2.2空气压缩系统的数学模型

为了深入研究空气压缩系统的运行原理，本文将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。一是活塞机。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。



图 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

如上图所示，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。



活塞机气缸内气 体P-V曲线图

### 1.1 压缩机模型

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。目前压缩机按产气原理分主要有活塞式、螺杆式、涡旋式和转子式，本文的系统只包括活塞机和螺杆机。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。