

蔡廷文 著

液压系统 现代建模方法



中国标准出版社

液压系统现代建模方法

蔡廷文 著

中国标准出版社

· 内 容 简 介 ·

本书内容包括液压系统现代建模策略,基于电液相似原理的液压元件实体的建模,子系统的仿真模块图,应用相似模型和MATLAB+SIMULINK 软件对液压系统的仿真示例以及液压系统的多极建模方法。

本书可供从事液压传动与控制,机械电子工程以及相关的机械、自动控制行业的工程技术人员参考使用,并可作为大专院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

液压系统现代建模方法/蔡廷文著. —北京:中国标准出版社,2002.12

ISBN 7-5066-3042-7

I. 液... II. 蔡... III. 液压系统-系统建模
IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 101363 号

中国标准出版社出版

北京复兴门外三里河北街16号

邮政编码:100045

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 5 $\frac{1}{2}$ 字数 152 千字

2002 年 12 月第一版 2002 年 12 月第一次印刷

*

印数 1—1 500 定价 17.80 元

网址 www.bzchs.com

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68533533

引

言

随着计算机技术广泛用于各种工程技术问题的研究和设计,工程上出现了现代研究方法和现代设计方法。这种方法就是把工程技术要解决的某个问题,考虑它的静力学、动力学和运动学的情况,抽象成描述这个物理系统的数学模型,借助于计算机的高速运算能力和判断能力对其反复进行计算、仿真试验,实现参数优化、方案优化和最佳设计。

液压工程师为了实现参数优化和方案优化,获得最佳设计,要做很多工作,其中最重要、目前最为迫切需要解决的问题就是实现高质量的计算机数字仿真。因为高质量仿真可以帮助设计师在设计阶段就能准确地预测出先前设计对象(液压元件或液压系统)具有的静动态特性,以及功率消耗、效率、发热等技术经济指标情况,及时发现和克服设计中的弱点,有效地进行设计参数和方案的比较、优化工作,以此为基础指导物理样机的调试工作,可大大缩短调试周期,避免材料、能源浪费。特别是对于越来越复杂的现代液压系统设计来说,提高计算机仿真质量,就更显出其迫切性。传统建模方法已经难以满足这种要求。摆脱繁琐无序的、经验的、类比的、依靠实体实验的传统建模方法,建立科学的、逻辑的、与现代计算机技术有机结合成一体的先进建模方法,才能促进液压技术的快速向前发展,已成为共识。

引

言

虽然流体技术发展的历史比电子技术古老的多,然而今天电气电子技术的发展已大大超过了流体技术,无论在理论上和技术上都居于领先地位,而计算机的迅猛发展更加强了这种优势,已反过来对流体技术起着巨大的推动作用。这种相互促进、借鉴的基础就是相似系统原理,电-液模拟就是直接利用各自参量间关联规律的相似。相似原理亦为机-电-液整个自动化系统的综合研究创造了条件。尽管一些关于液压系统建模的论文,而且是非常好的论文,反对电-液模拟,它们认为只有电气电子元件可以假定是线形的,然而,实际上,电类元件特别是半导体元件,并不比液压元件的非线性少。

关于液压系统现代建模和仿真方法的研究,无论在国内外,都尚处于探索和发展之中。本书作者从各类能量领域通用的连续性和相容性条件出发,依据控制理论的相似系统原理,借鉴电路的阻、容、惯性的概念和已有深入研究的电网络的成熟理论——分裂法(节点分析、回路分析及混合分析的方法),对现代液压传动或控制系统的传统建模方法进行改造,引入了面向现代计算机技术的模块式建模方法,使之更适合于对愈来愈复杂的现代液压系统进行计算机仿真和优化设计。

在本书第一章,介绍如何模拟电路建立现代液压系统的液阻、液容、液感等标准元件,在此基础上给出了用

于描述不同液压回路的各类典型子系统相似模型。在第二章,把大系统理论用于现代液压系统的分析,把实际液压系统甚至液压元件实体视为由一些典型子系统构成的大系统,介绍如何运用上述各类典型子系统相似模型将它们按电路理论组合为液压大系统相似模型。这是应用 MATLAB+SIMULINK 软件建立仿真模块图 and 进行仿真的前提和基础。在第三章,介绍如何建立面向 MATLAB+SIMULINK 软件的对应于典型子系统、典型液压件、典型液压系统和典型负载特性的计算机仿真模块图。以上三章内容概括了建立液压系统现代数学模型的基本原则和方法。这种建模方法与传统建模法相比,显然,具有科学性、逻辑性和更适于计算机自动技术的特点。

第四章在第三章的基础上介绍了采用 MATLAB+SIMULINK 软件包对液压系统仿真的若干实例。使用 Simulink 创建的模块可以具有递阶结构,适合于上述的大系统拓扑建模思想和策略。同时它支持连续、离散或两者混合的线性 and 非线性系统,也支持具有多种采样速率的多速率系统,对运行复杂的液压系统仿真非常方便有用。通过示例介绍了对主要液压元件实体和液压系统在特定参数下进行仿真试验的方法,并给出了一些仿真曲线,还可以在改变参数后观察系统中发生的变

引

言

化情况。这些对于实际设计人员具有参考价值。

由于液压技术中的非线性过程多,液压流体力学的公式很多是经验公式,形式复杂,而且在模拟中常因小液容存在引发较严重的“病态”,大大影响求解动态响应时的仿真速度。这一系列特点,使得人们在仿真时必须慎重选择仿真软件或程序语言。作者经过比较研究后认为,对于本书阐述的电液模拟方法而言,MATLAB+SIMULINK 软件最为适用。

由第四章可知仿真方法可归结为以下两类:

a. 应用液压系统的传递函数(由电液模拟方法得出)来仿真。需要给出传递函数的具体形式和有关参数值。这种方法看似较简单,但导出传递函数的步骤显得较多。

b. 将液压回路和液压系统的数学模型(电液模拟方程式和相似系统图)按拓扑法组合成仿真模块图,设置具体参数后由 SIMULINK 程序求解。这种方法对于需要仔细研究和调整一个液压系统的动态性能细节时,是很合适的。因为仿真过程中伴随有信息的反馈。这使得在仿真过程中发生的干扰或控制变量产生的任何变化都能够得到及时模拟和反应。

由于液压系统子系统模块的建立,不但使我们能够将 MATLAB+SIMULINK 这个卓越软件应用到液压

引

言

系统和液压工业领域,而且有助于推进实现各个液压件生产厂的产品建立数学上的互换性,不仅可以大大避免许多重复无意义的劳动,并为建立液压系统模型库、数据库带来很大的方便,这是一项极有意义和具有远大前景的工作。今后需要继续补充这个子系统模型库,以扩大 MATLAB+SIMULINK 软件在调整与完善液压传动装置和液压控制系统的设计方案上的作用。

本书第五章,依据电液相似系统原理,应用电网络理论及其基本方程,将实际液压系统(包括元件)的物理模型视为由若干个相互独立的子系统多极模型经若干节点拓扑而成的多极图。每个子系统的多极模型的结构关系与子系统之间的相互作用是无关的,因此,一经建立,以后便可随时重复使用。这种多极图的结构与实际液压系统的结构是同型的,基于液压系统的工作原理图便可直接建成。这种多极模型较目前液压系统建模与仿真研究中通常使用的方块图和状态方程更接近于真实的物理系统,并比键合图使用方便。对具有混合能量领域特征的液压系统或装置施用多极概念,建立拓扑多极模型和多极图,可使建模、仿真、动态分析等自动设计领域的研究变得更方便。它是一种类似键合图法的另一种强有力的现代建模方法。这一章介绍的物理建模方法与前四章介绍的数学建模方法在本质上都是基

引

言

于电液相似系统原理,但表现形式有异,各有自己的独到优点,可供选择使用。

本书基本内容是建立在作者多年来在国内外从事液压系统建模、仿真和设计的研究成果基础之上的。本书在写作过程中得到了导师和同行专家提供的许多宝贵意见和学校领导的鼓励帮助。东南大学自动控制系统蔡立参加了本书部分内容的编写工作。在此深表谢意!作者写作过程中虽殚精竭虑,并历时3年,但由于水平有限,文中难免有不当甚至错误之处,敬请各位专家和读者批评指出。本书的出版如果能起到抛砖引玉的作用,那将是作者的莫大荣幸。

(E-mail: cailis@263. net)

作者

2002年10月

目

录

第 1 章 液压系统现代建模策略	1
1.1 液体能量形式与能量比	2
1.1.1 压力能	2
1.1.2 容能	3
1.1.3 动能	4
1.1.4 热能	4
1.2 对流体阻尼的电液模拟——液阻、液感和液容 的概念	5
1.2.1 液阻	6
1.2.2 液感	8
1.2.3 液容	11
1.3 液阻、液感、液容在电液模拟网络中的符号规定	18
1.4 电液模拟中的时间常数	18
1.5 在正弦输入信号作用下线性系统中液压阻抗的 分析计算及应用	19
1.5.1 对于液阻元件的傅里埃分析	20
1.5.2 对于液感元件的傅里埃分析	21
1.5.3 对于液容元件的傅里埃分析	22
1.6 标准电液模拟回路的设想	26
1.6.1 引言	26
1.6.2 R, L, C 串联基本回路	27

目 录

1.6.3	R, L, C 并联基本回路	35
1.6.4	R, L, C 串并联复合回路	39
1.6.5	几种典型应用回路	43
1.6.6	基本回路的无量纲参数特性	49
1.6.7	液压马达的简化相似回路和无量纲参数 特性分析	51

第 2 章 基于电液相似原理的液压元件实体的建模

.....	56
2.1 液压泵的电模拟	57
2.1.1 液压泵的相似模型	57
2.1.2 恒压油源	62
2.2 液压马达的电模拟	64
2.2.1 液压马达的相似模型	64
2.2.2 液压马达的流量控制	67
2.2.3 液压马达的压力控制	70
2.2.4 容积效率和机械效率	73
2.3 液压缸的相似模型	80
2.4 液压阀的建模	86
2.4.1 直控式溢流阀的建模	87
2.4.2 间接控制式溢流阀的建模	92
2.4.3 直动式减压阀的建模	96



第 3 章 子系统的仿真模块图 99

- 3.1 创建液阻仿真模块图 99
 - 3.1.1 HRLINS 型仿真模块图(串联线性液阻模块图) 99
 - 3.1.2 HRKVAS 型仿真模块图(串联二次液阻模块图) 100
 - 3.1.3 HRLINP 型仿真模块图(并联线性液阻模块图) 101
 - 3.1.4 HRKVAP 型仿真模块图(并联二次液阻模块图) 102
- 3.2 创建液感仿真模块图 103
 - 3.2.1 HLS 型仿真模块图(串联液感模块图) 103
 - 3.2.2 HLP 型仿真模块图(并联液感模块图) 104
- 3.3 创建液容仿真模块图 105
 - 3.3.1 HCS 型仿真模块图 105
 - 3.3.2 HCP 型仿真模块图 106
- 3.4 基本模拟回路的仿真模块图 107
 - 3.4.1 HLCPR 型仿真模块图 107
 - 3.4.2 HCPLR 型仿真模块图 108
 - 3.4.3 HLRCP 型仿真模块图 108
 - 3.4.4 T 型回路仿真模块图 109
 - 3.4.5 π 型回路仿真模块图 110



3.5 液压泵仿真模块图	111
3.6 液压马达仿真模块图	114
3.7 几种带负载的典型电液模拟应用回路及其仿真 模块图	116
3.7.1 带负载的 L 型和 π 型电液模拟回路	116
3.7.2 带负载的液压缸线性相似模型	116
3.7.3 带负载的液压马达简化相似模型	117
3.7.4 典型液压系统——泵控马达液压系统的 电液模拟	117
3.7.5 带负载的电液模拟回路的仿真模块图	118

第 4 章 应用相似模型和 MATLAB+SIMULINK

软件对液压系统的仿真示例

4.1 在 MATLAB+SIMULINK 程序下应用传递函数 进行数字仿真试验示例	123
4.1.1 假设负载 $F_L=0$ 时液压缸的动态仿真	124
4.1.2 当负载 $F_L \neq 0$ 时液压缸的动态仿真	126
4.1.3 位置控制电液伺服系统的仿真	130
4.2 并联压力控制阀的液压泵的动态仿真	132
4.2.1 并联压力阀的液压泵的线性特性及仿真 试验模块图	132
4.2.2 恒压油源仿真试验参数的设置	134

目

录

4.2.3 恒压油源在给定参数条件下的动态仿真曲线	136
第5章 液压系统的多极建模方法	140
5.1 引言	140
5.2 多极建模的基本元件	141
5.2.1 极点	141
5.2.2 标准二极元件	144
5.2.3 理想独立源	145
5.2.4 受控源	146
5.3 液压系统多极建模示例	149
5.3.1 液压缸的多极建模	150
5.3.2 节流液压系统的多极建模	153
5.4 机械系统的多极建模示例	154
5.4.1 机械平移系统的多极建模	154
5.4.2 机械转动系统的多极建模	157
5.5 电气电子系统的多极建模	158
5.6 应用多极模型对现代液压系统进行仿真和优化设计	159
5.6.1 电液伺服阀控制液压马达位置伺服系统按多极图的仿真	159
参考文献	167

第1章

1. 液压系统现代建模策略

众所周知,对于线性系统,求解方程的数学过程与方程所代表的物理系统外貌其实无关。因此,若某一物理系统对给定输入信号的响应已被确定,则所有可用同一方程或方程组描述的其他物理系统的响应,对相同的激励函数来说,就是已知的。用同一方程或方程组描述的不同物理外貌的系统称为相似系统。例如,一个由电阻、电感和电容组成的电路,可以和一个由黏性摩擦器、质量和弹簧适当组合而成的机械系统相似,也可以与一个由管道、阀门、油缸、蓄能器和油泵适当组合而成的液压系统相似。

相似系统这一概念,在现代科学技术的试验研究和理论分析中得到了越来越多的应用,且越来越受到重视。当我们处理像液压系统这样的非电系统时,如果能把所考虑的系统化为相似的电路系统,这将有明显的好处。首先,使用电路元件符号可以把复杂的液压系统职能符号图变成便于阅读和分析系统特性的电路图。其次,各种电路理论技术,如阻抗概念和各种网络理论(如网络的拓扑分析法),可以有效地用于实际液压系统的分析。第三,电路元件更换方便,数值容易改变,测量电流和电压比较容易。所有这些都为模型的构成和试验提供了极大方便。

非常重要的一点是,各种近代电路理论,如网络方程、图论、分裂法等,在近二三十年得到长足发展,已经比较成熟完善,目前在计算机辅助分析和设计领域都得到了成功应用,有力推动了现代科学技术的向前发展。

因此,我们不但可以而且十分有必要,借鉴已有经验,应用电液

模拟方法,将液压回路(或液压单元)和液压系统转变为结构和特性类似的电回路和电系统来研究。

本章将建立液压系统与电路系统的相似性,建立电液相似系统的相似元件和相似回路,即将液压元件转换为相似的电路元件(即液阻、液感和液容元件)来表示,将液压回路转换为相似的电回路(即由液阻、液感和液容元件适当组合而成的回路)来表示。

1.1 液体能量形式与能量比

由于液压传动和控制系统是以封闭在回路里的有压液体(液压油)为工作介质进行能量传递和控制,与机电两类系统有很大的不同,因此,本书从分析工作液体具有的能量形式开始并建立相应的能量传递函数。

1.1.1 压力能

设密封容积中工作液体的体积为 V ,压力为 p ,如图1-1所示,

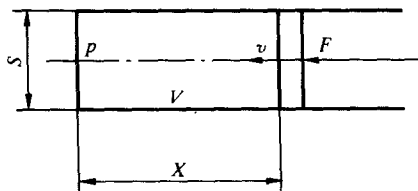


图 1-1

则密封液体具有的压力能为

$$E_t = pV = FX = pSX$$

式中: F ——作用于活塞上的外力;

X ——液柱长度;

S ——液柱的横截面积。

假设液体是不可压缩的。按功率是能量变化率的定义,求得压力能的变化率为

$$P_t = \frac{dE_t}{dt} = \frac{d(pV)}{dt} = p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt}$$

当压力 $p = \text{const}$ 时

$$P_t = p \frac{dV}{dt} = pQ_v = \rho ghQ_v = \rho ghSv = Y_1 Q_m = Fv$$

式中： v ——活塞运动速度；

Q_v ——流量；

Q_m ——质量流量。

功率密度(液柱单位面积上的功率)可表示为

$$\bar{P} = \frac{P}{S} = \frac{pQ_v}{S} = pv$$

功率密度 $\bar{P}$ 的单位是 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

得比压能

$$e_t = \frac{E_t}{V} = p \quad (1.1)$$

1.1.2 容能

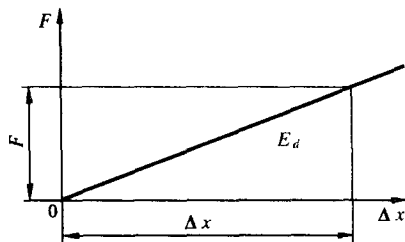


图 1-2

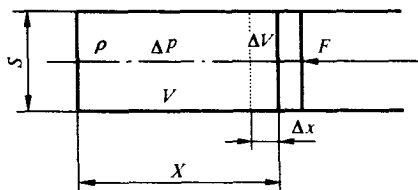


图 1-3

密闭液体被压缩后,如机械弹簧那样,将积聚能量,并极大地影响着液压系统的动态特性,本书称之为容能,符号为 E_d 。假定引起液柱变形的力 F 与液柱形变长度 Δx 呈线性关系,如图 1-2 所示。