

# 液压控制系统

---

[美] H. E. 梅里特 著

科学出版社

# 液 压 控 制 系 统

(美) H. E. 梅里特 著

陈 燕 庆 译

科 学 出 版 社

1 9 7 6

## 内 容 简 介

本书论述液压控制系统的分析与设计。对系统中的各主要元件，例如泵、伺服阀和执行器等的工作原理及参数选择作了讨论。同时，对作为工质的液压油的特性及其在管道中的运动规律也作了探讨。最后还较全面地分析了液压控制系统中可能出现的各种非线性特性及其对系统的影响。

本书可供从事液压传动与控制方面工作的工程技术人员阅读，也可作大专院校有关专业的教学参考书。

Herbert E. Merritt

HYDRAULIC CONTROL SYSTEMS

John Wiley, 1967

## 液 压 控 制 系 统

[美] H. E. 梅里特 著

陈 燕 庆 译

顾 瑞 龙 校

\*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 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

\*

1976 年 3 月 第 一 版 开本：787×1092 1/32

1976 年 3 月 第 一 次 印 刷 印 张：12 3/4

印 数：0001—65,250 字 数：293,000

统一书号：15031·118

本社书号：623·15—8

定 价：0.95 元

## 译 者 的 话

液压控制有许多优点,其中最突出的就是响应速度快、比功率(即功率重量比)大,因而在车辆、船舶、机床、工程机械,特别是在各种武器系统,诸如火炮、雷达、飞机、导弹等方面,都得到了广泛的应用。

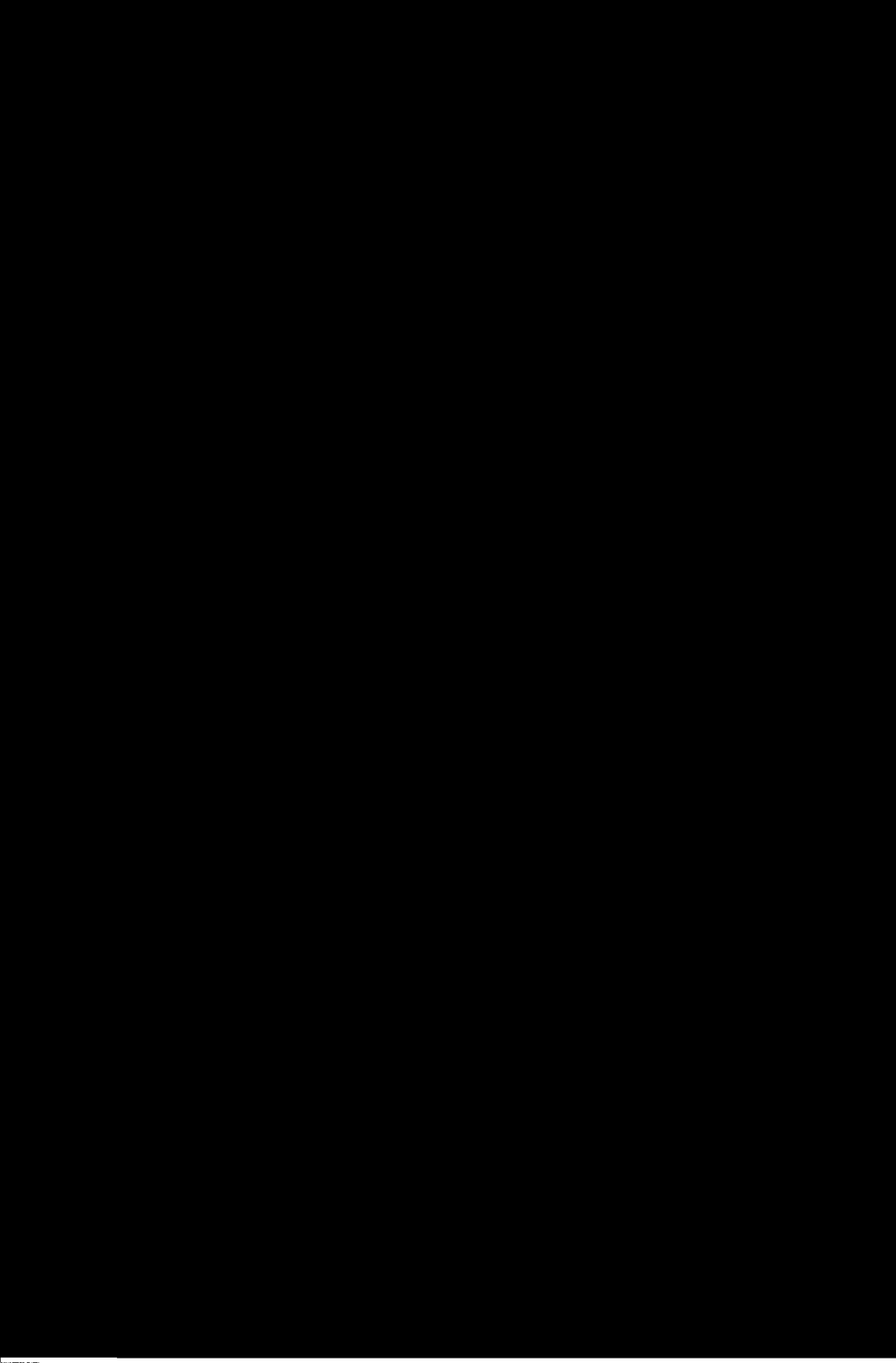
人类使用水力机械及液压传动虽然已有很长的历史,但液压控制技术的发展却还是近几十年的事。因此,无论是在理论上还是实际经验上都还不够成熟。就目前的情况而言,许多设计关系都是凭经验或试验得出。即使有些理论研究,但也都是在作了许多简化的基础上进行的,而且其结果还往往不很实用。

本书作者在工厂工作,有一定的实践经验,在论述上不是一味追求理论的严格,而是从闭环控制的动态品质出发,导出实用的设计准则。这对许多读者来说,都会是感兴趣的。

近年来,我国的液压控制技术在自力更生的基础上发展很快,取得了很大成绩。遵照毛主席“洋为中用”的教导,我们把这本书翻译出来介绍给读者作为参考。但由于我们水平有限,因此译文中一定会有许多错误和不当之处,希望广大读者批评指正。

在本书翻译过程中得到陈立茂同志的许多帮助,在此顺致谢意。





# 目 录

第一章 绪论 .....	1
1-1 液压控制的优缺点 .....	1
1-2 设计概论 .....	4
第二章 液压流体 .....	7
2-1 密度及其有关的量 .....	7
2-2 液体的状态方程 .....	9
2-3 粘度及其有关的量 .....	10
2-4 热力特性 .....	15
2-5 有效容积模数 .....	16
2-6 化学性能及其有关的特性 .....	21
2-7 液压流体的类型 .....	23
2-8 液压油的选择 .....	27
第三章 液体流动的基本原理 .....	29
3-1 一般方程 .....	29
3-2 液流的类型 .....	34
3-3 液流通过导管 .....	36
3-4 液流通过节流孔 .....	46
3-5 次要损失 .....	53
3-6 功率损失与温升 .....	56
3-7 液压导管中的压力瞬变 .....	57
3-8 小结 .....	60
第四章 液压泵和液压马达 .....	63
4-1 基本类型和结构 .....	63
4-2 理想泵和理想马达的分析 .....	73
4-3 实际泵和实际马达的分析 .....	74

4-4	性能曲线和参数 .....	81
<b>第五章</b>	<b>液压控制阀 .....</b>	<b>86</b>
5-1	阀的结构形式 .....	86
5-2	阀的一般分析 .....	89
5-3	零开口滑阀的分析 .....	95
5-4	正开口滑阀的分析 .....	107
5-5	三通滑阀的分析 .....	112
5-6	作用在滑阀上的液流力 .....	115
5-7	作用在滑阀上的侧向力 .....	122
5-8	滑阀的设计 .....	126
5-9	挡板阀的分析和设计 .....	133
<b>第六章</b>	<b>液压动力元件 .....</b>	<b>149</b>
6-1	阀控马达 .....	150
6-2	阀控制的活塞 .....	165
6-3	三通阀控制的活塞 .....	170
6-4	泵控制的马达 .....	172
6-5	具有多自由度负载的阀控马达 .....	179
6-6	动力元件中的压力瞬变 .....	185
6-7	阀控执行器的非线性分析 .....	194
<b>第七章</b>	<b>电液伺服阀 .....</b>	<b>199</b>
7-1	电液伺服阀的类型 .....	200
7-2	永磁力矩马达 .....	202
7-3	单级电液伺服阀 .....	219
7-4	带有直接反馈的两级电液伺服阀 .....	228
7-5	带有力反馈的两级电液伺服阀 .....	240
7-6	伺服阀的技术要求、选择和使用 .....	246
<b>第八章</b>	<b>电液伺服机构 .....</b>	<b>254</b>
8-1	供油压力和动力元件的选择 .....	255
8-2	电液位置控制伺服系统 .....	267
8-3	具有滞后校正的电液位置控制伺服系统 .....	280



8-4	电液速度控制伺服系统 .....	293
8-5	伺服系统设计的一些考虑因素 .....	297
<b>第九章 机液伺服机构 .....</b>		<b>303</b>
<b>第十章 控制系统中的非线性 .....</b>		<b>308</b>
10-1	典型的非线性现象和输入-输出特性 .....	310
10-2	描述函数分析法 .....	311
10-3	饱和特性 .....	315
10-4	死区特性 .....	318
10-5	非线性增益特性 .....	320
10-6	游隙和磁滞特性 .....	323
10-7	继电器非线性 .....	329
10-8	摩擦非线性 .....	332
10-9	描述函数概念在正弦试验中的应用 .....	349
10-10	探查产生极限环振荡的原因 .....	351
<b>第十一章 压力控制阀与流量控制阀 .....</b>		<b>360</b>
11-1	阀按功用的分类 .....	360
11-2	单级压力控制阀 .....	363
11-3	两级压力控制阀 .....	374
11-4	流量控制阀 .....	375
<b>第十二章 液压能源 .....</b>		<b>378</b>
12-1	液压能源的基本结构 .....	379
12-2	旁路调节式液压油源 .....	381
12-3	行程调节式液压油源 .....	384
12-4	液压油源和伺服回路之间的相互影响 .....	386
12-5	液压系统的油箱 .....	388
12-6	液压系统中的发热和散热 .....	390
12-7	油液的污染和过滤 .....	394

8-4	电液速度控制伺服系统 .....	293
8-5	伺服系统设计的一些考虑因素 .....	297
<b>第九章 机液伺服机构 .....</b>		<b>303</b>
<b>第十章 控制系统中的非线性 .....</b>		<b>308</b>
10-1	典型的非线性现象和输入-输出特性 .....	310
10-2	描述函数分析法 .....	311
10-3	饱和特性 .....	315
10-4	死区特性 .....	318
10-5	非线性增益特性 .....	320
10-6	游隙和磁滞特性 .....	323
10-7	继电型非线性 .....	329
10-8	摩擦非线性 .....	332
10-9	描述函数概念在正弦试验中的应用 .....	349
10-10	探查产生极限环振荡的原因 .....	351
<b>第十一章 压力控制阀与流量控制阀 .....</b>		<b>360</b>
11-1	阀按功用的分类 .....	360
11-2	单级压力控制阀 .....	363
11-3	两级压力控制阀 .....	374
11-4	流量控制阀 .....	375
<b>第十二章 液压能源 .....</b>		<b>378</b>
12-1	液压能源的基本结构 .....	379
12-2	旁路调节式液压油源 .....	381
12-3	行程调节式液压油源 .....	384
12-4	液压油源和伺服回路之间的相互影响 .....	386
12-5	液压系统的油箱 .....	388
12-6	液压系统中的发热和散热 .....	390
12-7	油液的污染和过滤 .....	394



# 第一章 绪 论

随着人们所能利用但却需要进行控制的功率的日益增加以及对现代控制系统的日益严格的要求，人们已把注意力集中在控制系统的理论、设计和应用上。水力学——液体流动的科学——是一门很古老的学科。近年来，人们对它发生了新的兴趣，在液压控制系统中尤其是这样。而且它还成了控制领域中的一个重要组成部分。液压控制元件和液压控制系统在车辆、航空和一些固定设备中都有所应用。

## 1-1 液压控制的优缺点

液压控制与其他类型的控制相比，具有许多特点。这些特点十分重要，因而使它获得广泛的应用。液压控制的一些主要优点如下：

1. 内部损耗产生的热量是一切机械的基本限制因素。随着温度的上升，润滑剂会变质，机械零件要咬合，绝缘被破坏。就此而言，液压元件优于他种元件。因为油液能将所产生的热量带到很方便的热交换器中去散发。这一特点使液压元件有可能变得轻巧。现在，油泵与马达的功率-重量比已经达到 2 马力/磅以上。结构紧凑的小型系统对车辆和航空设备很有吸引力。

2. 液压油还能兼起润滑剂的作用，从而使元件的寿命得到延长。

3. 液压元件不存在电机中所出现的磁性材料饱和与损耗

现象。电动机产生的力矩与电流成正比，其大小受磁性饱和的限制。液压执行器(即马达与油缸)产生的力矩与压差成正比，其大小只受安全应力值的限制。因而液压执行器能在体积较小的情况下产生较大的力矩。

4. 电动机就电压-速度而言，基本上是一个简单的滞后环节。而液压执行器就流量-速度而言，基本上是一个固有频率很高的二阶振荡环节。因而液压执行器的响应速度比较高，能高速起动、制动与反向。同时其力矩-惯量比也比较大，因而其加速能力较强。总之，在伺服回路中采用液压执行器可使回路的增益提高，频带加宽。

5. 液压执行器能不受损伤地在连续、间歇、正反向和失速等各种状态下工作。在溢流阀的保护下，液压执行器还可作动力破碎之用。采用液压执行器还可获得很大的速度范围。液压执行器又有直线位移式和旋转式两种，这就提高了它的适应性。

6. 液压执行器与他种驱动元件相比，因其泄漏较小，所以它的刚度较高，即速度-力矩曲线斜率的倒数比较大。因此，当加上负载后，速度只是稍许有些下降。用在闭环系统中，其结果就是定位刚度比较大，位置误差比较小。

7. 借助阀与泵，液压执行器的开环与闭环控制都很简单。

8. 还有其他一些优点，但这些优点与机电控制元件相比并不突出，不过尚不致影响到它的广泛使用。这些优点就是：借助油管，动力的传输比较方便；借助蓄压器，使能量储存也比较方便。

虽然液压控制具有许多突出的优点，但也存在一些缺点。这些缺点使它的应用受到了限制，现将这些主要缺点列举如下：

1. 液压动力不像电力那样容易获得。这一点对于车辆、航空设备方面的应用，倒还不致产生严重的影响。但对于一些固定装置的应用，则肯定会受到影响。

2. 液压元件的公差要求较严，因而价格昂贵。

3. 液压油的油温有一个上限。当液压系统附近有火种存在时，有燃烧和爆炸的危险。不过，采用耐高温和防燃油液可使这种危险减小。液压系统由于很难保持不漏，因此比较脏。此外，当系统破裂时，还存在油液完全漏失的可能。

4. 不可能使油液完全不含污物和完全不受污染。污染的油液会使阀和执行器堵塞。如果污物是磨料的话，还会使这些元件的性能受到永久性的损伤，甚至可能失效。污染的油液是液压控制系统发生故障的主要原因。在液压控制系统中，清洁的油液与可靠性可以说是两个同义词。

5. 由于液压控制系统分析的复杂性，因此缺乏并难于获得设计的基本程序。例如流过电阻的电流可由一简单的定律——欧姆定律来描述。但是，却没有一个简单的定律来描述液阻与流量之间的关系。对于这个看来似乎十分简单的问题却包含着雷诺数、层流或是紊流，通道的几何形状、摩擦系数、流量系数等几乎无穷尽的细节需要考虑。这个缺点使液压控制系统的成熟程度受到限制。

6. 就处理小功率讯号的数学运算、误差检测、放大、测试与补偿等功能而言，液压装置不如电子和（或）机电装置那样灵活、线性、准确和便宜。因而在控制系统的小功率部分一般不宜采用。

液压动力元件突出的特点以及它在小功率工作时的不灵活性，这两者联系起来就使得它主要只在线路和系统的动力部分具有吸引力。而系统的小功率部分一般都由机械装置和（或）机电装置来充任。

## 1-2 设计概论

“设计”这个名词具有广泛的含义。它通常是指为达到某一目的而创造性地构思出一种机构的大致轮廓与草图。有时是指为了构成某一元件或系统，在选择零件与确定零件尺寸时所作的工程计算与分析，这是它的第二个含义。设计还包括材料选择、辅助计算与绘制工程详图等细节。本书的内容是对具有液压动力元件的控制系统进行分析与设计（用纸和笔）。从这个意义上说，设计的含义是确定合适的规格尺寸。虽然材料、应力、密封等问题对于构成一个完美的设计来说也很重要，但它们与系统的动态特性没有直接联系。因此，这些问题将放在其他更权威的地方去讨论。

描述液压元件的微分方程是非线性的，有时甚至还是高阶的。因此，对于包含这类元件的系统，控制工程师就想借助于模拟计算机与数字计算机来进行设计。一般说来，设计程序是首先列出描述系统的方程，然后用计算机解出这些方程，再调整某些系数，直到计算所得的性能（稳定性、精度与响应速度）满足要求为止。然后根据计算结果组成一个希望能与其有相近性能的系统。但往往和想像的不一样，实际性能总是要差一些，这就产生了问题，即初始方程中所作的基本假定是否成立，系统的全部“效应”是否都给予模拟了，一些无可置疑的非线性是否破坏了预期的结果（通常都是这种情况）以及理论上是否有缺陷等。

事实上，如果先用笔和纸对系统进行初步分析设计，然后再到计算机上进行最后的修正，则往往可以省去许多时间和减少许多麻烦。只要小心行事，再加上作出一些正确的和恰当、细致的工程判断，那末，在大多数情况下并不是非用机器

计算不可的。但是,对于复杂情况,要作出正确的工程判断即便不能说是不可,至少也是十分困难的。这时就得借助机器来计算。不过,这种要求并不多见。近年来,求解复杂非线性微分方程的数字计算机程序的发展,增加了关于初步分析是否还有必要的争论。因为现在求精确解已有了可能。事实上,为了从机器的计算取得最大的好处,先通过初步分析来取得某些近似结果还是有用的,有时甚至是绝对必要的。有了这些程序可供利用,就使我们可把更多的精力放在问题的物理性质和数学表示方面,而只需将较小的精力放在求解技术上。

初步动态分析只限于线性化了的微分方程。因为只有这种方程才能较容易地求解。不过,考虑到列写原始方程时一般都作过一些基本假设,考虑到实验工作的重要性,考虑到一般性能指标都只对线性系统而言的事实,所以,就动态性能而言,线性化分析已经足够。此外,液压方程中所出现的代数或单值非线性,通常并不是计算结果与实际情况不相符的主要原因。实际上,这种矛盾是由以下两个现象造成的:间隙之类的多值非线性(它是众所周知的引起极限环振荡的原因)以及在液压分析中所涉及到的物理量的类型。

在液压控制系统的分析中所涉及到的物理量可分为以下两种基本类型:“硬量”与“软量”。所谓硬量,就是那些能够精确地确定,而且其数值保持相对恒定的量。简言之,硬量是易于识别、计算和控制的。相反,软量是那些其数值至多只是在某一可能范围内不变的物理量。软量是一种不可靠的、模糊的量,是一些难于知道或难于控制的变量的函数。例如,设有一个简单的弹簧-质量装置。质量与弹簧常数都是硬量,于是由该两个量组成的无阻尼固有频率也就是硬量。但是,阻尼系数虽然肯定具有某一数值,而且这个数值可以测定,但却难以计算,所以是软量。



伺服系统最重要的东西是稳定性,因此,稳定性应当建立在硬量的基础上。的确,系统的设计可以根据几个与其性能有关的硬量来判断。如果某个性能指标决定于软量,则相应的物理性能将是模糊不清的。例如,单级溢流阀的稳定性主要取决于阀的压力灵敏度,而压力灵敏度是个软量,因为它取决于阀的零位几何形状、磨损情况等等。众所周知,这类阀是极易发生振荡的。相反,未经校正的电液伺服系统的稳定性却取决于阀的流量增益,活塞面积等硬量,它的稳定性实际上可以得到保证。因此,本书的企图之一是除了判断那些量是与性能有关的量之外,还逐步灌输判断物理量的性质的概念。为使液压控制装置能做到合理设计,这种工程判断是绝对必要的。设计师应该经常关心所要求的性能是否决定于软量。可以肯定地说,如果把重点更多地放在研究物理量的性质以及如何利用这些物理量来构成一个设计上,而不是放在对那些想象能代表系统特性的方程组来求得精确的数学解上,那就一定能够设计出比较好的系统来。

### 液压控制的一般参考文献

- [1] Blackburn, J. F., G. Reethof, and J. L. Shearer, *Fluid Power Control*. New York: Technology Press of M.I.T. and Wiley, 1960.
- [2] Ernst, W., *Oil Hydraulic Power and Its Industrial Applications*, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1960.
- [3] Lewis, E. E., and H. Stern, *Design of Hydraulic Control Systems*. New York: McGraw-Hill, 1962.
- [4] Morse, A. C., *Electrohydraulic Servomechanisms*. New York: McGraw-Hill, 1963.
- [5] Pippenger, J. J., and T. G. Hicks, *Industrial Hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 1962.
- [6] Pippenger, J. J., and R. M. Koff, *Fluid-Power Controls*. New York: McGraw-Hill, 1959.
- [7] Fitch, Jr., E. C., *Fluid Power and Control Systems*. New York: McGraw-Hill, 1966.