# **第一章** 绪论

## 1.1研究背景和意义

随着社会经济水平和生活生产质量的不断提高，人类对于能源的需求越来越大。传统的三大能源煤、石油、天然气在过去的工业发展和社会生产中发挥了巨大的作用，虽然中国国土面积非常大，但人口众多，人均资源远低于世界平均水平，并且传统能源的储量非常有限，如果能源结构不改变，可以预测到在不久的将来，传统资源将会消耗殆尽，到时候就会出现严重的能源危机。除此之外，传统能源在使用过程中排放了大量的二氧化碳，造成全球气候变暖，带来很多生态问题，全世界都在想办法应对这种环境变化，中国担负大国责任，在世界气候大会上承诺到2020年我国二氧化碳排放量比2005年下降40%-45%。在这种环境下，国家必须进行节能降耗和生态建设。根据《中国能源发展报告2016》，2015年我国的能源消费强度明显下降，全国万元国内生产总值能耗下降5.6%，我国能源投资3.25万元，同比增长4.1%，煤炭行业投资额同比下降14.4%并且已经连续三年呈下降趋势，石油和天然气投资同比分别下降5.7%和20.9%，同时，电力和热力的生产和供应投资同2014年比较增长15.7%，清洁能源投资总额增长17%[1]。中国对于清洁能源的投资已经连续四年居于世界首位，充分体现了我国对于能源发展的重视以及为全球环境发展做出的贡献。

压缩空气作为一种清洁、安全、可控制的能源被越来越多的应用在了工业生产中。压缩空气经过压缩机的压缩，电能转换为压缩空气的动力势能，压缩空气可以很好的被控制，运输容易并且在生产和应用的过程中不发热不触电，安全可靠，越来越多的企业搭建空气压缩系统来取代原先的生产设备。空气压缩系统每年消耗2000亿度电以上，占全国工业总耗电量的10%左右[2]。空气压缩系统在食品、纺织、石油、化工、材料、航空航天等方面有着广泛的应用，主要体现在三个方面：制冷与压缩、提供空气动力和工艺流程压缩机[3]。一个空气压缩系统主要的成本包括压缩设备的购买及安装、设备的维护、设备运行时电能的消耗，其中电能的消耗占了整个系统生命周期内大约70%-80%的成本[4]。另外，根据研究和实际运行的情况，气动系统的能量转换效率是非常低的，一般不到40%，远低于电气系统，这说明气动系统的节能效果是不理想的，同时也说明了气动系统具有很大的节能空间[5]。因此降低空气压缩系统能源的消耗是节能减排的重要目标和突破口。

在空压机能耗方面，国外一些发达国家很早就成立相关部门针对空压机节能做了很多研究和实践工作，很大程度上降低了空气压缩系统的能源消耗；而我国空压机系统的运行效率比日本和一些欧美的发达国家低很多，主要存在用气管理不科学，压缩机运行机制不合理，部分企业对节能工作不重视等问题。通过对现有的空气压缩系统进行研究和改造，提高工作人员的节能意识，改进空压机的运行策略，科学管理用气，减少管道的泄漏等措施能够很好地降低空气压缩系统的能源消耗，提高运行效率。根据我国企业当前的空气压缩系统中存在的问题，通过改造空压机系统，大约能够取得30%的节能，这就意味着每年能够节约600亿度电。对于企业来说这带来了巨大的经济效益，为企业生产带来了多方面积极的因素。对于国家和社会而言，消耗的电能减少意味着传统能源消耗变少，同时减少二氧化碳的排放量，对建设生态环境起着重要的作用。

本课题是基于空气压缩系统，从理论知识到实践分析等方面全面的研究空压机节能情况，对于单台的空气压缩机和压缩机群提出相应的控制策略研究，在满足工业需求的基础上分析控制节能策略到达节能的目的。对于空气压缩系统的产气单元、储气罐、冷却器、管道以及上层的控制策略等多个目标的优化系统，达到节能减排的效果。该课题的研究能有效的提高空气压缩系统的能量转换的效率以及资源的利用率，带来良好的经济效益和社会效益，对生态建设也能起到重要的作用。

## 1.2 压缩空气系统研究现状

### 1.2.1国内研究现状

空压机在我国的经济建设中应用越来越广泛，针对现在大部分的生产厂家和现场操作人员没有认识到空压机巨大的节能潜力，对空压机节能的重视也远远不够。空压机的控制通常是简单的启停机控制，虽然能够达到工业目的，但是频繁的启停造成了很大的能源浪费，也加大了空压机的机械损耗。针对于这一现状，国内众多的学者和工程专业人员在各方面展开了积极的研究。

郭鹏[6]等研究了压缩机气缸的内部热力工作过程，建立气缸内的气体运动参数变化的数学模型，对缸内气体的瞬时参数压力场、速度场、平均质量等的变化情况进行了研究。此外，对于各种热力学参数变化的检测，他们搭建了压缩机试验台，对压缩机运行过程中测得的温度、压力、流量、转速、功率等参数进行分析和计算，通过数值模拟结果，对比实际和理论的压缩机工作过程。

孔德文[7]等将现场总线技术应用于螺杆机空压机群的控制系统设计，提出螺杆空压机群联动控制的控制策略，给出了控制系统架构方式、硬件和软件设计、压力控制算法，完成对空压机数据的实时采集、实时显示、历史数据查询和数据存储等功能。将其应用于空压机群的联动控制上，很大程度的提高了空压机的运行效率，为企业中的空压机群的节能运行提供了可行的控制方案，具有一定的应用价值。

王红[8]等针对压缩机较多的运行在变工况条件下，比如大气温度和压力变化巨大的情况下，压缩机的工作性能会发生改变，压缩机的轴功率、排气温度、排气质量流量等参数会发生变化。通过建立螺杆压缩机工作过程的数学模型，提出了计算螺杆压缩机阴阳转子受力的方法，得出在变工况下力矩和转速的关系，对比理论过程与实践过程的差别，对工业现场的螺杆压缩机运行具有一定的指导意义。

张业明、蔡茂林[9]针对生产企业 对气动系统逐步加大节能措施的现状，提出基于流量供给的气动节能理念，将传统压力控制转为流量控制，阐述了基于流量供给的气动节能理论，研究了面向压缩机群控制的新型节能智能控制器的流量控制、台数控制、预测控制、和学习控制四个功能，分析了各功能的关系，给出了智能控制器的软硬件结构。

何凤有[10]针对空压机供气系统具有大滞后特性及系统稳定性差的问题，研究了一种基于模糊控制器的空压机恒压供气系统设计。该系统结合了传统PID控制和模糊控制技术研究了模糊PID控制器，完成了整个系统自整定参数，实现恒压供气的目的，提高系统可靠性和稳定性，具有一定的节能效果并且故障率有所下降。

史世坤[11]对现有空压机系统进行深入研究，建立空压机系统数学模型，分析影响能耗主要因素；对压缩后的输气管道进行压损原理分析，阐述室内外气象条件与调节旁通流量的关联因素；通过对城市气象参数的统计分析，选择计算的标准工况，分析能耗并进行数据比对，得出系统的节能比例。

傅烈虎[12]等人在转变速工况的条件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定义式；提出容积系数主要与压缩机的结构尺寸和吸、排气压力比有关，压力比的变化对容积系数构成以多变膨胀指数为幕的指数影响；转速变化对压力系数构成二次影响；温度系数和泄漏系数同时受到与压力比和转速的影响。以压缩机的吸气和排气的压力比以及转速为变量，用实验数据拟合压缩机的容积效率，拟合公式具有一定的可信度。

周大寒[13]等人对空压机群控节能策略实用性进行深入研究，研究了单台空压机和多台空压机节能的控制策略，通过实验对比传统控制方法和该文章优化后的控制方法，此外搭建了空气压缩系统实验台，该实验台以西门子PLC为核心，实时的采集空压机系统的温度、压力、流量等数据量，用C#开发了相关的上位机软件，能进行实时的数据读取和记录，动态分析空压机各个参数的变化已经控制策略的节能效果，为进行空压机节能实验提供了良好的平台以及基础的数据。

赵前程[14]等人以螺杆空压机为研究对象，在系统组成的基础上分为储气罐子系统、电机子系统、压力控制子系统；电机子系统采用三相感应电机转子磁场定向控制模型，分别进行了电机 控制和普通加卸载控制模式下的数值仿真分析，说明变频控制策略使系统具有良好的动态和静态性能，使压力比较精确得控制在给定值附近。

王盛慧[15]等人详细的解释了空压机恒压控制过程中诸多参数之间的相互关系，建立了空压机时变系统模型，提出基于串级控制的广义预测控制策略，该策略已经被成功的应用在了空压机调节系统。该文的结果表明控制策略能够消除不确定的干扰和非线性的其他因素，有效的提高了系统的稳定性和可控性。

除了以上的对空压机节能方面的研究之外，国内还有很多的学者和工程人员致力于空压机的节能研究，包括恒压控制、变频控制器、空压机模型优化、空压机群控调度策略等方面，使人认识到空压机节能的可行性，了解空压机节能带来巨大的经济效益和社会效益，推广和优化空压机的使用。

### 1.2.2国外研究现状

在空压机的节能优化方面，许多国外的学者和工程人员也做了非常多的研究工作，包括压缩机工作机理分析和压缩机节能控制器的研发等。

德国凯撒空压机公司是世界上最大的空压机生产及空气压缩解决方案的公司之一，该公式研制的SIGMA系列的三种控制器处理空气生产控制问题。该系列智能控制器能够智能的分析运行数据，模拟可选的行动方案并且自主的选择空压机控制策略。它能够智能的控制空压机的启停，并且计算空闲即变频器损失，使现有的空压机站能够实现最大的能源利用率。

瑞典的阿特拉斯科普柯集团是著名的跨国公司，旗下生产的空压机及配套产品远销世界各地，阿特拉斯研制的ES中央控制器就是用来优化压缩空气系统，ES中央控制器可连接所有的压缩机设备，能够降低系统压力并且稳定压力，实时的监测系统对于压力的需求，发挥变速驱动的优势，高效的节约能源。

另外一家空压机生产的巨头英格索兰公司近期发布全新变频微油螺杆空压机，R系列的RS30n和RS37n变频微油螺杆机。通过先进的变频驱动技术，这两款压缩机气量增加了15%，能耗降低了35%，此外还提升系统的可靠性，一般的机组启动时的电流是正常工作情况下的8倍，而这两种空压机有效的限制启动电流，减少启动瞬间对电网的冲击并且降低了空压机启动时的电流。新一代R系列微油螺杆机配合Xe系列控制器能够达到控制整个空压机系统的效果，Xe7.0能够联合控制多台空压机并自适应运动速度。

空压机系统具有巨大的节能潜力，国外相关领域的很多学者也专注于空压机节能的研究，在多方面有了成果。

Susanne[16]在MATLAB/SIMULINK中建立了空气压缩系统的动态仿真模型，把整个系统分为产气单元、储气罐、冷却器三个主要部分，对每个部分都给出了详细的数学描述，文中还给出了模拟结果和实际结果的对比，完成参数的修正以及仿真效果的评估，实现了标准螺杆空压机组的动态仿真模型。

N.Seshaiah[17]研究了喷油双螺杆机，在完善气体和标准热力学关系的基础上进行数学分析，通过实验获得模拟系统所需要的系数，并在以空气为介质的情况下进行压缩机的性能试验，最后还研究了空压机运行和设计的参数对容积效率的影响。

H.H.Nguyen[18]研究了天然气管道选择压缩机策略，目的是为了尽量减少运行成本，提出了三种自动化技术，混合整形线性规划、遗传算法和专家系统，智能的启停压缩机去满足用户的需求，基于天然气管道的参数值对以上自动化技术的优缺点进行比较。

R.Saidur[19]介绍了在节能策略下的空压机能源利用情况，对比使用高效电机、变频代替非变频、防漏、高效喷嘴等节能策略来分析节能情况，企业可以根据自身的情况选择最适合的节能策略，在经济上是可行的。

Richard Adamson[20]讨论了低温空气分离装置和压缩机组的稳态优化策略的开发，使用混合整数线性规划实现，证明在满足客户需求的同时来提高稳态下的现场效率，通过压缩机的分布和压缩网络的最佳负载分布来实现，压缩机的精确功率模型可以比较准确的预测压缩机现场的功率模型。

Gholamreza[21]研究了压缩机工作过程中吸入的水分对需要高品质空气客户设备的危害，说明空气在压缩前必须经过适当的干燥，并且研究了一种热量再生的干燥剂结合空压机的余热利用，这样就某种程度上节能了。该应用可以改变传统的耗电、风冷、圧缩热等风干系统，在干燥的同时还能起到冷却作用，经济效益十分显著。

Marwan[22]根据SRM(Svenska Rotor Maskiner)开发的一种新型带水冷双螺杆压缩机，介绍了该压缩机热力学过程的数学模型，运用特殊的离散化方法来研究空压机在高温情况下的工作过程。模型中的压力和焓变作为主要量去计算转子耗能和连续性方程，并且在空压机真实工作过程中的压力泄漏、注水和热量损失等情况也能够通过建模来对比分析，结果表明注水冷却能够减少压缩机故障，提高压缩机的工作效率。

Jan Tommy[23]把对压缩机角速度的控制扩展到压缩机防喘振的工作中，提出了一种低阶离心压缩机模型，其中状态是质量流量、升压和转速；使用与压缩机串联的紧耦合阀来稳定喘振线左侧的平衡，最终推导出阀压降和阀芯速度的控制器。

以上的研究包含了气体压缩过程的热力学研究、压缩机工作状态的变化、压缩机模型的仿真、压缩机操作优化、压缩机节能方向等多个方面，目标是追求压缩机性能稳定和节能。除了以上研究之外，在压缩机节能方面还有很多其他的学者做了很多出色的工作。

## 1.3空压机的分类及应用

根据空气压缩的原理来分，空压机可以分为容积式空压机和动力式空压机。根据理想气体压强公式，气体压强的大小由单位容积分子个数*n*，分子质量*m*和运动速度*v*决定，如下式所示：



式中，*N*为气体分子数，*m*为分子质量，*v*表示分子运动速度，*V*表示体积。

容积式压缩机通过压缩气体的体积提高单位体积内的分子速度提高气体的压力，即减少*V*，工业中典型的活塞机和螺杆机都属于容积式压缩机；动力式压缩机通过改变气体的运动速度来增加气体压力，即增加*v*，离心式空压机属于动力式压缩机，具体如下图所示。



图 空气压缩机分类

空压机按压缩原理细分有很多种类型，如上图所示，最常用的有：1）活塞机。依靠活塞的往复运动来压缩气缸内的气体，活塞机制造简单，热效率大，排气范围广，被广泛应用。2）螺杆机。通过阴阳转子的相互浸入，使容积发生周期性变化，而完成吸气和排气。螺杆机一体化程度高，操作维护方便，稳定性强被广泛应用。3）涡旋机。通过相位差180°的两个盘进行啮合，形成封闭空间，相啮合使月牙面积不断压缩变小，达到气体压缩的目的。涡轮机噪音低，适用于变转速运动和变频调速等特定的场合。4）离心机。叶轮转动时，气体在叶片的推动下随叶轮一起旋转，由于离心作用气体沿叶轮流道径向流动并离开叶轮。离心机结构简单易维护，无须润滑，运转率高，用在一些气量大压比低的场合。

根据润滑方式分为有油压缩机和无油压缩机。空压机油有以下几个作用：1）润滑作用。润滑轴承和传动部件，减少部件之间的摩擦，延长机械寿命。2）密封作用。在空压机运行过程中起密封作用，减少空气泄漏，提高容积效率。3）冷却作用。作为一种介质冷却压缩后的高温气体及机器本身。有油空压机有很多优点，目前市场上大部分都是有油空压机，但是也有一定的局限性。部分有油压缩机在使用的过程中需要定期为机器加油，并且空压机会出现喷油、漏油等现象，造成环境污染和操作麻烦，工作效率受影响。因此，无油空压机在有油空压机的基础上进行改造，有两种方法：1）用水代替油，不需要用户花时间去维护，自动化的进水排水装置也让用户省心。2）在转子上镀上自润滑的涂层，但空压机的高速密封性使无油空压机的加工精度要求很高，成本大。

表1.1 无油空压机行业应用情况

|  |  |
| --- | --- |
| 行业 | 特点 |
| 汽车 | 高品质的喷漆饰面、运行平稳的工艺流程、更健康 |
| 食品和饮料 | 更健康、更美味的高品质终端产品 |
| 化工 | 更高的产品纯度、更佳的工艺流程、更少浪费、更多安全 |
| 电子 | 稳定的控制系统、洁净的生产环节、更高品质的最终产品 |
| 石油和天然气 | 无故障控制系统、更安全、更高效 |
| 纺织 | 更高的生产效率、维护费用低、更高的织物品质 |
| 制药 | 高纯度产品、减少污染风险、工艺流程更高效、减少浪费 |

表1.2 喷油空压机行业应用情况

|  |  |
| --- | --- |
| 行业 | 特点 |
| 船舶 | 减低成本、易于安装、易于维护 |
| 汽车制造 | 安装方便、提升工作效率 |
| 发电 | 长时间无故障运行、工作效率高 |
| 通用工业 | 设备运行安全、设备寿命长 |
| 化工和石油化工 | 降低系统生命周期的成本、提升生产效率 |
| 纺织业 | 可集成、减小压降、低噪音 |
| 采矿 | 长时间无故障运行、工作效率高 |

无油空压机出气具有无油性，避免了净化过滤等不必要的麻烦，也不会因为润滑油的粘度问题产生机体高温或者油污损坏机体等情况。无油空压机还降低了空压机在运行过程中的能耗。如上表1.1所示，在生产的实际应用中，在对产品的安全洁净要求比较高的行业，大多采用无油压缩机，无油压缩机更节能，更高效。然而，无油空压机的高精度意味着维护变得更加困难，采购和维护成本大大增加。如表1.2所示，在对系统可靠性和可维护性要求较高，而对无油性要求低的场合大多使用喷油压缩机。

## 1.4空气压缩系统的节能潜力

目前国内外空压机的应用非常广泛，由于没有通用的能耗评估标准、空气压缩系统设计不科学、空压机控制策略不合理、空气泄漏和空气浪费严重等问题，空气压缩系统能源利用率低，空气压缩系统的节能潜力巨大。

本文从以下几个方面阐述空气压缩系统的节能空间：

（1）能耗标准

使用能耗低、效率高的空压机代替能源利用率低的空压机能够很大程度上节约电能。目前没有一套全世界公用的衡量压缩机能耗的标准，主要是根据空压机的产气量和消耗的电能衡量该空压机的效率，在这个过程中对空压机的吸气温度、吸气压力、产气压力等环境参数没有确切的计算过程，而这些参数与空压机的能耗有着非常密切的关系，目前采用的处理公式不能够有效的判断市场上各式各样的压缩机效率高低。空压机的用户选取空压机类型的时候除了考虑空压机的功率、产气量等必要参数之外，只能根据空压机的品牌来判断空压机品质的优劣，这样对生产空压机的大公司很有利，可是对大多数不知名的小公司有失公平，使用高效电机的空压机不被认可，使用低效电机的空压机也能给出一个压缩机能耗低的指标。目前亟需一套科学量化的指标，使用户能够挑选能源利用率高、产气性能好的空压机。

（2）空压机站的运行

由于现在很多的空压机站的操作人员和管理人员缺乏足够的节能意识，空压机站不合理的配置和运行方式造成了很大的能源浪费。节能主要体现在以下三个方面：1）在搭建空压机站之前必须评估用气需求，通过对空压机型号、台数、额定排气量、功率、工作条件等参数的比对配置合理的空压机站，选择节能高效的电机。目前，应用最广泛的压缩机包括往复式活塞机、螺杆机和离心式压缩机，往复式活塞机的工作效率最低，大约50%左右，离心式压缩机能达到60%，最高的是螺杆机，工作效率最高能达到80%[24]。2）根据实际需求制定空压机站的控制策略，包括空压机站的启停数量、空压机的运行方式等，使空压机在用户需求的压力内合理供气。如果空压机供给的压力高于用户需求的压力，那么在这种运行方式下会浪费很多的能源，产气压力每高0.1MPa，空压机额外耗能7%[25]。3）绝大多数的空压机站提供统一的压力，而一个用气场所各处所需的压缩空气的压力可能会不同，在这种情况下空压机站需要提供用气场所需要的最高压力，对于压力需求低的场合需要用减压阀进行减压，这样的操作使得空压机站浪费了很多能源。这种情况可以将一个压缩机站分为几组，分别提供不同压力范围的高低压，分别对不同压力需求的设备供气而放弃传统的统一的高压供气，根据需求用减压阀减压。

（3）空气泄漏

压缩机站正常运行并不代表压缩机站没有存在的问题，而这些问题严重影响着压缩机站的效率，空气泄漏就是其中一个具有代表性的问题，消除和减少泄漏是十分有效的节能方式。我国工厂中泄漏量通常占供气量的20-30%，有些不注重管理的工厂甚至达到了50%，一个直径1mm的小孔能导致每年3000KW·h的电力损失[26]。相关管理人员必须采取有关措施，对泄漏定量的检测和计算，定期更换破损老化的零部件，确保把空气泄漏的程度降到最低，实现能耗的降低。

（4）供气管路

压缩空气由产气单元到各地的用气设备是由管路系统来运输的，在管路系统也有很大的节能空间。除了空气泄漏外，压缩空气在管路的传输过程中的压力损失也造成了很大的能源浪费，压缩空气流动过程中的压力损失和管路直径的5次幂成反比，和管路的长度成正比，所以必须配备行之有效的方案，使得在满足用气需求的情况下减少管路长度，增加管路直径，尽量减少弯头。由于管路直径越大费用越高，所以现在常常采用优化方法使管路系统综合压力损失的费用和管路材料施工等费用，使管路系统达到经济最优。

（5）终端设备

提高终端用气设备的压缩空气利用率能够在一定程度上有效的节约能源。对于终端用气设备，因为执行元件在工作过程中，有部分高压气体没有做功就从排气系统排出，这部分气体的流失造成了很大的能源浪费。例如矿业生产中的一些风机和矿石分拣机供气等环节，即使设备不处于工作状态，供气系统也没有停止运行，能源浪费严重。又比如在制造加工企业中，大量使用的气枪在使用过程中存在诸如供气管道过长、供气压损过大、供给压力过大等用气不规范问题，这些问题带来了严重能量损失。当今已经有了一些应对办法，有的针对排出的气体设置一个节气缸用来重复利用。还有一个方法是进口节流方式，在开关关闭后马上切断充气过程来降低充气一侧的压力，这样也能减少终端用气设备的能量损失。

（6）余热利用

余热利用是对空压机运行过程中排放的热量进行进一步的利用，没有提高空压机的工作效率，但是从另一方面提高了空压机的能量转换率。空压机的热量一般都是直接排放到空气中，有的甚至需要额外配备冷却器来降低空压机运行过程中的温度，余热利用装置不仅解决了空压机运行过程中温度过高的问题，提高了压缩机的使用性能和工作寿命，而且利用了空压机运行过程中的多余热量，创造了额外的经济效益和环境效益。空压机预热利用装置已经在很多工业领域得到了应用，包括给锅炉供水预加热、用于供暖设备或者热水系统的预加热、冬季空调新风预热等，在纺织业，食品业等行业也有着广泛的应用。

以下是某研究针对各个节能措施的节能情况分析[19]，如表1.1所示，在实际的节能改造当中，我们可以根据实际情况优化其中的一项或多项来达到节能的目的。

表1.1空压机节能优化目标及节能效果

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 优化目标 | 具体措施 | 节能情况 |
| 吸气温度 | 使用冷却器降低吸气温度 | 能耗总量减少1%/5℃ |
| 加载策略 | 优化空压机的控制策略 | 能耗总量减少0.8% |
| 产气压力 | 合理降低产气压力 | 能耗总量减少0.4% |
| 空气使用 | 提高空气使用效率 | 能耗总量减少0.6% |
| 空气泄漏 | 减少空气泄漏 | 能耗总量减少4% |
| 余热利用 | 利用运行过程中的热量 | 能耗总量减少1.8% |

## 1.5本文研究的主要内容