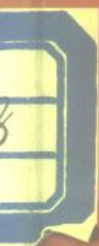


气动元件 和系统

〔苏〕E.B.盖尔茨 主编



机械工业出版社

气动元件和系统

〔苏〕 E. B. 盖尔茨 主编

李建藩 徐炳辉 盛永才 译

李建藩 校

机械工业出版社

本书介绍了苏联各工厂制造的气动元件的类型、结构和主要技术数据。研究了机床、压力机、操作机和其它机器的典型气动控制系统，压缩空气的净化方法和气动元件的润滑。还讨论了气压传动和元件的设计与动力学计算方法。

可供从事气压传动和气动控制系统设计与使用的工程技术人员使用。

**ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА
И СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ
(СПРАВОЧНИК)**

Е. В. ГЕРЦ

МОСКВА 《Машиностроение》

1981

* * *

气 动 元 件 和 系 统

〔苏〕Е. В. 盖尔茨 主编

李建藩 徐炳辉 盛永才 译

李建藩 校

*

**责任编辑：沈 红 版式设计：胡金瑛
封面设计：刘 代 责任校对：张 媛
责任印制：郭 炜**

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

**开本 850×1168¹/₃₂·印张 16³/₈·字数 428 千字
1990年10月北京第一版·1990年10月北京第一次印刷
印数 0,001—1,480·定价：16.20 元**

*

ISBN 7-111-00753-0/TH·126

译 序

近二十年来,气压传动与控制技术发展十分迅速,目前已广泛应用于各个工业部门,成为生产过程自动化和机械化的最有效的手段之一。为了振兴中华,加速我国的四个现代化建设,广大工程技术人员,迫切需要学习和掌握气压传动与控制技术。

但是,目前我国系统地介绍这方面知识的书籍甚少,远远不能满足工程技术人员实际工作的需要。

本书是由苏联技术科学博士 E. B. 盖尔茨 (E. B. Герц) 主编的。书中系统地介绍了苏联生产的各类气动元件的类型、结构和主要技术性能,各种机器的典型气动控制系统及其现代设计方法,还介绍了气压传动和元件的动力学设计与计算方法。书中的内容比较系统完整,反映了苏联 70 年代末 80 年代初的气动技术水平。对我国广大工程技术人员进行生产过程自动化及气压传动与控制系统的 design 和使用工作,有很好的参考价值;对各院校师生的教学、科研工作,也具有重要的参考价值。为简便起见,译者将书名改为《气动元件和系统》。

本书由李建藩(序、前言、第一章、第二章、第三章、第四章、第七章、第十一章、第十二章和附录)、徐炳辉(第五、八章,和第十章部分内容)、盛永才(第六、九章和第十章部分内容)同志翻译。由李建藩同志进行校订和文字统一工作。

由于译者水平有限,译文中难免有不少错误和不妥之处,请读者批评指正。

译者

1986年8月

序

随着工艺过程进行速度的加快，对动力问题的注意也日益增长。因此，研制经济、高效的新型机器具有重要意义。为了从节能角度选择最佳的传动型式，就必须进行精确的分析研究和数量上的评价。

本书能帮助工程师在进行传动和控制系统的设计、计算时，正确选择方案和传动与控制系统元件的结构，并根据功率大小和应保证的给定速度，选择合理的参数。

书中介绍了苏联工业部门生产的各类气动元件的结构及其合理使用范围的数据，还举例介绍了一些别国厂商的产品。根据电子计算机获得的综合图表和参考数据，提出了各种气动装置的工作循环时间的动力学计算及其参数选择的方法。综合图表是以无因次形式作出的，能扩大其在实际装置中的应用范围。当设计的传动参数超出了综合图表的参数范围时，工程师可按本书介绍的方程组编制计算程序，用电子计算机解决这些具体问题。

书中阐述的控制系统现代设计方法，考虑了气动装置的特点，在控制论的一般方法的基础上制订而成的。书中还介绍了苏联和其它国家生产的气动自动装置的元件和线路。

苏联科学院通讯院士

К. В. 伏罗洛夫 (К. В. Фролов)

前 言

气动控制系统与电气和液压系统一样，都是生产过程自动化和机械化最有效的手段之一。只要指出，在最发达的资本主义国家中，约占全部自动化过程的30%是用气动系统实现的，就足以说明这个问题。

装有气动系统的各种机器设备，在其总产量中所占的比重为：包装机中达90%；焊接机和铸造机中达70%；自动操作机中达50%；锻压机器中超过40%；采煤机中超过30%；洗衣店设备中达40%；纺织机、制鞋机、木材加工和食品机械中占20%〔42〕。

气动控制系统的优点在使普遍而大量的操作实现机械化和自动化方面表现得特别突出。如零件的夹紧及其定位、翻转、装配、监控长度尺寸、运输和包装等。它可消除繁重而单调的操作，或使这种操作减至最少。而且可使这些操作的劳动生产率提高1.5~4倍。

在机械制造中广泛使用气动系统有很多优点：气动系统结构简单，维护使用简便，成本低廉，投资回收快，并能在温度变化范围宽、湿度高和有灰尘的环境下可靠地工作，无火灾、爆炸危险；工作寿命长，可达10000~20000 h（动作次数达10~50兆次）；气动执行元件的输出速度高（直线运动达15 m/s，转动达100000 r/min）；工作介质（压缩空气）的传输比较简单，且容易获得；能从一个压缩空气站供给大量用气装置；有过载保护性能（气动马达过载时会自动停止，无损坏危险）。

气动系统的主要缺点是：大距离传递信号的速度较慢，在负载有波动时难以保证气动执行元件输出平稳以及工作介质（压缩空气）的成本较高。然而，对于机械制造中的大多数对象来说，气动系统的参数是合适的。此外，还可采用气-电或气-液联动控

制系统，将上述缺点部分或全部消除。

在苏联机械制造工业中，使用三种压力级的气动系统：高压 $0.2 \sim 1.6 \text{ MPa}$ ，中压 $0.1 \sim 0.25 \text{ MPa}$ ，低压 $0.001 \sim 0.01 \text{ MPa}$ 。

现代机械制造中，气动系统的发展特点是气动装置不仅能用于传动，而且在自动线、操作机和其它机器中，用于工作过程的程序控制和检测的控制系统。因此，从事自动化系统设计和使用的广大工程技术人员，具有气动设备及其基本元件的设计与计算的知识是十分重要的。目前，虽然关于单个气动装置及其计算和应用，已发表了大量的论文和综合图表[1~4, 13, 20, 23, 27, 32~42]，但是，仍然还没有设计师在工作中迫切需要的手册。本书的目的就在于，向从事机械制造自动化的工程技术人员和科学工作者，介绍气动系统和元件及其用于实现生产过程自动化的可能性。

作者力图给工程师和设计师提供关于气动装置结构和线路的选择、使用及其设计计算的 actual 数据（也就是要给他们提供在日常工作中能够直接使用的材料）。因此，从许多已发表的气压传动计算方法中[2, 10, 12, 21, 30, 31, 40]挑选出一些以各种参考材料、图表和诺模图的形式编制而成的计算方法。不过，在阐述这些计算方法时，作者尽量避免重复发表过的资料。如在第十一章中介绍的新的计算方法、曲线图和表格等材料，有些在已出版的参考书[6, 9]中引用过。这种情况说明，在介绍各种气动装置的计算方法时，材料的分配有些不平衡：阐述新内容所占的篇幅比已知的旧内容要多。书中介绍的用于计算气压复位气动元件动作时间的许多图表，就是过去完全没有介绍过的。

在文献[7, 11, 15, 16]中，考虑的流动的波动过程，即作为分布参数系统研究气压传动及其连接管线的计算方法，本书中没有介绍。这是因为，使用这些方法建立的一套电子计算机计算程序，要在一般设计科室的日常工作中使用还太复杂。本书中也没有介绍高速冲击气缸[8, 8, 22, 35, 39]和旋转运动气动马达[18, 19, 28]的计算方法，这是因为，在所列文献中，还缺乏这些元件

广泛适用的参考材料。

断续式气压传动与控制系统的理论和计算问题,由 А. А. 布拉干尔沃夫机构学研究所 (Института Машиноведения им. А. А. Благонравова), 全苏液压传动研究所 (ВНИИ Гидропривода) 等进行研究 [3, 7~9]。图里斯克工艺研究所 (Тульского Политехнического института), 莫斯科自动化研究所 (МАИ) 和莫斯科包曼高等学校 (МВТУ им. Баумана) 等的科研工作,主要在气动伺服传动以及控制系统动态计算和设计过程自动化之理论与实验研究方面 [12, 26, 28]。而控制问题研究所 (Институт проблем управления), 金属切削机床科学实验研究所 (ЭНИМС) 和热工仪表研究所 (НИИ Теплоприбор) 等则从事中低压控制系统设计、射流元件和膜片式元件的结构及其独特线路的研究 [14, 17, 28, 29, 33]。

由于气动控制系统是气动、电气、电子、机械、液压等主要控制系统之一,故在进行这些系统的结构综合时,可使用控制论的一般方法 [17, 24, 25, 37, 42]。与此同时,考虑气动元件的特点,可把气动系统单独划为一类,并在一般方法的基础上制订自己的结构综合方法。本书阐述的方法只适用于这类控制系统。

本书介绍的现代化机器中所用的气动元件,可分为以下主要类型:

执行元件 用于将压缩空气的能量转换成输出环节的机械能以驱动机器的工作机构的元件。机械制造中所用的气动执行元件的结构和技术性能,将在第二章中介绍 (第一章为工作介质和气压传动及其组成元件的概述)。第十一章阐述了气动执行元件的动力学计算方法。这些方法也可用于其它气动元件,如换向阀和控制元件等的计算。

气动阀 用于改变传动系统及其连接元件和管道中的压缩空气流动方向的元件。第四、五两章介绍各种型式的流量和压力调节阀以及方向控制阀。第七章研究气动管件。

控制元件 用于保证各执行元件按照给定的运动规律实现给

定的运动程序的元件。整个控制装置就是由逻辑元件和反馈元件组成的气动系统。第八、九两章介绍中、低压气动自动元件，第十章研究气动控制系统的结构综合问题。因为控制系统可用各种型式（电气、液压和气动）的元件实现，所以信号转换器（见第三章）也是某些系统不可缺少的元件。第六章讨论密封装置。

第十二章讨论压缩空气的净化、运动件的润滑和系统的消声问题。

本书中采用国际单位制（SI）。因为在气动技术的应用中，目前还使用有旧单位制（M Kgf S 制等）刻度的仪表（压力计、气压表等），书中个别章节还列出了几种常用单位间的换算表。

书中引用的苏联国家标准是 1981 年实行的情况。

参 考 文 献

1. Алимов О. Д., Гохберг М. М. Пневмопривод и пневмоавтоматика с нестандартными схемами. Фрунзе: Илим, 1970. 264 с.
2. Анализ конструкций самоходных буровых агрегатов. Фрунзе: Илим, 1975. 217 с.
3. Артоболевский И. И. Механизмы в современной технике. Пневмогидравлические механизмы. Т. 5. М.: Наука, 1976. 848 с.
4. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1975. 638 с.
5. Ашавский А. М., Вольперт А. Я., Шейнбаум В. С. Силовые импульсные системы. М.: Машиностроение, 1978. 200 с.
6. Герц Е. В. Пневматические приводы. М.: Машиностроение, 1969. 359 с.
7. Герц Е. В., Гогричани Г. В. Динамика пневматических систем машин с разветвленными линиями. — Механика машин, 1978, № 54, с. 53—58.
8. Герц Е. В., Долженков Б. С. Выбор параметров быстродействующего пневмопривода. — Станки и инструмент, 1977, № 4, с. 15—17.
9. Герц Е. В., Крейнин Г. В. Расчет пневмоприводов. М.: Машиностроение, 1975. 272 с.
10. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. Киев: Техника, 1971—79. Вып. 1—12. 1000 с.
11. Гогричани Г. В. Динамика пневматических систем машин. — В кн.: Механика машин. Наука, 1978, № 53, с. 58—66.
12. Динамика и долговечность машин. Томск, 1979. 173 с. (Труды Томского университета).
13. Динамика и точность функционирования тепломеханических систем. Тула: ТПИ, 1971—1978. 800 с.
14. Дмитриев В. И., Градецкий В. Г. Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1973. 360 с.
15. Елмелех И. М. Струйные устройства ввода информации. Л.: Судостроение, 1972. 219 с.
16. Залманзон Л. А. Теория элементов пневмоники. М.: Наука, 1969. 507 с.
17. Залманзон Л. А. Специализированные аэрогидродинамические системы автоматического управления. М.: Наука, 1978. 464 с.
18. Зеленецкий С. В., Рябков Е. Д., Михеров А. Г. Ротационные пневматические двигатели. Л.: Машиностроение, 1978. 239 с.
19. Зиневич В. Д., Ярошенко Г. З., Калита Е. Г. Пневматические двигатели горных машин. М.: Недра, 1975. 344 с.
20. Казинер Ю. Я., Слободкин М. С. Пневматические исполнительные устройства в системах автоматического управления. М.: Энергия, 1972. 72 с.
21. Кожевников С. Н., Пешат В. Ф. Гидравлический и пневматический приводы металлургических машин. М.: Машиностроение, 1973. 369 с.
22. Крейнин Г. В., Матвиенко И. В. Выбор параметров пневматической встряхивающей машины с амортизацией ударов. — Литейное производство, 1978, № 5, с. 10—13.
23. Козловский А. А., Эйдерман Б. А. Пневмоприводы конвейеров и вспомогательных механизмов. М.: Машиностроение, 1971. 167 с.
24. Лазарев В. Л., Илья Е. И. Синтез управляющих автоматов. М.: Энергия, 1970.

- 400 с.
25. Левитская О. Н., Левитский Н. И. Курс теории механизмов и машин. М.: Высшая школа, 1978. 269 с.
 26. Мамонтов М. А. Трехконтактная термодинамика. Тула: ТПИ, 1976. 307 с.
 27. Петрокас Л. В. Производительность машин-автоматов и синтез их систем. М.: МИХМ, 1979. 80 с.
 28. Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. М.: Машиностроение, 1979. Вып. 1—8. 2000 с.
 29. Пневматические приводы и системы управления. М.: Наука, 1971. 298 с.
 30. Погорелов В. И. Газодинамические расчеты пневматических приводов. Л.: Машиностроение, 1977. 183 с.
 31. Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.
 32. Юдицкий С. А., Тагаевская А. А., Ефремова Т. К. Проектирование дискретных систем автоматики. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.
 33. Симкин Е. Л. Пневматические ручные машины в судостроении. М.: Судостроение, 1970. 394 с.
 34. Andersen B. W. The analysis and design of pneumatic system N. I. Wiley, 1967. 363 S.
 35. Artobolevski I. I., Herz E. V. Analysis and synthesis of a High Speed Pneumatic machine Drive Mechanism and Machine Theory. Print in Great Britain, 1978, v. 13, p. 293—300.
 36. Entwicklung Huldischer Antriebe und Steuerungen Barikte von der Pachtagung Ölhydraulik und Pneumatik. Mainz, Krauskopf-Verl, 1971. 205 S.
 37. Halm L., Marton I. Pneumatische Logikelemente. Budapest Akad. Klado, 1970. 120 S.
 38. Multrus V. Pneumatische Logikelemente und Steuerungssysteme. Mainz, Krauskopf-Verl., 1970. 247 S.
 39. Pneumatik handbook. 2 ed. Morden, England Trade and Techn. Press, 1968. 616 p.
 40. Principles and theory of penumatics. Dublin, England. Trade and Techn. Press, 109 p.
 41. Zoehl H. Angewandte Strömungslehre in Ölhydraulik und Pneumatik. Mainz, Krauskopf, 1970. 200 S.
 42. Hydraulics and Pneumatics, 1972—1980.

目 录

前言

参考文献

第一章 气动元件和系统的概述 1

1.1 空气的性质..... 1

1.2 热力学过程..... 4

1.3 气体流动的基本规律..... 6

1.4 气动系统和元件的结构..... 9

1.5 气动元件的基本参数 11

1.6 工作压力和耗气量 17

1.7 空气压缩机与贮气罐的概述 21

1.8 气动控制系统与其它控制系统的比较 24

参考文献..... 27

第二章 气动执行元件..... 28

2.1 活塞式气动执行元件 32

2.2 膜片式气动执行元件 44

2.3 波纹管式气动执行元件 47

2.4 摆动式气动执行元件 48

2.5 气动马达 53

参考文献..... 71

第三章 气动转换器..... 72

3.1 气-液传送器..... 72

3.2 气-液转换器..... 73

3.3 气动液压泵 75

3.4 气-液蓄能器..... 75

3.5 压力继电器 79

3.6 压力指示器 82

3.7 成批生产的气动转换器技术性能 84

参考文献..... 90

第四章 气动方向控制阀	91
4.1 气动换向阀	91
4.2 气动单向阀	103
4.3 快速排气阀	104
4.4 气动顺序阀	105
4.5 气动逻辑阀	107
4.6 气动延时阀	108
4.7 成批生产的气动方向控制阀的结构和技术性能	110
参考文献	145
第五章 气动流量和压力调节阀	146
5.1 气动节流阀	146
5.2 气动减压阀	154
5.3 气动安全阀	156
5.4 成批量生产的气动流量和压力调节阀的技术性能	158
参考文献	170
第六章 密封装置	171
6.1 固定密封装置	171
6.2 往复运动密封装置	181
6.3 旋转运动密封装置	196
6.4 密封材料	205
参考文献	207
第七章 气动管件	208
7.1 管道	208
7.2 接头	219
参考文献	232
第八章 中压气动元件和装置	233
8.1 输入元件	234
8.2 中央部分元件	238
8.3 实现连续-断续转换作用的УСЭППА元件	241
8.4 输出元件	245
8.5 辅助元件	247
8.6 ЦИКЛ循环自动装置组合-集成元件系统	251

参考文献	253
第九章 射流元件和装置	254
9.1 射流自动控制系统	254
9.2 控制装置的元件和结构	263
9.3 射流控制系统的外部设备	275
9.4 用“伏尔加”元件组成的逻辑线路	282
9.5 射流控制装置的设计	304
参考文献	329
第十章 气动控制系统的设计	330
10.1 原始数据和气动线路的拟制程序	330
10.2 气动线路图的内容	331
10.3 设计控制系统的一般要求	332
10.4 控制系统的设计方法	333
10.5 用气动自动化技术工具实现布尔函数	364
10.6 用气动自动化技术工具实现的功能元件	371
10.7 典型气动控制系统举例	381
参考文献	389
第十一章 气压传动及元件的动力学计算	390
11.1 有定容腔室的传动和元件	391
11.2 有变容腔室的传动和元件	406
参考文献	448
第十二章 压缩空气的处理	449
12.1 气源的净化	449
12.2 气动元件的润滑	494
12.3 气动元件工作时的噪声和对环境的污染控制	504
参考文献	506
附录	507
附录 1 稳定速度和稳定压力值	507
附录 2 饱和水蒸汽分压力	510

第一章 气动元件和系统的概述

1.1 空气的性质

压缩空气是气动系统的工作介质，它是氮、氧（其空气含量分别为 78% 和 21%）和其它含量不多的气体（氩、二氧化碳气体等）的混合物，其中还含有水蒸汽。

空气中的水蒸汽含量用绝对湿度和相对湿度表示。绝对湿度以单位容积空气中所含水蒸汽的数量确定。绝对湿度与在相同温度和压力条件下，单位容积空气中水蒸汽的最大可能含量之比，称为相对湿度。在实际工作中，进行热力学计算时采用干燥空气的参数。只有在对计算精度有特殊要求时，才考虑湿度的影响并进行修正。

压缩空气的最常用的主要状态参数是压力、温度和比容（或密度）。

压力 P 是作用在介质表面单位面积上的法向作用力。规定 $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$ 的压力，它相当于海平面的平均大气压力。从大气压力开始计算的压力称为相对压力或表压。在气动元件的技术性能中所指出的和用压力表测量出的压力都是表压。

在理论关系式中，总是用绝对压力。绝对压力等于表压与大气压力之和，是气体的状态参数。

在国际单位制（SI）中，压力单位为 Pa ， 1 Pa 的压力就等于在面积为 1 m^2 的表面上，法向作用 1 N 的匀布力，即 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。

各主要压力单位之间的换算关系如表 1-1 所列^[1]。

绝对温度 T 也是气体的状态参数，它是从绝对零度，即从零下 273°C 算起的温度，即 $T = t^\circ\text{C} + 273$ ，式中， $t^\circ\text{C}$ ——摄氏温度， T ——绝对温度， K 。此参数在一切热力学和气体动力学关系式

中使用。

百等分刻度的摄氏温度是国际上最流行的计温单位（其中在大气压条件下， 0°C ——冰的熔点， 100°C ——水的沸点）。此外，还有其它温度单位（见表1-2）〔3〕。

表1-1 各压力单位之间的换算关系

计量单位	计 量 单 位					
	Pa	kgf/cm ²	bar	psi	mmHg	mmH ₂ O
1 Pa(N/m ²)	1	1.02×10^{-5}	10^{-5}	1.45×10^{-4}	7.5×10^{-3}	0.102
1 kgf/cm ²	9.81×10^4	1	0.98	14.22	735.6	10^4
1 bar	10^5	1.02	1	14.5	750	1.02×10^4
1 psi	6.9×10^3	0.07	0.069	1	51.71	703
1 mmHg	133.3	1.36×10^{-3}	1.33×10^{-3}	19.34×10^{-3}	1	13.6
1 mmH ₂ O	9.81	10^{-4}	9.81×10^{-5}	1.42×10^{-3}	7.36×10^{-2}	1

表1-2 各种温度分度之间的关系

分 度	分 度			
	开尔文 K	摄 氏 $^{\circ}\text{C}$	华 氏 $^{\circ}\text{F}$	列 氏 $^{\circ}\text{R}$
开尔文, K	1	$t^{\circ}\text{C} + 273$	$\frac{t^{\circ}\text{F} - 32}{1.8} + 273$	$1.25 t^{\circ}\text{R} + 273$
摄氏, $^{\circ}\text{C}$	$t^{\circ}\text{K} - 273$	1	$\frac{t^{\circ}\text{F} - 32}{1.8}$	$1.25 t^{\circ}\text{R}$
华氏, $^{\circ}\text{F}$	$1.8 t^{\circ}\text{K} - 459$	$1.8 t^{\circ}\text{C} + 32$	1	$\frac{9}{4} t^{\circ}\text{R} + 32$
列氏, $^{\circ}\text{R}$	$0.8 t^{\circ}\text{K} - 218$	$0.8 t^{\circ}\text{C}$	$\frac{9}{4} (t^{\circ}\text{F} - 32)$	1

比容就是单位质量物质所占的容积， m^3/kg 。

$$v = V/m$$

式中 V 和 m ——分别为气体的容积和质量。

比容的倒数就是密度，即

$$\rho = 1/v = m/V$$

气体状态参数 p 、 v 、 T 之间的单值关系就是状态方程式，其形式在一般情况下与气体的性质有关：

$$F(p, v, T) = 0$$

理想气体定律 压缩空气通常可看作理想气体。在理想气体中，各分子之间没有互相作用力，其分子只是一些质点而不占有体积。理想气体遵循下列定律：

波意尔-马略特定律：当气体的温度不变时， $pV = \text{const}$ （常数）。

盖-吕萨克定律：当气体的压力不变时， $V/T = \text{const}$ （常数）。

查理定律：当气体容积不变时， $p/T = \text{const}$ （常数）。

将上列这些方程式合而为一，就是理想气体的状态方程式 $pV = mRT$ ，此方程式又称为克拉贝隆（Клайперон）方程式。对于单位质量气体而言，可写成 $pv = RT$ 。

比例系数 R 称为理想气体的气体常数，其意义就是在压力不变的条件下，质量 1 kg 的理想气体温度升高 1 K 所作的外功。其大小只与气体的性质有关。干燥空气的 $R = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

真实气体 它与理想气体的主要区别是它有内摩擦力。真实气体的密度越大，与理想气体的差别也越大。动力粘性系数 η ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)，取决于内摩擦力，它与运动粘性系数 ν (m^2/s) 的关系式为：

$$\nu = \eta / \rho$$

空气的粘度与温度的关系为：

$$\eta_{\pi} = \eta_{\pi 1} \left(\frac{T}{273} \right)^{0.75 \ominus}$$

式中 η_{π} ——在温度为 273 K (0°C) 时的动力粘性系数。

⊖ 原文为

$$\eta_{\pi 1} = \eta_{\pi} \left(\frac{T_1}{273} \right)^{0.75} \text{——译者注。}$$

1.2 热力学过程

所谓热力学过程就是气体由一种状态变到另一种状态时，其参数的连续变化过程。

描述热力学过程时，采用热容、内能、焓和熵等参数。

热容 (J/K) 就是将介质加热，使温度升高 1K 所需的热量。比热容就是单位质量 (或容积) 物质的热容。热容与过程的性质有关。定压条件下的比热容 (c_p) 和定容条件下的比热容 (c_v) 有不同的值。二者有如下关系：

$$c_p = c_v + R \quad \text{J/(kg} \cdot \text{K)}$$

比热容比就是绝热过程的指数

$$k = c_p / c_v$$

比热容还与温度有关，不过，在气压传动中，温度的波动是不大的，因而比热容可近似地看作常数。

内能 U 是分子 (原子、离子、电子) 的动能与势能之和。在热力学计算中不使用内能的绝对值，而使用其在不同过程中的变化，单位质量物质的内能 u 称为比内能。理想气体的内能只包含其分子的动能，因而只与温度有关，即 $du = c_v dT^\ominus$ 。在国际单位制中，内能的单位为 J。

焓 I 是一个热力学函数，等于内能加上压力与气体容积乘积之和

$$I = U + pV$$

或对于单位质量气体而言，有

$$i = u + pv$$

焓的计量单位是 J。

熵 S 是状态的函数。熵的变化就是系统与环境介质进行热能交换的标志。

$$dS = dQ_T / T$$

式中 Q_T ——热量。

$\ominus$ 原文为 $dU = c_v dT$ ——译者注。