

# 压缩机和压缩空气系统

1. 介绍 .....	1
2. 压缩机类型 .....	3
3. 压缩机的评估和压缩空气系统 .....	8
4. 提高能源效率的机会 .....	13
5. 方案列表 .....	20
6. 工作表 .....	21
7. 参考资料 .....	24

## 1. 介绍

工业厂房在整个生产过程中都使用压缩空气，这些压缩空气由从 5 马力 (hp) 到 5 万 马力以上的压缩空气装置产生。美国能源部 (2003 年) 报告说，70-90% 的压缩空气都以 不可用的热量、摩擦、误用和噪音的形式遗失了 (见图 1)。为此，压缩机和压缩空气系 统对于提高工业厂房的能源效率来说就显得非常重要了。

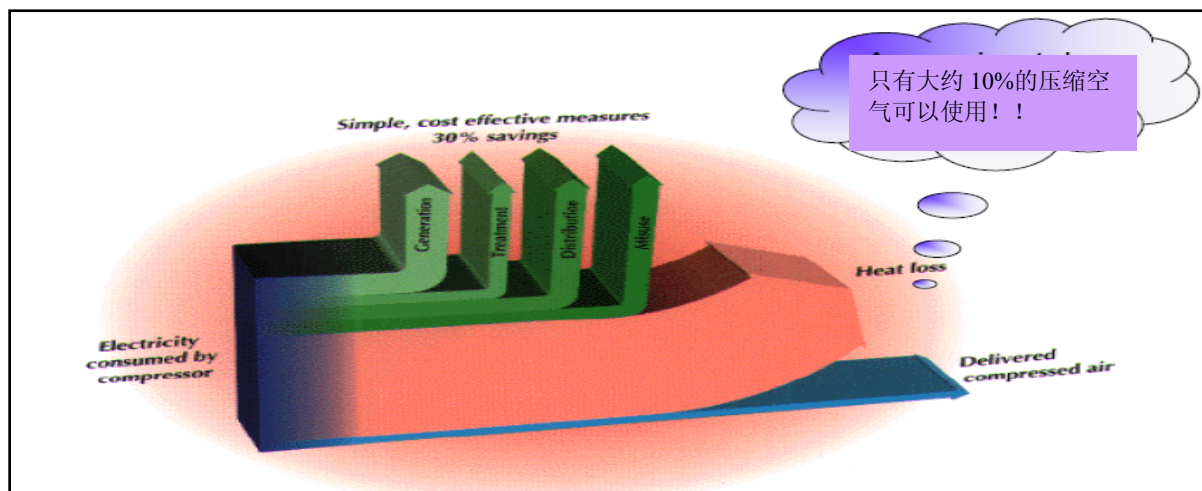


图 1. 压缩空气系统的 Shanky 图 (McKane and Medaris, 2003)

值得一提的是，压缩空气系统的运行成本远高于压缩机本身的成本 (见图 2)。通过 系统改进可以节约 20% 到 50% 甚至更多的电力消耗，从而节约成千上万美元甚至几十万

美元的开支。在正确的运营下，压缩空气系统能够节约能源、降低维护、减少停工时间、增加生产量和提高产品质量。

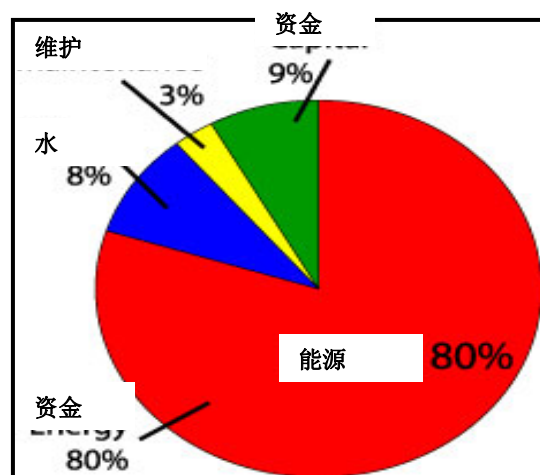


图 2. 典型的压缩空气系统的成本组成 (e 压缩空气)

压缩空气系统由供应端和需求端组成，其中前者包括压缩机和空气处理，而后者则包括分配和存储系统和终端使用设备。在正确的运营下，供应端可以在适当的压力下、以低成本、高效率的方式输出清洁、干燥和稳定的空气。在正确的运营下，需求端可以最大程度地降低空气的浪费并将压缩空气进行适当的应用。提高和保持压缩空气系统的最大生产率需要重视系统的供应端和需求端以及二者如何相互作用。

## 1.1 压缩空气系统的主要部件

压缩空气系统由以下主要部件组成：进气过滤器、级间冷却器、后置冷却器、空气干燥器、除湿疏水器、储气罐、管道网络、过滤器、调节器和润滑器（见图3）。

- **进气过滤器：**防止灰尘进入压缩机；灰尘将会使阀门具有粘性、使气缸具有划痕和过度磨损等。
- **级间冷却器：**在空气进入下一级之前先行降低其温度，以便减少压缩工作和提高效率。它们通常运用水冷工艺。
- **后置冷却器：**其目标是通过降低水冷却换热器里面的温度而消除空气中的水分。
- **空气干燥器：**由于仪器和气动设备中的空气相对来讲不能含有任何水分，因此需要通过使用空气干燥器来消除经过后置冷却器后所剩余的微量水分。这些微量水分可以通过使用诸如硅胶/活性炭或冷却干燥剂等吸附剂或压缩干燥器的热量来消除。
- **除湿疏水器：**除湿疏水器用来清除压缩空气中的水分。这些阱类似于汽阱。经常使用的各种类型的阱包括手动排水栓、基于定时器的/自动排水阀等。

- **储气罐：**提供储气罐以便存储和缓和脉动空气输出—减少来自压缩机的压力变化。

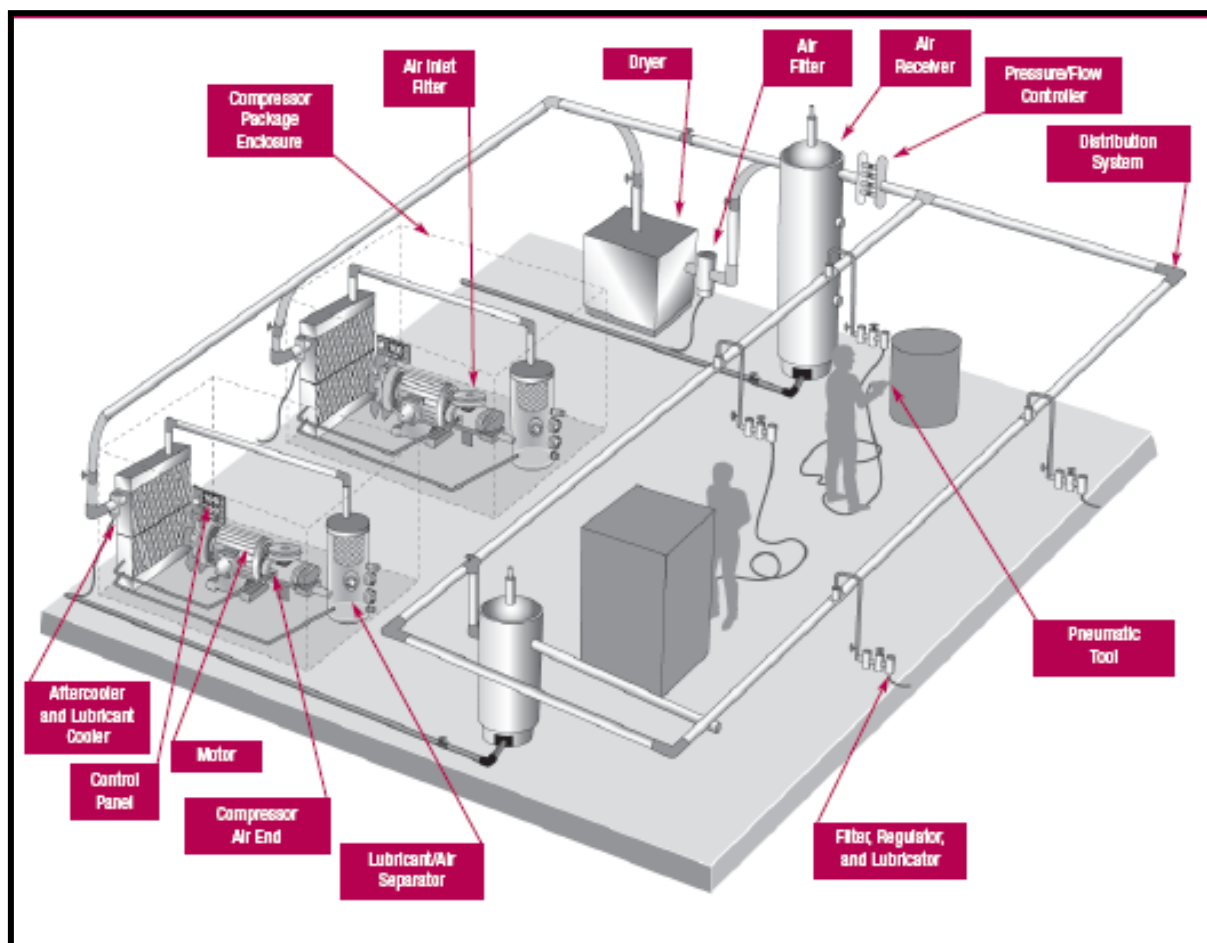


图 3. 压缩机部件的类型（美国能源部，2003）

## 2. 压缩机类型

如图4所示，共有两种基本的压缩机类型：正排量式和动力式。

对于正排量式压缩机来说，给定数量的空气或气体被捕获到加压室中，它们所占有的体积会机械地减少，从而导致在将它们排出前加压室内部的压力会相应的上升。在恒定排放速度的情况下，气流在排放压力变化方面将保持基本恒定。

动力压缩机通过叶轮的高速旋转来将速度能传递给持续流动的空气或气体。速度能通过叶轮和排放蜗壳或扩散器被转变为压力能量。对于离心式动力压缩机来说，叶轮片的形状决定着气流和所产生的压力（或压头）的关系。

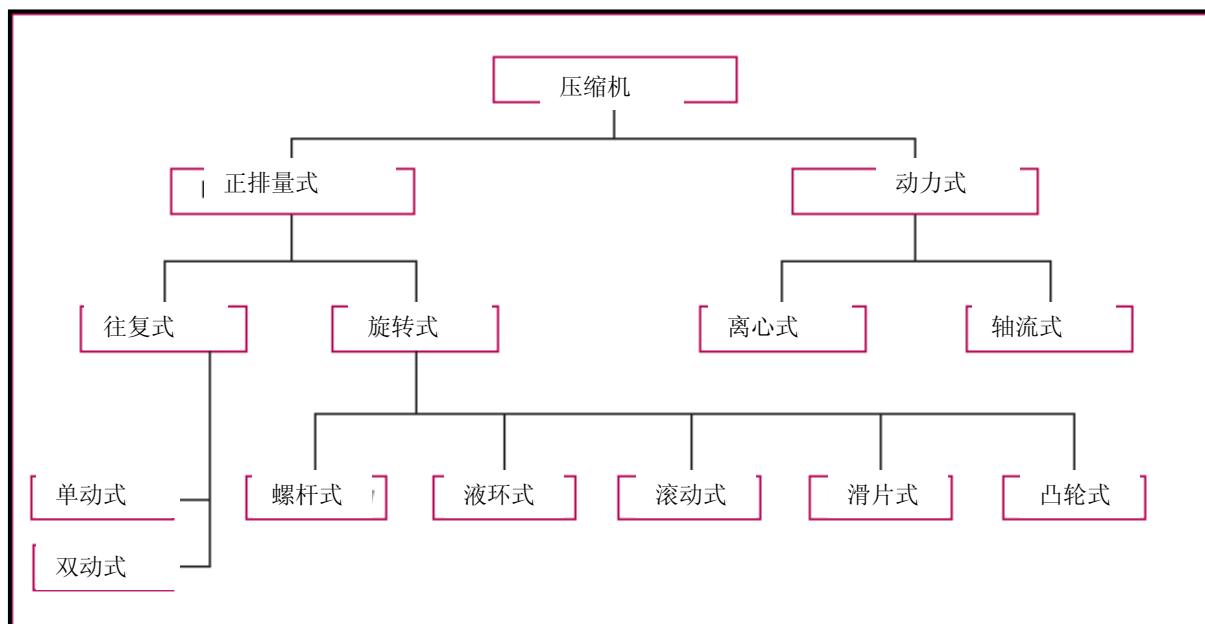


图 4. 压缩机类型（美国能源部，2003）

## 2.1 正排量式压缩机

这些压缩机有两种类型：往复式和旋转式。

### 2.1.1 往复式压缩机

工业上，往复式压缩机是空气和制冷压缩工艺中应用最为广泛的压缩机类型（见图 5）。它们根据自行车气筒的原理运行，具有在一定的排放压力范围内气流输出几乎保持不变的特点。同时，该种压缩机的生产能力与其速度成正比。然而，该压缩机的气流输出是以脉动方式进行的。

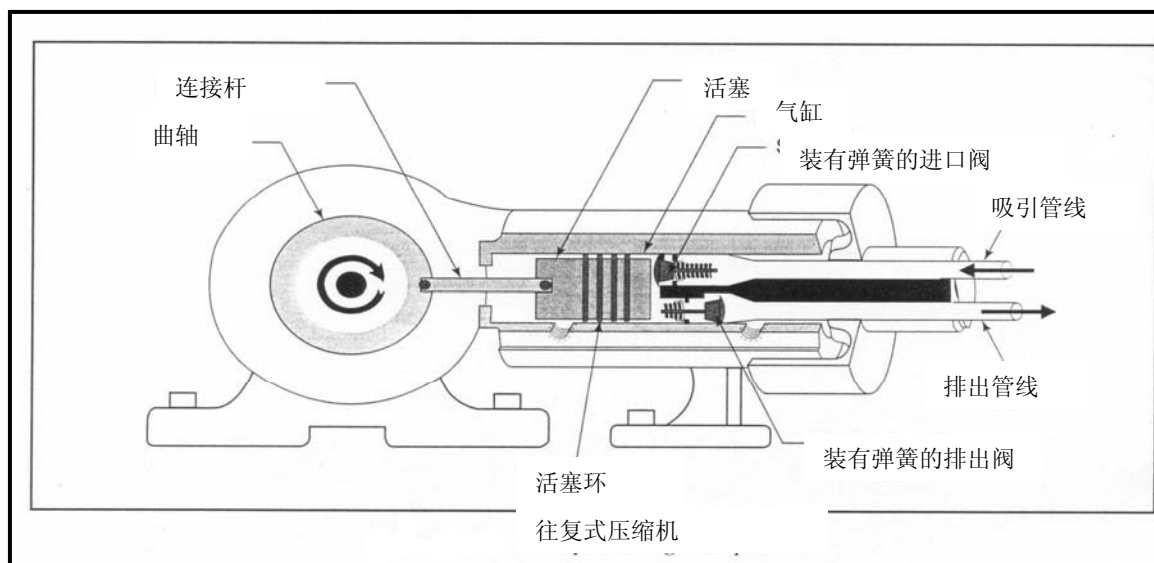


图 5. 往复式压缩机的断面图 (King, Julie)

往复式压缩机有多种配置类型，其中最常用的四种类型为横向式、纵向式、水平反向平衡式和串联式。纵向式往复压缩机的生产能力范围是50 – 150 cfm，而水平反向平衡式压缩机的生产能力范围则是200 – 5000 cfm，为多级设计，单级设计中的最高生产能力可达10,000 cfm（国家生产力委员会，1993年）。

如果只使用活塞的一侧来完成压缩时，那么这种往复式空气压缩机就被认为是单动式往复压缩机；如果使用活塞的两侧来完成压缩时，那么这种空气压缩机则被认为是双动式往复压缩机。

如果整个压缩过程是通过单一气缸或一组并列气缸完成的，那么这种压缩机就被认为是单级式往复压缩机。然而，许多具体应用条件都超出了单一压缩级的实际能力。而且，太大的压缩比（绝对排放压力/绝对进气压力）可能会造成极端的排放温度或其他一些设计问题。因此，在高压条件下通常应用两级压缩机械，因为与单级机械的排放温度（205到240°C）相比，这些机械具有较低的排放温度的特点（140和160°C）。

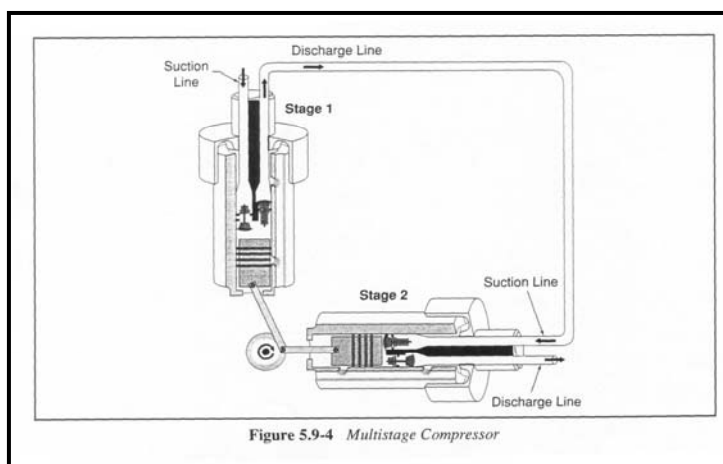


图 6. 多级压缩机视图 (King, Julie)

出于实用之目的，超过100马力

的、用于提供工厂用压缩空气的大部分往复式空气压缩机都被建为多级装置，在这些装置中两个或更多的压缩步骤被按照先后顺序分类。空气通常会在这些级之间进行冷却，以降低进入下一级的空气温度和数量。（国家生产力委员会，1993年）。

往复式空气压缩机包括气冷型和水冷型两种，可以进行润滑配置和非润滑配置，可以进行整装，还可以提供多种压力和生产能力类型供选择。

### 2.1.2 旋转式压缩机

旋转式压缩机用转子取代了活塞，从而进行持续和自由的脉动式气流供应。它们高速运转，通常能够比往复式压缩机提供更高的生产量。它们的资本成本低、结构紧凑、重量轻而且容易维护。为此，它们在工业上得到了广泛的应用。其中，功率为30到200马力或22或150 kW左右的旋转式压缩机的应用最为广泛。

旋转式压缩机的类型包括：

- 凸轮式压缩机（罗茨鼓风机）
- 螺杆式压缩机（在旋转螺杆处，阳螺杆转子和阴螺杆转子以相反的方向运动并捕获空气，而空气在向前运动的时候被压缩，见图7）
- 叶轮式/滑片式、液环式和滚动式压缩机

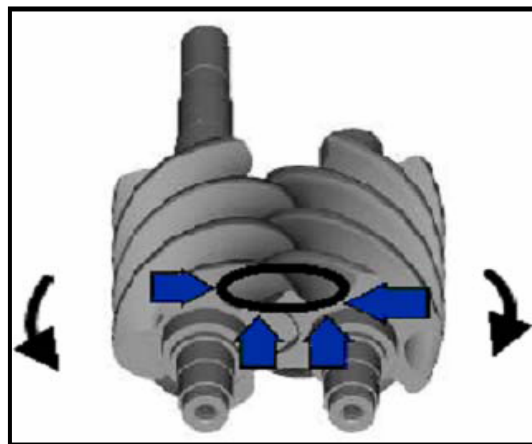


图 7. 螺杆式压缩机视图（参考资料不详）

旋转螺旋压缩机包括气冷型和水冷型两种。由于冷却直接在压缩机内部进行，因此工作部件永远不会经历极端的运行温度。从这一点来讲，旋转式压缩机是一个可以连续运行的、气冷或水冷的压缩机包。

由于旋转螺旋空气压缩机的设计简单和易损件较少，因此它易于维护、操作和安装。旋转式空气压缩机可以安装在能够支持其静止重量的任何表面。

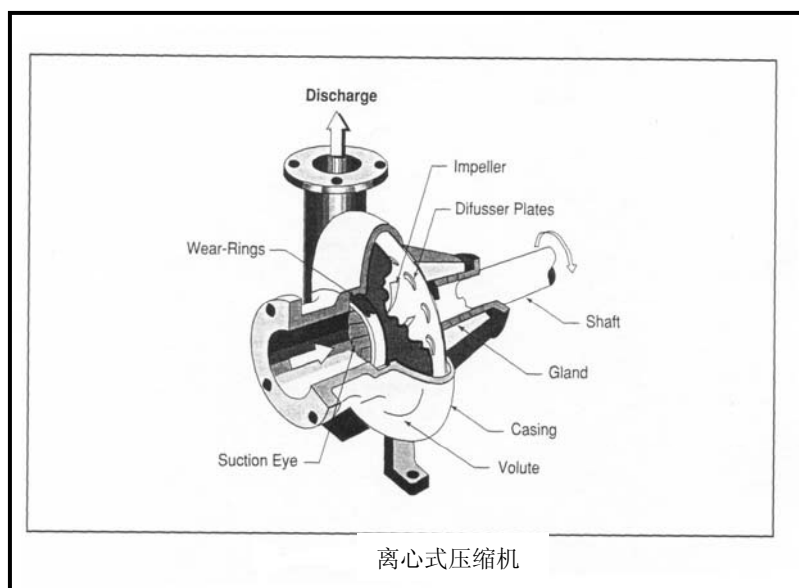
## 2.2 动力压缩机

离心式空气压缩机（见图8）是一种动力压缩机，用于将来自旋转叶轮的能量转化为空气。通过改变空气的动量和压力，转子能够实现这一转化。通过降低静止的扩散器中的空气流动速度，就可以将这种动量转化为有效的压力。离心式空气压缩机故意设计为无油压缩机。通过轴密封和排气口，油润滑行走机构就与空气分离开来。

## 电气设备：压缩机和压缩空气系统

离心式空气压缩机是一种连续运行的、具有为数不多的活动件的压缩机，特别适合于需要大量压缩空气的情形——尤其是需要无油空气的场合。

离心式空气压缩机属于水冷型，可以进行整装——典型的组装装置包括后置冷却器和所有控制装置。



与往复式压缩机相比，这些压缩机具有明显不同的特点。在压缩比上的很小的变化将会给压缩机的产量和效率带来显著的变化。离心式压缩机更加适合于要求非常高的生产能力——通常高于 12,000 cfm 的应用情形。

关于正确选择不同类型的压缩机的标准请参见下表。

图 8. 离心式压缩机视图 (King, Julie)

表1. 压缩机总体选择标准 (印度工业联合会)

压缩机类型	生产能力 (m <sup>3</sup> /h)		压力 (巴)	
	从	到	从	到
罗茨鼓风压缩机 单级压缩机	100	30000	0.1	1
往复式压缩机 -单/两级	100	12000	0.8	12
-多级	100	12000	12.0	700
螺杆式压缩机 -单级	100	2400	0.8	13
-两级	100	2200	0.8	24
离心式压缩机	600	300000	0.1	450

**表2. 关于重要压缩机类型的详细比较**  
(可持续能源开发办公室, 2002年)

项目	往复式	叶轮式	旋转螺旋	离心式
满负荷状态下的效率	高	中-高	高	高
部分负载状态下的效率	高—由于分级	低：低于满负荷的60%	低：低于满负荷的60%	低：低于满负荷的60%
零负载状态下的效率（与满负荷情形相比较的功率%）	高（10% - 25%）	中（30% - 40%）	高-低（25% - 60%）	高-中（20% - 30%）
噪声级	嘈杂	安静	安静-如果设置封套的话	安静
尺寸	大	小	小	小
油的遗留状况	适中	低-中	低	低
振动	强烈	几乎无	几乎无	几乎无
维护	许多易损件	很少的易损件	非常少的易损件	对于空气中的尘埃敏感
生产能力	低-高	低-中	低-高	中-高
压力	中-非常高	低-中	中-高	中-高

### 3. 压缩机的评估和压缩空气系统

#### 3.1 压缩机的生产能力

压缩机的生产能力是指在总温度和总压力的条件下，全部额定的被压缩和被输出的气体流速和压缩机进口处的主要成分。它有时表示实际流速，而不是额定流速。在这种情况下，它也被称为自由出气量（FAD），即在任何特定场所和大气条件下的空气量。这一术语并不特指在完全相同或标准条件下所输出的空气量，因为在不同地区和不同时间的情况下，海拔高度、气压和温度都可能会发生改变。

##### 3.1.1 压缩机生产能力的评估

由于压缩机的老化及其内部元件的固有低效能，尽管对压缩机进行了较好的维护，所输出的空气量可能仍然会少于设计值。有时，诸如不良维护、污秽的换热器和海拔影响等其他一些因素也会降低自由出气量。此外，为了满足对压缩空气的需求，效率低下的压缩机可能也会不得不运行更长的时间，从而造成所消费的电力要高出实际所需。

电力的浪费量取决于偏离 FAD 生产能力的百分比。例如，一个磨损的压缩机阀可能会导致压缩机的生产能力降低 20%。因此，必须定期对每台压缩机的 FAD 生产能力进行



评估，以便检查其实际生产能力。如果以上偏离超过 10%，那么就应该采取矫正措施来消除这种偏离。

对压缩机生产能力进行评估的理想方法是进行管口试验，即使用校准的管口作为负载来排出所产生的压缩空气。然后，根据空气温度、稳定压力和管口系数等因素来对气流进行评估。

### 3.1.2 在工厂生产场地进行压缩机生产能力评估的简便方法

- 通过紧紧关闭隔离阀或将其切断、从而关闭储气罐出口的方法，将用来进行试验的压缩机及其储气罐与主要压缩空气系统进行隔离。
- 打开排水阀，充分排出里面所有的水，然后清空储气罐和管道。一定要将脱水器管线再次紧紧关闭，以便开始进行试验。
- 起动压缩机并激活记秒表。
- 记录从初始压力 $P_1$ 达到正常操作压力 $P_2$ （在储气罐中）所花费的时间。
- 按照以下（印度工业联合会）所给出的公式计算压缩机的生产能力：

实际排气量

$$Q = \frac{P_2 - P_1}{P_0} \times \frac{V}{T} \text{ Nm}^3 / \text{Minute}$$

式中：

$P_2$  = 填充后的最终压力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2\text{a}$ )

$P_1$  = 慢慢地排出空气后的初始压力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2\text{a}$ )

$P_0$  = 大气压力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2\text{a}$ )

$V$  = 包括储气罐、压后冷却器和输出管道在内的存储量 ( $\text{m}^3$ )

$T$  = 压力达到  $P_2$  时所花费的时间 (分钟)

当压缩空气的温度与环境空气温度相同时，即在完全等温压缩的情况下，以上方程式将适用。如果实际压缩空气的排放温度（假定为 $t_2$  °C）高于环境空气温度（假定为 $t_1$  °C）（通常情形），将使用 $(273 + t_1) / (273 + t_2)$ 因数来改正FAD。

## 3.2 压缩机的效率

在通常情况下，使用以下几种不同的方法来测量压缩机的效率：体积效率、绝热效率、等温效率和机械效率。

绝热效率和等温效率是通过将等温或绝热功率除以实际功率消耗的方法来进行计算的。所得到的数字表示压缩机和驱动马达的总效率。

### 3.2.1 等温效率

等温效率 = 实际测量的输入功率 / 等温功率

等温功率 (kW) =  $P_1 \times Q_1 \times \log_e r / 36.7$

式中  $P_1$  = 绝对进气压力 kg/cm<sup>2</sup>

$Q_1$  = 自由出气量 m<sup>3</sup>/hr

$r$  = 压力比  $P_2/P_1$

等温功率的计算结果不包括克服摩擦所需要的功率，它通常会给出一个低于绝热效率的效率。所报告的效率值通常就是等温效率。在根据报告的效率值选择压缩机时，这是一个重要的考虑因素。

### 3.2.2 体积效率

$\text{体积效率} = \frac{\text{自由出气量 m}^3/\text{分钟}}{\text{压缩机排量}}$
---

压缩机排量 =  $\Pi \times D^2 / 4 \times L \times S \times \chi \times n$

式中  $D$  = 气缸内径 (米)

$L$  = 气缸冲程 (米)

$S$  = 压缩机速度 (每分钟转数 rpm)

$\chi$  = 1 代表单动式气缸

2 代表双动式气缸

$n$  = 气缸数目

在实际应用中，比较压缩机效率的最有效指标就是比功率消耗，即提供同一功率的不同压缩机的 kW/体积流率。

## 3.3 压缩空气系统中配电损失的性能评估

### 3.3.1 泄露可以设定及相关结果

分配管和调节器系统将压缩空气从中心压缩机厂输送到加工区域。本系统包括各种隔离阀、疏水器、中间存储器和防止暴露到户外的管线冷凝或冻结的管子热量示踪器。通常情况下，分配过程中的压力损失将由压缩机排放出的高压空气予以补偿。

## 电气设备：压缩机和压缩空气系统

在预定用气点，配有最终隔离阀、过滤器和调节器的进料管将压缩空气传送到提供加工或气动工具的胶管。

泄露可能是工业压缩空气系统中能源浪费的一个重要来源，有时这种浪费可能高达压缩机产量的20-30%。典型的管理不善的工厂的泄露率将可能达到总压缩空气生产能力的20%。另一方面，事先有效地进行泄露检查和修理能够将泄露率降低到压缩机产量的10%以下。

泄露除了会造成能源浪费以外，还可能会导致其它一些运行损失。泄露会造成系统压力的下降，从而使得气动工具的功能不能有效发挥，继而给生产带来了不利的影响。此外，泄露会迫使设备运行更长的时间，从而会缩短几乎所有系统设备（包括压缩机成套机组本身）的使用寿命。增加的运行时间还可能导致额外的维护要求和意外停工时间延长。最后，泄露还会导致增加不必要的压缩机生产能力。

泄露可能会来自压缩空气系统的任何部分，其中最常出现泄露问题的区域包括：

- 连接器、胶管和配件
- 调压器
- 开放式冷凝水隔汽具和截止阀
- 管子接头、分离件和螺纹密封胶。

泄露率是非控制系统中供给压力的一个函数，并随着系统压力的增加而增加。泄露率的单位是立方尺/每分钟（cfm），它还与管口直径的平方数成比例。请参见下表。

表 3. 不同供给压力和管口尺寸的泄露率（美国能源部，2004年）

压力 (psig)	管口直径 (英寸)					
	1/64	1/32	1/16	1/8	1/4	3/8
70	0.29	1.16	4.66	18.62	74.40	167.80
80	0.32	1.26	5.24	20.76	83.10	187.20
90	0.36	1.46	5.72	23.10	92.00	206.60
100	0.40	1.55	6.31	25.22	100.90	227.00
125	0.48	1.94	7.66	30.65	122.20	275.50

\*对于丰满的管口来说，以上数值应该乘以 0.97 和 0.611 以便使之更加准确。

### 3.2.2 确定泄露量

对于配有起动/停止或装载/卸载控制装置的压缩机来说，有一种很容易的评估系统泄露量的方法。在不需要压缩空气系统（如果所有装置都为气动装置，应该关掉端点使用设备）的情况下，这种方法涉及到起动压缩机。进行多次测量，以便确定装载和卸载压缩机需要花费的平均时间。由于空气从泄漏处漏掉将会使压力下降，从而造成压缩机间断地循环运行，因此必须对压缩机进行装载和卸载操作。总漏损率（百分比）可以通过以下方法进行计算：

$$\text{漏损率 (\%)} = [(T \times 100) / (T + t)]$$

式中：T=装载时间（分钟）

t=卸载时间（分钟）

漏损率将以  
的百分比来表

示。该漏损百分比应该低于维护良好的系统的10%。如果系统维护不良，那么漏损的空气量和功率可能会高达20-30%。

所损失的压缩机生产能力

### 3.3.3 在工厂生产场地确定泄漏量的简便方法的步骤

在工厂生产场地简便测量压缩空气系统的“泄漏量”的方法如下：

- 切断正在运行的压缩空气设备的电源（或者，在没有设备使用压缩空气时，对相关设备进行试验）。
- 运行压缩机，以便向系统填充压缩空气，并确定操作压力。
- 记录后来进行压缩机“装载”和“卸载”循环所花费的时间。为了使该时间更加准确，记录连续进行 8-10 个“装载”和“卸载”循环所花费的时间。然后，计算总的“装载”时间（T）和总的“卸载”时间（t）。
- 使用上述表达式计算系统的泄露量。如果Q是试验过程中的实际自由供气量（m<sup>3</sup>/分钟），那么系统的泄露量（m<sup>3</sup>/分钟）则是：

$$\text{系统泄漏量 (m}^3\text{/分钟)} = Q \times T / (T + t)$$

#### 例子

在一个加工工业的泄漏试验过程中，观测到了以下结果：

压缩机生产能力 (m <sup>3</sup> /分钟)	= 35
接入压力, kg/cm <sup>2</sup>	= 6.8
断开压力, kg/cm <sup>2</sup>	= 7.5
已装载 kW	= 188 kW
已卸载 kW	= 54 kW
平均“装载”时间	= 1.5 分钟
平均“卸载”时间	= 10.5 分钟
泄漏量 = [(1.5)/(1.5+10.5)] x 35	= 4.375 m <sup>3</sup> /分钟

## 4. 提高能源效率的机会

### 4.1 压缩机的位置

空气压缩机的位置及其吸入空气的质量将对能源的消耗量产生重要的影响。如果吸入的空气凉爽、清洁和干燥的话，那么作为呼吸机的压缩机的性能将会有所改善。

### 4.2 进气温度

吸入空气对于压缩机性能的影响不容低估。吸入被污染的空气或热的空气将会削弱压缩机的性能，并产生额外的能源和维护成本。如果吸入的空气中含有水分、灰尘或其它污染物，这些污染物将会堵塞压缩机的内部元件，例如阀、叶轮、转子和叶片等。这种堵塞将会造成元件的过早磨损，从而降低压缩机的生产能力。

压缩机由于连续运行将会产生热量。这些热量将散失到压缩机的小室/隔腔内，从而导致进气变热，并进一步导致体积效率降低和功率消耗增加。作为一般规则，“吸入空气的温度每升高4°C将会导致多消耗1%的能源才能达到同等的产量”。因此，吸入凉爽的空气将会提高压缩机的能源性能系数（见表4）。

**表 4. 吸入空气温度对压缩机功率消耗的影响**  
(印度工业联合会)

进气温度 (°C)	相对出气量 (%)	节省的功率 (%)
10.0	102.0	+ 1.4
15.5	100.0	Nil
21.1	98.1	- 1.3
26.6	96.3	- 2.5
32.2	94.1	- 4.0
37.7	92.8	- 5.0
43.3	91.2	- 5.8

如果将进气过滤器安装在压缩机处，环境温度应该保持在最低值，以便防止质量流的减少。这可以通过在室外或建筑物外设置进入管的方法来实现。当进气过滤器被安装在建筑物外面，尤其是安装在屋顶的情况下，应该考虑环境因素的影响。

### 4.3 空气过滤器里的压降

压缩机的进气过滤器应该安装在清洁和凉爽的位置，或者将来自清洁和凉爽地点的空气先行经过它的过滤。压缩机制造商通常提供或建议用于保护压缩机的进气过滤器的特定等级。压缩机进口的过滤效果越好，对压缩机进行维护的程度就越低。然而，整个进气过滤器的压降应该保持在最低值（通过调整过滤器尺寸和对它进行维护），以便防止节流效果的发生和压缩机生产能力的下降。压差计是监测进气过滤器状况的最好工具之一。整个

新的进气过滤器的压降不应该超过3磅/平方英寸（psi）。表5显示了空气过滤器压降对于功率消耗的影响。

表5.空气过滤器压降对于功率消耗的影响（印度工业联合会）

空气过滤器的压降 (mmWC)	功率消耗的增加 (%)
0	0
200	1.6
400	3.2
600	4.7
800	7.0

作为一般规则，“由于过滤器阻塞等原因使得吸入路径每增加250 mm WC的压降，将会使得压缩机的功率消耗增加2%左右才能达到同样的产量”。

因此，应该定期清理进气过滤器，以便将压降降到最低水平。可以针对过滤器使用压力计或差压表，以便监测压降情况，从而制定过滤器清洁时间表。

#### 4.4 高程

高程将会对压缩机的体积效率产生直接的影响。高程对于体积效率的影响如表6所示。

显然，要想达到某一特定输出压力，由于压缩比的增加，位于较高海拔的压缩机将比位于海平面的压缩机消耗更多的功率。

表6. 海拔对于压缩机体积效率的影响  
(印度工业联合会)

海拔 (米)	气压 (毫巴*)	与海平面相比的相对体积效率的百分比	
		4 巴	7 巴
Sea level	1013	100.0	100.0
500	945	98.7	97.7
1000	894	97.0	95.2
1500	840	95.5	92.7
2000	789	93.9	90.0
2500	737	92.1	87.0

\*: \*1 毫巴=1.01972 x 10<sup>-3</sup>kg/cm<sup>2</sup>

## 4.5 中间冷却器和后冷却器

大部分多级压缩机都使用中间冷却器。该冷却器是一种换热器，用以清除压缩级之间的压缩热。中间冷却将会影响压缩机的总效率。

由于机械能被施加于压缩气中，因此压缩气的温度就会升高。后冷却器在压缩的最后阶段之后进行安装，以便降低空气温度。随着空气温度的降低，空气中的水汽就会凝结、分离、收集和排离压缩系统。来自中间冷却的压缩机的大部分冷凝液都会进入中间冷却器，残余部分则进入后冷却器。除了向热惰性操作供应加工空气的系统外，几乎所有的工业系统都需要进行后冷却。在一些系统中，后冷却器是压缩机成套机组的一个必要组成部分，而在其它系统中，后冷却器则是一个独立的设备件。还有一些系统则配有两个后冷却器。

理想的情形是，多级机器的每级进口处的空气温度都应该与它在第一级的温度相同。这种情形被称为“理想冷却”或等温压缩。但是在实际操作过程中，后续阶段的进口空气温度将会高出正常水平，使得为了达到同样的生产量而不得不处理更多的空气，从而造成更高的功率消耗（见表7）。

表 7. 关于中间冷却对于压缩机功率消耗影响的说明（印度工业联合会）

细目	非理想冷却	理想冷却 (基值)	急冷水冷却
第一级的进口温度 (°C)	21.1	21.1	21.1
第二级的进口温度 (°C)	26.6	21.1	15.5
生产能力 (nm <sup>3</sup> /分钟)	15.5	15.6	15.7
轴输出功率 (kW)	76.3	75.3	74.2
能量比耗kW (nm <sup>3</sup> /分钟)	4.9	4.8	4.7
百分率的变化	+ 2.1	参考值	- 2.1

使用较低温度的水可以降低能量比耗。然而，如果冷却水的温度非常低的话，可能会导致空气中的水分冷凝，而如果不及及时消除这些冷凝水分，它们将会导致气缸的损害。

类似地，如果后冷却器中的冷却效力不充分（由于污垢和结垢等原因），将会使得温暖而潮湿的空气进入储气罐，从而造成储气罐和分配线路中凝结更多的水分，最终会导致

管道和端点使用设备的腐蚀增加以及发生压降和泄漏等问题。因此，定期对中间冷却器和后冷却器进行清洗和保证适当温度下的充分流转对于取得预期的性能非常必要。

## 4.6 压力的设定

在达到同样生产能力的情况下，处于较高压力下的压缩机将会消耗更多的功率。因此，不应该在高于压缩机最佳操作压力的条件下对其进行操作，因为这样做不仅会浪费能量，而且还会导致过度磨损，并继而导致更多的能源浪费。在较高输送压力的情况下，压缩机的体积效率也会降低。

### 4.6.1 降低输送压力

应该通过仔细研究各个设备的压力要求和压缩空气产生点和利用点之间线路的压降，来探究降低（优化）输送压力设置的可能性。通过减压而节约功率的典型做法如图8所示。

如果一个用气点或少数用气设备要求采用比工厂其它压力高的压力，可以考虑将这些操作放置到其自己的系统上或者在该用气点增加升压器成套机组，从而保持较大的系统仍然在较低压力的状况下运行。压缩空气系统的运行将会对压缩空气的成本产生轻微的影响。例如，在120 PSIG（非100 PSIG）的状况下操作压缩机将需要多消耗10%的能源，同时还会增加漏失率。因此，应该尽最大努力将系统和压缩机的压力降到最可能低的设定值。

表 8: 降低输出压力对于功率消耗的影响  
(印度工业联合会)

减压		功率节省 (%)		
从 (巴)	到 (巴)	单级、水冷	两级、水冷	两级、气冷
6.8	6.1	4	4	2.6
6.8	5.5	9	11	6.5

注：压缩机的输出压力每减小 1 巴，将会减少 6-10%的功率消耗。



#### 4.6.2 通过最佳压力设定进行压缩机调节

工业上，经常出现将不同类型、生产能力和构造的压缩机与普通的配气网络连接的情形。在这些情况下，适当地选择正确的压缩机组合以及将不同的压缩机进行最佳调节将会节约能源。

当两台以上的压缩机为一个普通的联箱供气时，应该以使产生压缩空气的成本最低的方式来操作这些压缩机。

- 如果所有的压缩机都类似，那么可以对压力设置进行如下调整，即：只让一台压缩机处理荷载变化，而其它压缩机则或多或少地进行满负荷运转。
- 如果这些压缩机具有不同的尺寸，那么应该对压力开关进行这样的设置，即：只允许最小的压缩机进行调节（改变流速）。
- 如果不同类型的压缩机在一起运作的话，空载功率将会非常重要。必须对具有最低无载功率的压缩机进行调节。
- 在一般情况下，应该调节较低部分负载功率消耗的压缩机。
- 在不同的压力并使节能装置满足大部分需求的情况下，可以根据压缩机的能量比耗对压缩机进行分级。

#### 4.6.3 分离高压和低压的要求

如果低压空气要求相当多的话，应该单独生成低压和高压空气，并分别为相应部分供气，而不是通过始终浪费能源的减压阀降低压力。

#### 4.6.4 分配线路中最低压降的设计

压降是一个用来描述由于压缩机向实际用气点排放空气而使其内部空气压力下降的特性术语。当压缩空气经过处理和分配系统时，就会发生压降现象。经过适当设计的系统的压力损失应该远低于从接收箱输出到用气点所测量的压缩机排放压力的10%。

管道越长、它的直径越小，摩擦损失就越大。为了有效地降低压降，可以使用具有双向流程的环路系统。此外，由于腐蚀和系统元件本身所造成的压降也是一个重要的问题。

由于管道尺寸不适宜、过滤器滤芯阻塞以及连接器和胶管的尺寸不适宜所造成的过度压降将会造成能源浪费。图 9 就说明了由于管道直径偏小而造成的这种能源浪费情形。

工业实践中，典型的、可以接受的压降在主要联箱的最远点是 0.3 巴，而在分配系统中则是 0.5 巴。

表 9. 在不同管径的压缩空气线路中的典型压降  
(印度工业联合会)

管子公称通径 (mm)	每 100 米的压降 (巴)	等值的功率损耗 (kW)
40	1.80	9.5
50	0.65	3.4
65	0.22	1.2
80	0.04	0.2
100	0.02	0.1

#### 4.7 将漏失量降到最低

正如上文所说明的，压缩空气泄漏是发生功率大量浪费的重要原因。由于几乎不可能看见空气泄漏，因此必须使用其它方法来确定泄漏是否发生。检测泄漏的最好方法就是使用超声波声音检波器（见图10），通过这种仪器可以确认与空气泄漏有关的高频率嘶嘶声。

超声波检漏可能是应用最为广泛的泄漏检测形式。它非常容易适合各种泄漏检测情形。



图 9. 超声波检漏器 (Tashian, Paul)

泄漏最容易在连接处和接合点发生。阻止泄漏可能会很简单，例如：只要拧紧连接件就可以了；也可能会很复杂，例如：需要更换有缺陷的器件，包括连接件、配件、管段、胶管、接合件、排放口和疏水器等。在许多情况下，泄露是由于未能清洗螺纹或者不良或不正确地使用罗纹密封胶造成的。因此，应该选择优质配件、分离件、胶管和管材，并使用适当的螺纹密封胶来安装它们，以便防止将来发生泄漏。

#### 4.8 清除冷凝液

当压缩空气离开压缩室以后，压缩机的后冷却器就会将排出空气的温度完全降低到露点（大部分环境条件），因此将会在这里凝结大量的水汽。为了消除这些冷凝汽，大多数配有内置后冷却器的压缩机都装设有组合冷凝液分离器/疏水器。

在类似于以上情形的条件下，应该在压缩机排放物附近安装隔离阀。同时，应该将排水管道连接到基部的冷凝排水管里。该排水管道必须从基部向下倾斜，以便于其正确工作。如果下游管道进一步冷却空气的话，那么还可能发生额外的冷凝现象，因此应该在管道系统的低点处提供滴水器和疏水器。此外，排放管道与压缩机附件的排放连接件保持同样的尺寸也非常重要。所有的管道和配件都必须进行适当地评定，以便适合于排放压力。

仔细检查压缩机接点的管道尺寸至关重要。必须认真考虑、选择管子的长度、尺寸以及配件和阀的数量和类型，以便使压缩机获得最佳效率。

## 4.9 控制压缩空气的使用

由于已经可以拥有了压缩空气系统，工厂工程师可能会很想使用压缩空气来为一些低压应用供气，例如搅拌、气动输送或燃烧空气。使用设计用于低压操作的鼓风机所花费的成本将只是产生压缩空气所需能源和成本的一小部分。

## 4.10 压缩机控制装置

如果在远低于空气压缩机额定 **cfm**（立方尺/每分钟）产量的情况下对其进行操作，它将会失去效力。为了避免在不需要的时候额外使用空气压缩机，可以安装一个控制器，以便根据需要自动启动和停止压缩机。同时，如果将压缩空气系统的压力保持在尽可能低的水平，将会提高其效率和减少空气泄漏的发生。

## 4.11 保养程序

良好和正确的保养程序将会大大提高压缩机系统的运行效率。以下内容就是有效操作和保养工业压缩空气系统的几点建议：

- **润滑**：应该每天都查看压缩机的油压，并每月更换一次滤油器。
- **空气过滤器**：入口空气过滤器可能会很容易阻塞，在灰尘多的环境中尤其如此。因此，应该定期检查和更换空气过滤器。
- **冷凝水隔汽具**：许多系统都配有冷凝水隔汽具，用以收集和（为安装有浮子控制阀的冷凝水隔汽具）冲洗系统中的冷凝液。应该定期打开和重新关闭手动冷凝水隔汽具，以便排出其内部任何积聚的液体；此外，还应该检查自动冷凝水隔汽具，以便检验它们是否泄漏压缩空气。
- **空气干燥器**：将空气进行干燥将会消耗大量能源。对于冷冻干燥器来说，由于这些干燥器内部的一些小的通道经常会被污染物阻塞，因此应该定期检查和更换前置过滤器。此外，由于压缩机的润滑油可能会覆盖干燥剂，从而使得再生干燥器不能有效运行，因此需要在该干燥器的进口处安装有效的除油过滤器。潮解型干燥器的温度应该保持在 100°F 以下，以便防止干燥材料的消耗增加。这些干燥材料需要根据消耗率每 3-4 个月重新补足。

## 5. 方案列表

- 找出并且维修现有的压缩空气泄漏点，并努力防止这些泄漏再次发生。定期（每月一次）检查整个系统的泄漏和压力损失情况。
- 避免为了确保特殊用气点的压缩机不受潮而损坏排气系统，这种做法是不合适的、但却是目前常见的做法。
- 使用优质调节器将所有用气点的操作调节到尽可能低的压力水平上。
- 取缔使用气压卷扬机。
- 切断向“脱线”生产设备的空气供应。
- 隔离单个的使用高压空气的设备。
- 监控管道系统的压降情况。
- 评估调节压缩机的必要性。
- 使用高效马达来取代标准马达。
- 考虑采用多级压缩机。
- 尽量降低输出压力。
- 使用压缩机的废热来帮助工厂的其他环节节约能源。
- 避免为了满足一台设备的需求而向整个工厂输出高压空气的做法。
- 了解多级压缩机系统的控制装置。
- 利用中间控制装置/扩展器/优质背压式调节器。
- 了解清洁设备的需要。
- 使用干燥技术，获取最大允许的压力露点。
- 在更换配件时，选择所有“同类中最好”的压缩机配件。
- 监测通过空气过滤器的差压。过滤器的压降过大也会浪费能源。
- 使用凉爽的外界空气作为压缩机的进气。
- 为压缩机制定一套系统的预防性维护策略。
- 开展培训，以便在员工中间建立有效操作和维护压缩机系统的意识。
- 确保用良好的内部管理来监控整个压缩机系统。
- 确保冷凝作用能够迅速从配气网络中消除，或从不发生。
- 检查储气罐是否有足够的容量，以满足短期内的大容量储存需求。

## 6. 工作表

工作表 1. 压缩机基本数据

空气压缩机参考项	单位	1	2	3	4
构造	--				
类型	--				
级数	--				
排气量	Nm <sup>3</sup> /分钟				
排放压力	kg/cm <sup>2</sup> .g				
速度	rpm				
储气罐容量	m <sup>3</sup>				
马达额定功率					
功率	kW				
满载气流	A				
电压	V				
功率因数	PF				
速度	rpm				
频率	Hz				
比功率消耗	kW/m <sup>3</sup> /分钟				

工作表 2. 压缩空气系统的漏气试验

细目	单位	备注
压缩空气使用设备	台	所提及的工厂区域
装载时间 (t1)	秒	测量
卸载时间 (t2)	秒	测量
压缩机的生产能力	Nm <sup>3</sup> / 分 钟	额定
漏损率= $[t1/(t1+t2)] \times 100$	%	估计
漏损率cfm = % 漏损率 x 压缩机的生产能力		估计
<p><b>步骤:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>在整个工厂停工期间或所有压缩空气使用设备都不工作的情况下，进行漏气试验。如果通过隔离阀将各个部分彼此隔离开来将会非常有利。</li> <li>接通专用压缩机，向相应的系统网络填充压缩空气。</li> <li>由于没有压缩空气使用设备，因此当系统压力达到设定值（假定为8 kg/cm<sup>2</sup>.g）的时候，空气压缩机将会卸载。</li> <li>如果系统没有泄漏点，那么空气压缩机将无限期地保持卸载状态。</li> <li>然而，如果系统有泄漏点，那么储气罐的压力将会逐渐开始下降，直到达到较低的设定值。在这个设定值上，空气压缩机再一次装载，并开始产生压缩空气。</li> <li>使用记秒表测量装载和卸载时间，重复进行这种测量5-6次以上，然而计算平均装载和卸载时间。</li> <li>最后，计算压缩空气漏损率（%）和数量。</li> </ul>		

工作表 3. 压缩机生产能力测试

空气压缩机参考项	单位	1	2	3	4
储气罐容量加上储气罐和空气压缩机之间管道的容量	m <sup>3</sup>				
储气罐温度	°C				
储气罐起始压力 (P <sub>1</sub> )	kg/cm <sup>2</sup> .a				
储气罐最终压力 (P <sub>2</sub> )	kg/cm <sup>2</sup> .a				
向储气罐填充空气，使之从P <sub>1</sub> 达到P <sub>2</sub> 所花费的时间 (t)	分钟				
大气压 (P <sub>0</sub> )	kg/cm <sup>2</sup> .a				
空气压缩机的生产能力 (自由出气量) Q	Nm <sup>3</sup> /分钟				
<p><b>注：每台压缩机都必须拥有其自己的储气罐。</b></p> <p>步骤：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 通过操作单向截止阀，将用于生产能力测试的空气压缩机与系统其他部分先行隔离。</li> <li>2. 关掉压缩机的驱动马达。</li> <li>3. 将与此空气压缩机连接的储气罐中的空气排空。</li> <li>4. 重新启动驱动马达。</li> <li>5. 储气罐内的压力开始上升。记录起始压力值，假定为 2 kg/cm<sup>2</sup>。此时，启动记秒表。</li> <li>6. 当储气罐的压力已经上升到预计压力值，假定为 9 kg/cm<sup>2</sup>时，停止记秒表。</li> <li>7. 记录经过时间。</li> <li>8. 最后，压缩机的生产能力根据以下公式进行计算：</li> </ol> $(\text{Nm}^3/\text{分钟}) = \left( \frac{P_2 - P_1}{P_0} \right) \times \left( \frac{V_R}{t} \right) \times \left( \frac{273}{273 + T} \right)$					

## 7. 参考文献

印度工业联合会。《压缩机和压缩空气系统指南》

<http://greenbusinesscentre.com/documents/compressor.pdf>

E压缩空气。《压缩空气审计》。 <http://ecompressedair.com/air.shtml>

<http://superiorsignal.com/usndacr.pdf>

King, Julie。密歇根理工大学，化学工程系

McKane, A.和Medaris, B. 《压缩空气的挑战—对美国工业的影响》。2003年。

[http://eetd.lbl.gov/ea/indpart/publications/lbnl\\_52771.pdf](http://eetd.lbl.gov/ea/indpart/publications/lbnl_52771.pdf)

密歇根理工大学。《压缩机》。

[www.chem.mtu.edu/chem\\_eng/current/new\\_courses/CM4120/315,30,Reference](http://www.chem.mtu.edu/chem_eng/current/new_courses/CM4120/315,30,Reference)

印度国家生产力委员会。《压缩机》。在：“有效使用能源的技术菜单”，“马达驱动系统”（国家生产力委员会）。1993年

国家生产力委员会（NPC）《能源审计报告》

西澳州政府可持续能源开发办公室。《压缩空气系统》。2002年。

[www1.sedo.energy.wa.gov.au/uploads](http://www1.sedo.energy.wa.gov.au/uploads)

Tashian, Paul。《应用超声学成功进行泄漏监测》。

美国能源部（US DOE），能源效率和可再生能源。《改进压缩空气系统的性能》。

DEO/GO-102003-1822。2003年。 [www.oit.doe.gov/bestpractices/compressed\\_air](http://www.oit.doe.gov/bestpractices/compressed_air)

美国能源部（US DOE），能源效率和可再生能源，工业技术方案。《能源信息—压缩空气内情报告》。2004年。

[www.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/compressed\\_air.pdf](http://www.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/compressed_air.pdf)

### **Copyright:**

Copyright © United Nations Environment Programme (year 2006)

*This publication may be reproduced in whole or in part and in any form for educational or non-profit purposes without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. UNEP would appreciate receiving a copy of any publication that uses this publication as a source. No use of this publication may be made for resale or any other commercial purpose whatsoever without prior permission from the United Nations Environment Programme.*

### **版权声明:**

本出版物可供任何形式的培训或非盈利活动全部或部分复制使用，无需经过版权所有者的特别许可，而只需在副本中注明出处即可。如需在其他出版物中引用本出版物中的内容，请向 UNEP 发送一份该出版物的副本。

未经联合国环境规划署的书面许可，禁止将此出版物用于转售或任何其他商业用途。

### **Disclaimer:**

*This energy equipment module was prepared as part of the project "Greenhouse Gas Emission Reduction from Industry in Asia and the Pacific" (GERIAP) by the National Productivity Council, India. While reasonable efforts have been made to ensure that the contents of this publication are factually correct and properly referenced, UNEP does not accept responsibility for the accuracy or completeness of the contents, and shall not be liable for any loss or damage that may be occasioned directly or*



## 电气设备：压缩机和压缩空气系统

*indirectly through the use of, or reliance on, the contents of this publication, including its translation into other languages than English. This is the translated version from the chapter in English, and does not constitute an official United Nations publication.*

### **免责声明:**

该能源设备简介是“亚太地区工业温室气体排放削减计划”(GERIAP)的一部分，由印度国家生产力委员会编写。尽管 UNEP 为保证此出版物的内容的正确性做出了不懈的努力，但是 UNEP 不承担其内容的准确性和完整性的责任，对任何通过直接或间接使用或者依赖该出版物内容，包括其非英语译本，而遭受的损失或者伤害，UNEP 概不负责。本材料是英文原版的中文译本，不属于联合国的官方出版物。