

977587

高等学校教材

TP271
4422

液压系统计算机辅助设计

林崧 主编



西北工业大学出版社

高 等 学 校 教 材

液压系统计算机辅助设计

林 崧 主编

林 崧 张毓铨 编

西北工业大学出版社

1992年6月 西安

(陕)新登字第009号

【内 容 简 介】 本书着重讲述计算机辅助设计技术在流体传动与控制专业中应用的特点和基础。本书共分10章,分别讲述了液压系统的稳态和准瞬态仿真、瞬态仿真、频率响应仿真、热响应仿真、系统自动设计和绘图,以及管道的液固耦合振动分析等问题。此外,本书还介绍了经典的系统辨识方法与优化技术基础两项内容。

本书可供流体传动与控制专业的学生和教师使用,也可供有关专业人员学习与参考。

高 等 学 校 教 材
液压系统计算机辅助设计

主 编 林 崧
责任编辑 郑永安
责任校对 郭生儒

西北工业大学出版社出版
(西安市友谊西路127号)
陕西省新华书店发行
西北工业大学出版社印刷厂印装
ISBN 7-5612-0362-7/TP·53(课)

开本 787×1092毫米 1/16 14 印张 插页1 334千字
1992年6月第1版 1992年6月第1次印刷
印数: 1—2 000册 定价: 3.70元

前 言

计算机辅助设计是一门新发展起来的综合性技术，它综合了数学、控制、计算机技术与学科基础等方面的知识。它以快速性和准确性高质量地参与了人们的种种设计活动，在实践中已显示出它的社会效益与经济效益。在先进国家的经济领域中，尤其是在航空航天领域的设计与制造中，已得到广泛的应用。我国发展这门技术起步较晚，但它在发展国民经济中的作用已为越来越多的人所认识。

液压技术有它的显著特点，所以它的计算机辅助设计技术也有它明显的特殊性。为了使读者了解这方面的内容与特点，了解它的基础与关键，我们总结了近几年来科研工作的成果与工作体会，编写了这本书，希冀从理论上予以阐述，俾能有助于液压系统计算机辅助设计技术的发展。

全书共分10章，第二到第六章讲述液压系统性能仿真问题，第七章讲述液固耦合振动问题，第八章讲述其它辅助设计内容，第九章讲述经典的辨识方法，第十章讲述优化方法基础。第七章内容涉及弹性力学基础，难度大些，但它是管道系统所不容忽视的问题，还是编了进来，供有兴趣者钻研。

本书的编者全为西北工业大学9系的教师，由林崧任主编。第七章由张毓铨编写，其余各章均由林崧编写。全书由北京理工大学徐家蓓和北京航空航天大学莫松峰审阅。谨向所有为本书的编写与出版给予帮助的同志们致谢。

由于编者水平所限，缺点与错误难免，欢迎批评指正。

编 者

1991年10月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 CAD概念和 CAD系统.....	1
§ 1.2 设计最佳化.....	2
§ 1.3 液压系统 CAD 的发展概况.....	3
§ 1.4 程序的优化.....	3
§ 1.5 本课程的目的、内容与要求.....	6
第二章 液压系统稳态性能仿真	7
§ 2.1 建立液压系统数学模型的基本理论.....	7
§ 2.2 液压系统网络图的计算机自动形成.....	8
§ 2.3 用节点法建立液压系统数学模型.....	10
§ 2.4 用回路法建立液压系统数学模型.....	13
§ 2.5 稀疏矩阵技术.....	20
§ 2.6 线性方程组解的误差校正.....	23
§ 2.7 网络的灵敏度分析.....	24
§ 2.8 解非线性方程组的牛顿-拉夫逊法	26
思考题.....	28
第三章 控制系统仿真	29
§ 3.1 连续系统频域仿真.....	29
§ 3.2 连续系统根轨迹分析.....	31
§ 3.3 连续系统时域仿真.....	35
§ 3.4 连续系统离散相似法数字仿真.....	44
思考题.....	53
第四章 液压系统瞬态性能仿真	54
§ 4.1 基元管路特性.....	54
§ 4.2 液压系统瞬态性能仿真的集中参数法.....	56
§ 4.3 管路动态的特征线算法.....	61
§ 4.4 液压系统瞬态性能仿真的特征线算法.....	64
思考题.....	69

第五章 液压系统频率响应仿真	70
§ 5.1 液压系统频率响应分析.....	70
§ 5.2 泵的数学模型.....	74
§ 5.3 系统频率响应计算.....	79
§ 5.4 简化泵模型分流阻抗的实验求取.....	81
思考题.....	82
第六章 液压系统热响应仿真	83
§ 6.1 热模型与热平衡方程.....	83
§ 6.2 元件的热方程.....	84
§ 6.3 液压泵.....	91
§ 6.4 系统热响应计算.....	94
思考题.....	94
* 第七章 管道与非稳定内流的耦合振动分析	95
§ 7.1 管内非稳定流与管道耦合振动分析方法的回顾	95
§ 7.2 流体与管道耦合振动的数学模型	96
§ 7.3 流体与管道耦合振动的时域分析法.....	103
§ 7.4 流体与管道耦合振动的频率域分析法.....	113
思考题	122
第八章 液压系统和元件的自动设计与绘图	123
§ 8.1 液压元件的流场分析.....	123
§ 8.2 系统和元件的自动设计与绘图.....	125
第九章 系统辨识的经典方法	130
§ 9.1 系统模型的频率域辨识.....	130
§ 9.2 系统模型的脉冲响应辨识.....	134
§ 9.3 系统模型的时间响应辨识.....	136
§ 9.4 相关辨识法.....	140
思考题	146
第十章 优化技术基础	147
§ 10.1 优化方法引论.....	147
§ 10.2 一维无约束问题优化法.....	152
§ 10.3 多维无约束问题优化法.....	157

* 内容难度较大, 不作为教学的基本要求。

§ 10.4 多维有约束问题优化法	168
§ 10.5 多目标函数优化问题	173
思考题	174
附录	176
一、频率特性分析程序 FCG 1	176
二、根轨迹分析程序 RTA-1	179
三、龙格-库塔法时域分析程序	184
四、时域仿真程序 LS-VSI	187
五、面向结构图的非线性仿真程序	194
六、频域辨识程序	202
七、单纯形法优化程序	211
参考文献	214

第一章 绪 论

计算机辅助设计 (Computer Aided Design 简称CAD) 的概念是在计算机问世后提出的一种新概念。它最早由 MIT 小组在1959年美国计算机联合大会上提出的, 提出了在操作台前用光笔操作的设想, 给当时的技术界震动很大。随后各国各行业纷纷开展了这方面的研究工作。

计算机问世后, 首先用于数学计算和逻辑推理。大约在 1955 年就出现了第一支光笔。1966 年推出了独立的制图机。1969 年就有 CAD Turnkey System。1974 年提出了制图标准, 1979 年提出了模型化标准。从以上简单的发展史可以看出 CAD 工作发展非常迅速, 已形成整套的系统, 并向更完善通用方向前进。CAD 技术的发展也促进了计算机图示学、计算数学和计算机控制等学科的飞速发展。

§ 1.1 CAD 概念和CAD系统

所谓 CAD 就是在工程设计过程中计算机协助人们进行若干指定的设计过程, 它是生产循环中计算机一系列连续支援活动的一部分。说得更具体一些就是人们为了达到预想的目的, 通过计算机的硬件和软件进行检索、判断、选择、计算、绘图和最佳设计等创造性的活动, 实现综合设计, 最后将结果变成加工过程的指令输入加工系统。所以 CAD 系统是一个功能齐全的人机共存系统, 人与机器在这里有非常合理的分工, 充分发挥各自的优点。

计算机加工系统接收信息后, 就编制加工计划、加工程序, 并直接控制机床的加工过程。这就是计算机辅助制造 (Computer Aided Manufacturing), 简称 CAM。将 CAD 系统和 CAM 系统联接起来就构成了一个综合 (集成) 加工系统 (Integrated Manufacturing System), 简称 IMS 或叫 CIMS (Computer Integrated Manufacturing System)。

一个 CAD 系统大致包括下列几项工作:

- (1) 技术要求的分析;
- (2) 现有各种数据的检索;
- (3) 性能估算和结构参数的初设计;
- (4) 结构参数优化;
- (5) 设计评价——系统仿真;
- (6) 绘制构造图;
- (7) 提出生产数据。

由于 CAD 系统是由计算机支持的, 计算机的快速运算能力使设计时间与费用大大降低; 又由于评价设计是根据统一的判据, 就可以保证设计质量的统一, 使设计可靠。由计算机绘出图纸, 图形变成了一组数字, 有利于生产过程的控制。

在 CAD 系统中绘图系统起重要的作用, 这因为产品的最终设计是给出生产图纸, 只有给出了产品图形及加工要求才能编制加工程序和控制机床进行加工。为此, 绘图系统能①按

指令显示所需图形；②根据数据描绘物体图形；③按照所绘图形取出图形数据；④实现图形的旋转和移动；⑤在完善的绘图软件支持下，针对图形取出任意剖面。

现在运行的 CAD 系统非常多，尽管对象不同，大小不同，但其基本内容与特点都是一样的。如我国研制出的大型 CAD 系统——飞机设计 CAD 系统，语句约有45万条，它包括有飞机总体设计、飞机静动态性能计算、飞机外形设计、飞机结构设计与强度分析、飞机颤振分析和飞机结构图形绘制等。一个小系统——齿轮 CAD 系统也同样包括了技术要求分析、传动计算、强度计算、材料选择、参数优化和绘图等。

§ 1.2 设计最佳化

所谓设计最佳化，就是设计者在整个设计期间分析用户提出的技术要求，进行设计构思，进行产品静动态分析，选择评价设计的准则，进行指标对比和优化各设计参数，以求得所设计的结果是满足技术要求的最佳方案。在人工设计中上述过程不管如何反复都是由人来完成，在 CAD 系统中上述工作绝大部分要由计算机来完成。要使计算机能完成这些工作，最基本的一条是使所有的问题公式化。因此设计最佳化的概念也可以这样描述：给出一个产品或技术系统的功能要求（技术的、物理的、经济的和规范限定的），在所提出的满足这些要求的设计的种种选择中，找出一个满足某个选择准则的最佳解。其步骤大致如下：

（1）首先把一个设计假定为能由若干个设计变量表征的若干个不同状态。有些变量影响系统的状态但不能被设计者所控制，则称这些变量为参数。

（2）列出限制设计变量自由变化的约束条件，这些约束条件表达为约束函数。

（3）选择一个评价的估量准则，这个准则称为目标函数。

（4）确定反映系统状态与设计变量之间的关系的数学模型。

（5）通过运算最终选择出一组最佳的设计变量。

设计最佳化的进程用流程图表示，如图 1-1 所示。

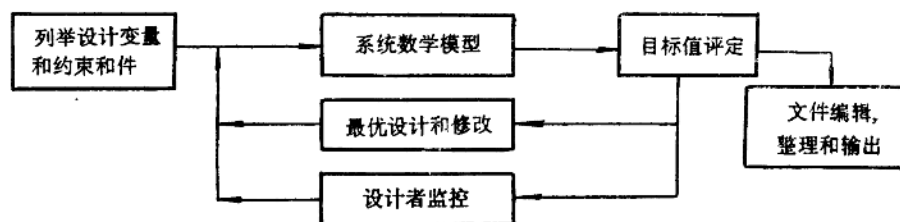


图 1-1 设计最佳化的流程图

要指出的是，用计算机实现设计最佳化并没有解除设计者的责任。因为一组设计变量的提出、有关评判准则的选择、约束条件的确定和系统模型的提出等都离不开设计者的思考与决断；而且设计者为保证最佳化能够成功还要保证系统模型的准确和使用问题最终有解，也就是说要导出准确的系统模型并选择出使最佳化进程有解的合适的运算方法。

§ 1.3 液压系统CAD的发展概况

液压系统 CAD 是在控制系统 CAD 之后发展起来的。控制系统 CAD 是在 70 年代仿真技术的基础上发展起来的。最早的软件包如 EXTRAN 是由汤姆逊与袁将 Mimic 仿真语言和 NASA 分析程序改造而成。加拿大阿尔伯塔大学 DACS 中心于 70 年代初研制的 GEMCOPE 软件包,其主线也是系统仿真程序。早期的软件包中系统设计的方法主要是古典方法或线性二次型最优法。后来英国曼彻斯特大学(UMIST)发展了一套用于多变量系统设计的软件,日本古田胜久等人也建立了一个控制系统设计软件包 DPACS-F。目前控制系统 CAD 技术已相当成熟,可用的软件包也相当地多。

也是在 70 年代开始探索将 CAD 技术应用于液压方面,最早也是用于液压系统与元件的仿真,如麦道飞机公司开发了 AFSS (Advanced Fluid System Simulation) 程序包,它包含了四个大程序:①稳态仿真程序 SSFAN,后又扩展成稳态与准瞬态仿真程序,②瞬态仿真程序 HYTRAN,③频率响应分析程序 HSFR,④热分析程序 HYTTA。后来经过 CDC 公司(Control Data Corporation)和明尼苏达大学修改补充归并到 CDC-ICEM 软件包中成了通用的液压 CAD 软件。此外,德国亚琛工业大学搞了一个 DSH 程序包,英国巴斯大学搞了一个 HASP 程序包,瑞典凌可平大学从 1979 年起编制了 HOPSAN 软件包,美国俄克拉荷马州大学流体动力研究中心在 1984 年推出了液压静态仿真程序包 PERSIM,芬兰坦派勒大学 1986 年推出了 CATSIM 程序包,以上程序包都注重于液压系统与元件的静态仿真,后来补充有系统与元件的绘图功能的也不多。

在我国液压 CAD 技术大约在 70 年代末期开始发展的,也是在控制系统 CAD 技术上发展起来的。80 年代我国引进了 AFSS 程序包和 DSH 程序包。有些学校与研究所也自行研制出一些程序包,如能绘出液压系统原理图的系统设计软件、能绘出插装阀零件图的插装阀 CAD 程序,以及一些液压元件的仿真程序等等,同时还开展了液压系统与元件的辨识和管路系统液固耦合振动的研究。当前国际上注重研究 CIMS 系统,我国也已着手研究自己的 CIMS,并将之列为一高技术课题,可望在若干年后,我们会在许多方面对液压 CAD 技术作出贡献。

§ 1.4 程序的优化

CAD 工作当然离不开软件——程序,程序的编制工作虽然大家已经干过,但要编出一个高质量的程序并非易事。一个好的程序要语句最少、效率最高、通用性要强、便于检查及更改和有好的算法等等。下面就分别从两个方面作一简要介绍,作为学习这门课的入门基础。

一、程序的优化

程序中不可避免地有种种计算,有的计算还要重复多次,编制程序时就要考虑节省内存空间与计算机时等问题。虽然只是运算一个算式,有的程序计算量大机时长,有的程序计算量小所花机时就少。如有一局部程序为:

```

DO 10 I=1, 100
DO 20 J=1, 100
TAX = A(I, J)-3200.0/12.0
IN =IRATE(J)/(365/12)-I
B =4.* TAX/3.0
20 CONTINUE
10 CONTINUE

```

在这个程序中对(3200./12.)，(365/12)和(4./3.)要重复计算一万次。这些都是固定值，计算一次就可以了，假如我们用三个变量存这三个值就会节约好多时间。如可将程序改成下面形式：

```

C1 =3200.0/12.0
C2 =4.0/3.0
IC =365/12
DO 10 I=1, 100
DO 20 J=1, 100
TAX = A(I, J)-C1
IN=IRATE(J)/IC-I
B=TAX * C2
20 CONTINUE
10 CONTINUE

```

计算机处理各种算术运算中，不同的运算方法所用的时间不同。大型机加减法、乘法与除法所用时间的比例大致为1:2:3，小型机的比例为1:8:20，乘幂的运算花时最多。因此能用加法的地方最好不用乘法，除法最好改为乘法，整数幂尽可能用乘法，整数幂花时少于实数幂，因此

$L=3*I$ 不如 $L=I+I+I$
 $B=A/5.0$ 不如 $B=0.2*A$

又例如

$A=1.0/X$ $C=B+D/X$

不如改成：

$A=1.0/X$ $C=B+D*A$
 $Y=X**8.0$ 应写成 $Y=X**8$

因为实数幂运算要用 EXP 和 ALOG 两个标准函数而整数幂采用自乘。在一个算式中变量类型要一致，不然计算机要先将变量类型搞一致后才能运算，这就多花了时间。计算机在执行循环语句时总是先判断控制变量是否大于终值，因而尽量避免滥用循环。当循环次数很大时，如适当增加语句数都可以节省大量时间，如：

```

DO 10 I=1, 10000
10 A(I)=B(I)

```

应改为：

```

DO 10 I=1, 10000, 4
A(I) =B(I)
A(I+1) =B(I+1)

```

$A(I+2) = B(I+2)$

10 $A(I+3) = B(I+3)$

在程序的改变中,虽然语句增加了三条,但循环次数却由此减少了 7 500 次。多重循环中使用数组如 $A(I,J)$,内循环应对应于第一下标 I ,因为对 I 先循环是按数组内存次序依次存取,便于寻址和取数,从而节省了时间。在计算中也要尽量避免对数组元素的反复寻址,更不要在循环体内计算数组元素的下标,例如矩阵相乘可写成:

```
DO 30 I=1, N
  DO 20 J=1, N
    A(I, J)=0.0
    DO 10 K=1, L
      A(I, J)=A(I, J)+B(I, K)*C(K, J)
10    CONTINUE
20    CONTINUE
30    CONTINUE
```

这里要对 $A(I,J)$ 反复寻址,应改写成

```
DO 30 I=1, N
  DO 20 J=1, N
    TEMP =0.0
    DO 10 K=1, L
      A(I, J)=TEMP+B(I, K)*C(K, J)
10    CONTINUE
20    CONTINUE
30    CONTINUE
```

这样 $A(I,J)$ 下标就少计算了 $2N^2L$ 次,又例如

```
DO 10 I=1, 10
10 X(3*I+4)=Y(3*I+2)+C
```

应改写为:

```
DO 10 I=7, 34, 3
  J=I-2
10 X(I)=Y(J)+C
```

在逻辑运算或条件语句的逻辑表达式中经常利用某些逻辑常数运算的结果时,应一次算好,存入中间变量。要充分利用数据初值语句以减少运行时间。以上这些仅仅作为讲清问题而提出,要编出高质量的程序还要靠工作中不断积累。

二、程序的结构化

随着计算机应用日益广泛深入,程序也越编越大,程序的体积增加一倍,其复杂性可能增加两倍以上,使得程序的易读性大大降低。科学技术的发展常常使得执行同一类型计算时增加新的情况、状态、元件、要求等等,这就要求程序便于修改补充,因此,提出了结构化程序设计的思想。

结构化的程序设计是一种编制程序的方法。它将大程序分成若干个模块(程序段),每一个模块完成一项功能。模块之间可以互相调用。在具体编制之前先将大的流程图转换成一

张模块流程图，然后具体编制。编制步骤是从上向下，这样便于纵观全局，从上向下逐步求精。这种分模块的编制方法，可以分别对每个模块进行编译和验证，实现了自我说明和自我捍卫，容易保证整个程序的调试和验证；同时使得程序易读、易改和易于补充，因为改变一二个模块和补充一二个模块只影响到极少数模块的更改，对一个模块本身的修改甚至可能不影响其它模块。这种模块化的目的是把一个复杂问题分解为许多小问题来解决。

在结构化程序设计时为保证设计的正确性还有一些具体设计原则，如：模块只具有单入口与单出口；GO TO 语句只用于模块中的基本结构内部；各模块的变量、数组的标识符最好在同一模块里按同一原则选取，尽可能在同一程序中用同一标识符等等。

各模块的编程都应采取从粗到精的编制方法。最初对本模块的功能用几句话予以描述，然后逐步细化。例如要把 4 个实型量按升序排列并打印出，编程的步骤大致如下。

第一步，用 3 句话描述功能：

读 4 个变量值 V1, V2, V3, V4；

按升序排列；

打印已排好的变量值。

第二步，对按升序排列进行细化：

比较 V1 和 V2，取出大值存入 V2，将小值存入 V1；

比较 V2 和 V3，取出大值存入 V3，将小值存入 V2；

比较 V2 和 V1，取出大值存入 V2，将小值存入 V1；

比较 V3 和 V4，取出大值存入 V4，将小值存入 V3；

比较 V2 和 V3，取出大值存入 V3，将小值存入 V2；

比较 V2 和 V1，将大值存入 V2，将小值存入 V1。

第三步，写出整个程序。

这种从粗到精的编制方法便于逻辑推理，易于保证程序的正确性。

实践已经证明结构化的程序设计思想是一种行之有效的正确的设计方法。

§ 1.5 本课程的目的、内容与要求

液压 CAD 技术是一门综合技术，涉及到的基础很广泛，由于各学科的交叉渗透，在这门课上不可能把 CAD 有关问题全部讲到。这里只能讲授一些 CAD 技术的最关键问题的基础理论、处理问题的一些主要方法，以及编制软件包的基本思路 and 要考虑的问题，以期使读者对 CAD 有概略的认识，并掌握一些实例，在从事 CAD 工作时不至于茫无头绪。因此，本课程偏重于液压系统的仿真，讲述系统与元件数学模型的建立与求解，各种处理问题方法的原理、比较与评价；着重讲述一般方法的应用中对液压特性的处理。显然这只能提供思考的方向和思考的基础，工作中还需要不断学习，不断完善。

第二章 液压系统稳态性能仿真

液压系统稳态性能仿真就是求出在一定外载下系统各点的压力和各管路的流量,也就是在相对稳定的外载下求出系统中相对稳定的压力和流量。假如外载值变了,与之平衡的压力及流量也会改变。外载随时间变化后,求出系统中各点的压力和各管路流量随时间的变化情况,也是本章中要讨论的一个内容——准瞬态性能仿真。稳态性能仿真看来似乎简单,但很重要,它是瞬态分析和热分析的基础,因为在这些分析之前都要确定系统的工作点或初始状态,而且稳态性能容易测量对照,对改进设计很有帮助。

§ 2.1 建立液压系统数学模型的基本理论

构成液压系统的元件不外乎几类,在稳态情况下其特性均表现为压力与流量的关系。但有些元件或由于能量的输入或输出,或由于结构本身的特点,存在有压力突变或流量突变,如泵和马达的进出口处的压力大小不等,增压器和单边作动筒也是如此,不仅有压力突变还有流量突变。在进行性能仿真中要注意到这个特点。

一根管路或一根包括某些元件的支路,在两端有压力和流量。流体流过支路会有能量损失。损失包括摩擦损失,局部损失和节流损失。假如与外界没有能量交换,支路两端的压力差就等于支路的损失,若有了能量的交换,支路两端的压力差不等于支路损失,它还包括了压力突变在内。对支路两端截面 1 和 2 列写伯努利方程,得

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + p_l - \Delta p \quad (2-1)$$

这里, p_l 为支路压力损失; Δp 为由于能量输入引起的支路压力突变, 正值为压力升, 负值为压力降。

假如支路管径不变, 那么 $v_1 = v_2$ 。再定义支路压力损失 p_l 与流量 Q 成正比, R 为液阻, $\frac{1}{R} = G$ 为液导, 那么

$$p_l = RQ = \frac{Q}{G}$$

显然 R 与 G 不是常量, 而是随流态与损失种类而变的 Q 的非线性函数。但我们仍可以将 (2-1) 式改写成

$$(p_1 - p_2) + \Delta p = p_l = \frac{Q}{G}$$

所以

$$Q = G(p_1 - p_2) + \Delta p G \quad (2-2)$$

这就是基元管路的一般方程式。

系统中有许多元件, 元件的数学模型可按照元件特性去建立。例如变量泵, 在有负载时输出压力和输出流量有一定关系, 表现为泵的外部特性, 近似地画成折线关系, 见图 2-1。图中

p_1 为零流量下的压力, p_2 为额定压力, p_3 为全流量下的压力, 与之对应的流量为 Q_1 , Q_2 与 Q_3 。这样泵的输出压力 p_{out} 可以写成公式如下:

$$p_{out} = \begin{cases} p_1 - (p_1 - p_2) \frac{Q_{out}}{Q_2} & Q_{out} < Q_2 \quad p > p_2 \\ p_2 - (p_2 - p_3) \frac{(Q_{out} - Q_2)}{Q_3 - Q_2} & Q_{out} > Q_2 \quad p < p_2 \end{cases}$$

泵的壳体泄油量 Q_{cd} 可以用经验公式^[1]表示

$$Q_{cd} = Q_{cd0} - 0.3 \frac{Q_{out}}{Q_r}$$

式中, Q_{cd0} 为泵壳体额定泄油量; Q_r 为泵额定转速下的额定流量。已知 Q_{cd} 和泄油管阻力系数就可以算出泵泄油口的压力, 计算出泵的吸油流量等等。

我们知道了管路和元件的数学方程, 就可以根据不同的建模方法建立系统的数学模型。

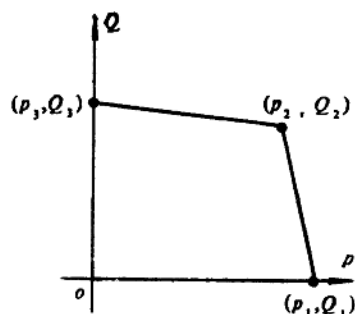


图 2-1 泵的外部特性曲线

§ 2.2 液压系统网络图的计算机自动形成

我们知道在稳态性能仿真中, 有些元件的特性非常接近, 如管接头、硬管、软管、弯头和节流阀等, 它们主要都是考虑损失, 在计算时经过某种处理完全可以合并在一条支路内。经过处理后的系统图就比较简单了, 这个图就称为系统网络图。系统网络图能不能自动形成呢? 如果能做到, 那么用户只要按系统连接原理图(图 2-2)将各组成元件的特性参数和它前后的连接号输进计算机, 就可以进行计算。这样一来更改一个系统就很方便了, 用户只要更换几张卡片或几个记录就可以了, 使得稳态分析有利于系统的初期设计, 有利于对系统组合进行寻优。

首先, 我们将液压元件分成两类, 一类是可以合并进支路内的元件, 另一类是本身有两个以上连接点的或者是节点元件(如三通和四通)。对第一类元件, 在建立系统网络图过程中就边连接边合并。譬如 90° 弯头与软管相联, 软管又与 45° 弯头连接, 弯头后再接一根硬管(见图 2-2)。我们给硬管的连接点号是上游为 30, 下游为 35; 45° 弯头的连接点号上游为 25, 下游为 30; 软管的连接点号上游为 20, 下游为 25; 90° 弯头的连接点号上游为 10, 下游为 20。通过连接点号知道软管是接在两个弯头之间。当把这四个元件连起来时, 就定为一条支路, 其连接点号上游为 10, 下游为 35。这条支路号定为(1), 见图 2-3。

连接时, 指定一个元件从它开始连接, 例如液压泵, 就从液压泵的压力口开始连接, 寻找与泵压力口连接点号相同的元件。找到这个元件就记下这条支路号。这时支路的下游连接点就是所找到的元件的下游连接点号。这样, 一个元件一个元件地往下连接, 当遇到第二类元件时, 这条支路就算终止。再从开始连接这条支路的元件(这里是液压泵)的其余连接点号开始连接其余的支路。当与液压泵相连的支路都连接完以后, 就从支路的下游节点继续往下连接。这样, 我们就得到了支路号及其连接号的全部信息, 根据这些信息就可以画出系统网络图了。系统网络图见图 2-3。

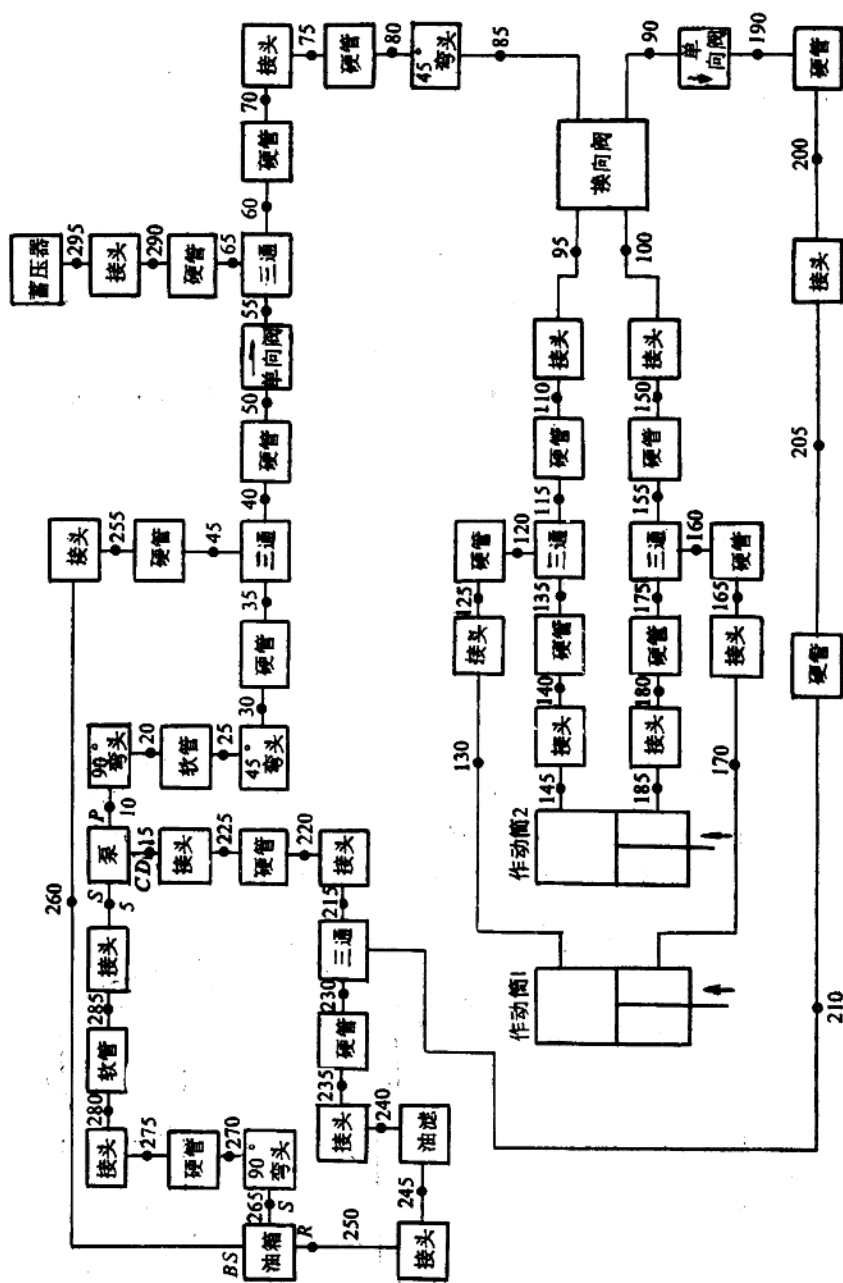


图 2-2 液压系统连接原理图

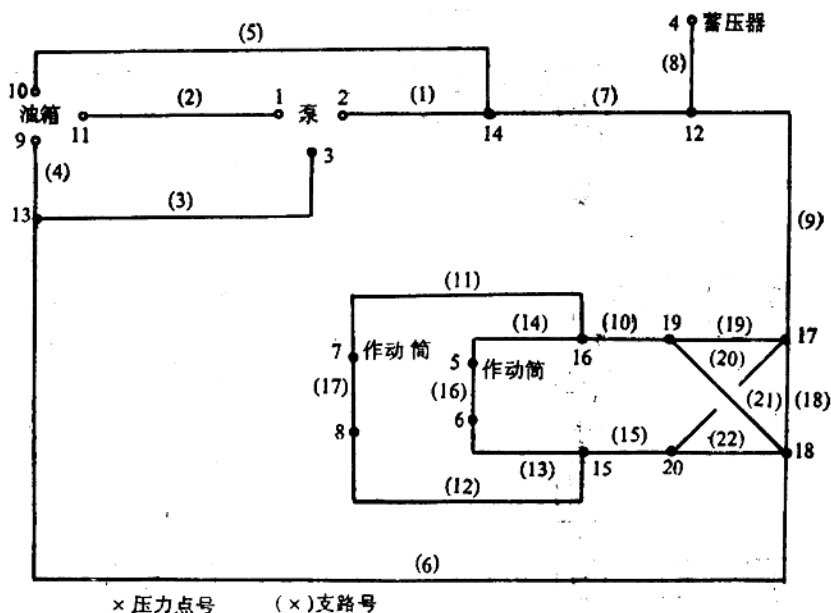


图 2-3 液压系统网络图

§ 2.3 用节点法建立液压系统数学模型

液压系统有许多管路和元件，有的几根管路汇合于元件，有的汇交于三通或者四通，我们把管路汇交点定义为节点。如果节点没有源与洞，在节点处进、出流量和应为零，即进、出流量应平衡。我们对系统的每个节点都可建立其流量平衡方程，所得的方程组就是用节点法建立的系统数学模型。解这个方程组就可得到各节点的压力和各支路的流量。

一、液压系统的节点法数学模型

为了使读者掌握节点模型的建立，这里用一个简化的系统网络图来说明，系统网络图如图 2-4。这个网络图很像电路图，只是在有些支路上有压力突变，这点与电路不同；在电源的地方变成了液压泵，用外加能源来表示。在网络图上，各节点都标有号码，支路号码用支路两端的节点号的组合来表示。下面我们就对图 2-4 上的系统网络图上的每个节点列写流量平衡方程。列写时流量都以流

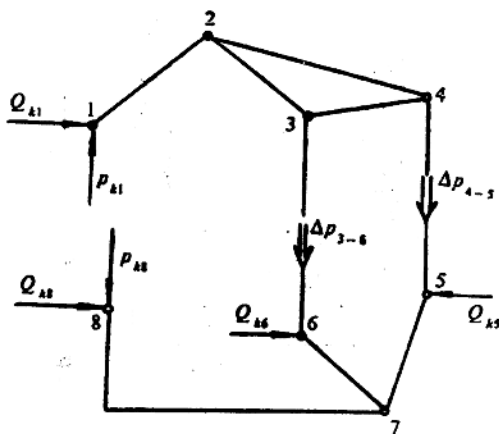


图 2-4 简化的系统网络图