

流体动力控制 分析和设计

D. 麦克洛伊 H. R. 马尔汀 著

《流体动力控制》翻译组 译

机械工业出版社

流 体 动 力 控 制

(分析和设计)

D. 麦克洛伊 著
H. R. 马尔汀

《流体动力控制》翻译组 译



机 械 工 业 出 版 社

本书介绍流体动力控制系统中的工作介质，阀类元件的结构及静、动态特性分析，伺服机构和压力、速度控制系统的动态特性分析，布尔代数及逻辑设计基础等。此外，还对流体动力控制系统中的物理量及信号处理，系统的噪声控制等进行了分析。

本书可供从事流体动力控制技术的设计和研究人员参考，也可供高等院校有关专业的师生阅读。

CONTROL OF FLUID POWER

Analysis and Design

2nd (Revised) Edition

D. McCLOY H. R. MARTIN

ELLIS HORWOOD LIMITED

1980

* * *

流体动力控制

(分析和设计)

D. 麦克洛伊 H. R. 马尔汀 著

《流体动力控制》翻译组 译

1980年英国版

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门内大街25号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第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·新华书店经销

*

开本 $787 \times 1092^{1/8}$ · 印张 $16^{5/8}$ · 字数 366 千字

1980年10月北京第一版·1980年10月北京第一次印刷

印数 0,001—3,270 · 定价 3.90 元

*

统一书号: 15033·6340

译 者 序

本书介绍流体动力控制系统中的工作介质；阀类元件的结构及静、动态特性分析；伺服机构和压力、速度控制系统的动态特性分析；布尔代数及逻辑设计基础等。此外，本书还对流体动力控制系统中的物理量及信号处理；系统的噪声控制等进行了分析。

本书涉及液压、气动和射流三个技术领域，内容偏重于控制技术，取材广泛，资料新颖，理论与实际并重，既介绍了传统的设计方法也介绍了最近的技术进展，是一本颇有特色的专著。

由于本书内容涉及的范围较为广泛，对于流体控制领域中某些比较活跃的课题，如管路的动态分析和逻辑回路设计等虽有涉及，但未能很好展开。对于这些部分，读者可在阅读时参考其他专著。

本书可供从事流体动力控制技术的设计与研究 人员 参考，也可供高等院校有关专业的师生阅读。

本书翻译组人员有：宋学义（第11,12,13,14章），李建藩（第15,16,17章），李昌琪（第4,5,18章），钟永隆（第1,2,3章），罗志骏（第9,10章），吴庆达（第7,8章），沈新（第6章和附录并负责统一全书）。由于我们水平有限，译文中错误之处在所难免，请读者指正。

《流体动力控制》翻译组

1985年3月

ABA 20/12

目 录

第一章 绪论	1
1.1 液压的发展简史	1
1.2 气动技术	5
1.3 射流技术	6
1.4 流体的功率控制	10
1.5 用流体元件进行控制的流体控制系统	11
1.6 顺序控制	14
1.7 参考文献	18
第二章 流体动力传动的工作介质	19
2.1 工作介质的种类	19
2.2 有效体积弹性模数	23
2.3 混入空气	28
2.4 气穴现象	33
2.5 油的过滤和污染评价	35
2.6 高温系统	38
2.7 电敏液体	38
2.8 习题	42
2.9 参考文献	43
第三章 基本流体动力系统	45
3.1 引言	45
3.2 基本气动系统	45
3.3 基本液压系统	48
3.4 空气压缩机	50
3.5 液压泵	55
3.6 液压马达和液压缸	62
3.7 习题	65

3.8 参考文献	67
第四章 流体控制基本要素	68
4.1 引言	68
4.2 阀类元件的要素	68
4.3 可节流孔	71
4.4 喷流的特性	77
4.5 流量系数的理论决定法	80
4.6 实验研究	88
4.7 滑阀中的附着流动	92
4.8 液压锥阀的实验	97
4.9 液压喷嘴-挡板阀的实验	98
4.10 对液压短节流孔的实验	100
4.11 对气动节流孔的实验	101
4.12 习题	104
4.13 参考文献	105
第五章 测量和信号处理	107
5.1 引言	107
5.2 指令输入	108
5.3 接近检测	110
5.4 位置测量	113
5.5 速度测量	118
5.6 力的测量	122
5.7 信号处理	123
5.8 参考文献	130
第六章 阀及其简单回路	132
6.1 引言	132
6.2 方向控制阀	132
6.3 流量控制	145
6.4 压力控制	148

6.5	电场阀	153
6.6	参考文献	158
第七章	阀的静态特性	159
7.1	引言	159
7.2	可变节流孔	159
7.3	阀特性的应用	163
7.4	阀特性的线性化	164
7.5	三通伺服阀	167
7.6	四通阀和五通阀	177
7.7	习题	181
7.8	参考文献	182
第八章	阀的流动力	183
8.1	引言	183
8.2	滑阀中的稳态流动力	184
8.3	滑阀的流动力补偿	186
8.4	滑阀的瞬态流动力	191
8.5	锥阀的流动力	193
8.6	喷嘴 挡板阀的力	196
8.7	习题	201
8.8	参考文献	202
第九章	关于回路设计的几个问题	204
9.1	引言	204
9.2	管路设计	204
9.3	管道中的压力损失	206
9.4	通过阀门和管路附件的压力损失	208
9.5	典型回路的设计	211
9.6	效率问题的进一步研究	219
9.7	变化负载的影响	223
9.8	使用蓄能器可以降低能量消耗	226

9.9	习题	229
9.10	参考文献	230
第十章	回路的动特性	231
10.1	引言	231
10.2	液流网络	231
10.3	稳态流网	233
10.4	线性网络阻力	235
10.5	动态流网	236
10.6	流体阻抗	240
10.7	阻抗研究在系统分析中的应用	245
10.8	波的方程式和分布参数模型	248
10.9	谐波方程式的解	252
10.10	匹配管路和非匹配管路	255
10.11	泵激励的封闭管路的特性	258
10.12	习题	262
10.13	参考文献	264
第十一章	液压伺服机构	265
11.1	液压技术中的精密控制系统	265
11.2	液压伺服机构的简单模型	266
11.3	油液压缩性的影响	269
11.4	稳定性	274
11.5	确定最佳响应	276
11.6	响应特性	277
11.7	负载干扰的影响	280
11.8	液压伺服机构的设计	281
11.9	性能估算	285
11.10	选择控制阀	287
11.11	一种估算频率响应的方法	291
11.12	液压执行元件中的气穴现象	296

11.13	负遮盖对气穴现象的影响	299
11.14	习题	301
11.15	参考文献	303
第十二章 电液伺服机构		304
12.1	单级液压阀	304
12.2	两级电液阀	308
12.3	电液伺服机构的一般分析	313
12.4	简单情况	315
12.5	计算机分析结果	317
12.6	液动力的影响	321
12.7	更精确的仿真	325
12.8	小信号响应	329
12.9	改善性能的方法	333
12.10	小振幅响应的计算机分析	336
12.11	改善性能的方法	340
12.12	习题	343
12.13	参考文献	344
第十三章 气压伺服机构		346
13.1	引言	346
13.2	气压伺服机构	347
13.3	模型方程的解	351
13.4	气压伺服机构的线性化分析	353
13.5	负载敏感度	356
13.6	增稳方法	357
13.7	用辅助气室增稳	360
13.8	热气体伺服马达	363
13.9	习题	366
13.10	参考文献	366
第十四章 压力和速度控制系统的动态		368

14.1	引言	368
14.2	压力补偿流量控制	369
14.3	压力控制阀的稳定性	370
14.4	液压系统中的速度控制	377
14.5	气动系统中的速度控制	379
14.6	质量负载的气动缸出口节流调速	384
14.7	质量负载的液压缸出口节流调速	389
14.8	习题	391
14.9	参考文献	391
第十五章 布尔代数与逻辑门		393
15.1	引言	393
15.2	布尔代数	393
15.3	其它逻辑门	397
15.4	逻辑表达式的演算	400
15.5	线路设计	403
15.6	用常规阀的逻辑	404
15.7	计数线路	413
15.8	习题	418
15.9	参考文献	418
第十六章 顺序控制		420
16.1	引言	420
16.2	时基固定程序	421
16.3	分步完成固定程序	428
16.4	顺序控制线路的简单设计方法	433
16.5	级联法	439
16.6	消除障碍信号的其他方法	441
16.7	级联法的逻辑学	442
16.8	可变程序	445
16.9	习题	449

16.10	参考文献	449
第十七章	断续控制和数字伺服装置	451
17.1	引言	451
17.2	数字-模拟转换器	451
17.3	脉冲控制	454
17.4	数字缸	457
17.5	开关控制系统	461
17.6	振动控制系统——脉冲宽度调制	461
17.7	用数字技术改善响应曲线	466
17.8	与开关控制液压伺服装置有关的某些现象	469
17.9	参考文献	476
第十八章	流体动力系统噪声	478
18.1	引言	478
18.2	声学基础	479
18.3	信号分析	485
18.4	能量通过系统的传播及其检测	488
18.5	泵的噪声	494
18.6	齿轮泵的噪声	499
18.7	管道网络	502
18.8	气穴噪声的识别	507
18.9	气动回路	510
18.10	设计阶段的噪声控制	513
18.11	现有设备中噪声的降低	515
18.12	参考文献	516
附录	流体动力元件的图形符号	517

第一章 绪 论

1.1 液压的发展简史

人类应用流体动力已经很多世纪了。长期以来，用它推动帆船，转动风车和水轮，而水电站也许是应用流体动力最引人注目的例子了[1, 2, 3]。但是，如大家所知，现今所指的流体动力并不包括这些。上述例子均是流体动能起主要作用的，目前习惯上所指的流体动力就是容积式液压传动。在这种传动中，受压流体储存能量的主要形式是势能，而不是上述例子中的动能。

法国人帕斯卡对液压技术的发展作出了重要贡献，1648年他出版了一本有关流体静力学的书，书中有他的著名定律——帕斯卡定律。定律指出：流体静压力等值传至流体的所有方向。此定律是液压传动的基础。遗憾的是帕斯卡是个理论家，他很少致力于定律的实际应用。一个多世纪以后才由布拉默（Bramah）发明了实际流体动力系统。布拉默论证了作用在长行程、小直径活塞上的小作用力，可以在一个短行程、大直径活塞上产生出很大的作用力。虽然力的放大作用给人的印象非常深刻，但布拉默并没有因此而忽视利用液压来传输功率和力的可能性。他正确断定，采用机械功率（能）——液压功率（能）——机械功率（能）的循环形式是高效传输功率的基础。在早期，人们用手摇泵产生液压功率（能），并用液压缸把液压功率（能）重新转换为机械功率（能）。

液压技术的发展如此迅速，以致到十九世纪六十年代后期，在伦敦和曼彻斯特，已有流体动力中央泵站，压力流体从中央泵站流入各工厂。但到十九世纪末，由于电力传动的出现，液压传动的发展速度有所减慢。

然而，⁹⁹ 液压传动的优越性，很快重新唤起人们对它的巨大兴趣。例如，车辆的制动系统曾经是纯机械的制动系统，它通过对系统的操纵与停止工作来满足车辆相对运动要求和确保制动力平衡，因此其传动装置必然很复杂。而图 1-1 所示的液压系统，就能确保制动力平衡和给出足够大的力。软管的应用消除了车辆零部件间相对运动所带来的各种问题。

能够提供巨大的作用力是液压的突出优点之一。布鲁内尔 (Brunel) 在“东方巨人” (Great Eastern) 号船下水时，曾用十八个柱塞式液压缸 (其中九个缸在船头，九个缸在船尾) 产生 45 MN 的推力。

力-重量比高是液压设备的另一重要优点。在设备的

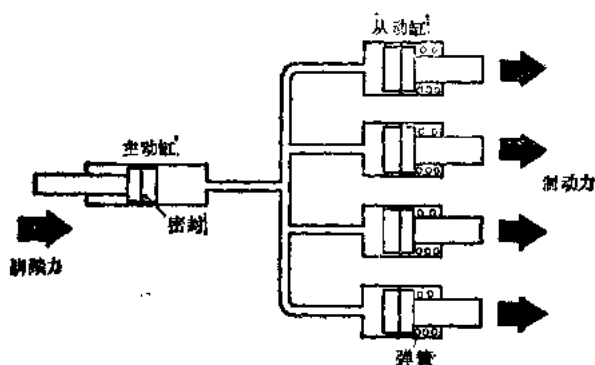


图1-1 车辆液压制动系统

重量要求非常严格的地方，譬如在导弹和飞机中〔4〕，采用液压设备具有很大的吸引力。在相同功率的条件下，液压泵的外形尺寸远小于电动机（见图 1-2）。尺寸与重量的这个差别是由于液压系统有高的工作压力——一般为 280 bar[⊖]，而目前电动机中的电磁体，单位面积上能产生的拖动力大约为 17 bar。在液压系统中：

$$\text{功率} = \text{力} \times \text{速度}$$

$$= \text{压力} \times \text{面积} \times \text{速度} = \text{压力} \times \text{流量}$$

因此，对于给定的液压功率，由于液压泵在高压下工作，需要排出的流量较小，故泵的体积可以较小。实际上，当前液压技术正对工业设备的微型化产生积极的影响。已制成直径为 50 mm、长度为 75 mm 的泵。0.6 kW 的液压马达，其直径仅为 32 mm，长度为 50 mm，其转向可逆，最大转速为

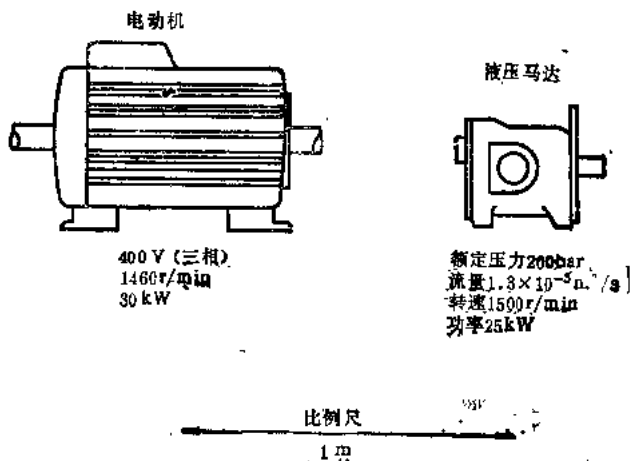


图 1-2 电动机与液压马达的比较

⊖ 1 bar = 10^5 Pa (下同)。——译者

30000 r/min, 重量仅 0.3kg。

将液压能转换为机械能既可用旋转液压马达, 又可用直线运动液压缸来实现。图 1-3 所示的单柱塞式液压缸输出的直线运动, 可以作为运动形式变换的基础。图 1-3 a) 为简单的夹紧装置, b) 为分度机构, c) 为由两个缸的不同运动组合来决定从动杆的三个输出位置的机构。图 1-3 d) 为直线运动转换为旋转运动或旋转运动转换为直线运动的机构, 它实际上是许多液压泵与液压马达的基本工作机构。另外, 用一些简单的液压阀和缸所产生的输出运动, 在一个纯机械系统中, 需要很复杂的传动装置才能实现。譬如, 快速返回运动, 用使液压缸一个方向的液流比另一方向的液流受

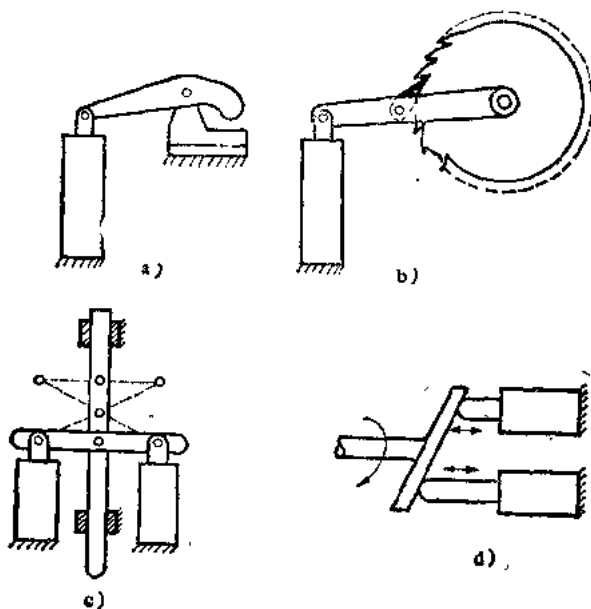


图1-3 液压缸应用举例

更少节流的方法来实现是很容易的。

液压传动的刚度大是它的又一重要优点。这是因为油液相对不可压缩,其结果是液压传动受负载变化的影响较小。因此,它广泛用在航天工业和机床工业中。

1.2 气动技术

气压传动系统用压缩气体传输功率。较早的气压传动系统用空气作为工作介质,但现今有些场合已用惰性气体和热气体作为工作介质。虽然现在有些系统的设计工作压力为10 bar但系统工作压力一般限制在7 bar以内。气体压缩的低效率和储存高压气体的危险性,决定了必须限制气动系统的工作压力。

用压缩空气作为动力源,在过去10年中发展很迅速,现在已广泛用于各工业部门^[5]。它的优点很多,现归纳如下:

1. 大多数工厂都有方便的压缩空气源。
2. 气动元件价格较低。
3. 气动元件易于修复,阀的调节范围广,气缸的尺寸选择范围大。

4. 气动设备的最大优点是它的适应性强。现有的机器可以方便和迅速地改为气压传动,气缸可以直接安装在要求力的地方,需做的全部工作是装几个支架和确定活塞杆与现有的手动操纵机构的联结方法。

5. 气动元件工作可靠,维护简单,维修工作可就地进行,因为维修时一般只需更换密封件和气缸的轴承密封。

6. 风动工具如凿岩机、风动磨头等,发生故障时,不会被烧坏。液压工具也有同样优点。

7. 气动设备,没有着火的安全危险,可以用在因有爆炸危

险而禁止用电的地方。

8. 压缩空气是不可燃气体，因此气动设备可以在高温下工作。这些地方采用液压传动或电传动会产生危险或使设备造价提高。大多数气动设备可在 $80\sim 90^{\circ}\text{C}$ 下工作，如果采用耐热密封，则工作温度允许更高。

9. 气动系统较清洁。

当然，气动技术也有缺点。在设置气动设备之前，必须仔细考虑以下问题：

(a) 生产压缩空气的费用高。如果工厂没有空气压缩机，就不必考虑采用气压传动。产生相同的功率，气压传动比电传动或液压传动的费用高得多。

(b) 由于空气的可压缩性大，要获得精确的进给运动是困难的。这方面，它不如液压传动。

(c) 空气信号的传输速度比电信号慢很多，因此，如果对信号的传输时间要求高，管线又长（如大于 10m ），则采用电传输较好。

(d) 如果要求大的输出力，则气缸体积庞大而价高，大的输出力宜用液压来产生。

1.3 射流技术

射流技术与信息的传输和控制的关系更为密切。射流技术在流体领域中所占的地位，与电子技术在电气领域中占的地位相同。电子技术的成就，促使工程师们看到用液（气）流代替电流来实现放大作用的可能性。射流元件与对应的电子元件比较有很多优点，如抗辐射能力强、耐高温等。

射流技术领域中意义最重大的进展直到 1959 年才获得。这一年公布了美国戴孟德军械引信实验室 (Diamond Ord-