

现代气动技术理论与实践

第四讲：压缩空气的能量

蔡茂林

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

中图分类号: TH138

文献标识码: A

文章编号: 1008-0813(2007)05-0054-06

0 前言

气动系统由于系统构成简单、元器件价格低廉、维护容易等特点,从 20 世纪 70 年代开始在工业自动化领域的应用逐步扩大,至今已形成全球年销售约 110 亿美元的市场规模,在汽车生产、半导体制造等行业中发挥着重要的作用。但是,其能耗问题被很少关注。现在,气动系统中的耗能设备——工业压缩机的耗电占据了工厂总耗电量的 10%~20%,有些工厂甚至高达 35%^[1]。我国工业压缩机每年耗电量在 1000~1200 亿 kw·h,约占全国总发电量的 6%。在原油日益高涨,能源问题突出的今天,气动系统效率偏低、浪费严重等问题也引起了人们的关注。目前,我国大部分企业对气动系统能耗问题认识不足,节能意识淡薄。因此,研究气动系统中的能量转换,明确压缩空气所携带的能量,分析气动系统内的主要损失,对今后制定相应的气动节能措施,深入地开展气动节能活动具有重要意义。

本讲先分析工业现场广泛使用的能量评价指标——空气消耗量的缺点,然后从热力学理论介绍压缩空气的绝对能量——焓的概念及其适用性,随后阐述一种新的能量评价指标——表征相对能量的有效能与气动功率。最后,基于气动功率概念,讨论气动系统的系统损失及造成气动功率损失的因素。

1 空气消耗量

空气消耗量是指气动设备单位时间或一个动作循环下所耗空气的体积。通常,该体积用换算到标准状态(100kPa、20℃、相对湿度 65%)下的体积来表示,单位为 m³/min(ANR)或 m³(ANR)、L/min(ANR)或 L(ANR)^[2]。空气消耗量是当前评价气动设备耗气的主要指标,在工业现场被广泛采用。

由于空气消耗量表示的是体积而不是能量,所以用它来表示能量消耗时需通过压缩机的比功率(Speci-

fic power)或比能量(Specific energy)指标来换算。比功率表示的是输出单位体积流量压缩空气所需的平均消耗电力,单位通常为 kw/(m³/min);比能量表示的是输出单位体积压缩空气所需的平均耗电量,单位通常为kwh/m³。从以上定义可以看出,两者虽名称不同,但表示的是同一概念,在单位上可以相互换算。例如,某压缩机额定功率为 75kw,额定输出流量为 12m³/min,其比功率为:

$$\alpha = \frac{75 \text{ kW}}{12 \text{ m}^3/\text{min}} = 6.25 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{min}) \quad (1)$$

其比能量为:

$$\alpha = \frac{75 \text{ kW} \times 1 \text{ h}}{12 \text{ m}^3/\text{min} \times 60 \text{ min}} = 0.104 \text{ kWh}/\text{m}^3 \quad (2)$$

注意,以上计算中用的额定输出流量通常是指换算到压缩机吸入口附近大气状态的体积流量。比功率/比能量因压缩机类型、厂家、型号和输出压力而异。

这样,通过比功率或比能量就可进行空气消耗量的能耗换算。比如某设备的空气消耗量为 1.0m³/min(ANR),其所在工厂压缩机的比功率为 6.25kw/(m³/min),压缩机入口处的大气压力为 101.3kPa,大气温度为 30℃,该设备的实际用气能耗可按以下步骤计算:

(1)将设备耗气转换成压缩机入口处大气状态下的体积流量

$$\begin{aligned} Q &= Q_{\text{ANR}} \frac{p_{\text{ANR}}}{p} \frac{\theta}{\theta_{\text{ANR}}} \\ &= 1.0 \times \frac{100}{101.3} \times \frac{273+30}{273+20} \\ &= 1.02 \text{ m}^3/\text{min} \end{aligned} \quad (3)$$

(2)用比功率进行能耗计算

$$W = Q\alpha = 1.02 \times 6.25 = 6.375 \text{ kW} \quad (4)$$

这样的能耗换算关系如图 1 所示。

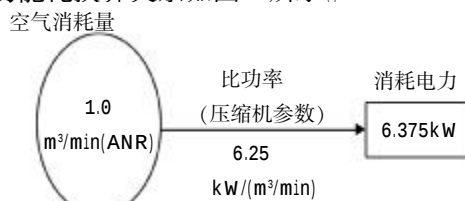


图 1 基于比功率的能耗换算

收稿日期: 2007-07-15

作者简介: 蔡茂林(1972-),男,教授/博士生导师,主要研究方向是气动系统的节能、测量、仿真与控制。

上述这种能耗评价体系尽管可以评价设备最终的用气能耗,但具有如下两个缺点:

1) 表示设备特性之一的空气消耗量不具有能量单位,不能独立地表示设备能耗,设备能耗还依赖于所用气源的比功率或比能量。

2) 无法对气源输出端到设备使用端的中间环节的能量损失做出量化,比如管道压力损失导致的能量损失无法计算,即无法对气动系统中存在的能量损失做出分析。

要克服以上缺点,必须使用具有能量单位焦耳或瓦特的评价指标,该指标既独立于气源,同时又与压力变化相关,如同电力不仅取决于电流,还取决于电压一样。

2 压缩空气的绝对能量——焓

根据热力学理论,流动空气的绝对能量由焓、运动能和势能组成^[3]。其中,运动能和势能比较小以致基本可以忽略不计,而焓由内能与传递能组成。所以,空气流动过程中所具有的绝对能量可表示为:

$$H=U+pV=mC_p\theta \quad (5)$$

式中 m ——空气质量;

C_p ——等压比热;

θ ——空气绝对温度。

参照式(5),空气的绝对能量取决于空气的质量和温度,与压力无关。即使是大气状态的空气,也含有大量的焓。

对于气动系统内的能量转换,可直观地考虑为压缩机电机先做功将空气压缩,做功能量储存在压缩空气中,随后压缩后的空气在气缸等执行器处将该能量释放输出机械能,实现动力传递的目的。这样储存在压缩空气中的能量伴随空气的压缩或膨胀而增减,具有与焓完全不同的性质。因而,焓不能用来表示气动系统中储存在压缩空气中用于动力传动的能量。

3 压缩空气的相对能量——有效能

3.1 气动系统中的能量转换

气动系统通常工作在大气环境中,在压缩机处消耗电力,通过电动机输出机械动力做功以压缩空气,将该部分机械能储存在压缩空气中。随后,通过管路将压缩空气输送到终端设备,在终端设备的气缸等执行元件处对外做功,将储存在压缩空气中的能量还原成机械能。另外,由于管路摩擦、接头等的存在,压缩空气在输送过程中压力会逐渐下降,损失一部分能量。以上过程中,压缩空气呈如下状态变化循环:大气状态→压缩状态→压缩状态(压力略降)→大气状态。因此,气动系

统中能量的转换/损失在压缩空气的状态变化中得到反映,用空气的状态量来表示储存在压缩空气中的能量是可行的。

为了验证这点,以下分别讨论对应于大气状态→压缩状态的压缩过程 and 对应于压缩状态→大气状态的做功过程,分析这两个过程中的能量转换与空气状态变化间的关系。

3.2 空气的压缩与做功

空气的压缩与做功过程因压缩机与执行器的种类而不同。这里为了讨论方便,以构造最为简单的往复活塞式容积压缩机和气缸为对象,并忽略摩擦力等因素,讨论压缩与做功的理想过程。

一般而言,压缩机输出的压缩空气都是高温空气,经过冷却干燥处理后以常温状态再输送给终端设备。为制造这样的压缩空气,从大气吸入空气后进行等温压缩所需要的功最少^[3]。如图2所示,理想的空气压缩过程按如下步骤进行。

1) 吸气过程:将活塞从位置 A 拉到位置 B,从大气环境中缓慢地、准静态地吸入大气;

$$W_{A \rightarrow B} = 0 \quad (6)$$

2) 压缩过程:将活塞从位置 B 推到位置 C,将密闭的大气以等温变化压缩到供气压力 p_s ;

$$\begin{aligned} W_{B \rightarrow C} &= \int_{V_0}^{V_s} (p - p_a) \cdot (-dV) \\ &= p_s V_s \ln \frac{p_s}{p_a} - p_a (V_0 - V_s) \end{aligned} \quad (7)$$

3) 送气过程:将截至阀 1 打开,活塞从位置 C 推到位置 A,将压缩好的空气完全推送出去。此时,出口压力始终保持为供气压力 p_s 。

$$W_{C \rightarrow A} = (p_s - p_a) V_s \quad (8)$$

因为是等温压缩,所以 $p_a V_0 = p_s V_s$ 成立。以上三个步骤中压缩机做的总功为:

$$W_{\text{ideal_compress}} = W_{A \rightarrow B} + W_{B \rightarrow C} + W_{C \rightarrow A} = p_s V_s \ln \frac{p_s}{p_a} \quad (9)$$

如图2所示,以上做功获得的压力 p_s 、体积 V_s 的压缩空气被输送到右侧的气缸,在气缸处对外做功。此时同样,等温膨胀可使压缩空气做功最大^[3]。压缩空气的理想做功过程按如下步骤进行:

1) 送气过程:以上压缩过程中的送气过程将活塞从位置 A 推到位置 C,缓慢地、准静态地将压力 p_s 的压缩空气推入气缸;

$$W_{A \rightarrow C} = (p_s - p_a) V_s \quad (10)$$

2) 膨胀过程:关闭截至阀 1,使推入的压缩空气以等温变化膨胀,其压力从 p_s 变到大气压 p_a ,活塞从位置

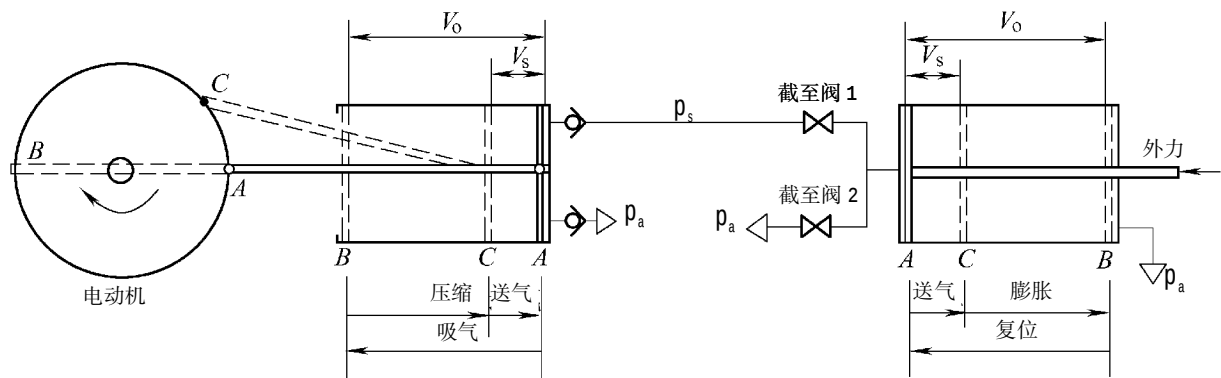


图 2 空气的理想压缩和理想做功

C移动到位置 B;

$$\begin{aligned}
 W_{C \rightarrow B} &= \int_{V_0}^{V_s} (p - p_a) dV \\
 &= p_s V_s \ln \frac{p_s}{p_a} - p_a (V_0 - V_s)
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

3)复位过程:打开截至阀 2 让活塞两侧向大气开放,使活塞从位置 B 复位到位置 A。

$$W_{B \rightarrow A} = 0
 \tag{12}$$

因为是等温膨胀,所以 $p_a V_0 = p_s V_s$ 成立。以上三个步骤中压缩空气对外做的总功为:

$$W_{\text{ideal_work}} = W_{A \rightarrow C} + W_{C \rightarrow B} + W_{B \rightarrow A} = p_s V_s \ln \frac{p_s}{p_a}
 \tag{13}$$

以上讨论的都是理想过程,而实际上由于各种损失的存在,以下不等式成立。

$$W_{\text{compress}} > p_s V_s \ln \frac{p_s}{p_a} > W_{\text{work}}
 \tag{14}$$

从式(14)可以看出, $p_s V_s \ln \frac{p_s}{p_a}$ 是空气理想压缩和空气理想做功过程中的能量转换量,是一个仅取决于空气状态的物理量。

3.3 有效能的定义

为此,定义压缩空气的有效能(Available Energy)为:以大气温度和压力状态为外界基准,压缩空气具有的对外做功能力^[4]。该有效能是一个相对于大气状态基准的相对量,是建立在气动系统都工作在大气环境下这样一个事实基础上。有效能在大气温度下用下式表达:

$$E = pV \ln \frac{p}{p_a}
 \tag{15}$$

式中 p ——空气绝对压力;
 V ——空气体积;
 p_a ——大气绝对压力。

根据式(14),有效能相当于压缩空气在执行器处能做的最大功,在压缩机处制造同样空气所需的最小功。

根据式(15),有效能取决于空气的压力和体积,在空气压力等于大气压力时有有效能为零,压力越高有效能值越大。

4 气动功率

4.1 气动功率的定义

空气流动时,空气流束所含的有效能表现为动力形式,称之为气动功率(Pneumatic Power)。其表达式为^[4]:

$$p = \frac{dE}{dt} = pQ \ln \frac{p}{p_a} = p_a Q_a \ln \frac{p}{p_a}
 \tag{16}$$

式中 Q ——压缩状态下的体积流量;
 Q_a ——换算到大气状态下的体积流量。

气动功率的计算例如表 1 所示。

表 1 气动功率计算例

绝对压力 p/MPa	气动功率 P/kW		
	体积流量 $Q_a / (\text{L}/\text{min})$ (ANR)		
	100	500	1,000
0.1013	0.00	0.00	0.00
0.2	0.11	0.57	1.15
0.3	0.18	0.92	1.83
0.4	0.23	1.16	2.32
0.5	0.27	1.35	2.70
0.6	0.30	1.50	3.00
0.7	0.33	1.63	3.26
0.8	0.35	1.74	3.49
0.9	0.37	1.84	3.69
1.0	0.39	1.93	3.87
1.1	0.40	2.01	4.03

例如,绝对压力 0.8MPa、流量 1,000L/min(ANR)的压缩空气的气动功率为 3.49kW。从单位 kW 可以看出,气动功率使工厂中的压缩空气可以与电力一样,在 kW 单位下统一来进行能量消耗管理。

这样,气动设备的用气能耗可以不再依赖于气源,直接用其气动功率值来表示即可。此时的用气能耗将区别于式(4)的能耗,不再包含气源及输送管道的损失,是供给到设备的纯能量。式(4)计算的最终能耗中,压缩机及冷却干燥处理等的损失占到了 $6.375-3.49=2.885(\text{kW})$ 。

此外,气源、输送管道等各个环节的损失可以分别用气动功率计算出来。例如,流量 $1000\text{L}/\text{min}(\text{ANR})$ 的输送管道压力从 0.8MPa 降到 0.6MPa 时,其气动功率从 3.49kW 降到 3.00kW ,能量损失为 0.49kW 。压缩机的效率也可以用气源输出的气动功率与所耗电力的比值来评价。

运用新的气动功率的量化方法,将区别于传统的基于空气消耗量的评价体系,可以将气动系统中各个环节的损失计算出来,这对明确节能目标有着非常重要的意义。

4.2 气动功率的构成

在液压系统中,工作油从液压泵输出后流向下流,每流动压力 p 、体积 V 的工作油,就向下流传送 pV 的机械能。这个能量与内能不同,不是流体固有的能量,而是流体流动过程中从上流向下流传送的能量。压缩空气在压缩状态下流动时,与液体一样传送该能量,我们称该能量为压缩空气的传送能。

压缩空气与液体不同,在传送传送能的同时,如前所述还具有利用其膨胀性进行对外做功的能力,我们称利用膨胀对外做功的能量为压缩空气的膨胀能。

压缩空气的有效能由这两部分构成:

1) 传送能(Transmission Energy)

由于有效能是以大气状态为基准的相对能量,传送能中对大气做功的部分必须减去。这样,压缩空气的传送能可用下式表示:

$$E_t = (p - p_a)V \quad (17)$$

对时间进行微分得压缩空气的传送功率:

$$P_t = (p - p_a)Q \quad (18)$$

2) 膨胀能(Expansion Energy)

压缩空气的膨胀能可用它的最大膨胀功来表示,采用等温膨胀可求得该膨胀功。与传送能一样,膨胀功中减去对大气做功的部分,就是有效能。

$$E_e = pV \ln \frac{p}{p_a} - (p - p_a)V \quad (19)$$

对时间进行微分得压缩空气的膨胀功率:

$$P_e = pQ \ln \frac{p}{p_a} - (p - p_a)Q \quad (20)$$

储存在固定容器中的压缩空气没有传送能,其有

效能仅为膨胀能,可用式(20)算出。

图3表示的是体积流量为 $1.0\text{m}^3/\text{min}(\text{ANR})$ 的压缩空气的气动功率。其中,灰色部分表示的是传送功率,网格部分表示的是膨胀功率。如图所示,随着压力的上升,两个功率都在上升。在大气压附近,膨胀功率很小,传送功率占据支配地位。但随着压力上升到 0.52MPa 时,两个功率变为相等。压力再向上升,膨胀功率超过50%继续上升。

由此可见,由于空气的压缩性而产生的膨胀功率在气动功率中占据很大的比率,在评价和利用空气的能量时,必须考虑这部分能量。当前气缸的驱动回路中,膨胀能基本都没有得到利用,这也是导致气缸效率低下的原因之一。

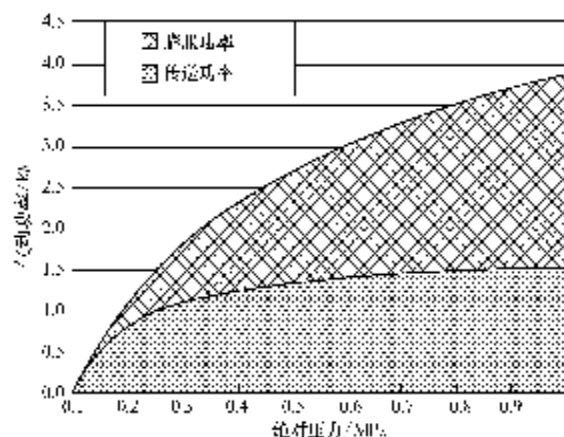


图3 气动功率的构成

4.3 温度的影响

式(16)中表示的是大气温度状态下的压缩空气的气动功率。在偏离大气温度时,其气动功率可用下式表示^[5]:

$$P = p_a Q_a \left[\ln \frac{p}{p_a} + \frac{k}{k-1} \left(\frac{\theta - \theta_a}{\theta_a} - \ln \frac{\theta}{\theta_a} \right) \right] \quad (21)$$

这里, θ 是空气的绝对温度, θ_a 是大气温度, k 是空气的比热比。

图4表示的是气动功率受温度影响的情况。空气温度越偏离大气温度,其气动功率越高。这是因为气动功率表示的相对于基准——大气状态的一个相对量,越偏离基准,其值就越高。

通常,压缩机输出的压缩空气温度比大气温度高 $10 \sim 50^\circ\text{C}$,参照图4,其气动功率要增加几个百分点。由于压缩空气从压缩机到终端设备的输送过程中,会在干燥机或管路中自然冷却成大气温度,所以在温度的处理上需要谨慎。通常,是将高温压缩空气按等压变化换算成大气温度,然后用式(16)进行计算。

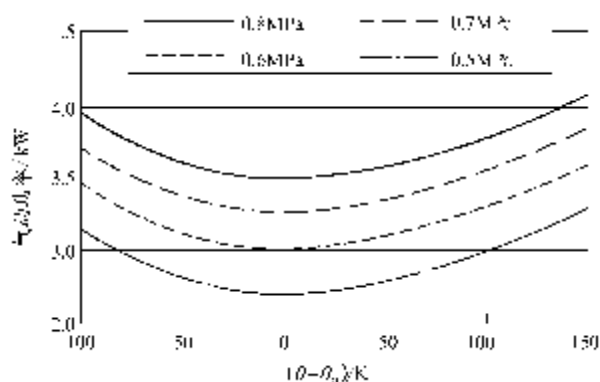


图4 气动功率随温度的变化

4.4 动能的考虑

压缩空气的动能与有效能一样可以转换为机械能。严格来说,动能也应包括在压缩空气的有效能中。

空气密度很小,但其动能能否忽略不计取决于其速度。如图5所示,平均流速在100m/s以下时,动能在有效能中的比率低于5%,可以忽略不计^[6]。通常,工厂管道中的空气流速远低于100m/s,所以一般可以不用考虑。但是,在处理流速很快的气动元器件内部的能量收支时,就必须考虑动能,否则,能量收支无法平衡。

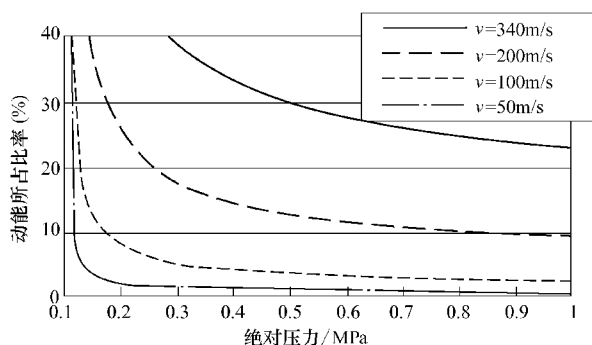


图5 动能在有效能中所占比率

5 损失分析

5.1 气动功率的损失因素

气动系统中的能量损失实质上是气动功率的损失。因此,有必要分析导致气动功率损失的因素。

气动功率的有效能实质也是热力学中的有效能,其损失将遵守热力学中有效能的损失法则。这个法则就是热力学第二定律。根据这个法则,不可逆变化将导致有效能减少,熵增加^[3]。因此,不可逆变化将导致气动功率损失。

气动系统中的不可逆变化大致可区分为机械不可逆变化和热不可逆变化^[7]。

(1)机械不可逆变化

外部摩擦:空气在管路中流动时,与管路内壁发生

摩擦产生抵抗。空气流经管路的压力损失就是这部分摩擦引起的。

内部因素:空气在管路中流动时,空气分子之间的粘性摩擦力尽管可以不计,但流动的紊乱及漩涡引起的损失却无法忽略。压缩空气流经接头或节流孔时产生的损失主要就是由这部分因素造成的。

(2)热不可逆变化

外部热交换:气动系统中空气温度随着空气压缩或膨胀极易变化,因而与外界的热交换较多。气动系统中热交换量最大的地方就是空气被压缩后从压缩机输出后的冷却处理。另外,容器的充放气以及空气流经节流孔后的温度恢复过程等处都存在热交换。

现以空气绝热压缩后再冷却到室温的等压过程为例,压缩到绝对压力0.6MPa后的冷却处理过程将导致23.4%的有效能损失。

内部因素:对容器充气是把高压空气充入到低压空气中的过程,相当于内部混合。这样的混合是不可逆的,所以也将导致有效能的损失。例如,将绝对压力0.6MPa、体积1L的压缩空气充入绝对压力0.3MPa、体积10L的容器中,将损失相当于充入有效能3成的359J的能量。

以上气动功率损失因素的明确将有助于深入分析和理解气动系统中的能量损失。

5.2 气动系统的系统损失

考虑气动系统中的能量转换,可得如图6所示的流程。这样的变化用p-V线图来表示,如图7所示。

气源处的空气压缩及输出可用A→B→C来表示。在这个过程中空气从电动机做功得到的能量为

$$W_{in} = S_{ABCGA} \quad (22)$$

输出的压缩空气供给气缸做功可用D→E→F→A来表示,对外做功量为

$$W_{out} = S_{DEFGD} \quad (23)$$

两者的差就是系统的损失

$$\Delta W = W_{in} - W_{out} = S_{ABCDEFA} \quad (24)$$

如图7所示,气动系统中的状态变化的方向是A→B→C→D→E→F,与内燃机正好相反,是将机械能转换为热能,热能释放到大气的系统。如要使放热量,即系统损失为零,则需使状态循环线A→B→C→D→E→F围起的面积为零。这样就要使状态变化在图7所示的虚线,即大气等温线上进行,也就意味着压缩和做功都必须都是等温过程。但是,在实际的气动系统中,实现等温压缩是不现实的,而且,还存在节流孔及排气等不可逆因素,很多损失不可避免。

从图7中还可以看到,空气有效能实际上就是图上两部分阴影面积之和。 E_i 代表压缩空气流动所伴随

的传递能,而 E_e 代表压缩空气的膨胀能。

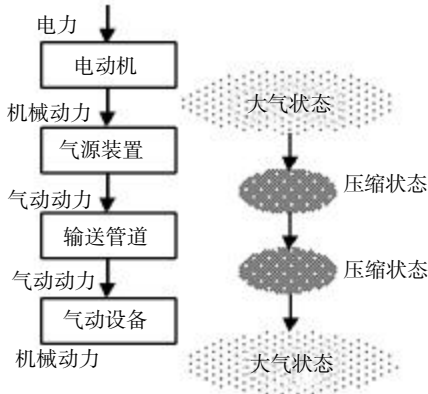


图 6 气动系统中的能量流程及空气状态变化

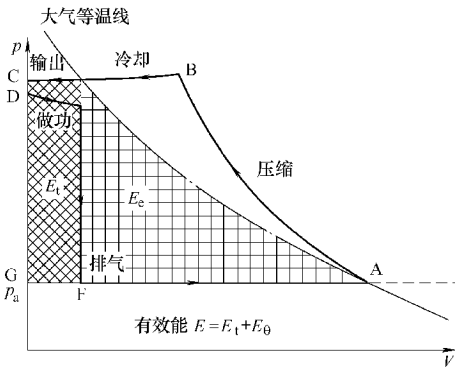


图 7 气动系统中的空气状态变化及系统损失

参 考 文 献

[1] 空気圧システムの利用者及び製造業者に対する空気圧システムの省エネルギー動向のアンケート調査,平成 13 年度空気圧機器複合システムの省エネルギー化に関する調査研究報告書, 社団法人日本フルードパワー工業会, 2002.

[2] 蔡茂林,气动元件的流量特性[J],液压气动与密封,2007,27 (2).

[3] Kam W.Li Applied Thermodynamics -availability Method and Energy Conversion[M].Taylor&Francis,1995.

[4] Maolin Cai,Kenji Kawashima,Toshiharu Kagawa:Power Assessment of Flowing Compressed Air[J].Journal of Fluids Engineering,Transactions of the ASME,Vol.128,No.2,pp.402-405 (2006).

[5] 蔡茂林,藤田壽憲,香川利春.エアエクセルギによる空気圧エネルギー評価,平成 13 年度春季フルードパワーシステム講演会,東京[C],2001.

[6] 蔡茂林,船木達也,川嶋健嗣,香川利春:省エネのためのエアパワーメータの開発,平成 15 年度春季フルードパワーシステム講演会,東京[C],2003.

[7] 谷下市松.工業熱力学[M].東京裳華房,1981.