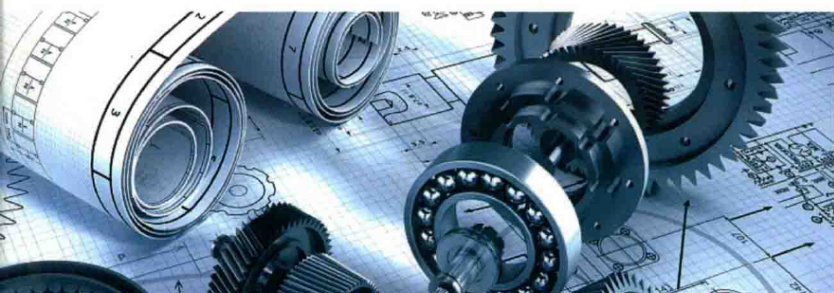


XIAOXING ERJI YASUOJI SHU
SHEJI JIQI GUANJIAN JISHU YANJIU

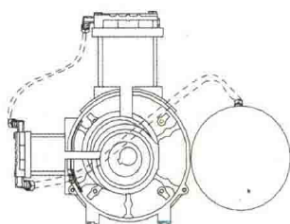


010758347



小型二级压缩机

瞬态分析设计及其关键技术研究



◆ 钟美鹏 著

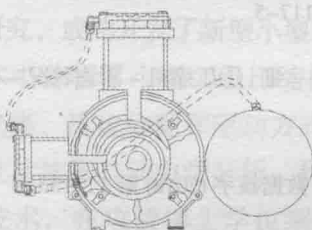


上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

密封容内

小型二级压缩机

瞬态分析设计及其关键技术研究



◆ 钟美鹏 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

宛平路 200 号

（上海） 20024

电话：021-62470212

内容提要

本书属于压缩机的设计类专著,本书分为8章,分别为绪论、小型二级压缩机结构型式与稳态参数确定、小型二级压缩机瞬态分析模型、基于瞬态热力过程模型的设计计算与参数优化、小型二级压缩机的惯性力平衡、小型二级压缩机无位置传感器变占空比控制、小型二级压缩机实验研究、结论与展望。本书适合作为压缩机设计和制造科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

小型二级压缩机瞬态分析设计及其关键技术研究 /

钟美鹏著. — 上海:上海交通大学出版社, 2018

ISBN 978-7-313-19117-5

I. ①小… II. ①钟… III. ①压缩机—瞬态状况—研

究 IV. ①TH45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 111133 号

小型二级压缩机瞬态分析设计及其关键技术研究

著 者: 钟美鹏

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 三河市华晨印务有限公司

开 本: 889×1194mm 1/16

字 数: 101 千字

版 次: 2018 年 6 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-19117-5/TH

定 价: 26.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 5.625

印 次: 2018 年 6 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 010-61370827

前 言

直流无刷电机驱动的小型二级压缩机具有效率高、重量轻、体积小、节能效果明显的优点。便携式高压气源的开发,可以促进高压气动工具的研发,减小气动工具的重量,大大降低劳动强度。本书对小型二级压缩机关键技术进行了深入研究,成功开发了新型小型二级压缩机。

本书分析了小型二级压缩机的设计需求、结构型式、级数选择、压比分配和驱动方式,进行了基于等压比的热力学设计计算与动力学分析。作者长期研究压缩机设计与制造技术,在攻读博士学位期间以及毕业工作后,发表了一系列与压缩机相关的论文,在此基础上总结出版本专著。

由于按等压比设计小型二级压缩机具有局限性,本书提出了瞬态热力过程分析的新方法,建立了小型二级压缩机瞬态过程数学模型。该模型根据高、低压缸和储罐的连通状态不同,将整个工作过程分为七种情况,分别建立了这几种情况下的高、低压缸膨胀、压缩、排气和吸气方程,能更好描述小型二级压缩机的实际运行情况。同时还建立了动力学方程和电机瞬态电磁转矩方程,对小型二级压缩机的瞬态过程进行了计算与仿真分析。在此基础上,提出了以转速波动和功率最小为目标的小型二级压缩机结构参数优化方法,求得最优的参数,并进行了仿真实证。

为了减小小型二级压缩机的转速波动,本书研究了小型二级压缩机旋转、往复惯性力和惯性力矩的平衡,提出了L式小型二级压缩机配重的位置布置方法。研究了平衡L式小型二级压缩机的一阶往复惯性力的途径,对低压端活塞进行了参数优化。

为了提高小型二级压缩机效率,借鉴直接转矩控制思想,提出了小型二级压缩机无位置传感器变占空比控制方法。分析了小型二级压缩机无位置传感器变占空比控制对电流、转速波动、功率的影响。

在理论方法研究的基础上,开发了小型二级压缩机样机和测试平台,进行了实验研究。测试了整个过程中的级间铜管和储罐的瞬态压力变化过程、惯性力平衡前和惯性力平衡后的小型二级压缩机的振幅大小、变占空比和恒占空比下的电流大小等,实验结果验证了所提出的理论与方法。同时对小型二级压缩机样机的排气压力、排气量、功率、比功率、噪声等主要性能指标进行测试,测试结果表明:该样机各项性能指标均达到了国外同类产品的水平,填补了国内空白。

在此书编写过程中感谢浙江大学潘晓弘教授和郑水英教授对本书编写过程的技术指导。

目 录

第 1 章 绪论 / 001

- 1.1 研究背景及意义 / 001
- 1.2 变工况运行过程的研究现状 / 007
- 1.3 压缩机优化技术研究现状 / 009
- 1.4 惯性力平衡研究现状 / 010
- 1.5 直流无刷电机无位置传感器控制研究现状 / 012
- 1.6 压缩机控制研究现状 / 015
- 1.7 本书的主要研究内容 / 016

第 2 章 小型二级压缩机结构型式与稳态参数确定 / 020

- 2.1 引言 / 020
- 2.2 小型二级压缩机设计需求分析 / 021
- 2.3 小型二级压缩机的结构设计 / 024
- 2.4 基于等压比的热力学设计 / 031
- 2.5 动力学设计 / 038
- 2.6 基于等压比设计方法中存在的问题 / 041
- 2.7 本章小结 / 042

第3章 小型二级压缩机瞬态分析模型 / 044

3.1 引言 / 044

3.2 瞬态热力过程模型 / 046

3.3 动力学方程建立 / 063

3.4 本章小结 / 074

第4章 基于瞬态热力过程模型的设计计算与参数优化 / 075

4.1 引言 / 075

4.2 瞬态热力过程及影响因素分析 / 076

4.3 驱动系统仿真 / 089

4.4 小型二级压缩机结构参数优化 / 096

4.5 本章小结 / 103

第5章 小型二级压缩机的惯性力平衡 / 104

5.1 引言 / 104

5.2 惯性力平衡 / 105

5.3 低压端活塞参数优化 / 111

5.4 本章小结 / 122

第6章 小型二级压缩机无位置传感器变占空比控制 / 123

6.1 引言 / 123

6.2 PWM 控制原理 / 124

- 6.3 变占空比控制原理 / 126
- 6.4 变占空比控制对转速与电流影响 / 129
- 6.5 本章小结 / 133

第7章 小型二级压缩机实验研究 / 134

- 7.1 瞬态热力过程气体压力实验 / 134
- 7.2 振动实验 / 138
- 7.3 控制系统的实验研究 / 140
- 7.4 小型二级压缩机的性能测试 / 143
- 7.5 本章小结 / 152

第8章 结论与展望 / 153

- 8.1 主要结论 / 153
- 8.2 展望 / 155

参考文献 / 157

索 引 / 170

第1章 绪论

本章从我国目前微型直联机节能环保的要求出发,阐述了研究高效直流无刷电机驱动的小型二级压缩机背景和重要意义,阐述了国内外压缩机关键技术的研究现状。在此基础上,提出了本书的主要研究内容和解决的问题。

1.1 研究背景及意义

压缩机是一种将气体压缩从而提高气体压力或输送气体的机器^[1],在许多部门中应用极广,特别是在石油、化工、制药等工业领域中已成为必不可少的关键设备^[2],是许多工业部门工艺流程中的心脏设备^[3]。压缩机也是空调、冰箱等的关键部件,还常用于为气动工具提供动力源^[4-5]。压缩机是高能耗产品,据有关部门统计,空气压缩机的能量消耗占全国总发电量的10%左右^[6]。可见降低压缩机的能耗,提高压缩机的能效,对节约能源、保护环境具有重大意义。提高压缩机的效率对实现我国能源政策有着重要意义。

出于生产成本的考虑,目前,我国的压缩机绝大部分采用普通的异步感应电动机驱动,不但成本低,而且可靠稳定。但小功率电机通常效率低下^[7],能源浪费非常严重,因此国家发展和改革委员会的节能中长期专项规划中将压缩机系统节能优化改造列为“十一五”期间重点推广项目^[8]。

由于空气具有很好的可压缩性和膨胀性,适宜做能量传递中的介质,输送方便不凝结^[9],对人无害,对环境无污染,没有起火危险,且到处都有,用之不尽,因此压缩机作为动力的主要设备,为各种类型的凿岩机、装岩机、气镐等气动工具提供动力源^[10]。特别是室内装修业的兴起,为微型压缩机开辟了一个新的广阔的市场空间^[11]。比如,以前往墙壁上敲铁钉要用榔头之类的工具,现在基本上已被气钉枪所取代^[12]。为了使用起来更方便,传统的移动式微型压缩机已不再适用,取而代之的便是便携式压缩机^[13]。便携式压缩机由于重量轻,便于携带,且可用单相电源,因此受到用户的喜爱,主要用于气钉枪等气动工具^[14, 15]。1993年以前,国内市场上的便携式压缩机绝大部分是从意大利进口^[16, 17]。1993年后,国内开始制造,1995年后,随着国内铝件铸造水平的提高以及成本的降低^[18, 19],生产厂家越来越多,经过十年的发展,其制造水平已达一定水准,有相当一部分出口到欧美地区^[20]。值得一提的是,浙江省温岭的便携式压缩机产量已经占到全国的70%以上^[21]。但是,这些直联机大部分排气压力为0.8 MPa,也有1.0 MPa的机型,均属于低压直联

机。这从机械行业标准 JB/T 8934- 1999《直联便携式往复活塞空气压缩机》中不难看出^[22]。直联便携式往复活塞空气压缩机标准的部分参数如表 1-1 所示。

表1-1 直联便携式往复活塞空气压缩机标准JB/T 8934- 1999
的部分参数

压缩机 级数	驱动电机 输入功率 /kW	额定排气压力 /MPa			
		0.25	0.4 (0.5)	0.7 (0.8)	1.0
		输入比功率 / (kW/m ² · min ⁻¹)			
单级	0.25	12.4	14.8 (15.6)	17.3 (18.3)	19.1
	0.37	11.9	14.0 (14.8)	16.5 (17.5)	
	0.55	11.4	13.2 (14.0)	15.7 (16.7)	18.5
	0.75	10.7	12.5 (13.4)	15.0 (15.9)	17.8
	1.1	10.4	12.3 (13.0)	14.5 (15.4)	16.8
	1.5	10.2	12.0 (12.5)	14.2 (15.0)	16.8
	1.8				
	2.2	9.9	11.8 (12.5)	14.0 (14.8)	16.5
	2.6				
	3.0	9.7	11.4 (12.2)	13.5 (14.3)	16.1

表 1-10 小型二级压缩机主要性能参数 (续表)

压缩机级数	驱动电机输入功率 /kW	额定排气压力 /MPa			
		0.25	0.4 (0.5)	0.7 (0.8)	1.0
		输入比功率 / (kW/m ² · min ⁻¹)			
两级	0.55				15.7
	0.75				15.5
	1.1				
	1.5				
	2.2				15.0
	3.0				

综观近代压缩机技术的发展可知，它的前进与发展是与其他相关行业的发展进步分不开的^[23]。直联便携式空气压缩机的生产发展同样也不例外，目前大部分微型气动工具，如气钉枪之类，由于其动力源较弱，也就是气源的压力不够高，只能设计成比较笨重的模样，致使操作者的劳动强度很大^[24, 25]。很自然地，人们要求改善这些气动工具，要求它们更加轻巧、灵便，最直接、也是最简便的方法，就是提高气源的供气压力^[26, 27]。对高压气动工具而言，由于动力源更加强劲，其结构可以设计得更加轻巧，从而降低操作人员的劳动强度，提高工作效率^[28, 29]，因此急需研制排气压力在 3.0 MPa 左右的小型二级压缩机。

日本 HITACHI 公司目前已经研制成功了小型二级压缩机, 并已投入批量生产。该产品的功率为 1.5 kW, 使用单相、110 V 电源, 50 Hz 和 60 Hz 电源通用。最大排气压力 3.0 MPa, 高低压气动工具都可使用, 且高低压分别有两个出气口, 可同时使用。最重要的是, 该压缩机整机只有 18 kg 的重量, 一般人都可随手提起行走, 而噪声只有 90 分贝左右。

目前国内只生产低压直联机, 为了分析低压直联机的不足, 下面以国产直联机的参数与日本 HITACHI 公司研制的小型二级压缩机的参数之间差异为例进行分析。图 1-1 为国产直联机 PT3714 直联机, 图 1-2 为 HITACHI 公司研制的小型二级压缩机, 表 1-2 为国产直联机与 HITACHI 公司研制的小型二级压缩机参数比较。从表 1-2 可以看出, 相对国产低压直联机, HITACHI 公司研制的小型二级压缩机功率大, 重量轻, 排气压力高。

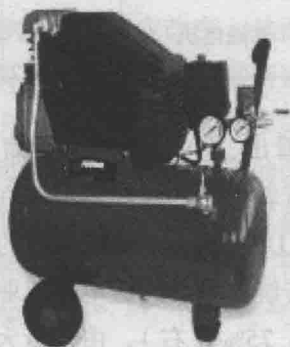


图 1-1 国产直联机 PT3714



图 1-2 HITACHI 公司研制的小型二级压缩机

表1-2 两种压缩机参数比较

	驱动方式	排气压力	重 量	功 率
国产直联机	异步感应电动机	0.7 MPa	33 kg	1.25 kW
HITACHI 小 型二级压缩机	永磁电机	3.0 MPa	18 kg	1.5 kW

从对比可以看出,小型或微型压缩机作为动力源虽然在各行各业都有着广泛的应用,但存在着一些普遍的问题^[30, 31],包括:①效率低,目前我国的小型或微型压缩机绝大部分采用传统的异步感应电动机驱动,电机效率通常非常低(65%~75%左右),由于量大面广,能源浪费非常严重^[32]。②排气压力低,大部分压缩机的排气压力为

0.8 MPa, 部分为 1.0 ~ 1.2 MPa, 相应的气动工具只能设计成比较笨重的形式, 使用起来不太方便^[33, 34]。③ 重量大, 传统的异步感应电动机驱动不但效率低, 而且很重, 加上现有压缩机的工作转速偏低, 使压缩机的整体重量偏大, 不适宜随身携带, 因而在某些场合无法使用^[35]。

由此可见, 小型二级压缩机如能研制成功, 可以直接提升我国压缩机制造行业的技术含量, 从而占领更大的国际国内市场空间。同时, 由于便携式高压气源的出现, 将直接促进气钉枪等气动工具的技术革新, 带来更大的经济效益。

1.2 变工况运行过程的研究现状

压缩机的变工况运行是指压缩机的运行条件(各级进气压力、进气温度、排气压力和排气量)中只要有一个发生变化, 其他参数也会相应改变, 从而破坏了压缩机各级之间原有的协调平衡关系, 直到重新建立起一种新的协调平衡关系为止^[36, 37]。由于工作状态发生了变化, 因此压缩机的排气量和功率也会发生相应的改变。此种状况下压缩机便处于变工况工作。虽然压缩机处于变工况时其排气量和功耗与正常工作时不同, 但其工作过程也遵循压缩机工作过程的基本原理^[38, 39]。由于进气压力、进气温度、排气压力和排气量的变化对压缩机的阻力矩与效率有重要影响, 因此国内外很多学者对压缩机的变工况运行进行了

深入的研究。

唐景春^[40]等人针对空调用变频制冷压缩机的变转速运行条件,分析了变频制冷压缩机的实际运行特性,提出了一种优化匹配方法。高俊峰^[41]在此基础上,结合工程实际,对活塞式压缩机的绝热吸气和等温排气工况进行深一层的热力学分析,重点讨论该工况下的各个工作参数,形成一套全面系统、简便易算的计算程序。傅烈虎等在变转速工况下进行了压缩机的性能实验,分析了容积系数、压力系数、温度系数和泄漏系数对容积效率的影响以及它们各自在变转速工况下的定义式^[42]。李鹏翔等^[43]通过对水源热泵机组压缩机的热泵循环过程的分析,推导出了压缩机制热量、耗功量和制热系数与蒸发温度及冷凝温度之间的函数关系,对热泵工况下压缩机的调节控制和选择具有一定的指导意义。以上研究都是单级压缩的情况下,没有考虑到级间压力对效率的影响。而小型二级压缩机是两级压缩,两级之间也相互影响。

范吉全等从多级活塞压缩机基本热力过程分析入手,得出了多级活塞压缩机变工况热力复算新方法,该方法具有收敛快,复算次数少的优点^[44]。王君等详细分析变工况下多级活塞压缩机的工作特点和气体在各级间的流动情况,建立了求解变工况下各中间级状态参数的方程组,并具体讨论了常见的变工况^[45]。王站成等建立了活塞式压缩机变工况下的绝热吸气和等温排气模型,讨论了模型的排气量、质量流量、抽气时间、充气时间、最低抽气压力、最高充气压力及指示功率等工作参数,并推导了相应

的计算公式^[46]。

上述研究考虑了各级之间的影响,但没有考虑到级间温度影响,同时没有考虑到排气压力与进气压力大小对阀的开启状况的影响。

文献^[47]分析了空调压缩机的变工况运行情况,建立了阀的二维模型,对制冷压缩机在背压变化的情况下,质量、能量和压力之间的关系进行了仿真。文章应用神经网络技术,对汽车空调的变工况运行进行了仿真研究,给出一个基于反向传播(BP)算法的神经网络结构设计方案并进行学习及分析,对汽车空调变工况运行可以利用BP神经网络进行计算机仿真^[48]。文献^[49]进行了递归神经网络应用于压缩机的进、排气压力与进、排气温度的仿真研究。

上述用于仿真的模型都是不确定的数学模型,很难用于压缩机的参数优化。同时,上述仿真没有考虑压缩机驱动系统对压缩机效率的影响。小型二级压缩机阻力矩波动大,同时由永磁电机驱动,而阻力矩波动对电机的效率影响较大,因此需考虑阻力矩与转速波动对小型二级压缩机的影响。

1.3 压缩机优化技术研究现状

评价压缩机性能好坏的主要指标是效率,因此国内外学者围绕这方面对压缩机进行了优化设计研究。Lafrance L J^[50]在总结前人的工作基础上,以效率为目标