

学校编码: 10384
学号: 19920081152941

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

新型高压空气压缩机的理论分析与仿真研究

A Study of Theoretical Analysis and Simulation of New-type

of High-pressure Air Compressor

陈 羽 锋

指导教师姓名: 胡国清 教授

专 业 名 称: 机械设计及理论

论文提交日期: 2011 年 5 月

论文答辩时间: 2011 年 月

学位授予日期: 2011 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2011 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(胡国清教授)课题(组)的研究成果,获得(35MPa 高压气泵研制)课题(组)经费或实验室的资助,在(国内某飞机装备公司及厦门大学机电一体化)实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

空气压缩机在机械、国防、航空、化工、石油、矿山、工农业等各个领域得到广泛应用。在航空领域应用的压缩机有严格的空间限制要求，一般的活塞式压缩机已经不能满足需要，因此，研制气压高、体积小、工作性能稳定的新型压缩机迫在眉睫。

本课题得到我国某飞机装备公司的项目资助，主要以新型十字滑块空气压缩机为研究对象。该新型压缩机充分利用余隙容积高压气体压力，改变以框架与活塞刚性连接的传统方式，采用活塞与滑块直接接触的柔性连接方式，因此，没有框架形成的滑道，整个结构更加紧凑，体积更加小型化。

首先，本文对新型压缩机的结构和工作原理进行研究；建立了新型滑块机构的力学模型，包括各级气缸气体压力、往复惯性力、旋转惯性力、气缸的侧向力、曲柄销所受切向力和法向力等，并使用 excel 软件进行了仿真和求解。对其动态特性分析表明：该新型压缩机所受活塞合力周期性变化，活塞与滑块瞬时不分离条件为第四级气缸排气压力达到 0.75MPa 以上，气缸所受侧向力在数十牛顿范围内变化，因此振动小噪声低。

其次，本文运用 Pro/Engineer 三维仿真软件建立了新型压缩机主体三维实体模型，进行虚拟装配，并使用 Pro/E 的运动分析模块 Pro/MECHANISM 进行运动学仿真。重点研究压缩机零部件运动干涉、活塞位置、速度、加速度变化规律及气缸行程容积的动态变化规律等问题。仿真结果表明，活塞的位置、速度、加速度基本呈正弦曲线变化，同列活塞的速度、加速度变化曲线重合；气缸容积随时间呈正弦曲线变化，其行程容积测量结果与样机数据相符合。

最后，本文基于有限元理论分析，使用 ANSYS 软件建立了新型压缩机曲轴的有限元模型，着重对曲轴进行了应力分析和模态分析研究。曲轴最大应力位于曲柄与曲柄销连接处，该位置最易出现裂纹；曲轴在约束状态下的频率比自由状态高，其振型主要表现为弯曲振动、扭转振动及两者的复合振动。

关键词：压缩机 柔性连接 仿真 有限元

ABSTRACT

The air compressor is extremely widely applied to various fields, including the machinery industry, national defense, chemical engineering, oil industry, mining industry, agriculture and industry. General piston compressor can not satisfy requirement due to the strict space restrictions requirements of the compressor applied in aviation field. Therefore, it is urgent and important to study a new type of air compressor which is designed with high air pressure, little volume and stable service performance.

The project has got the sponsorship of an aircraft equipment company, its main research object is a new type of cross slide air compressor. This new compressor takes full advantage of the high pressure air in the clearance volume, changes the connecting way between the framework and piston from rigidly to flexibly. Without the slide formed by the frame, the whole structure become more compact, the size of it becomes smaller.

Firstly, the structure and working principle of the new compressor is analyzed in this thesis, the mechanical model of the new slider mechanism is established, including air pressure in cylinders of each level, reciprocating inertia force, rotation inertia force, lateral force of cylinder, tangential and normal force of crankpin, and used Excel software to do simulation and solution. The dynamic characteristics analysis of it showed that the piston force is in change of cyclical, the condition under which the piston and slider won't separate instantaneously is that the pressure in fourth cylinder reach 0.75MPa or more and lateral force of cylinder fluctuates in dozens of Newton, thus the compressor can be little vibration and low noise.

Secondly, three-dimensional simulation software--Pro/Engineer is used to establish the three-dimension solid modeling, to do virtual assembly, and Pro/MECHANISM is also used to do kinematics simulation. It focused on problems of motion interference between compressor parts, change rules of piston position,

velocity, acceleration, and the dynamic change of cylinder's stroke volume. Simulation results showed that piston position, velocity, and acceleration are in changes of sinusoidal, curves of velocity and acceleration of the piston with the same column are coincident. Cylinder's stroke volume is in dynamic changes of sinusoidal, and the stroke volume measurement results consistent with the prototype data.

Finally, based on the finite element analysis theory, ANSYS software is used to establish a new type of finite element model of the compressor crankshaft, the research is focused on the crankshaft stress analysis and modal analysis. The maximum stress in the crankshaft is at the junction of crank and crank pin, where is the most likely location of cracks. The frequency of crankshaft under bound state is higher than it under free state, Its vibration type is mainly as flexural vibration, torsional vibration, or the combination of them.

Keywords: Compressor; Flexible connection; Simulation; Finite element

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 概况.....	1
1.1.1 压缩机的分类.....	1
1.1.2 活塞式压缩机的概况.....	2
1.2 国内外的研究现状与发展趋势.....	3
1.2.1 国内外研究现状及趋势.....	3
1.2.2 十字滑块压缩机的发展.....	5
1.3 课题来源和意义.....	9
1.4 课题研究的主要内容和方法.....	9
第二章 新型高压空气压缩机的组成和工作原理.....	11
2.1 新型十字滑块压缩机的结构组成.....	11
2.2 工作原理.....	12
2.3 新型运动转换机构研究.....	13
2.3.1 传统滑块压缩机运动转换机构.....	14
2.3.2 新型运动转换机构优点.....	17
2.4 热力学原理.....	18
2.4.1 理想循环与实际循环.....	18
2.4.2 热力学基本方程.....	20
2.5 级数选择和压力比分配问题研究.....	22
2.6 润滑与冷却系统.....	23
2.6.1 润滑系统.....	23
2.6.2 冷却系统.....	24
2.7 小结.....	25
第三章 新型高压压缩机动力特性的理论研究与分析.....	26
3.1 滑块机构受力分析.....	26

3.1.1 活塞和滑块运动方程.....	26
3.1.2 活塞和滑块机构的受力分析.....	26
3.2 动力学计算	30
3.2.1 基于 Excel 的新型压缩机动力学计算	31
3.2.2 动力学计算程序设计.....	31
3.2.3 计算结果及动态特性分析.....	37
3.3 曲轴质心偏心原因分析	41
3.4 滑块与各级活塞瞬时不分离地边界条件	41
3.5 小结	43
第四章 新型高压压缩机的运动学仿真与分析	44
4.1 基于 Pro/Engineer 的三维零件建模	44
4.2 虚拟装配	47
4.2.1 连接类型的选择.....	47
4.2.2 组件装配.....	48
4.3 基于 Pro/MECHANISM 的运动仿真	50
4.3.1 定义伺服电动机.....	51
4.3.2 分析定义.....	52
4.3.3 干涉检测与生成动画.....	53
4.3.4 位置、速度及加速度.....	56
4.4 气缸行程容积动态分析	61
4.4.1 活塞面积的计算.....	61
4.4.2 活塞距气缸壁的距离测量.....	62
4.4.3 气缸容积动态变化测量.....	64
4.5 小结	66
第五章 曲轴的有限元分析	67
5.1 概述	67
5.1.1 有限元法基本思想.....	67
5.1.2 有限元分析软件.....	67
5.1.3 ANSYS 有限元分析流程.....	69

5.2 曲轴模型的建立	70
5.2.1 几何模型的建立	70
5.2.2 有限元模型的建立	71
5.3 曲轴应力分析	72
5.3.1 边界条件设置及载荷确定	72
5.3.2 应力分析	74
5.4 曲轴的模态分析	76
5.4.1 模态分析意义	76
5.4.2 模态提取的方法	77
5.4.3 模态分析基本理论	78
5.4.4 模态分析过程	79
5.4.5 自由状态下模态	80
5.4.6 约束状态下模态	81
5.5 小结	83
第六章 总结与展望	84
6.1 总结	84
6.2 展望	85
参考文献	86
硕士期间发表的学术论文及取得的成果	90
致 谢	91

CONTENTS

Chapter1 Introduction	1
1.1 Overview	1
1.1.1 Classification of compressor	1
1.1.2 Profile of piston compressor	2
1.2 Research status and development trend of domestic and foreign	3
1.2.1 Research status and trend of domestic and foreign	3
1.2.2 The development of quadro-flex compressor	5
1.3 Sources and significance of issues	9
1.4 The main research contents and methods	9
Chapter2 The composition and working principle of new type compressor	11
2.1 The composition of the new quadro-flex compressor	11
2.2 Working principle	12
2.3 Study on new-type motion conversion mechanism	13
2.3.1 Traditional movement converter mechanism	14
2.3.2 Advantages of the new-type motion conversion mechanism	17
2.4 Thermodynamic principles	18
2.4.1 Ideal cycle and actual cycle	18
2.4.2 Basic equation of thermodynamics	20
2.5 Study on series selection and distribution of pressure ratio	22
2.6 Lubrication and cooling system	23
2.6.1 Lubrication system	23
2.6.2 Cooling System	24
2.7 Summary	25
Chapter3 Theoretical study and analysis of dynamic characteristics	26
3.1 Force analysis of slider mechanisms	26

3.1.1	The equation of motion of piston and slide	26
3.1.2	Stress analysis of the piston and the slider mechanism	26
3.2	Dynamic calculation	30
3.2.1	Dynamic calculation of new-type compressor based on Excel	31
3.2.2	The programming of dynamics calculation	31
3.2.3	The results and dynamic analysis	37
3.3	Cause analysis of mass eccentricity of crankshaft	41
3.4	The piston and slider won't separate instantaneously	41
3.5	Summary	43
Chapter4	Analysis and kinematics simulation of new-type compressor	44
4.1	Three-dimensional part modeling based on Pro/Engineer	44
4.2	Virtual assembly	47
4.2.1	Choice of connection type	47
4.2.2	Component assembly	48
4.3	Motion simulation based on Pro/MECHANISM	50
4.3.1	Definition of a servo motor	51
4.3.2	The definition analysis	52
4.3.3	Interference detection and generation animation	53
4.3.4	Position, velocity and Acceleration.....	56
4.4	Dynamic analysis of cylinder stroke volume	61
4.4.1	Calculation of piston area	61
4.4.2	Distance measurement of piston from the cylinder wall	62
4.4.3	Measurement of dynamic change of cylinder volume	64
4.5	Summary	66
Chapter 5	Finite element analysis of crankshaft	67
5.1	Overview	67
5.1.1	Basic idea of the finite element method.....	67
5.1.2	Finite element analysis software	67
5.1.3	Finite element analysis process using ANSYS	69

5.2 Establishing the crank model	70
5.2.1 Creation of geometric model	70
5.2.2 Creation of finite element model	71
5.3 Stress analysis of crankshaft	72
5.3.1 Set of boundary condition and load determination	72
5.3.2 Analysis of crankshaft.....	74
5.4 Modal analysis of crankshaft	76
5.4.1 Significance of modal analysis	76
5.4.2 Extraction method of modal.....	77
5.4.3 Basic theory of modal analysis	78
5.4.4 The process of modal analysis	79
5.4.5 Modality of the free State	80
5.4.6 Modality of the constraint condition.....	81
5.5 Summary	83
Chapter 5 Conclusions and prospect	84
6.1 Conclusions	84
6.2 Prospect	85
References	86
Publication	90
Acknowledgements	91

第一章 绪论

1.1 概况

空气压缩机(又称气泵)是一种将气体压缩从而提高气体压力或输送气体的通用流体机器,它把机械能转换为气体压力能,用途广泛,种类繁多,有“通用机械”之称^[1]。

1.1.1 压缩机的分类

压缩机种类很多,广泛应用于化工、石油、矿山、机械制造、工农业、航空、国防、甚至生活的各个领域。在各种不同使用条件下,根据不同的使用场合和使用对象的需求,压缩机的种类也很多。

按照压缩气体的工作原理不同,压缩机通常分为两大类,如图 1-1 所示,一类是容积式压缩机,另一类是速度式压缩机。容积型又细分为:回转式(包括螺杆式、滑片式及转子式)和往复式(包括活塞式和隔膜式)等。容积式压缩机中,通过改变气体的容积进而改变气体分子的密度来提高气体的压力。速度式压缩机细分为:离心式、轴流式、喷射式以及旋涡式压缩机等。其气体压力的提高是通过叶轮的高速旋转,使气体获得速度能,然后在扩压器中急剧降速转变为压力能^[2]。

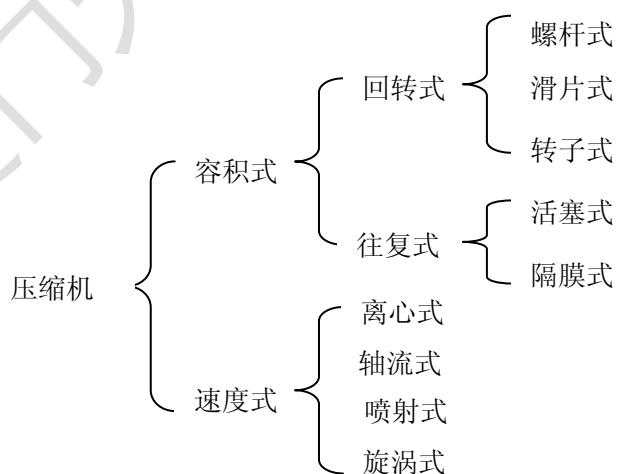


图 1-1 压缩机分类原理图

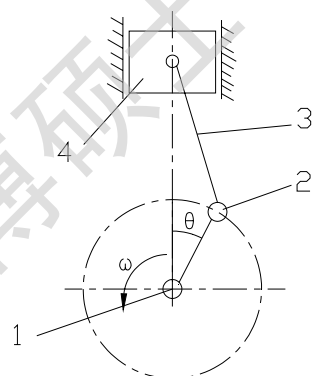
另外，按压缩的介质分类还可以分为：空气压缩机、氮气压缩机、氧气压缩机和氢气压缩机等。按照排气压力的大小分类：低压（0.3-1.0MPa）、中压（1.0-10MPa）、高压（10-100MPa）及超高压（>100MPa）。按照压缩机级数分为：单级、两级和多级压缩机^[3]。

1.1.2 活塞式压缩机的概况

往复式压缩机历史悠久，技术上已趋成熟，加上其制造简单，具有压力和排量范围广、效率高、气量调节时压力稳定等优点，目前仍然广泛被使用于国防、机械、冶金、化工等部门。

往复式压缩机中最典型的是活塞式压缩机，活塞式压缩机是人类最早开发的一种压缩机，也是最通用的一种压缩机。1952年，沈阳空气压缩机厂成功制造出第一台活塞式空气压缩机，如今我国已积累了将近60年的设计和生产经验。

活塞式压缩机工作原理如图1-2所示，它通过曲柄连杆机构把曲轴的旋转运动转变为活塞在气缸的往复运动。



1-曲轴 2-曲柄销 3-连杆 4-活塞

图 1-2 活塞式压缩机工作原理图

一般来讲，活塞式压缩机虽然品种繁多，结构复杂，但在结构方面，都具有一些共同特点，即都包括以下四类部件^[4]：(1)气缸部件，包括气缸、活塞、气阀等；(2)运动转换机构与机体部件，把驱动机的旋转运动转换为活塞在气缸的往复运动，包括曲轴、连杆、十字头、机身等；(3)辅助机构部件，它是保证压缩机正常运行和提高经济性、可靠性所必需的一些辅助设备和系统，包括冷却器、油水分离器、滤清器、润滑系统、消声器等；(4)驱动机及其控制系统，它是用来驱动并控制压缩机运行的动力设备，包括驱动电机、启动器、联轴器、相应控

制系统等。

虽然活塞式压缩机有外形尺寸和重量较大, 气体压力有波动, 易损件多, 维修工作量大等不足之处, 但它具有一系列其他类型压缩机不能及的优点, 包括活塞式压缩机能适应较广阔的压力范围; 其热效率高, 单位气量耗电量少; 加工比较容易、对材料要求低、造价相对比较低廉等; 技术上较为成熟, 积累了丰富的经验; 系统装置比较简单等多方面优点, 因此, 活塞式压缩机作为最通用的一种压缩机, 问世最早的压缩机, 依然有着广阔的市场前景。

1. 2 国内外的研究现状与发展趋势

鉴于活塞式压缩机适用压力范围广、热剪率高、适应性强等优点, 因此被广泛应用于国防、机械、造船、纺织、电子、化工、石油等各领域。

随着生产技术的发展, 对活塞式压缩机的研究从未止步, 并越来越多的应用新的材料、新的工艺、优化其性能和扩大其应用范围等。

1. 2. 1 国内外研究现状及趋势

随着工业生产技术的发展, 活塞式压缩机的种类和结构型式也日益增多, 各行业对活塞式压缩机的需求也不断增加。

目前, 国内外活塞式压缩机的研究动向有如下几个方面:

(1) 结构优化

国内外学者把较多的目光放在结构优化上, 即在原有压缩机结构的基础上不断创新及改进, 提升活塞式压缩机的总体性能, 如热力、动力学参数的优化、结构参数的优化、零部件结构和强度的优化等等。局部零件结构优化开始采用有限元分析的方法达到优化效果^{[5][6]}, 整体结构改进最具代表性的是 20 世纪 90 年代美国泰康公司开发的十字滑块式压缩机^[7], 其保留了传统往复压缩机的许多优点, 而且结构紧凑、力的平衡性好、振动小、噪声低、转速范围广, 在空调热泵系统中, 其性能可与滚动转子式和涡旋式压缩机相媲美^[8]。十字滑块式压缩机成为活塞式压缩机研究改进的一个重要方向, 其后国内外诸多公司和学者对十字滑块式压缩机进行了继续研究。

(2) 振动和噪声

压缩机结构振动和噪声是直接影响产品质量的重要因素,减振降噪一直是压缩机设计者追求的目标,对于提高产品的内在品质,降低噪声污染等都具有广阔的工程应用前景,同时还具有重要的学术意义和社会意义。

国内外学者利用软件分析和实验测试研究了振动和噪声的来源,提出了系列减振降噪措施,并取得一定研究成果^{[9]-[15]}。杨伟成^[11]通过实验发现通过阀片系统的修改,可以明显降低压缩机的噪声,而且随着压缩机流量的增加,阀片运动产生的噪声为主要声源。管华等人^[13]采取拆装压缩机零部件(如密封壳体上盖和气阀、顶盖等部件)测量比较分析噪声频谱,确定了主要噪声源。沈松等^[10]通过试验得出了通过改变压缩机壳体顶盖的刚度、阻尼参数和壳体在机箱上的固定方式,以及在压缩机附近采用吸声材料,这些都是改善压缩机噪声的有效途径。徐斌等^[15]采用了平面波动理论计算管道中的气流脉动的这种方法,在管道中气流压力的脉动值相对于压力的平均值是一个很小的数值时(小于 8%),能够比较准确的预测管道中的压力脉动。

(3) 摩擦与润滑

摩擦与润滑是当前压缩机技术研究的重要方向之一,这也是压缩机能耗降低、可靠性提高双重目标的追求。国内外学者主要进行了摩擦副磨损特性研究,新型耐磨材料的应用研究,活塞式压缩机的润滑油品研制及选择等相关研究。

Heinz Baumann^[16]提出瑞士苏尔寿公司研制了无油润滑压缩机,并在高压级柱塞外表采用自润滑材料。徐双满等^[17]进行了缸套-活塞环材料摩擦学性能的试验研究,得出了该配对副在往复滑动中摩擦系数随负荷和速度变化的关系曲线。周雷等^[18]以曲柄销-滑块副作为研究对象,对其在固体润滑下的磨损规律进行深入研究,建立了磨损定量计算的数学模型。林强^[19]提出采用把自润滑材料聚醚醚酮(PEEK)复合材料的滑块-滑道副来替代直线滚动轴承,并对 PEEK 复合材料的摩擦磨损机理及其影响滑块-滑道副的主要因素加以分析。

研究得知,对不同的压缩机润滑油的选择会影响功耗变化 3%~5%,选择适当的润滑油对压缩机性能、寿命及安全至关重要。西安交大先后研制开发了不同系列的压缩机油品,已经在国内全面推广应用^[20]。

(4) 气阀技术

气阀是压缩机最重要的部件之一,它的设计是否合理将直接影响压缩机运行

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库