塞杆伸出后气缸无杆腔内的压缩空气驱动活塞返回, 从而变双程耗气的常规系统为单程耗气的节能系统, 可以节省耗气量近 50%。

同样, 如图 1-8c 所示, 通过几种气动元件的有效组合将气缸排气腔的压缩空气回收起来<sup>[24,25]</sup>, 让它再次做功, 推动气缸活塞返回, 这样也可以减少压缩空气的用量, 节省了能源。

但上述三个节能回路中, 存在以下问题。

- 1) 每个气缸均需配备一个适当大小的蓄能气罐, 增加了安装的困难。
- 2) 要使气缸可靠完全地退回, 气罐所蓄能量必须供给气缸驱动腔足够的能



量，因此，所需气罐容积的选取较复杂，如气源压力降低，气罐容积也必须相应减小，否则气缸活塞便不能完全返回等。

2. 气缸垂直向上安装回路中的气罐节能方法

文献 [19, 25] 中介绍了如图 1-9 所示的节能回路，气缸在往复运动中进行排气时，将排气部分地回收，也能减少压缩空气消耗量。此回路中的减压阀 2 被调定为较低的压力，气缸无杆腔不排放压缩空气，由气罐 3 引出的气体，经减压阀减压引入气缸有杆腔。电磁阀 1 通电，气缸上升，压缩空气进入气缸的无杆腔，气缸有杆腔的低压气体经电磁阀向大气排出。电磁阀断电，气缸在负载重力的作用下缩回，气缸无杆腔的压缩空气被压回气罐，由此将回路耗气量降至最小。

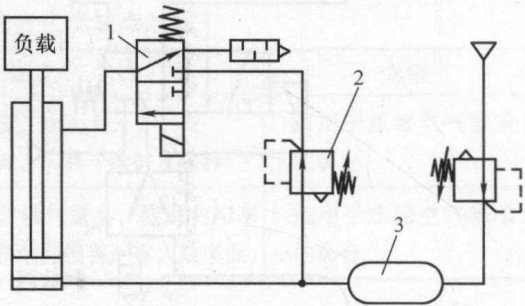


图 1-9 气缸垂直向上安装节能回路

但该节能方法只适用于气缸垂直向上安装回路，应用范围较窄，而且活塞杆伸出时，气缸有杆腔的压缩空气直接排向了大气。

1.3 有待研究解决的问题

1.3.1 气罐式排气回收节能技术

由前述国内外气缸排气回收节能的研究状况可见，利用气罐回收节能的思想得到了国内外许多学者的重视，与其他节能方式相比，主要是因为回收到气罐中的压缩空气不用经过净化过滤等处理即可直接使用，节能效果显著。有学者利用蓄能气罐将活塞杆伸出后无杆腔中的部分能量回收起来，直接驱动活塞返回，从而变双程耗气为单程耗气的节能方式作了较深入的研究，可获得近 50% 的节能效果<sup>[17]</sup>。但是，该节能回路中气罐大小的选取等较复杂，较难在工程实际中得以推广应用。

而本书通过将气缸排气腔的压缩空气回收到一气罐中，并作为中压空气源再利用的节能方法与其他节能方式相比，该节能方法不仅安装方便，而且适用范围较广，但若直接将气缸排气腔与一回收气罐相连，使气缸排气腔内的有压空气回收到气罐内，再加以利用。如图 1-10 所示，经过几个工作循环后，随着气罐内回收压缩空气的增加，气罐压力会越来越高，可能会对气缸活塞的速度特性产生影响。又因标准气缸的使用速度范围大多是  $(50 \sim 500) \text{ mm/s}$ <sup>[26]</sup>，当气缸活塞速度小于  $50 \text{ mm/s}$  时，由于气体摩擦阻力的影响增大，加上气体的可压缩性，气缸活塞可能会出现时走时停的“爬行”现象，且当气缸进气腔与排气腔压力所产生的输出力不足以克服系统外加负载时，气缸活塞还会停止。也就是说，当气缸活塞速度接近