# 第二章 空气压缩系统分析与建模

## 2.1空压机的运行原理

为了深入研究空气压缩系统的运行原理，本文先详细介绍两种常用的空压机的运行过程——活塞机和螺杆机，它们都是容积式压缩机。

### 2.1.1活塞机的运行原理

如图2.1所示，活塞机的运行原理很简单。具体的步骤为：1）吸气过程：关闭出气阀，转轮转动由连接杆带动活塞向右运动，一直运动到最右端，关闭吸气阀，吸气过程结束。2）压缩过程，活塞开始左运动，气缸容积变小，气体压力变大。3）排气过程，当气缸中气体压力大于储气罐中的压力，气缸中的气体由出气口排入储气罐，直到排完。4）膨胀过程，由于余隙容积的存在，气缸中会有一些高压气体残留，在吸气过程之前有一个膨胀过程，这个过程没有吸入气体而是内部气体膨胀。图2.2是一个压缩过程的P-V曲线描述：1）吸气过程：活塞机的容积增大，由于进气阀与外界环境相通，所有最终的气压为标准大气压。2）压缩过程：活塞和吸气过程中的运行方向相反，活塞机容积减小，压力增大，直到压力增大到大于等于储气罐中压力。3）排气过程：当气缸中的空气压力大于等于储气罐中的压力时，开始排气，然后继续压缩，继续排气。4）膨胀过程：气缸余隙容积中的高压气体膨胀到压力小于等于标准大气压，这时才会开始吸气。上述活塞机的进气阀和出气阀都是配备回止阀，单向流通，防止气体回流。



图2.1 活塞式空压机工作原理图

注：1-进气阀；2-气缸；3-活塞；4-连接杆；5-转轮；6-出气阀



图2.2 活塞机气缸内气体P-V曲线图

活塞机具有很多优点。首先，活塞机进气排气的压力范围非常广泛，在高压的应用领域往复式压缩机能够作为增压机来使用；其次活塞机气密性相当良好，适用于压缩各种不同类型气体。此外，活塞机采用高强度的转子，转速低，坚固耐用，稳定性高，连续使用不容易出故障。活塞机的不足之处也很明显，其一，在活塞机加载过程和卸载状态活塞机都浪费了大量的能量；其二，启动电流很大，容易造成电网不稳定以及导致其他设备异常，频繁的加卸载切换很容易损害机器本身。其三，活塞机具有噪音大等问题。

### 2.1.2螺杆机的运行原理

螺杆机的基本运行原理如下（以喷油螺杆机为例），如图2.3所示：1）空压机通过空气过滤器吸入周围的空气，使之进入压缩机容腔。2）通过阴阳转子合运动改变容积，具体过程如图2.4所示，同时容腔内不断喷油，润滑和冷却螺杆。3）经过压缩后产生的高温高压的油气混合物通过单向排气阀进入油气分离器。4）大多数的油在油气分离器内和压缩空气分离，经过冷却后循环利用。5）油气分离器内的空气达到最低压力时，打开最小压力阀，高温的压缩气体进入冷却器。6）压缩空气冷却过滤后被用气设备使用。



图2.3 螺杆机运行原理图

注：1-空气过滤器；2-减荷阀；3-螺杆主机；4-排气单向阀；5-油气分离器；6-最小压力阀；7-冷却器



图2.4 螺杆机压缩空气原理图

螺杆机相比其他类型空压机的优势在于以下几点：其一，可靠性高。这是由于螺杆空压机零部件少，故障自然就少，运行稳定可靠；其二，适应性强，螺杆空压机具有强制输气的特点，排气量不受排气压力影响，运转平稳。其三，动力平衡性好，螺杆空压机没有不平衡的惯性力，机器可以平稳地高速运转，适合移动式作业。当然，螺杆机也有一定的局限性，运行噪音大、能耗较高、损坏后维护费用比较大等都是制约螺杆式空压机的一些因素。

## 2.2空气压缩系统的基本控制方式

### 2.2.1空气压缩系统控制背景

传统的空压机的驱动电机都不能够在运行时调节转速，一般都是采用启停机来控制电机的运行。空压机正常运行的具体过程为：设定一个上限压力和一个下限压力，空压机工作压缩气体到储气罐中，通过储气罐中的压力变送器传递压力信号，当压力达到上限压力时，空压机停机，储气罐中的压力开始下降，当压力值到达下线压力时，空压机开机，储气罐中的压力开始上升，如此往复。通过设定压力上下限来达到相对恒压控制的目的，通常空压机对一定时间内的启停次数有所规定，如200KW以上的大功率高压电机每小时启停的次数不应该超过4次，上下限控制方式容易带来以下问题：

（1）电网冲击大。三相电机启动瞬间启动电流一般是电机的额定电流的5-7倍，会造成整个用电线路电压降低，从而拉低整个用电网络的电网电压，对电机和其他用电设备带来损害。此外，电流的激增还可能触发电路欠保护动作，造成机器设备的有害跳闸，同时还可能使电机绕组发热，严重影响了电机的性能，降低了机器设备的使用寿命。

（2）电能浪费严重。电机在空载的时候会消耗相对于正常工作时大约30-50%的电能，并且一旦出现了频繁的排空现象会加大电能的浪费。电机在排空时，会产生大量废气，严重污染环境。

（3）上下限压力确定问题。通过设定上下限压力来控制产气压力相对恒定在设定值，上下限压力不容易确定。压力调节区间太小会导致检测的压力不断在上下限压力之间变化，电机启停很频繁，电机容易发热烧毁并且不断地启停带了了额外的启动电能消耗；压力区间太大一方面满足不了工业现场的要求，另一方面压力区间过大的话意味着电机要做额外的功去达到高压，极大的浪费能源，并且高压会带来更严重的压力损失和空气泄漏，对管路的也有一定的危害。

（4）噪音大。空压机正常运行噪音大概在60分贝左右，当空压机空载排空放气的时候会带来严重的噪音污染，长期下来对空压机站操作人员带来身体健康问题，而且电机空转时电机在做无用功。

### 2.2.2空气压缩系统基本控制方式

空气压缩系统能耗利用率高低很大程度上由控制方式来决定，一个有效的控制策略能够节约20%-40%的电能。空压机的基本的控制方式：

（1）启停控制。主要是通过电源开关的开和关来控制空压机的启动或者停止，首先读取储气罐中的压力值，如果达到了空压机的启动条件空压机就启动，如果达到了空压机的停机条件空压机停止运行，否则空压机保持原有的运动状态。空压机通过不断地启停来满足用户的需求，维持压力的稳定，频繁的启停不利于空气压缩系统的可持续运行。

（2）加卸载控制。加卸载控制方式是空压机最常见的控制方式之一。它的控制压力恒定原理和启停控制很接近，通过设定一个压力的上下限，压力达到上限，空压机卸载；压力达到下限，空压机加载，其他的情况空压机保持原有的工作状态。空压机加卸载是通过控制空压机进气阀的开闭来实现的，加载时打开进气阀，卸载时关闭进气阀。空压机加卸载控制适用于压力精度比较高，空压机需要比较频繁改变运动状态的场合。加卸载控制相比启停控制的优点：避免频繁的启停，对空压机性能损害小，空气压缩系统对电网的冲击小。加卸载运行也有一定的缺点：空压机处于卸载状态时，仍要消耗正常运行时大约40%的能源[27]。采用加卸载控制时一定要注意空压机不能长时间处在空载状态运行，在耗能的同时，空压机容易发热、损坏，一般设置一个空载时间，空载运行一定的时间后，空压机关机，下次运行重新启动。

（3）变频控制。变频控制是通过改变电流的频率来控制电机的转速，从而改变空压机产气量的控制方式。变频控制能够实现动态输出，一般情况下能够把压力稳定在设定值上下的运行波动范围之内，变频控制能实现空压机额定排气量40%-100%的输出，用户端耗气量大时，空压机以高频运行，用户耗气量低时，空压机以低频运行。变频控制在连续用气的工业场合应用效果很好，既能避免启停控制的空压机频繁启停，又能避免加卸载控制的空载运行，节能效果很好。此外，变频控制能实现一个区间内频率的连续变化，理论上能够实现稳压的效果，对于某些对压缩空气压力精度有要求的场合，变频控制具有很大的优点。

（4）台数控制。台数控制就是根据用气需求，决定启动多少台空压机。台数控制是一种宏观上的控制，一般应用于用户耗气需求变化很大，单台空压机不能实现很好的控制效果的场合。台数控制可以根据台数控制器来计算每台压缩机的工作状态，结合其他的控制方式一起运行。台数控制可以实现空压机轮换使用，避免压缩机群中的一些空压机一直处于工作状态，而一些空压机一直处于空闲状态，于此同时台数控制还能够起到负载均衡的作用，优化空压机群各台压缩机的使用，尽量延迟空压机群的使用年限。

（5）进口调制。空压机改变原来的加卸载的控制模式，空压机进气开关除了开和关两种状态以外，还能够根据用户耗气量的变化线性的改变开度，从而控制空压机的吸气量，这种吸气节流的方式就称作进口调制。进口调制的控制方式从节能上看效果要优于加卸载调节方式。它在负载率为40%—100%的工况下，具有非常明显的节能效果。

（6）可变位移。该控制方法主要通过控制转子壳体的阀门开关来改变空压机内部转子的有效长度，从而达到控制空压机产气量，实现对用户耗气量的匹配。

## 2.3空气压缩系统数学模型的建立

## 2.3.1气体压缩模型

压缩机是整个空气压缩系统核心部分，是整个反馈环节的执行机构。本文的研究基于活塞机和螺杆机。活塞机和螺杆机都是容积式压缩机，通过压缩体积达到增压的目的。

压比模型：在容腔压缩过程中存在内压比的概念，即空气压缩前后的压力比。根据热力学方程：

 (1)

式中，Π为内压比，Θ为恒定体积比，*n*为压缩过程多变指数。在压缩过程中，如果气体与外界没有热交换，这是一个绝热压缩的理想状态，这时绝热压缩指数为1.4；如果气体在压缩的过程中能量瞬间释放，气体温度与外界温度始终保持一致，这是一个等温压缩的理想状态，这时等温压缩指数为1。在实际情况下，气体压缩是介于绝热压缩和等温压缩之间的，叫做多变过程。压缩多变指数计算方式如下[10]：

 (2)

式中，*pd*为出气压力(MPa)，*ps*为进气压力(MPa)，*Ti*为进气温度(K)，*To*为出气温度(K)。

### 1.2 能耗模型

该模型近似的把压缩气体看作理想气体，空压机的等熵绝热功率*Pa*计算方式如下[11]：

**** (3)

式中，*Pa*为空压机等熵绝热功率(W)，*qv*为空压机实际体积流量(m3/min)。

空压机实际的轴功率为等熵压缩的功率与绝热效率的比值，即

 (4)

式中，*η*为绝热效率。绝热效率反映压缩机的能量利用率大小。不同型号的压缩机绝热效率不同，一般在60-80%之间，可以用以下拟合公式计算：

 (5)

式中，，，为空压机系数，本文非变频空压机依次为0.636、751、-6.1410-5，变频空压机为0.607、877、-7105，*s*为转子的转速。

### 1.3 产气量模型

在空压机的运行过程中，空压机在实际情况下的产气量可以用以下公式表示：

 (6)

式中，*Vi*为单位时间的进气量（m3），*ηv*为容积效率，*s*为转速（rad/min）。

容积效率：容积效率是压缩机实际容积流量除以压缩机理论容积流量的比值。理论的容积流量由压缩机的尺寸和转速决定。但是由于容腔内部有余隙容积和泄漏等问题存在，实际的容积流量小于理论容积流量。

 (7)

式中，*ηv*是容积效率，*qv1*是理论容积流量。容积效率与空压机转速和压力比有关。转速越高，压力比越小，容积效率越大，反之则越小。在实际情况下，通常使用以下经验公式计算容积效率，该经验公式能满足工程上的基本计算，应用面非常广[12]；

 (8)

### 1.4 储气罐模型

在一个空气压缩系统中，储气罐是必不可少的，储气罐可以存储高压气体，提供稳定的供气压力。在用户耗气变化的时候，我们是根据储气罐中的气体压力来调控压缩机的动作的，避免压缩机过度频繁的加卸载，也能起到一定的抗干扰作用。除此之外，储气罐能够消除管路中的气流冲击，还有冷却空气的作用，因此储气罐要进行定期的排水[13]。

**** (9)

式中，*V*是储气罐的有效容积（m3）；*m*是储气罐中气体的质量(kg)；*r*是常数对于干空气约为287(J/kg/K)；*T*是绝对温度(K)。

上面是理想状态方程。然而，理想气体状态方程并不能够准确的描述空气实际的变化状况，所以在此引入理想气体状态方程改进过来的范德瓦尔斯方程：

 (10)

式中，*Vm*是气体的摩尔体积(m3/mol)；*a、b*为范德瓦尔常数，因物质不同而不同，本文为空气，其值分别为0.1358、0.0364，k为玻尔兹曼常数为1.3810-23(J/K)。

空压机加载向储气罐充气，用户用气则是储气罐放气的过程，考虑到充放气的过程是一个渐变的过程，温度变化不大，本文将以上过程理想化成等温过程[14]。

 (11)

式中，*M*为气体的摩尔质量28.9kg/mol；*nm*是储气罐中气体的摩尔数。代入得，

**** (12)

整理后两边微分得：

 (13)

式中，*mi*、*mo*分别为储气罐进出口气体质量流量（kg/min），用*mi*-*mo*来表示单位时间质量的变化。