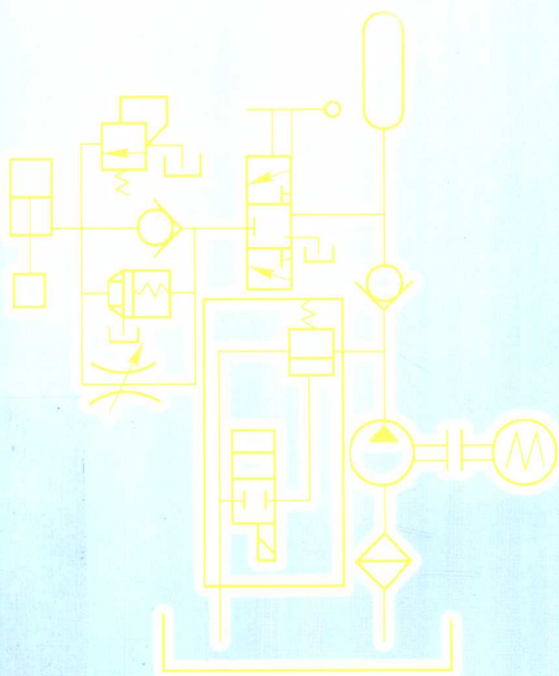


液压系统建模 与仿真

李永堂
雷步芳 编著
高雨茁



冶金工业出版社

液压系统建模与仿真

李永堂 雷步芳 高雨茁 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2003

内 容 提 要

液压系统包括液压的传动与控制技术,先进的液压传动与控制技术是机械、电子与计算机仿真技术等共同结合的结果。

本书共 8 章,1~3 章首先简要介绍了液压技术的基础知识,并从实用的角度介绍了液压元件、回路和系统设计;在此基础上,4~7 章叙述了液压系统动态特性研究的一般理论、方法、步骤、常用的建模理论与方法以及常用的数值积分法,重点阐述了液压大系统“灰箱”建模理论与方法,讨论了其原理、条件和模型;第 8 章介绍了基于“灰箱”建模法的计算机自动建模与仿真技术以及液压系统计算机辅助设计技术。

本书可作为高等学校机械专业本科生和研究生的教学参考书,也可供工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

液压系统建模与仿真/李永堂等编著. —北京:
冶金工业出版社,2003.2

ISBN 7-5024-3205-1

I. 液… II. 李… III. ①液压系统—系统建模
②液压系统—系统仿真 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 103885 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 张 卫(联系电话:010-64027930) 美术编辑 王耀忠

责任校对 侯 珺 责任印制 牛晓波

北京鑫正大印刷有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2003 年 2 月第 1 版,2003 年 2 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;11.5 印张;305 千字;352 页;1-4000 册

28.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

Copyright © 2006 John Wiley & Sons, Ltd.

对液压系统进行动态特性分析的理论与方法有多种,各有其特点。随着科学技术的发展和电子计算机尤其是微型计算机的普及,数字仿真技术已成为液压系统动态特性分析最实用有效的方法和手段。在用数字仿真方法分析液压系统动态特性的过程中,如何建立一个准确、适用、便于仿真的数学模型则是保证数字仿真周期短、费用低、结果准确可信的前提和关键。

本书简要介绍了液压技术的基础知识,并从实用的角度介绍了液压元件、回路和系统设计。在此基础上叙述了液压系统动态

特性研究的一般理论、方法、步骤、常用的建模理论与方法以及常用的数值积分法,重点研究了液压大系统“灰箱”建模理论与方法、基于“灰箱”建模法的计算机自动建模与仿真技术以及液压系统计算机辅助设计技术。

本书可作为高等学校机械专业本科生和研究生的教学参考书,也可供工程技术人员阅读。由于作者水平有限,书中不妥与不足之处,敬请读者和同行批评指正。

作 者

2002 年 10 月

主要物理量符号

A	面积,幅值	p	压力
B	阻尼系数	P	功率
C	流量系数,液容	q	流量
d	直径	r	半径
e	电压	R	液阻,摩擦阻力
F	力	Re	雷诺数
F_e	电磁力	T	转矩
G	液导,传递函数	u	流速
h	步长,高度	v	平均流速,速度
h_w	能量损失	V	体积,排量
κ	体积压缩系数	x	位移
K	体积弹性模量	γ	重度
K_s	弹簧刚度	ρ	密度
K_v	液动力系数	ζ	系数,阻尼比
K_f	黏性阻尼系数	ω	频率
l	长度	ν	运动黏度
L	液感	λ_c	泄漏系数
m	质量	θ	角度
n	转速	η	效率

目 录

主要物理量符号

1 绪论	(1)
1.1 液压传动与控制技术发展概况	(1)
1.2 液压传动与控制系统的特点	(7)
1.3 液压系统动态特性研究概述	(9)
2 液压技术基础知识	(15)
2.1 液压介质及其特性	(15)
2.1.1 液压介质的分类及特点	(15)
2.1.2 液压介质主要物理性质	(17)
2.1.3 液压介质的技术性能	(19)
2.1.4 液压介质的选择和使用	(22)
2.1.5 液压系统污染控制	(23)
2.2 液压流体力学基础	(27)
2.2.1 流体静力学基础	(27)
2.2.2 流体动力学基础	(30)
2.2.3 流动液体压力损失计算	(38)
2.2.4 小孔及缝隙的流量计算	(45)
2.2.5 液压冲击与空穴现象	(54)
3 液压传动与控制系统	(59)
3.1 液压元件	(59)
3.1.1 液压泵和液压马达	(59)
3.1.2 液压缸	(78)

3.1.3 液压控制阀	(84)
3.1.4 辅助装置	(115)
3.2 典型液压回路	(123)
3.2.1 压力控制基本回路	(123)
3.2.2 方向控制基本回路	(130)
3.2.3 速度流量控制基本回路	(133)
3.2.4 其他基本回路	(143)
3.3 液压传动与控制系统设计	(148)
3.3.1 主机工况分析和明确设计任务	(149)
3.3.2 液压系统的方案设计	(149)
3.3.3 液压系统的参数设计计算	(153)
3.3.4 拟定液压系统原理图	(154)
3.3.5 液压元件的选择计算	(154)
3.3.6 液压系统的验算	(156)
3.3.7 绘制工作图、编制技术文件	(157)
3.3.8 液压系统设计实例	(157)
3.4 液压伺服控制系统	(160)
3.4.1 液压伺服系统工作原理	(161)
3.4.2 液压伺服系统的组成和分类	(163)
3.4.3 液压伺服系统的优缺点及应用	(165)
4 液压系统动态特性分析	(168)
4.1 液压系统动态设计方法	(168)
4.2 用经典的控制理论分析元件和系统	(171)
4.2.1 液压泵的动态特性分析	(173)
4.2.2 液压缸的动态特性	(179)
4.2.3 溢流阀的动态特性	(185)
4.2.4 开关型阀控缸系统动态特性	(189)
4.3 液压系统动态特性数字仿真方法	(193)
4.3.1 面向状态方程的数字仿真	(194)

4.3.2	面向传递函数的数字仿真	(196)
4.3.3	面向系统方块图的数字仿真	(196)
5	液压系统常用建模方法	(198)
5.1	液压系统及其数学模型	(199)
5.1.1	系统概述	(199)
5.1.2	模型概述	(203)
5.1.3	液压系统的描述及其特性	(206)
5.2	解析法建模	(207)
5.2.1	微分方程模型	(208)
5.2.2	传递函数与方框图	(209)
5.2.3	信号流图	(210)
5.3	状态空间法建模	(212)
5.3.1	系统状态和状态变量	(213)
5.3.2	系统状态变量模型	(213)
5.3.3	解析法建状态变量模型	(215)
5.4	功率键合图法	(221)
5.4.1	功率键合图的特点	(222)
5.4.2	功率键合图的构成和符号	(222)
5.4.3	功率键合图的绘制	(235)
5.4.4	从功率键合图导出状态方程	(240)
5.4.5	功率键合图法应用实例	(241)
6	“灰箱”建模方法	(246)
6.1	“灰箱”建模法步骤和特点	(248)
6.1.1	“灰箱”建模法的指导思想与建模原则	(248)
6.1.2	“灰箱”建模法步骤	(249)
6.1.3	“灰箱”建模法的特点	(250)
6.2	“灰箱”建模法原理	(250)
6.3	液压系统子模型	(253)

6.3.1	油泵	(254)
6.3.2	工作缸	(254)
6.3.3	溢流阀	(255)
6.3.4	插装阀	(256)
6.3.5	电磁换向阀	(257)
6.3.6	蓄能器	(257)
6.3.7	单向阀	(258)
6.3.8	液控单向阀	(258)
6.3.9	节流阀	(259)
6.4	液压系统参数辨识	(259)
6.4.1	辨识概念	(260)
6.4.2	液压系统参数辨识	(261)
6.4.3	“灰箱”建模参数辨识算法	(262)
6.5	计算机辅助建模	(264)
6.5.1	液压系统自动建模软件结构	(264)
6.5.2	液压系统原理图的绘制	(266)
6.5.3	数据库的建立与访问	(268)
6.5.4	液压系统建模与仿真信息的输入	(270)
6.5.5	数学模型的自动组合及调整	(273)
6.5.6	仿真模型的自动转换	(274)
6.5.7	自动建模软件的特点及应用	(275)
7	数字仿真算法与程序	(279)
7.1	仿真计算中的几个问题	(280)
7.1.1	数字仿真中的精度分析	(280)
7.1.2	算法的数值稳定性	(281)
7.1.3	刚性问题与条件数	(283)
7.1.4	步长的控制与误差、数值稳定性的关系	(284)
7.2	数值积分法基本原理	(285)
7.3	四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)法	(286)

7.3.1 基本公式与计算式	(287)
7.3.2 精度分析	(287)
7.4 库塔-墨森(Kutta-Merson)法	(289)
7.4.1 基本公式	(289)
7.4.2 误差判据	(289)
7.4.3 计算式	(289)
7.4.4 步长选择规则	(290)
7.5 吉尔(Gear)法	(290)
7.6 MATLAB 软件在数值计算中的应用	(292)
7.6.1 MATLAB 简介	(292)
7.6.2 MATLAB 基本内容和使用方法	(293)
7.6.3 SIMULINK 简介	(294)
7.7 液压系统建模与仿真程序包(PMDSHS)简介	(295)
7.7.1 PMDSHS 程序包结构和特点	(295)
7.7.2 PMDSHS 程序包中控制变量和主要 标识符说明	(297)
7.8 液压系统建模与仿真实例	(299)
7.8.1 1000J 液压锤液压系统工作原理	(299)
7.8.2 1000J 液压锤液压系统拓扑结构图	(299)
7.8.3 1000J 液压锤液压系统各种动作循环的 数学模型	(304)
7.8.4 1000J 液压锤液压系统数学模型的 参数辨识	(306)
7.8.5 1000J 液压锤液压系统的数字仿真	(307)
8 液压系统计算机辅助设计	(315)
8.1 液压锤液压系统 CAD 程序包结构	(315)
8.2 数据库的建立与访问	(317)
8.2.1 FoxPro 2.6 数据库结构	(318)
8.2.2 FoxPro 2.6 数据库的建立、修改和查询	(319)

8.2.3	液压锤液压系统 CAD 数据结构分析·····	(319)
8.2.4	用 Borland C++ 语言直接访问 FoxPro 数据库 ·····	(320)
8.3	图形库的建立与原理图的绘制 ·····	(323)
8.3.1	AutoCAD 中型的定义及图形库的 建立方法 ·····	(323)
8.3.2	液压系统 CAD 图形库的建立及原理图 的绘制 ·····	(324)
8.4	液压锤液压系统计算机辅助设计 ·····	(325)
8.4.1	6.3kJ 砧座微动型液压锤的结构、原理 及主要技术参数 ·····	(325)
8.4.2	液压系统设计过程分析 ·····	(326)
8.4.3	液压系统参数计算 ·····	(328)
8.4.4	液压元件的计算和选择 ·····	(334)
8.4.5	6.3kJ 液压锤液压系统数学模型 ·····	(338)
8.4.6	液压锤液压系统仿真模型的生成 ·····	(344)
8.4.7	仿真结果与分析 ·····	(345)
8.4.8	液压原理图的绘制与输出 ·····	(346)
索引·····		(347)
参考文献·····		(351)

1 绪 论

1.1 液压传动与控制技术发展概况

流体传动技术是指利用压力流体产生、控制和传递动力的技术,而以矿物油、水和乳化液等液体作为工作介质的流体传动称为液压传动技术。有人把液压传动称为推动现代工业运动的“肌肉”,这是因为在现代工业中液压传动技术几乎应用于所有机械设备的驱动、传动和控制,例如利用液压传动技术操纵汽车转向和制动;控制飞机飞行;驱动和控制机床、推土机、收割机、采矿机械、食品机械以及医疗器械等等。在某种意义上可以说,几乎在各类现代工业产品中都可以看到液压传动技术的应用。

液压传动系统的设计是为了完成具体的工作,它是由动力元件产生压力液体,经过控制元件和管道将压力液体输送到工作油缸或马达,再通过工作油缸和马达将液体压力能转变为机械功,驱动和控制各种机械设备,完成预定的工作。各种控制元件和执行元件用来保证液压传动与控制过程的平稳、精确、高效和安全。

液压传动系统所传递的力和功率的范围几乎不受限制,大到驱动成千上万吨的大型水压机,小到各种微型设备和精密设备的控制系统。只要管道足够长,液压系统可以实现大功率的远距离传递。液压传动系统的控制精度也是惊人的,例如机床工业应用液压传动技术,往复运动中的位置误差可控制在千分之几毫米之内。由于液压传动系统具有这种柔性和可控性,所以可为各种工业设备提供动力,并保证执行机构平稳、精确、安全和高效地工作。

流体传动技术的应用可以追溯到早期人类文明,例如古巴比伦人、古埃及人利用水利学原理,通过划桨来为船提供动力;我国两千多年前李冰父子带领人民开凿的都江堰水利工程,成功地利

用水利工程技术实现成都平原的灌溉,造福百姓;我国古代利用水的滴漏来计算时间等等。后来,流体传动技术发展利用水轮机提供动力,用于驱动磨面和木材加工机械。但是,这种流体传动技术还停留在原始状态,由于流体是自然无压状态和部分可控状态,不仅应用受到局限,而且为提供动力还需要大量流体的流动。

现代液压传动与控制技术的发展是与流体力学的理论研究成果和工程材料、液压介质、钢铁冶金、机械加工等相关学科的发展紧密联系在一起的。

液压传动基于以密闭容器中流体的静压力传递力和功率这一原理来实现。该原理即 1650 年法国人帕斯卡(Blaise Pascal)提出的封闭静止流体中压力传递的帕斯卡原理。1686 年牛顿揭示了黏性流体的内摩擦定律;到 18 世纪,流体力学的两个重要方程——连续性方程和伯努利方程相继建立。这些理论成果为液压技术的发展奠定了理论基础。1795 年英国人约瑟夫·步拉默(Joseph Bramah)发明了世界上第一台水压机,是他首先不仅利用水进行能量传递,而且进行传递过程控制,即控制水流方向,第一次将帕斯卡原理付诸实际应用,标志着现代液压技术工程应用的开始。水压机的发明还与当时钢铁冶金、工程材料的发展及一些新的制造方法的出现密切相关。但是,直到 1850 年英国工业革命之后,液压技术才逐渐应用到实际工业中。由于这时候电能还未被发现和用来作动力,因此到 1870 年液压传动技术已经被用来驱动各种液压设备,如液压机、起重機、绞车、挤压机、剪切机和铆接机等。在这些系统中,使用蒸汽机驱动水泵,在一定压力下通过管道将压力流体(水)送到加工车间,驱动各种机械设备。

然而早期的以水为介质的液压传动系统具有许多缺点,如泄漏和密封问题。水的润滑性差,工作温度范围小,零部件容易锈蚀,同时随着电气技术的发展和电机驱动的应用,这就使得直到 19 世纪末之前,液压传动技术没有明显的发展和进步。直到 1905~1908 年威廉斯(H. Williams)和詹尼(R. Janney)两位英国工程师发明了用矿物油作工作介质的轴向柱塞式液压传动装置以后,矿

物油替代了水作为工作介质,在很大程度上解决了密封和锈蚀等问题,液压传动技术的情况才有所改观。1910年及1922年海勒·肖(Hele Shaw)及汉斯·托马研制出用油作工作介质的径向柱塞泵;1926年第一套由泵、控制阀和执行元件组成的集成式液压系统在美国诞生;1936年哈里·威克斯(Harry Vickers)又发明了先导式溢流阀;特别是20世纪30年代丁腈橡胶等新型密封材料的应用,使得液压传动逐步取代水压传动,并得到迅速的发展。此外在液压元件方面还值得一提的是简·默西埃(Jean Mercier)于1950年研制成功了气液隔离式气囊蓄能器。

从第一台水压机出现到现在已有二百多年的历史了,其中经历两次世界大战,特别是第二次世界大战期间,由于军事工业迫切需要反应快、动作准确、功率大的液压元件、液压传动系统和伺服控制系统,以便用于飞机、坦克、高射炮、军舰、潜艇等装备和武器方面的控制系统以及雷达、声纳的驱动系统,促进了液压技术及其自动控制技术方面的进一步发展。第二次世界大战以后,液压技术的研究与应用得到了迅速发展,美国麻省理工学院的布莱克本(Blackburn)、李诗颖等人对液压伺服控制问题作了深入的研究,于1958年制造出了喷嘴挡板型电液伺服阀,1960年发表了《流体动力控制》这本作出杰出贡献的重要著作。液压技术的应用也迅速转入民用工业,在机床、工程机械、船舶机械、锻压机械、冶金机械、农业机械以及汽车工业、航空航天工业等部门得到了广泛应用。由于伺服阀的造价高,抗污染能力差,20世纪60年代末,比电液伺服阀价廉、维护容易且具有一定控制精度的电液比例阀应运而生。由于矿物油易燃,在高温、明火、矿井等特殊环境下,乳化液等合成流体逐步取代了矿物油作为液压系统的工作介质。经过近半个世纪的进一步发展,液压技术已成为包括动力传动、控制、检测在内的,对现代机械装备的技术进步有重要影响的基础技术,已广泛用于各工业部门和领域。例如,国外生产的95%的工程机械、90%的数控加工中心、95%以上的自动化生产线都采用了液压传动技术。液压技术的应用对机电产品质量和水平的提高起到了极

大的促进和保证作用,世界上先进的工业国家均对液压技术的发展给予了高度重视,采用液压技术的程度已成为衡量一个国家工业水平的重要标志。

我国从 20 世纪 50 年代末期开始发展液压工业,其产品最初只应用于机床和锻压设备,后来才用到其他类设备上。自 1964 年从国外引进一些液压元件生产技术后,即着手进行自行设计、研制和生产,初步形成了从低压到高压的各种液压元件系列,并在各种机械设备上得到广泛的应用。特别是 20 世纪 80 年代到 90 年代,随着改革开放政策的实施,国家对液压行业进行了重点改造,有计划地加速了对国外先进液压元件和技术的引进、消化、吸收工作,扩大了与美国、德国、日本、意大利等国液压行业的技术交流与合作,努力在产品质量、技术性能、经济效益、人才培养和研究开发等方面追赶世界先进水平。但由于起步较晚和一些相关技术的影响,我国液压传动技术与国外先进水平相比还存在一些差距,主要表现在:产品质量不稳定,可靠性差,寿命短;一些新的应用领域如航空航天、海洋工程、生物医学工程、机器人、微型机械及高温、明火环境下的液压技术和所需的一些特殊元件,研究开发工作还不能满足需要。液压工业已成为影响我国机械工业和扩大机电产品国际交往的关键技术和瓶颈产业,迅速改变这种状况,是我国液压技术界和工业界所面临的迫切任务。

当前,液压传动与控制技术在实现高压、高速、大功率、低噪声、高可靠性和高度集成化等要求方面都取得了重大发展,在完善发展比例控制、伺服控制、开发数字控制技术以及实现机电一体化方面也取得了许多新成就。随着科学技术的进步以及为适应控制设备的使用要求和增强本身的竞争能力的需要,液压传动与控制技术仍然在不断发展,有些缺点正在不断被克服,其应用范围在不断扩大。目前液压技术的研究和发展动向主要有以下几个方面:

(1)提高效率,降低能耗。通过减少摩擦和内漏,能量回收,蓄能器的应用,二次调节负载压力、流量和功率以及用微型计算机对

液压系统进行自适应控制等手段来降低能耗。近年来,由于世界范围内能源的紧缺,各国都把液压系统传动的节能问题作为液压技术发展的重要课题,20世纪70年代后期,德、美等国相继研制成负载敏感泵及大功率电磁阀等。德国汉斯堡军事学院研究成功回收重物下降能量的开式节能液压系统。最近美国威克斯公司研制成用于功率匹配系统的CMX阀。

(2)提高技术性能和控制性能,适应机电一体化主机发展的需要。这要求开发低控功率阀门,研制适应野外条件的电液比例阀、适应各种工况的电液伺服阀、低成本比例阀以及不需要A/D、D/A转换,可以直接与计算机接口,且易于数字显示的数字阀。

(3)发展集成、复合、小型化、轻量化元件。随着液压系统复杂化程度和机电一体化要求的提高以及液压技术应用范围的扩大,要求液压元件具有高可靠性、减少配管、减少压力损失,提高效益、节约安装空间、便于维修等特点。为此,必须广泛发展集成、复合、小型化、轻量化元件。继集成块式、叠加阀式、插装式之后,近几年来又出现了将液压控制元件附加在液压执行元件或液压泵之上的一体化的复合式液压装置。

(4)开展液压系统自动控制技术方面的研究与开发。近年来,液压系统已由手动控制逐步转向数字控制和信号控制,以适应机电一体化、控制柔性化和计算机集中控制的要求。开发研制用于液压传动系统自动控制的控制元件,如按钮开关、行程开关、压力开关、温控开关、延时开关和继电器等,同时注重系统研究设计和程控软件的开发工作。

(5)加强以提高安全性和环境保护为目的的研究开发。包括水基难燃介质、无污染的纯水液压技术的研究、开发和应用,水基介质传动耐腐蚀液压元件与技术的研究与开发,以降低噪声,提高密封性能,减少泄漏。

(6)提高液压元件和系统的工作可靠性。世界各国都把可靠性作为设计、选用液压产品的重要准则。提高可靠性是一项系统工程,除靠科学的设计、先进的材料及完善的工艺外,还应注意应