

液 动 气 动 控 制

J. F. 布拉克伯恩等编著

科 学 出 版 社

52.7/
164

液 动 气 动 控 制

J. F. 布拉克伯恩等 編著

陈 珩 薛沐雍 譯

3K544/06

科 学 出 版 社

1965.12.20

FLUID POWER CONTROL

edited by

John F. Blackburn, Gerhard Reethof,

J. Lowen Shearer

The Technology Press of M. I. T. and John Wiley & Sons, Inc.

1960

内 容 简 介

本书专门论述液动控制和气动控制的理论和技术。它是以美国麻省理工学院所设的研究进修班的教材为基础补充改写而成的。

本书内容大致可分为三部分。第一部分是引论性的，其中谈到流体介质的特性及其选择标准，并扼要地介绍了有关的流体力学基本理论，此外对泵和马达以及流体动力的传送问题也有专章加以论述。

在第二部分中详细阐述了液动气动拖动，特别是阀控制的拖动的设计原理和计算方法。这一部分可算是本书的核心。它论述了各种结构型式的控制阀及其特性，详细介绍了分析和设计的方法，谈到加工制造的技术要求，并且还介绍了试制的经验。对阀的一些主要问题，如液流作用力、自振荡等问题，也有比较透彻的说明。对控制阀的“力马达”，即电-位移转换器的性能比较和设计原理，有一章加以详细介绍。

第三部分主要是谈一些实际系统中液动控制和气动控制的应用，特别着重这些系统的动态分析。除了阀控制亦即节流控制的液压系统外，也谈到了容积式控制用变量泵进行调节的液压传动。讨论了高压气动系统的分析和设计，并对很有发展前途的高压热燃气随动系统的分析和设计专章予以介绍。另外还有一章将液动随动系统和气动随动系统的性能作了简要的对比。

本书适用于从事流体动力控制的科技工作者。

液 动 气 动 控 制

[美] J. F. 布拉克伯恩等 编著

陈 珩 薛沐雍 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可证书出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1965 年 8 月第 一 版	开本：850×1168 1/32
1965 年 8 月第一次印刷	印张：22 3/16
精装：0001—2,200	插页：3
平装：0001—1,700	字数：589,000

统一书号：13031·200

本社书号：3275·15—8

定价：[科六] 精装本 3.80 元
平装本 3.30 元

譯 者 序

液动气动控制，液动气动随动系統是一門比較新兴的科学技术，系統地介紹这方面的理論和經驗的书籍还很少。一般自动控制和調節原理的著作也不可能專門对液动气动控制問題作比較詳細的闡述。这方面公开发表的研究論文、工作报告和有关文献，多散見于一些学报、論文集和有关的杂志期刊中，其中美国、英国的文献資料占很大的比重。近年来，我国对国外发表的液动气动控制方面的文献著作虽有翻譯介紹，但相对說来还是很少，而且其中多系俄文資料。

美国在第二次世界大战期間及其以后，由于軍事刺激，自动控制，特別是武器和飞行器控制系統的研究发展工作得到很大的进展。液动系統由于反应快，重量和体积小，抗負載的刚性大，特別受到重視。美国麻省理工学院在 1939 年就成立了随动系統研究室，在这方面进行了不少研究工作。1945 年，在这研究室的基础上成立了动态分析及控制研究室 (DACL)。本书的作者多是这研究室的成員。这研究室一开始便将液动气动控制系統及其元件的研究試制列为重要研究項目，其早期研究任务之一是研究試制飞行模拟用的高速液动多自由度轉台(見图 6.15)。他們所写的有关液动气动控制的論文，曾陸續在“美国机械工程学学会学报”(Trans. ASME)和“控制工程”(Control Engineering)等杂志上刊登过。这些論文曾作为重要資料，被世界各国引用于有关的文献和教材中。

在 1951 年以后，麻省理工学院曾为美国一些工业企业单位的工程师們开办过几期进修班，这进修班所用的教材讲义，即以該校动态分析和控制研究室这些发表过的研究論文为基础，加以补充整理而編成的。本书则又是以上述讲义为基础加以补充改写而成的，和讲义一样，它的主要内容是以該研究室多年来的研究成果和

工作經驗为依据的。

本书所介绍的液动气动控制,主要是指随动系统或伺服机构。这门学科的意义和重要性以及本书内容、范围和大綱体制,在本书第一章中已有詳細說明,这里便不必再贅述了。

本书的主要内容是取自研究工作的第一手資料,反映了当时的最新成就,对于一些基本概念和問題的本質闡述得比較精确,其中不少論点和分析方法是受到普遍重視的。它的学术性較強,有比較持久的参考价值,故将本书譯出介紹給我国讀者。

如前所述,本书主要内容是以研究工作为基础的,由于研究工作并不是系統而全面进行的,内容自然不免有所側重。編写本书的时候,原作者也沒有想把当时世界各国在这領域內的工作和成就全面介紹。原书是在1960年出版問世的,作为依据的研究工作大多是在1958年以前进行的。如果考虑到这门学科在最近几年来的迅速发展,再加上本书並沒有涉及的气动液动計算邏輯元件、流体射流控制元件(Fluid Jet Control Device),以及其他調节控制装置和系統,更不能认为本书能全面而均衡地反映了目前液动气动控制这门科学技术的全貌。本书的作者較多,各人特点和論述的风格不一样,所用的名詞术語也并不完全一致,这样在全书内容的統一性、連貫性上还存在一些缺陷,希望讀者在閱讀本书时注意到这些情况。

原书中个别明显誤印及其他錯誤,根据我們認識所及,在翻譯时作了校正,有的并加注說明以示慎重。譯者专业知識和实际經驗都很不够,譯文中一定有失去原意和錯誤疏漏之处,尚希讀者指正。

本书第一至十四章由薛沐雍翻譯,第十五至二十章由陈珩翻譯。

譯 者



目 录

譯者序	iii
第一章 流体动力	1
1.1 引言	1
1.2 为什么要采用流体动力	3
1.3 本书编写的大纲和范围	6
第二章 流体的性质	11
2.1 引言	11
2.2 密度	11
2.3 粘度	18
2.4 化学性质	27
2.5 表面性质	31
2.6 热性质以及其他特性	34
2.7 流体动力介质的选择	36
第三章 流体流动的基本理論	44
3.1 引言	44
3.2 基本关系式的推导	45
3.3 在封闭通道中流体的稳定流动	52
第四章 容积式泵和馬达的特性	92
4.1 引言	92
4.2 稳态分析	96
4.3 泵和马达中的流体摩擦力——热楔效应	113
第五章 流体动力的传送	131
5.1 基本概念	131
5.2 集中参数的传送管路	134
5.3 分散参数的流体系统	138
5.4 频率响应特性	140

第六章 閥控制	145
6.1 引言	145
6.2 负载的描述	145
6.3 负载运动的分类	148
6.4 拖动的种类	152
6.5 閥控制的拖动	155
6.6 典型的简单拖动装置	160
6.7 拖动装置中一些非理想情形的影响	167
6.8 较复杂的系统	171
第七章 液压閥的压力-流量特性	180
7.1 引言	180
7.2 控制閥的一般公式	187
7.3 恆压作用	191
7.4 恆流作用	201
7.5 不对称的影响	205
7.6 微变参数——閥的“增益”	207
7.7 閥口造形	209
7.8 功率输出及效率	215
第八章 气动閥的压力流量特性	218
8.1 引言	218
8.2 通过单节流孔的流动	219
8.3 情况 1——节流上游压力恆定	223
8.4 情况 2——节流下游压力恆定	224
8.5 通过串联的两节流孔的稳定流动	224
8.6 单节流控制中的稳定流动特性	225
8.7 稳态的三通閥特性	227
8.8 稳态的四通閥特性	232
8.9 处理反向流动的方法	237
第九章 閥的形式和结构	240
9.1 引言	240
9.2 基本的閥的形式	240
9.3 閥的结构	242

9.4 阀的设计	250
9.5 阀的实验性试制	264
9.6 气动阀的一些特点	280
第十章 稳态作用力	283
10.1 引言	283
10.2 侧向力——摩擦力及液压卡紧现象	284
10.3 轴向力	302
10.4 挡板阀上的作用力——压力反馈	318
10.5 在其他类型阀上的作用力	324
第十一章 电磁式电-机械转换器	329
11.1 控制阀的机械转换器	329
11.2 电气机械转换器	330
第十二章 瞬态作用力及阀的不稳定性	367
12.1 引言	367
12.2 流动的不稳定性	370
12.3 由稳态作用力引起的不稳定性	371
12.4 瞬态流动所产生的不稳定性	375
12.5 共振不稳定性	385
第十三章 电液转换作用	410
13.1 引言	410
13.2 实用两级阀	412
13.3 小型电液转换作动器	417
13.4 附录	438
第十四章 物理系统动态品质的分析	443
14.1 引言	443
14.2 线性元件	443
14.3 一些定义	444
14.4 决定系统的传递特性	446
14.5 无量纲化导	447
14.6 系统对干扰的动态响应	448
14.7 单容系统	450
14.8 一阶微分方程的解	450

14.9 作用方块图	453
14.10 单容系统的普遍性	454
14.11 二阶微分方程	457
14.12 高阶微分方程的解	465
14.13 物理系统的稳态频率响应	468
14.14 对阶跃函数的响应——它和频率响应的关系	474
14.15 串接元件的频率响应	474
14.16 反馈系统	477
14.17 闭环控制系统的品质判据	478
14.18 反馈系统品质的分析	479
14.19 决定稳定度	480
14.20 根轨迹法	494
14.21 本章所述内容的简短总结	503
第十五章 液压拖动	507
15.1 引言	507
15.2 变量泵控制的伺服马达	508
15.3 阀控制的伺服马达	517
15.4 结论	525
第十六章 气动拖动	531
16.1 引言	531
16.2 活塞工作腔内工作过程的动态分析	532
16.3 控制阀特性	537
16.4 对一个阀控制的盛气筒进行的试验	549
16.5 阀、活塞及负载系统的分析	552
16.6 结论	567
第十七章 闭环系统	572
17.1 引言	572
17.2 速度式伺服马达的比例控制	572
17.3 压力控制式液压系统的动态研究	584
17.4 一个速度控制式液压系统的模拟计算研究	599
17.5 一个高压气动随动系统的非线性模拟研究	625

第十八章 动力駕駛机构	641
18.1 引言	641
18.2 流体动力能源	642
18.3 操纵器单元组合	644
第十九章 液动和气动随动系统的比較	656
19.1 引言	656
19.2 定性的比較	656
19.3 定量的比較	659
第二十章 用高压热气工作的伺服馬达的分析和設計	668
20.1 引言	668
20.2 系统考虑	669
20.3 气体动力的发生	669
20.4 动力的控制	671
20.5 动力的传送和变换	672
20.6 系统的描述	675
20.7 元件分析	676
20.8 系统分析	687
20.9 设计示例	690

第一章 流体动力

1.1 引言

流体动力控制这门学科就一门工程技术的如何发展，提供了一个很好的例子。由于象蒸汽机那样经济实用的原动机的发明和工厂体制的发展，便需要有一种方法，将动力从产生的地点传送到一定距离外的机器上去，以供使用。可以用机械的方法来传送动力，如用传动轴和皮带等。但机械传动常是既不经济又不方便，其最大不便也许是难于精确而经济地控制这种动力的传送。用加压的流体来传送动力却是一种解决这个问题方法。

有一段时期，在这方面发展很快。有一些工业城市，特别在英国^[1]，在一些集中的动力站中装有蒸汽发动的水泵，它们和使用动力的各厂房之间敷设了正规的高压水管网。要使这些系统能够实用，必须设计大量的辅助设备，如水力蓄压器和各种调节控制阀门，还要积聚一大堆有关如何解决一般使用问题的资料。既有了这样的要求，就促使产生了各种解决的办法：许多液压装置应时而在市场上出现或见诸于当时新创办的工程杂志上，其中有許多结构是十分精巧的。同时还出现了一批液动专家，他们擅长于用高压水产生、传送和控制动力的工艺技术。

不幸得很，象一门非常迅速发展的学科所通常碰到的情况一样，这门新的工艺基本上跳不出工艺的圈子。理论还远远落后于实践，其中大部分道理只能定性地而不能定量地加以说明。如果不是由于电力工业有了惊人的进展，废黜了液压传动整个这门工艺的经济基础，上述这种情况本来不容怀疑会及时得到补救的。电力传送远比任何液动或气动动力的传送来得经济和有效，传送距离也大得多，而且这悬殊一开始便十分明显，因此流体动力这门

工艺凋疲衰落、瀕于灭絕之境近百年之久。

然而，它后来复苏再生，迄今已有几十年了。現在它是一門非常受人重視和重要的学科。这倒不是因为用电气技术傳送动力发现了什么缺点，而是因为各种性能要求有了很快的提高，单用电磁元件很难或簡直不可能加以滿足。尤其是軍事和工业上用的随动系統都要求功率大，反应极为迅速，馬达的力矩慣性比較之电动机所能达到的指标要高几个数量級。所以尽管流体傳送动力的价格比較貴，且有許多不方便的地方，我們仍不得不采用它，并且还必須研究怎样最好地利用它。

象在十九世紀时那样，許多要求正在試驗的基础上得到滿足；有許多現代的液压裝置正在設計中，但尚未投入工程应用。今天的設計師比起他一百年前的先輩來說，条件自然要优越得多，但是他同样也苦于对工作的基础不能作一个統一而有机的理論概括。这种說法并不意味着缺乏对物理現象的認識。水力学毕竟是一門較古老的物理学分支，并且在最近三十年中大有发展，并改名为流体力学，在这門学科中已有不少很好的著作。問題在于大多数这些著作述及了流体动力学的全部，其中很多还包括了空气动力学在內。要討論得这样广，自然不能在任一方面耕得很深，而現时的著作也沒有这样做。

在本书中只闡述了为說明本学科所必需的那些理論。这是假定可采用其他书以弥补这方面的不足。公式推导得比較少，也不大追求数学上的精确和严格性。这本书是为了从事实际工作的工程技术人員写的，我們希望以对他们最为有用的方式編写材料，并且尽量不用一些隱晦的假定或邏輯推理，而使他們感到困惑难懂。

通貫全书，只要实际可行，尽量用流体动力应用中当今的一些实际例子来补充所講的理論部分。但这个領域发展得非常快，其重心又經常轉移，所以本书不能对这門学科加以真正均衡全面的概括。由于同样原因，书中有关实际应用的那一部分也只有暫時性的意义，但基本部分是有持久的价值。而正是这个基本部分，使流体动力控制在今天成为一門技术科学，而不再是一种工艺性技

术了。

1.2 为什么要采用流体动力

上面已经谈到，人们对流体动力的兴趣正在迅速地增长。因为这是本书的主要内容，所以这里就要解释为什么对它这样重视，并且要将流体传动与电力和机械传动作一比较。

在很多方面，流体传动的地位是介乎电力传动和机械传动之间的。把流体动力传送到相当距离外，要比机械传动容易些，但比起电力传动则要困难得多。流体动力控制和电力传动控制都比机械传动控制更容易、更精确。在低功率时，电力传动在这方面最好，但在大功率时，它的优越性便显得很小了。从安全的观点看，三者都差不多。有这么一点例外：要保证机械传动装置不被人们所偶然碰触是有些困难的。从效率的观点看，如果不包括远距离传送的话，机械传动一般较好，而其他两者差不多。将它们的成本相比较是困难的，因为这取决于各种具体情况。在低功率时，电气装置要比其他两种装置更便宜一些；而在大功率时，恐怕整个说来便差别不大了。从能采用各种不同的部件来说，电气装置比其他二者要好得多；而且，部件和技术的丰富多样还反映在应用上的灵活性，这一点是其他二者难以达到的。就反应快速来说，情况和上面一样，只有一点例外，电磁元件还受一个极重要的限制。这种限制及其产生的后果将在下面加以讨论。

单在上面所讲的几段的基础上，可以作出结论：这三种形式的传动之间的差别不大，整个说来也许电力传动要好一些。平均说来（如果有平均情况存在的话），这也许是正确的，而正是这一点使电气技术和装备比其他动力大为发展。然而，在不多的几年内，工业的不断进展迫使电气设计师在进一步改进电气装备的努力中面临一个看来不可克服的障碍，而因为电气设计师直到现在还不能通过这个难关，因此必须寻找一条途径来绕过这个障碍。应用流体动力看来是一种最容易、最直接的途径。

刚才提到的难关是指物质的一种性质：任何一种已知的铁磁

物質在很不相宜的低磁通密度時便飽和了。這意味着，從電動機電樞的每一磅鐵中不可能再得到更多的力矩了。這個事實本身便使這些電磁元件，象力矩馬達、電動機、拖引電磁鐵(tractive magnet)等的力矩慣量比受了一個直接的限制。

在幾十年前，這種限制的意義還不大。但是，近年來對系統快速反應的要求很高，並且還不斷提高。這便要有快速作用的部件，就是說，部件的力矩慣量比要很高。電磁元件，至少在大功率時，作用不夠快，不能滿足這些要求。

用數字粗略地計算一下便能証實這一點。假定我們將兩個相似的部件進行比較：一個液壓活塞和一個拖引電磁鐵。優質電磁鋼的磁通飽和密度約為 135 千麥克斯韋/平方吋，這對電磁鐵來說，每平方吋面積約能產生 250 磅力。改變材料並不能增加很多，即使用價值昂貴的坡莫合金(Permendur)(鈷-鐵合金)，所產生的力也不過增加到每平方吋 315 磅左右。這些是極端的情況，實際上的極限也許是這些數字的一半到三分之二。

採用液壓活塞，只要活塞不是很大，所能採用的壓力一般是決定於系統中其他部件所容許的安全工作壓力，而不是活塞本身的容許壓力。目前，工作在 5000 磅/吋²壓力的液壓系統並非少有，而必要時尚可採用高得多的壓力。這樣可以看到，從液壓裝置所能得到的作用力比電磁鐵所能得到的至少要大十倍到二十倍。

這個計算也是過於保守的，因為液壓裝置設計並不必須碰到磁性裝置設計時所要受到的嚴格的設計限制。液壓裝置設計時可選用的材料很廣，並且幾乎總可以比較充分有效地利用它，這樣就大大減少了電氣裝置設計中所必須用的運動質量。因此將電動機換用液壓馬達以後，力矩慣量比增長很多，在實際情況中，這種增長在大功率時可以高達數千倍。在小功率時，力矩慣量比的增加少得多，因為實際上可以做成功率小達幾瓦的電動機，但是液壓馬達即使設計得充分有效，其最小而且在經濟上可行的功率也得有半匹馬力那樣。

現在我們可以比較詳細地討論流體傳動的優點和缺點了。首

先談談缺点, 傳送动力的液体总是不很干净的, 这也许是最大的缺点。設計得好, 制造得好, 維護得好, 可以使液体的漏泄減少到最低限度, 但是要使系統完全清洁不漏也許是办不到的。如果管理得比較好, 这种危害也許更多是心理上的成分, 而实际上并不那么严重, 但是它也确是存在着的。当然, 这点限制并不适用于气动系統, 但是气动系統現在还不很成熟, 它們将在本书的第八、十六、十七、十九和二十章討論到。

液动和气动系統第二个共同的严重缺点, 是它們容易被尘埃或流体介質中其他的杂质所污損。要消除这个缺点, 又要求設計好, 制造加工好, 維護好, 特別是維護得好。但是即使在最好的情况下, 液动系統也不能象一个机械或电气系統那样, 可以不予特別照料或任意使用。

第三个缺点是有爆破的危险。用这一点来反对高压气动系統的, 比反对液动系統的更多, 虽然实际上这一个比另一个好不了多少。大多数实际系統中总有大量的能量貯藏在蓄压器或是压气瓶中, 而爆破的影响很大程度上决定于爆破发生在系統的什么地方。在大多数情况中, 这种危险是大大地被夸大了的, 但它确实是存在的。

液动系統最严重的危险是起火爆炸。即使沒有真正破裂, 液体在高压下从一个小孔溢出也会扩散成雾状的微粒; 这种液体即使只有很小的可燃性, 这雾状物也会激烈地爆炸起来。因为这种原因而引起的起火爆炸是很常見和十分严重的, 因此要生产一种满意的不可燃的液压油便显得迫切需要了。在写本书的时候, 看来还没有这样一种油。除了可燃性外, 石油基油看来仍是我們目前最接近于满足各方面要求的压力介質。但是, 現在正在取得一些进展, 而很有希望将来便会有一种满意的不可燃的液压油以供应用。

现在再来討論流体传动的优点, 最重要的优点之一就是作为一种物質介質, 和电气不同, 它能够把由于功率損耗而产生的热量从发生的地方帶到別处。这样在一定的功率情况下, 可以大大減

少部件的尺寸,或者倒过来说,系统中的功率密度可以提高。很明显,这种损失必须要发散到某些地方去,而在液动或气动的系统中只要在合适的地方装一个热交换器便可解决这个发散问题了。电气部件的最小尺寸取决于最大的有效磁通密度和发热量;而液动或气动部件的最小尺寸一般是只由结构上的考虑而决定的。例如,目前生产的飞机用的液压马达每马力的重量远小于一磅,这是电动机所不能达到的指标,而且液压马达的结构相应地也紧凑一些。

液动系统的第二个主要优点是:从负载的影响看,它具有机械上的刚性。理论上(虽然实际上并不确实是这样)充满油液的作动筒对于活塞而言可视为有无限大的刚性,而不论一筒气体(除非在很高的压力下)还是一个磁场,它们都显得刚性很小而富于弹性。常常有必要在需要负载发生运动前,将它固定在一定位置不动。而要做到这一点,在液动系统中所要用的环路增益,要比低压气动系统或是电气系统要小得多。此外,负载作用于拖动机构的等效弹簧的共振频率是对反应快速的一个主要限制,所以希望这个弹簧的刚度尽可能大些,这一点也是有利于液压系统的。

第三个优点,一般说来也是决定性的优点,便是能够高速反应。简单地讲,就目前技术水平而言,很多重要工作非用流体传动不可,还有许多工作,如用流体传动也大为有利。这样,不论系统设计者是否欢喜,他常必须和液压打交道。在不久以前液压设计师大部分业务知识还是局限于经验性的,但这种情况已迅速改变。液动设计已成为一门技术科学,而不再是一种工艺技术,而气动刚开始向它学步追随。本书即是为促进这个过程而作的一个尝试。

1.3 本书编写的大纲和范围

因为在某些方面说来本书是首次阐述流体传动的問題,似乎应该对这个领域的范围加以规定,并简短地说明一下将用怎样的方式来讨论它。由于流体力学这门学科范围太广,所以在这里流

体传动只談到在高压下用流体传送动力(所用压力較高,重力影响可忽略不計)、控制这种动力的問題,并且还談到一些这样传送的动力如何加以利用的問題。对这門学科作了这样的限制,我們便可以把在开启的槽道中流体流动的問題,以及实际上所有空气动力学中的問題都省略而不談了。此外,在本书的大部分內容中,我們也能略去流体压縮性的影响,虽然对气体介質說来,这些影响是非常重要的,并且当油液压縮容积的柔度(compliance)对系統的动态性能有影响时,即使对液体介質說来,这种压縮性的影响也十分重要。我們把非牛頓流动的問題也略去不予考虑,在这种流动中,流动的有效粘性和流动的剪切率有关。这种流动在某些应用中是很重要的,象在石油提炼以及許多化学反应中,但是把流体用作传送动力的介質,它們至少是近似于牛頓式流动的。

现在有关流体传动的书很少,而这些有限的几种书大部分或全部是叙述性的。根据我們在 DACL 的工作体会,特別在几年前,当时可采用的資料比現在更少,我們感到需要有这样一本书:它的内容并不着重于液动或气动部件及系統的一般叙述,而是着重說明它們工作、設計和应用的基本原理,特別是那些定量性的因素;如果要真正应用流体传动的装置和技术,这些因素是十分重要的。这本书当然远远不能完全滿足这个要求——诚然,按这門学科的現狀說来,沒有一本能够完全滿足它——但是我們相信,这本书至少是朝这个方向前进的一步。

本书可大致地分为三个部分。第一部分是导論性的,第二部分对液动及气动拖动設計,特別对閥控制的拖动設計相当詳細地討論,第三部分則討論这些拖动如何应用于实际系統,特別着重于系統的动态問題。

第一部分包括五章。在本章說明解释以后,第二章对于一般流体介質的性質作一簡短概述,并对介質的选择作一些說明。因为液压用的流体发展得很快,現在还难以选择得完全确当。可供采用的数据是极多的,但有些不足为訓,对各种专利产品的宣传介绍也是比較混乱的,有时并且是有爭議的。在这种情况下只能做