

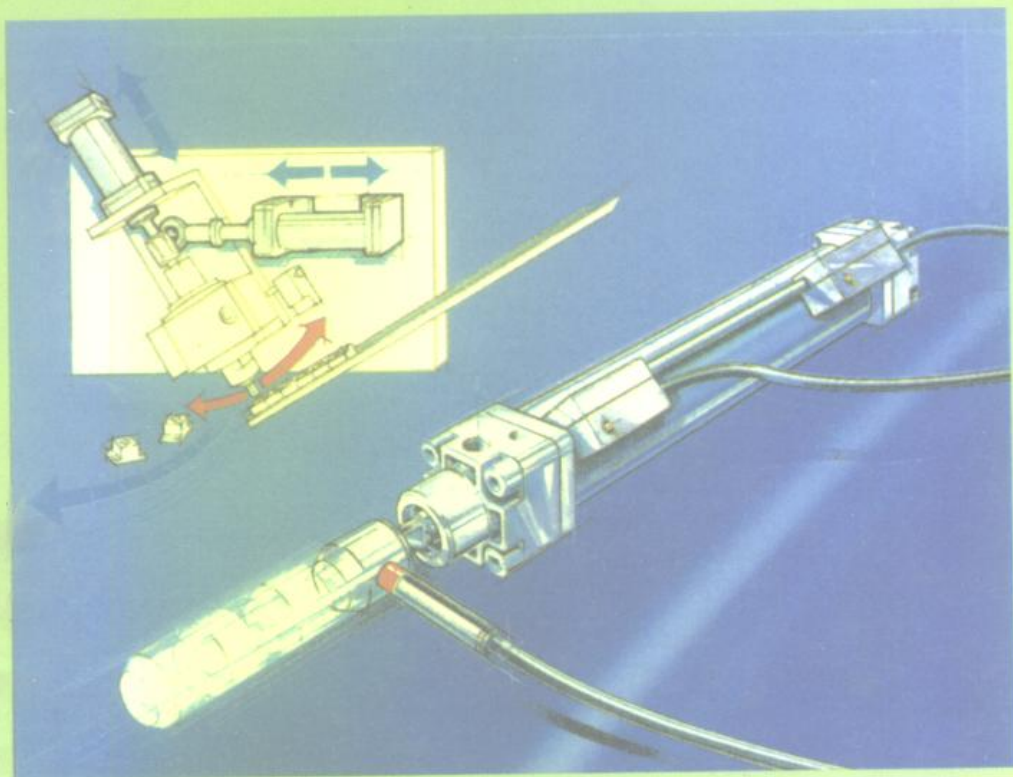
气动技术

低成本综合自动化

(德) Werner Deppert/Kurt Stoll 著

李宝仁 译

Cutting Costs with Pneumatics



机械工业出版社

TP6
D19

气 动 技 术

低成本综合自动化

德文符

(德) Werner Deppert 著
Kurt Stoll
李 宝 仁 译



机 械 工 业 出 版 社

Div 87/20
著作权合同登记号：图字 01—1999—2192

Werner Deppert, 工程师, 广告策划
顾问。

1935 年出生于 Heilbronn。曾在斯图加特工业大学任助教。自 1962 年起在工业界从事广告工作, 1970 年起为自由职业广告策划顾问。

Kurt Stoll, 工程师, 名誉博士。

1931 年出生于 Esslingen。斯图加特大学毕业。德国和欧洲工业协会会员, FESTO 股份公司监事会主席。1950 年开始从事气动产品的开发和应用工作。在行业中, 被誉为德国气动之父。

Cutting Costs with Pneumatics

Werner Deppert/Kurt Stoll

Copyright (©) 1988 by Vogel-Buchverlag
Würzburg.

图书在版编目(CIP)数据

气动技术—低成本综合自动化/(德)德泊特(Deppert, W.),
(德)斯托尔(Stoll, K.)著; 李宝仁译,
—北京: 机械工业出版社, 1999. 9
书名原文: Cutting Costs With Pneumatics
ISBN 7-111-07456-4

I. 气… I. ①德… ②斯… ③李… II. 气动技术 IV.
TP6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 38048 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 盛君豪 版式设计: 张世琴 责任校对: 张佳
封面设计: 姚毅 责任印制: 何全君

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·19.5 印张·2 插页·318 千字

0 001—2000 册

定价: 35.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

序

气压传动与控制广泛应用于工业领域各部门，它涉及各种各样的动力应用(包括驱动和控制)。除了在制造普通机械设备中使用气动技术外，在其它领域(如家庭、农业机械以及核试验和太空实验室等)，气动技术也有非常广阔的应用前景。甚至目前越来越受到人们重视的微电子控制技术，其输出末端也要采用气压传动与控制技术。这点可以通过气动技术的应用举例来加以说明。只有将控制功能和动力输出相结合，才能够真正形成高效的半自动或全自动的生产、装配和包装机械及装置。

本书不可能涵盖气动技术的所有实际应用及其巨大的技术潜力。相反，我们把本书局限于一些在生产加工中起着主要作用的例子，因为大多数实际生产加工能够通过气动技术很好地完成。不过，对于这些例子，我们也只能考虑其基本功能。既然一个作业的机械化程度通常由产品所用材料、生产批量、设备的机械特征、设备的加工能力和自动化程度所决定，那么，只有当指定作业任务时，我们才能够清楚了解这个作业的机械化程度。大型气动系统通常包含几个独立的加工功能和辅助操作功能。在一个设备中，各独立装置相互结合，从而构成一个整体，其结合方式既可以采用气动的，也可以采用电子的。

在选择所述应用实例时，我们将重点放在“廉价”自动化上，因为它能使用户有望从经济和技术两方面都获得最大收益。

所有企业都在追求降低成本、提高效益这一目标，为此必须通过大量努力将制造成本限制在一定范围内。只有不断地改进技术和加工工艺，这个持续变动的目标才可能被一次次地接近，在这方面，气动技术提供了大量途径。书中的举例只是向读者提出

了一些建议，它们可促使您进一步思考——怎样使一个具体的操作或生产流程做得更好和更有效。为了便于参考，我们对气动技术进行了必要的分类，但是如将气动技术的应用局限于某一工业或某一加工领域将有损本书的意图。

本书适合于工程技术人员，特别适合于机械设备、机械装置和生产设备的设计与制造人员。它也为气动技术的初学者阐明了许多工程解决方案，以帮助他们进入这个有趣的技术领域。

书中所用术语、符号和图表均采用相应 DIN 标准、VDMA 代码和 ISO 标准的最新版本。计量单位完全使用国际单位制。本书是由 Vogel-Buchverlag 出版社出版的《Pneumatic Control》(《气动控制》) 一书的补充。

作 者

译 者 序

气动技术——这个被誉为工业自动化之“肌肉”的传动与控制技术，在加工制造业领域越来越受到人们重视，并获得了广泛应用。目前，伴随着微电子技术、通信技术和自动控制技术的迅猛发展，气动技术也在不断创新，以工程实际应用为目标，得到了前所未有的发展。

本书中文版根据 Werner Deppert 和 Kurt Stoll 所著《Koston senken mit Pneumatik》一书的英文版《Cutting Cost With Pneumatics》翻译而成。

本书侧重于气动技术的实际应用，在介绍气动技术基础理论的同时，列举了大量工程实例，说明气动技术在生产过程中的应用，告诉人们如何通过气动技术达到降低制造成本，实现生产过程自动化的目的。这些内容在一般教科书或理论分析书籍中是很难找到的。它将有助于人们认识和正确使用气动技术，推动我国气动技术的应用和发展。

本书可作为高等院校机械电子工程及自动化专业“气压传动与控制”课程的教学参考书，也可供有关工程技术人员参考。

在翻译过程中，研究生刘标奇、杨钢和张庆先作了大量工作，FESTO(中国)有限公司的裴华徠博士给予了大力帮助和支持，在此表示感谢。

由于译者水平有限，译文中一定会有不少错误或不妥之处，请读者批评指正。

译 者

1999 年 6 月于华中理工大学

目 录

序

译者序

1 基础知识	1
1.1 压缩空气	2
1.1.1 干压缩空气	3
1.1.2 无油压缩空气	5
1.2 计量单位	6
1.2.1 压力	7
1.2.2 力	9
1.2.3 功	10
1.2.4 功率	10
1.2.5 运动粘度	11
1.3 符号及图表	11
1.3.1 结构原理图	11
1.3.2 流程图	12
1.3.3 逻辑图	13
1.3.4 功能图	15
1.3.5 回路图	16
1.3.6 图形符号	17
1.3.7 逻辑功能表	28
2 气动技术的应用	32
2.1 应用准则	33
2.1.1 力	36
2.1.2 行程	38
2.1.3 时间	43

2.1.4	速度	46
2.1.5	耗气量	51
2.1.6	信号转换	54
2.2	应用分类	56
2.2.1	按功能分类	57
2.2.2	按行业分类	59
3	操作形式	66
3.1	定向	67
3.1.1	位置控制	69
3.1.2	翻转	78
3.2	进给	86
3.2.1	传送	89
3.2.2	分配	90
3.2.3	汇集	98
3.2.4	进料	102
3.2.5	计量	117
3.2.6	定位和装卸	124
3.2.7	夹紧和松开	134
3.2.8	直线分度	144
3.2.9	旋转分度	154
3.2.10	集成	163
3.2.11	机器人	168
4	材料加工	173
4.1	切削加工	174
4.1.1	钻削	175
4.1.2	车削	190
4.1.3	铣削	196
4.1.4	锯削	201
4.1.5	磨削	205
4.1.6	光整	211
4.2	成形加工	212

4.2.1 剪切和冲切	213
4.2.2 弯曲和折叠	218
4.2.3 压印	225
4.2.4 拉深	227
4.2.5 焊接、热封和粘合	227
4.3 标记	234
4.3.1 冲压	234
4.3.2 模压	234
4.3.3 贴标签	236
4.3.4 印刷	239
4.4 装配	245
5 计量与检验	252
5.1 测量	253
5.2 计数	255
5.3 称量	257
5.4 检验	261
5.5 分类	263
6 专用设备	268
6.1 门控制	268
6.2 灌装设备	274
6.3 包装机械	284
7 维护保养	297
7.1 供气系统	297
7.2 气动控制	298
7.3 检修故障	298

1 基础知识

气动技术是气动执行元件(气缸与气马达)和控制元件(各种控制阀)的工业实现与应用。“Pneumatics”一词起源于希腊文“Pneuma”，其原义为“呼吸”，后来才演变成“气动技术”。气动技术是空气的性质和运动规律，在工业中的一种应用。

气动技术囊括了所有使用压缩空气能量的工业应用。

在压缩空气应用技术中，比较新的就是射流技术，这是一种“流体逻辑”控制技术。射流技术是对流体动力现象的应用，或者是对使用这些现象的元件描述。在以压缩空气为工作介质的气动系统中，射流技术应用了一些按空气动力学原理工作的控制元件，而气动技术则主要应用按空气静力学原理工作的控制元件。实际上，在拉丁文中射流技术表示的是流动的液体介质，但是，当今射流技术的含义已发生变化，更多的是指其工作介质为气体介质以及用于实际应用场合的低压和压力小于 1bar 的压缩空气。

气动控制元件也有工作在低压情况下的。过去常把所有工作在低压情况下的控制元件都称之为射流元件，但现在认为射流元件是指动态控制元件(如空气喷射元件)，而静态控制元件(如膜片阀或微型滑阀)则被划分到低压气动元件这一范畴。动态控制元件和静态控制元件都适合于在逻辑回路中应用。

射流元件是应用流体动力学原理工作的控制元件，其工作介质为低压(压力小于 1bar)的压缩空气。

应用流体静力学原理工作的控制元件(其工作介质为低压和压力小于 1bar 的压缩空气)现被划分到低压气动元件中。由于这些定义还不是通用标准，因此，静态控制元件有时也被划分到射流元件中。

50 年代气动技术才进入工业界，射流技术则更晚。但作为一种技术手段，射流技术在一定程度上已成为一门独立的工业技术。

由于没有标准专业术语，因此，只好沿用某些术语的习惯用法。这也表明射流元件可以定义成在低压情况下工作的控制元件，而气动元件则可以定义成在正常压力情况下工作的控制元件。应当记住，动态控制元件和静态控制元件都可以在低压情况下应用。既然静态控制元件功能与在正常压力情况下工作的“纯”气动控制元件一样，那么，最好把低压情况下工作的静态控制元件也称之为气动元件。

正常压力

是指完成驱动和控制功能的气体压力，其压力范围约为 3~10bar。

低压力

是指控制压力或气信号压力的最大值为 2bar。低压力不适合于操作气动执行元件或其它动力元件。

低压力范围划分如下：

控制压力为 0.5bar 或更低；

控制压力范围为 0.5~1bar；

控制压力为 1bar 或更高。

为改善生产条件或提高劳动生产率以及使加工过程自动化，作为动力传动与控制的一种手段，气动技术已获得广泛应用。正因为如此，为对各种实际问题采用最佳解决方案，需要不断深入研究各种方法和所用设备。为达到这一目的，我们不仅要精通气动技术，还要能够更好地使用包含气动技术的设备。

通常，气动系统正常工作时，空气管路压力至少应为 7bar。若要安装多个气动系统或空气管路，建议空气管道压力为 10~12bar。

1.1 压缩空气

众所周知，气动技术以空气作为工作介质，而空气是取之不尽，用之不竭的。自然界中的空气是一种混合物，主要由氧、氮、水蒸气、其它微量气体和一些杂质(如尘埃、其它固体粒子等)等组成，空气组成成分极易随气候条件变化和环境而变化。气动系统工作时，空气中水分和固体杂质粒子等的含量是决定系统能否正常工作的重要因素。对用于专用设备及过程

的空气，必须要经过干燥(除去水分)、净化(除去异物固体粒子等)及压缩等处理过程。

洁净干燥的压缩空气是气动系统正常工作的首要条件。

1.1.1 干压缩空气

自然界中的空气总是含有一定量的水蒸气，其含水量多少可以用相对湿度来表示。

$$\text{相对湿度} = 100\% \times \text{空气实际湿度} / \text{空气饱和湿度}$$

空气湿度是其压力和温度的函数。应当记住，一定体积的压缩空气与同体积具有大气压力的空气相比，二者吸收水分的能力是相同的。例如，在压缩空气过程中，压缩机吸入 7 个容积的空气，经过压缩，虽然仅排出 1 个容积的空气，但空气压力却变为原来的 7 倍，若这时空气在压缩机进出气口的温度相同，则在压缩过程完成后，就会有原来 6 个容积空气所含的水冷凝析出。另一方面，空气中水蒸气的饱和度仅是温度的函数，温度越高，空气中含有的水蒸气就越多(表 1.1)。安装在压缩机与贮气罐之间的后冷却器可以冷却压缩过程完成后的压缩空气，从而使大部分水蒸气冷凝析出。

表 1.1 空气中含有的饱和水蒸气量与其温度之间的关系

温度/℃	-10	0	5	10	15	20	30	50	70	90
水蒸气/(g/m³)	2.1	4.9	7	9.5	13	17	30	83	198	424

多级压缩机通常安装中间冷却器，以便在每个压缩级都有水蒸气冷凝析出。

在空气压缩期间，湿度大、温度高的空气常导致更多的水蒸气冷凝析出。

在空气压缩期间，由于中间冷却器或后冷却器可以除去空气中的大部分水蒸气，加之贮气罐还可以对压缩空气进一步冷却，因而从空气压缩站输出的压缩空气是相当干燥的。但在实际应用中，按照这种方式产生的干空气并不能满足气动元件对气源质量的要求。为使气源质量满足气动元件要求，常在气动系统前面安装气动三联件(气源调节装置)或过滤器。压缩

空气流经过滤器时,通过提高流动速度,可对其进一步冷却,此外,滤杯中的导流板对压缩空气产生的离心作用,也可以使压缩空气中的冷凝水和悬浮的固体杂质粒子等进一步分离析出。

气动三联件是由过滤器、减压阀和油雾器三部分组成的。过滤器用于从压缩空气中进一步除去水分和固体杂质粒子等;减压阀用于将进气压力减至出口所需的工作压力;有些应用场合要求在压缩空气中含有一定量的油雾,以便对气动元件进行润滑,用于完成这个功能的控制元件即为油雾器,它可以把油滴喷射到压缩空气中去。

由于压缩空气中的大部分水分已在后冷却器、贮气罐和过滤器中析出,因此,在标准压力情况下,干压缩空气可以满足气动系统的工作条件。若系统需要更高洁净度的压缩空气,应在系统中加入精过滤器。

对于特殊应用场合(如食品工业)或控制低压气动元件及射流元件的情况,按照上述方法所产生的干压缩空气还不够干燥或洁净。因此,对于要求有更高气源质量的应用场合,应在空气压缩站处安装干燥器,以使压缩空气满足气动系统的实际工作要求。根据气动系统工作条件,可采用下列三种方法来干燥压缩空气:

- 吸收干燥法
- 吸附干燥法
- 冷冻干燥法

吸收干燥法是利用一种不可再生的化学干燥剂来获得干压缩空气的干燥方法,即利用干燥剂吸收压缩空气中的水分,以达到干燥压缩空气的目的。在更换干燥剂之前,1kg 干燥剂通常可吸收约 13kg 的水。应该注意,采用这种干燥方法时,压缩空气的温度不应超过 30℃。经过吸收干燥法所获得的压缩空气,其露点温度在 0℃ 以下。

吸附干燥法同样是利用化学干燥剂来干燥压缩空气的干燥方法,即利用吸附剂吸收压缩空气中的水分,以达到干燥压缩空气的目的。但在这种干燥方法中,所用吸附剂可再生,也就是说,当所用吸附剂饱和时,通过向其吹热空气或冷空气,吸附剂可重复使用。一般来说,吸附式干燥器通常由两个并行部分组成,这两部分交替工作,以用于干燥压缩空气和吸附剂再生。经过吸附干燥法所获得的压缩空气,其露点温度可达 -90℃。

冷冻干燥法是气动技术中应用最为普遍的一种干燥方法,它利用空气

湿度随温度变化而变化的性质(表 1.1), 达到干燥压缩空气的目的。实际上, 冷冻式干燥器的工作原理类似于一台制冷机, 它由制冷装置和热交换器两部分组成。当压缩空气经过冷冻式干燥器时, 可被冷却至 2~5℃(冷冻式干燥器的进气口压缩空气温度可达 60℃)。但应记住, 冷冻式干燥器进气口压缩空气的温度与出气口压缩空气的露点温度之差越大, 干燥成本就越高。采用冷冻干燥法也可以同时除去压缩空气中约 80% 的油分(油分来自压缩机润滑系统), 且所获得的压缩空气的最低露点温度可达 1.5℃左右。

出气口压缩空气的露点(温度)	
吸收干燥法	0℃ 以下
吸附干燥法	可达 -90℃
冷冻干燥法	最低 1.5℃

干燥压缩空气成本
约为产生压缩空气成本的 10%~20%。

1.1.2 无油压缩空气

在某些工业场合(如医药或食品加工等)应用气动技术时, 常需要无油压缩空气。根据对压缩空气纯度的不同要求, 可分别选择下列三种不同的方法, 以达到获得无油压缩空气的目的。

- 选择无油润滑的压缩机
- 选择冷冻干燥法
- 安装除油过滤器

由于冷冻干燥法也可以同时除去压缩空气中约 80% 的油分, 因此, 对许多气动技术应用场合来说, 都可以采用冷冻干燥法除去压缩空气中的油分。一般来说, 冷冻干燥法也是气动技术中优选的除油方法。对于压缩空气中含有少量油分的情况, 大多数气动执行元件和控制元件都能正常工作。

某些应用场合若要求更高纯度的压缩空气, 仅采用冷冻干燥法所获得的压缩空气是不能满足要求的, 这时应把上述第三种方法与第一种方法或第二种方法组合起来使用, 并且还要安装精过滤器(过滤精度达 0.1μm), 进一步过滤掉压缩空气中的油分和水分。在串联安装的两个精过滤器中, 第二个过滤器常采用活性炭吸附剂填充, 以便从压缩空气中除去油味或其它微小杂质。

对于无油压缩空气,大多数气动执行元件和控制元件也可以正常工作(应考虑设备制造商建议)。

1.2 计量单位

在科学研究和工程技术上,国际间交流及合作要求工程变量和物理变量的计量单位统一定义和命名,这样就产生了国际单位制。国际单位制代表了世界范围内官方认可的计量单位(与早期世界各地应用的未统一的计量单位相反)。

国际单位制(SI unit)是国际间统一有效的计量单位。

国际单位制中,6个基本物理量及其对应单位(含缩写)如下*:	
长度	米(m)
质量	千克,(公斤)(kg)
时间	秒(s)
电流	安[培](A)
热力学温度	开[尔文](K)
发光强度	坎[德拉](cd)

* 根据现行国际标准 ISO 31, SI 基本单位共有 7 个,补充一个“物质的量,摩尔(mol)”。

表 1.2 非国际单位制与国际单位制之间的换算表

力				
力的单位牛[顿](N)为国际单位制的导出单位。1N 等于使 1kg 质量物体产生 1m/s ² 加速度所需要的力。				
牛[顿] (N)	达 因 (dyne)	千克力 (kgf)	吨 力 (tf)	克 力 (gf)
1	10 ⁵	0.102	1.02×10 ⁻⁴	102
10 ⁻⁵	1	1.02×10 ⁻⁶	1.02×10 ⁻⁹	1.02×10 ⁻³
9.81	9.81×10 ⁵	1	10 ⁻³	10 ³
9.81×10 ³	9.81×10 ⁸	10 ³	1	10 ⁶
9.81×10 ⁻³	981	10 ⁻³	10 ⁻⁶	1

(续)

功

功的单位焦[耳](J)为国际单位制的导出单位。焦[耳](J)可用作功、能量和热量的单位， $1\text{J}=1\text{N}\cdot\text{m}$ 。

焦[耳] (J)	尔 格 (erg)	千克力米 (kgf·m)	千瓦[小时] (kW·h)	千 卡 (kcal)	电子伏特 (eV)
1	10^7	0.102	2.78×10^{-7}	2.39×10^{-4}	6.24×10^{18}
10^{-7}	1	1.02×10^{-8}	2.78×10^{-14}	2.39×10^{-11}	6.24×10^{11}
9.81	9.81×10^7	1	2.72×10^{-6}	2.34×10^{-3}	6.12×10^{19}
3.60×10^6	3.60×10^{13}	3.67×10^5	1	860	2.25×10^{25}
4187	4.19×10^{10}	427	1.16×10^{-3}	1	2.61×10^{22}
1.6×10^{-19}	1.6×10^{-12}	1.63×10^{-20}	4.45×10^{-26}	3.83×10^{-23}	1

功率

功率的单位瓦[特](W)为国际单位制的导出单位。瓦[特](W)可用作能流和热流的单位， $1\text{W}=1\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

瓦[特] (W)	千 瓦 (kW)	千克力米每秒 (kgf·m/s)	马 力 (hp)	千卡每秒 (kcal/s)	千卡每[小时] (kcal/h)
1	10^{-3}	0.102	1.36×10^{-3}	2.39×10^{-4}	0.86
10^3	1	102	1.36	0.239	860
9.81	9.81×10^{-3}	1	1.33×10^{-2}	2.34×10^{-3}	8.43
735.5	0.7355	75	1	0.1757	632
4187	4.19	427	5.69	1	3600
1.16	1.16×10^{-3}	0.119	1.58×10^{-3}	2.78×10^{-4}	1

压力

压力或机械应力的单位帕[斯卡](Pa)为国际单位制的导出单位， $1\text{MPa}=10^6\text{Pa}=10\text{bar}$ 。压力的基本量纲换算关系式为 $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ 。

帕[斯卡] (Pa)	千克力每平方厘米 (kgf/cm ²)	大气压	巴 (bar)	毫米汞柱 (mmHg)	厘米水柱 (cmH ₂ O)
98100	1	0.98692	0.981	736	1000
101330	1.033	1	1.0133	760	1033
10^5	1.02	0.987	1	750	1020
1	1.02×10^{-5}	9.87×10^{-6}	10^{-5}	75×10^{-4}	1.02×10^{-2}
133.332	1.36×10^{-3}	1.32×10^{-3}	1.33×10^{-3}	1	1.36
98.1	10^{-3}	9.68×10^{-4}	9.81×10^{-4}	0.736	1

1.2.1 压力

在气动技术应用范围内，过去常用的压力单位(如 atm, kgf/cm²)仍将会遇到，不过，这些单位都可以用国际单位制的导出单位帕[斯卡](Pa)来替代。

1Pa 等于 1N 力垂直作用在 1m^2 面积上所产生的压强

1 帕[斯卡]=1 牛[顿]每平方米

$1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$

帕[斯卡](Pa)是压力或机械应力的常用单位，为国际单位制的导出单位，可以替代过去的压力基本单位—— kgf/cm^2 。由于帕[斯卡](Pa)与大气压力无关，因此，这一压力单位可以用于单位面积上的任何作用力，即压强和材料拉伸强度也可以用帕[斯卡](Pa)来计量。

对气动技术而言，若采用帕[斯卡](Pa)作为计量压力的单位，那么，在计量标准压力时，就需要好几位数字，也就是说，用帕[斯卡](Pa)作为压力的计量单位太小了。为改善这种状况，实际中常采用兆帕(MPa)或巴(bar)作为压力的计量单位。

$1\text{MPa}=10^6\text{Pa}$

$1\text{bar}=0.1\text{MPa}$

过去常用的压力计量单位(如 atm 和 kgf/cm^2)可以换算成国际单位制。

$1\text{kgf}/\text{cm}^2=0.0981\text{MPa}=0.981\text{bar}$

$1\text{bar}=0.1\text{MPa}=1.01972\text{kgf}/\text{cm}^2$

若把单位换算系数圆整到 $1\text{MPa}=10\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，则实际计算结果与未圆整前仅约有 2% 的误差。在工业气动技术中，对于许多实际应用场合，该 2% 的误差可忽略不计。

对于工业气动技术的所有应用场合，1MPa 可以等效为 $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ 。

目前，世界上仍有许多国家尚未采用国际单位制单位，但我们希望在不久的将来，这些国家将采用国际单位制。在未采用国际单位制单位的国家里，现仍把磅力每平方英寸(lbf/in^2)作为压力单位，不过，这些压力单位也可以通过简单的计算换算成国际单位制。

$1\text{MPa}=10\text{bar}=145\text{lbf}/\text{in}^2$

$1\text{lbf}/\text{in}^2=0.06895\text{bar}=6.895\text{kPa}$