

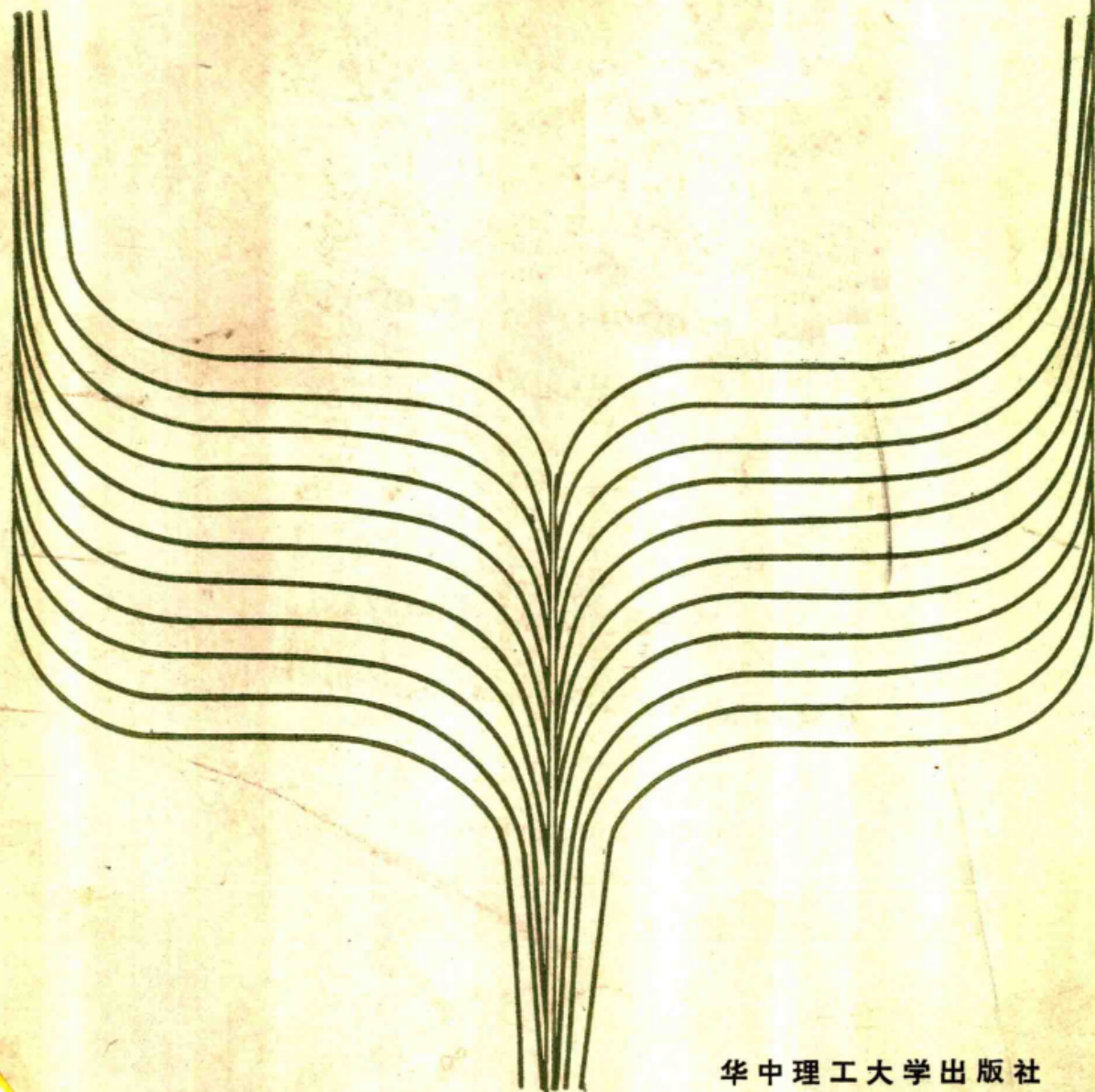
73.828
Q X S

73828
Q X S

484940

流体动力控制 原理及模拟

钱祥生 编著



华中理工大学出版社

流体动力控制原理及模拟

钱祥生 编著

华中理工大学出版社

内 容 提 要

本书通过揭示流体动力控制的本质,将液压元件、液压系统、伺服控制系统等内容有机地贯穿起来,并以此为基础,介绍了五种建立状态变量模型的方法和一个计算机仿真实例。

全书包括:流阻控制回路的分析和综合、控制反力的分析、控制中的自动调节和补偿、压力和流量的控制、能耗的控制、系统的模拟和仿真、状态变量模型的建立等十一章。通过本书的学习,读者能够较全面地掌握流体动力控制系统的现代设计和研究方法。

本书可作为高等院校流体传动及控制专业的高年级学生和研究生教材,亦可作为其他专业的学生学习流体动力控制时的主要参考书,还可供从事液压、气动和机、电、液综合自动化研究的科技人员参考。

流体动力控制原理及模拟

钱祥生 编著

责任编辑 钟小珉

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 10.75 字数: 225 000

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

印数: 1-3 000 册

ISBN 7-5609-0174-3/TK·6

定价: 1.84 元

前 言

计算机的应用把本学科的设计和研究提高到科学的、理性的、计算机化的先进水平。借助计算机进行分析、设计、仿真和控制,均需要建立数学模型。只有从原理出发,深刻地认识流体动力控制的本质,才能运用数学和计算机等知识,把实际物理问题抽象为便于计算机处理的数学模型。因此,本书试图通过对流体动力控制本质的揭示,将液压元件、液压系统、伺服控制系统等内容有机地贯穿起来,并以此为基础,介绍五种建立状态变量模型的方法和一个计算机仿真实例。本书的特点是:

(1) 从原理出发,强调本质,突出共性,用统一的观点,将本学科纵向有联系的内容横向贯穿起来,使读者对学科领域的内在普遍规律。有个清晰的概念,有利于知识的综合和深化。

(2) 在论述方式上,力求回避元件、系统的多样性和具体结构,强调对事物进行抽象——概括——推理,探索其普遍规律的思维研究方法,这种科学的方法论,有助于培养分析、综合、解决问题的能力。

(3) 介绍了五种建模方法和仿真技术的初步概念,帮助读者将计算机技术尽快地应用到流体动力控制研究中去。

本书是作者在华中工学院五年研究生教学实践中的产物,可作为液压传动与控制专业的研究生或本科生的教材,亦可作为其他机械类专业高年级学生的选修课教材,还可供从事液压、气动和机、电、液综合自动化研究的科技人员参考。

读者若具备微分方程、线性代数、控制理论、状态空间法等基础理论知识,特别是对本学科领域有关的液压元件、液压系统、伺服控制等课程有相当的基础,再读本书,得益会更大一些。

全书由西安交通大学史维祥教授主审,并提供了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

新的尝试总是有待完善的,本书在内容上和观点上值得商榷之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

一九八七年元月于华中工学院

本书采用符号汇总表

本书中, 对于同一变量、参量或常量, 尽可能采用同一字母来表示, 用附加角标的办法表示它们之间的区别。符号的选用, 除部分遵循习惯外, 多数采取与英文词意相应的字母。量纲一律使用国家法定的计量单位。同一符号用于相关的不同情况时, 用右上角加撇号的方式区别。

符号	名 称	单 位	符号	名 称	单 位
A	面积	m^2		弹簧柔度	m/N
a	通道截面积	m^2	G	阀口流量常数	$\sqrt{m^3/kg}$
a_e	排油节流孔截面积	m^2	G_c	流导	$m^2 \cdot s^2$
B	阀体的槽宽	m	G_g	气体常数	$N \cdot m/kg \cdot K$
b	宽度	m	G_r	环隙阀口流量常数	$\sqrt{m^3/kg}$
b	系数		g	重力加速度	m/s^2
C	流体容性 (流容)	$m \cdot s^2$	h	位置高度或缝隙	m
C_d	流量系数		I	流体惯性 (流感)	m^{-1}
C_e	电容	F	I_e	电流	A
C_g	充气蓄能器的流容	$m \cdot s^2$	i	指数	
C_h	比热	$J/kg \cdot ^\circ C$	J	转动惯量	$kg \cdot m^2$
C_t	总容性效应	$m \cdot s^2$	K	系数	
C_0	速度增益	s^{-1}	K_c	流量压力系数	$m^5/N \cdot s$
D	液压缸直径	m	K_e	电压常数	$V \cdot s$
d	直径	m	K_f	零位负载反力系数	
E	液体的弹性模量	Pa	K_p	压力增益	N/m^3
E_0	含气液体的弹性模量	Pa	K_q	流量增益	m^2/s
E_c	压缩能	J	K_s	弹簧常数	N/m
E_e	等效液体的弹性模量	Pa	K_{se}	等效弹簧常数	N/m
E_g	气体的弹性模量	Pa	K_t	电机输出转矩常数	$N \cdot m/A$
E_h	软管的弹性模量	Pa	K_v	零位速度反力系数	$N \cdot s/m$
E_h	热能损耗	J	L	电感	H
E_i	内能	J	L_r	杠杆比	
E_k	动能	J	L_s	系统能耗率	
E_p	压力能	J	l	长度	m
E_s	位能	J	M	扭矩	$N \cdot m$
E_t	热能	J	M	负载质量	kg
E_w	作功能	J	M_e	等效质量	kg
E_0	出力增益	N/m	m	流体质量	kg
F	力	N	m_v	阀芯质量	kg
F_{0x}	稳态液动力 (反力)	N	n	数量	
F_c	库仑摩擦力	N	n	转速	r/s 或 r/min
F_l	负载力	N	P	功率	W
F_r	液压缸的回程负载力	N	P_l	负载功率	W
F_s	弹簧力	N	p	压力	Pa
F_v	推移阀芯的力	N	p_{od}	调整压力	Pa
f	频率	Hz	p_b	背腔压力	Pa

符号	名 称	单 位	符号	名 称	单 位
p_c	控制压力	Pa	W	功	J
p_d	动压力	Pa	X	状态向量	
p_e	排出压力	Pa	x	位移	m
p_l	负载压力	Pa	x_0	弹簧预压缩量	m
p_r	额定压力	Pa	Y	输出向量	
p_s	供给压力	Pa	y	位移量或流阻调节量	m
p_{sh}	闭合压力	Pa	y_f	负载扰动误差	m
p_0	开启压力或压力起始值	Pa	y_t	总稳态误差	m
p_{0s}	压力超调比		y_v	速度误差	m
Q	体积流量	$m^3/s (L/min)$	y_0	阀的原始开启量	m
Q_e	电荷	C	Z	流阻的阻抗	$1/m \cdot s$
Q_e	排出流量	m^3/s	Z_e	电阻抗	Ω
Q_l	负载流量	m^3/s	Z_m	机械运动阻抗	kg/s
Q_p	先导阀溢流量	m^3/s	z	补偿位移	m
Q_r	额定流量或溢流量	m^3/s	α, θ, φ	角度	rad
Q_s	供给流量	m^3/s	γ	气体的绝热指数	
R	流阻	$1/m \cdot s$	δ	厚度	m
R_c	可控流阻	$1/m \cdot s$	Δ	增量	
R_e	电阻	Ω	e	液流的射入(出)角	rad
R_e	雷诺数		ζ	局部损失系数	
R_v	粘性阻尼系数	kg/s	ζ_e	等效损失系数	
R_{ve}	等效粘性阻尼系数	kg/s	ζ_l	管路损失系数	
r	半径	m	ζ_p	并联总损失系数	
r	比例系数		ζ_s	串联总损失系数	
S	拉氏算子		ζ_v	阀口损失系数	
S_c	液压缸刚度	N/m	η	总效率	
S_d	系统稳态刚度	$N \cdot s/m$	η_c	系统转换效率	
S_e	系统静态刚度	N/m	η_d	系统传输效率	
T	热力学温度	K	η_e	原动机效率	
T_t	时间常数	s	η_m	功率匹配效率	
t	摄氏温度	$^{\circ}C$	η_s	系统效率	
t	时间	s	λ_l	层流摩擦系数	
t_s	介质热膨胀率的倒数	$^{\circ}C$	λ_t	紊流摩擦系数	
t_s	关闭时间	s	μ	动力粘度	$N \cdot s/m^2$
t_0	开启时间	s	ν	运动粘度	m^2/s
U	输入向量		ξ	相对阻尼率	
U_e	电压	V	ρ	密度	kg/m^3
V	容积	m^3	ρ_e	电阻率	$\Omega \cdot m$
V_g	气体容积	m^3	Σ	求和符号	
V_h	软管容积	m^3	τ	采样时间区间	s
v	运动速度	m/s	ω	角速度	rad/s
v_m	管路内液体的平均流速	m/s	ω_n	无阻尼固有角频率	1/s

目 录

本书采用符号汇总表

第一章 导论

- §1-1 流体动力控制技术..... (1)
- §1-2 液压系统的现代研究方法..... (1)

第二章 流体动力控制的本质

- §2-1 动力系统的变量和参量..... (6)
- §2-2 流阻的控制作用..... (7)
- §2-3 动压效应及估算..... (10)
- §2-4 等效阻力系数..... (11)
- §2-5 流体的容性..... (14)
- §2-6 系统刚性..... (17)
- §2-7 流体感性及其影响..... (18)
- §2-8 机、电、液间的相似比拟..... (20)

第三章 流阻控制回路的分析和综合

- §3-1 流阻的结构形式及特性比较..... (24)
- §3-2 流阻控制单元分析..... (28)
- §3-3 桥路的组合..... (30)
- §3-4 阀控回路的性能指标..... (31)
- §3-5 基本半桥的零位指标..... (33)
- §3-6 桥路组合中的叠加法则..... (34)
- §3-7 零遮盖阀的流阻特性..... (36)
- §3-8 不对称桥路的控制问题..... (38)
- §3-9 回转运动的控制回路..... (41)

第四章 控制反力的分析

- §4-1 液动力概述..... (43)
- §4-2 基本控制单元的反力性质..... (44)
- §4-3 全桥回路的反力特性曲线族..... (47)
- §4-4 零遮盖流阻的反力特点..... (49)
- §4-5 稳态液动力的性质..... (50)
- §4-6 反力与控制性能的关系..... (52)
- §4-7 减小液动力的新措施..... (53)

第五章 控制中的自动调节和补偿

- §5-1 信息传递和反馈..... (56)
- §5-2 检测转换器..... (57)
- §5-3 机械量比较调节..... (60)
- §5-4 稳定性约束..... (61)

§5-5	液压平衡流阻调节·····	(63)
§5-6	位置误差的补偿·····	(66)
§5-7	速度误差的补偿·····	(69)
第六章 压力控制		
§6-1	压力绝对值控制·····	(71)
§6-2	压力比控制·····	(72)
§6-3	压差控制·····	(73)
§6-4	座阀式先导压力控制单元·····	(75)
§6-5	压力控制单元的稳态特性分析·····	(77)
§6-6	动态特性分析·····	(80)
第七章 流量控制		
§7-1	通断控制阀·····	(83)
§7-2	座阀式通断控制单元及机能·····	(86)
§7-3	通断控制单元的启闭过程·····	(87)
§7-4	影响启闭时间的因素·····	(89)
§7-5	流量调节单元的构成·····	(91)
§7-6	流量调节误差分析·····	(92)
§7-7	先导型流量调节单元·····	(95)
§7-8	交互反馈控制·····	(96)
§7-9	单稳流量调配控制·····	(98)
§7-10	插装式座阀小结·····	(98)
第八章 能耗控制		
§8-1	稳态流动能量守恒方程·····	(102)
§8-2	系统效率及能耗分析·····	(104)
§8-3	流阻回路效率特性·····	(105)
§8-4	流量适应控制·····	(107)
§8-5	压力适应控制·····	(109)
§8-6	功率适应控制·····	(114)
§8-7	功率匹配控制·····	(115)
第九章 建模基础		
§9-1	系统的模型化·····	(117)
§9-2	数学模型的构成及建模步骤·····	(118)
§9-3	两种基本分析方法·····	(119)
§9-4	信号流图简介·····	(121)
§9-5	键合图简介·····	(123)
第十章 状态变量模型的建立		
§10-1	概述·····	(127)
§10-2	状态空间法的基本概念·····	(128)
§10-3	微分方程转化法·····	(130)
§10-4	传递函数变换法·····	(133)

§10-5 信号流图法.....	(136)
§10-6 键合图法.....	(139)
§10-7 大系统分析法.....	(146)
第十一章 系统的仿真	
§11-1 概述.....	(152)
§11-2 模拟机仿真和数字机仿真.....	(153)
§11-3 数字仿真系统简介.....	(155)
§11-4 系统仿真实例.....	(157)
参考文献	

第一章 导 论

计算机技术的发展和普遍应用,给在机、电技术之间起纽带作用的流体动力控制技术带来了巨大的影响。把计算机应用技术、现代控制理论、优化设计理论等应用到本学科中,已成为促进流体动力控制技术发展的一项重要工作。

§1-1 流体动力控制技术

流体动力控制技术是一种以流体为对象,研究如何控制其动力的产生和传递的技术。当以流体作为传递动力和信号的介质时,要想发挥其应有的功能,就必须熟悉其控制原理,并且对它进行有效的控制。

70年代末,流体动力控制技术逐步地进入了一个新的发展阶段,这一时期的主要特点是:对液压泵、液压马达的研究着重于对其性能的提高;重视各种变量泵的研究和应用;阀类的品种和控制形式的多样化;单纯元件的研究逐步向整体式部件及系统的方向发展。流体动力控制技术之所以能够迅速地发展,是因为有下述原因所导致:

(1) 微型计算机及其在工业中的应用,大大地推动了新型电液控制元件的开发和研究,如数字式电液控制元件、高速切换元件、比例控制元件、非滑阀式新型控制元件等。

(2) 随着宇航部门先进的电气传动技术的推广应用,民用部门也出现了一些高性能的电气元件,例如小惯量无槽转子直流电机,它具有转矩大、低速性能好、频带宽等特点,这就使得在一些功率较小的控制系统中,电液控制有被纯电气控制取代的可能。这种挑战,迫使流体动力控制行业必须加速技术更新,在发扬本学科技术优点的基础上,全面改善元件的性能,研究控制技术,并通过集成化、小型化等措施来扩展自己的应用领域。

(3) 机电一体化技术发展的影响。由于液压技术在机械电气传动控制技术中起着桥梁作用,因此机电一体化在广泛的意义上说,就是液电一体化或机电液一体化。而液电一体化,使得由电气和液压元件组成的密集整体化的多功能部件正在逐步替代单功能元件,这种多功能部件既可看成是一个部件也可看成是一个局部系统。专业工厂逐步承担起将基础元件组成局部系统或完整系统的任务,具有一定功能的系统将以商品的形式直接提供给用户,这是技术进步和液电一体化的必然结果。因此,加强流体动力控制技术研究的迫切性和重要性更突出了。

(4) 世界范围内的能源危机使人们对能耗的问题更加重视。过去流体传动的优点把需消耗大量矿物油介质和能量转换效率很低等缺点掩盖了。能源问题尖锐化以后,不仅忽视传动效率的时代已经结束,而且掀起了研究非油代用介质的热潮。因此围绕着流体动力控制使用新型介质和重视能量的利用两个方面提出了许多新的控制课题。当前,流体传动和控制的效率已成为方案取舍的重要衡量指标。这些都要要求必须加强流体动力控制技术的研究和革新,才能适应整个科学技术发展的需要。

§1-2 液压系统的现代研究方法

把研究对象当作“系统”来看待是现代研究方法的基本思想。所谓系统,是指相互间具

有有机联系的许多单元要素结合起来，所构成的一个能完成特定功能的集合体。因此，系统不是一个不可分解的要素，而是一个可以分成许多部分的整体；也不是多个要素的简单集合，而是多个要素相互依存、相互作用，最后使整体具有某种特定功能、有规可循的集合。系统分析方法，主要是研究这些要素按什么关系组成系统，并探索满足系统多目标要求的要素之间的最佳关系。

单元要素的具体含义，决定于研究的对象和范围。就液压技术领域而言，单元要素不仅可以指组成系统的元件、组件、管路等，也可以指构成元件、组件的某些零件。例如压力阀，就可单独地视为一个系统来研究它的调节控制特性。必须指出，本书论及的系统分析方法也适用于对元件性能的分析研究。

系统分析方法论的基本特点有下列两点。

1. 整体观点

即把研究对象以及它周围的有关环境视为一个系统整体，而研究对象只是其中的一个子系统。在研究过程中，处理子系统与系统整体间的矛盾，或子系统与子系统之间的矛盾，都应从总体协调的观点出发来选择解决办法。

例如，研究一个压力阀元件，首先应把它本身视为一个系统，而且认为它仅仅是总系统整体中的一个子系统，因而它的性能将受到总系统性能要求的约束。把元件看成子系统，并把它放到总系统中去研究，可以避免过去孤立地研究元件的弊病。传统的研究分析方法，常常把事物看成是孤立的，因而所得的结论往往只适应于某个局部条件。如果把事物放到不同的或更大的系统中去考察，那么所得的结论就可能是片面的，甚至是错误的。

尽管流体动力系统是由元件有目的地组合而成的，但绝不能简单地理解为机械地并合。因为，同样质量的元件，可以组合出性能相差悬殊的系统，这点十分重要。例如，国外报导：在阿波罗宇宙飞船中用到的七百多万个零件，并没有什么十分新颖的特点，但经过周密地、巧妙地组合，却成了能把人送到月球上去的飞船。因此，重视提高流体动力元件的质量是正确的，而认为只有等待元件质量提高后才能谈改善系统性能，因而忽视系统研究则是片面的。只要组合得巧、应用得好，可以一定程度地弥补元件在质量上的弱点，设计出性能良好的系统来。反之，元件虽好，但组合不当，也得不到好的系统。

2. 综合观点

一个系统，往往是涉及各种技术和知识的综合体，必须对它进行综合的研究。例如现代自动化控制系统，往往是机、电、液技术综合应用的系统，各组成部分之间的关系，揭示得愈清晰、深刻、精确，就愈能得到最佳的综合效果。显然，仅定性地研究是做不到这一点的，必须把系统抽象化和数学化，采用概率论、数理统计、最优化技术等方法，运用电子计算机，借助模拟、仿真技术，进行大量数据处理和分析计算，才能得到最优的决策。

综合观点尚表现在，充分地考虑到技术要求以外的社会要求，即对象系统与外部（环境）系统间量的关系。虽然传统的研究方法，也曾顾及了简单、经济、可靠等社会要求，但主要是凭借技术人员的经验，缺乏科学的评价标准和方法，故出现片面性是难于避免的。总之，综合观点要求在各个方面对研究对象进行全面的分析和综合。

液压系统的现代研究方法包含着丰富的内容，虽然现在已初具成效，但还不够完善，有待继续深入探索和充实。到目前为止，大体上可将它归纳成液压系统的模拟技术、辨识技术、仿真技术、优化技术以及计算机辅助设计（CAD）等五个方面。

1. 模拟技术

把一个具体的系统实体抽象成物理模型,是人们较熟悉的研究方法。现代研究方法要求,对系统的研究不能只停留在建立物理模型的阶段上,而是要用数学符号和解析表达式,将其物理本质、系统参数间的内在关系以及状态描述出来,用变量、参量及其函数关系来表述系统属性,这样建立起来的模型称为数学模型。针对某具体系统,根据基础科学和应用科学的理论和定律,从确立模型结构(包括确定系统边界、系统属性、输入输出变量等)、提供数据,到列出能替代系统实体的、以数字和符号表示的解析表达式,这整个过程就称为系统的数字模拟过程。

建模是现代研究方法的首要环节,必须在对系统的工作原理和控制过程的本质的透彻了解基础上,才能建立起较准确地反映实际情况的模型。

解析建模法是以物理定律和理论推导为基础,进行必要的试验测试,以得到某些系数和参数,从而建立起模型。这种方法有物理概念明确的优点,但存在如下一些局限性。

(1) 液压系统往往有某些系数“软量”,如粘性阻尼系数、流量系数等等。准确地测量这些系数“软量”并不容易,因此欲获得准确的解析模型也就十分困难。

(2) 建模时,若细致分析各种因素,就会获得阶数较高、结构复杂的解析表达式。如对先导式溢流阀,可建立起六阶甚至更高阶次的微分方程模型。由于液压系统的固有特性,这些方程常属于“病态”方程,计算机处理时麻烦、费时。

(3) 许多复杂系统,存在交叉耦合、内部非线性等因素,因而用解析法推导系统模型时,不得不进行人为简化,这样会造成模型难于与实际相符。

辨识建模法可以克服上述缺点。

2. 辨识技术

系统辨识技术是一种以动态实验为依据的建模方法,实质上也是一种对系统的输入和输出数据进行检测,运用必要的数学手段,借助计算机对数据进行处理,以获得系统数学模型的技术。这种技术,并不需要对系统对象了解很多,甚至可以完全不了解,而只需准确地检测到该系统的输入、输出信号,就能较准确地获得该系统的等价模型。辨识技术能解决较复杂系统的建模问题,因此发展很快,已成为建立系统模型的强有力的工具,且日益为工程界所重视。下面介绍几种辨识方法。

以经典控制理论为基础的时间响应辨识法是借助试验和测量,作出阶跃响应曲线,然后用典型的三阶以下的数学模型去逼近,从而获得低阶近似的数学模型的方法。这种方法常会因信息量较少,使得拟合的模型精度不高。频率响应辨识法,能从测试获得的波德图(Bode diagram)中拟合出较好的模型,但需在不同的频率下进行反复地测试,花费许多的时间。用上述两种方法判明系统内在结构和参数间相互关系的辨识过程,均只能在“离线”状态下进行。

基于现代控制理论的伪随机信号(白噪声)相关辨识法,是一种可实现“在线”辨识的先进辨识技术。它是在输入信号上直接叠加微小的伪随机信号,以保证不影响系统的正常工作,然后研究该信号的输出变化。因此这种在线辨识技术能更直接地、更准确地获得反映系统真实工作状态的模型,并大大缩短建模时间,同时为实现计算机在线控制创造了条件。

基于经典控制理论和现代控制理论的常规辨识法,都是利用系统的输入与输出信息来建立系统模型的。在实际中常会遇到这样两种情况:(1)被观测的系统不具体,或被观测的系统虽然具体,但其边界条件不清楚,均无法确切获得系统的输入;(2)系统的输入虽是可观的,但系统处于严重的噪声干扰之中,因而所获得的输入不能反映真实的情况。在这两种

情况下,采用常规辨识方法是难于处理的,可采用近年来发展十分迅速的时序分析法,将动态数据进行系统处理,以获得等价系统的数学模型。

所谓时序分析,是指对有顺序的观测数据的分析、研究及处理。按时间顺序依次排列的观测数据,是相应系统在一定外界作用(输入)下的响应(输出)。产生观测数据的现象或过程,是相应系统的一种运动状态。将这种动态信息进行系统处理,不但使揭示出的数据间的相互关系变得简单,而且能使数据分析和研究的内容更加广泛、深入。经过处理原始的、零散的数据,就会逐步找到规律性,从而获得能描述系统工作状态的数学模型。

时序分析法,在系统的辨识、未来行为的预测与控制、故障的监视与诊断等方面,无疑是有很大实用价值的。但是这种动态数据的系统处理方法在流体动力控制技术领域中的应用,还是个有待开拓的新课题。

3. 仿真技术

直接用系统实体来进行实验,充其量只能暴露系统存在的某些问题,并不能指出系统的全部问题及其产生的原因,若采用计算机仿真技术进行分析研究,则能很好地解决这些问题。计算机仿真是不断地改变输入或干扰信号,用计算机对系统动态数学模型求解的过程。采用这种技术社会效益很大。例如,在英法合作的协和式飞机研制过程中,由于采用了仿真技术,使研制周期缩短了 $1/6 \sim 1/8$,费用节省了 $15 \sim 25\%$,故仿真技术已成为研究系统特性的重要手段。

理论解析模型和辨识模型往往不能直接被计算机所接受,只有用数值算法对其进行离散化处理,才能得到计算机能够接受的模型。故仿真还包括所谓“二次模化”过程和编程过程。最近,国外发展了连续系统仿真用语言 CSSL (Continuous System Simulation Language),比通用语言更方便。

计算机仿真技术使得人们可以对物理性质截然不同的各种控制系统进行仿真研究,对偶然或意外事件作出预测。这相对于直接用系统实体做试验的研究方法来说,其工作量小、周期短、费用省。

仿真可以在建模过程中验证所建立的数学模型是否有效,从这个意义上说,仿真即可理解为建模手段之一。经过仿真,可以了解初次模型所具有的特性是否反映了系统原型的性质。如果不是,则修改、校正初次模型,再仿真,直到对模型满意为止。仿真过程时常是伴随着建模过程的。仿真技术是一种通用的技术,在本书最后一章中,将简单地介绍有关仿真的基本知识。

4. 优化技术

优化技术是指在系统设计或分析过程中,借助优化理论从所有可行的方案中,择优选择一个最好的方案来。这是 70 年代才开始较普遍用于工程上的一种新技术。优化的过程首先要解决一个判别方案优劣的标准问题,然后根据所定的标准,在技术条件允许的范围内,去寻找一个或少数几个最好方案。

系统最优化,就是在一定条件下,分析系统的特性,改变有关参数,使得系统具有最佳功能。也就是说,要使系统的目标函数在约束条件下达到最大或最小。解决最优化问题的数学方法就称为最优化方法。

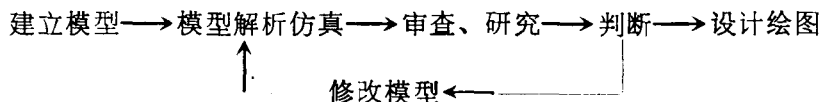
计算机用于设计,加快了优化设计发展的进程。现在,只要把最优化问题表示成数学模型,借助于优化理论和计算机运算,就可以设计出考虑了约束条件的最优系统来。

在进行系统最优化时,应根据最优化问题的性质,选择合适的优化方法,才能获得满意

的效果。

5. 计算机辅助设计 (CAD)

应用计算机单纯完成运算过程,并不能使工程技术人员从繁重的脑力劳动中解放出来,因为人类脑力思维范围和能力远远超过数字计算。CAD(计算机辅助设计)的出现,才能将人类从繁重的脑力劳动中解放出来。不仅如此,CAD的出现还将使设计过程走向半自动化和自动化。CAD的更高形式是计算机自动设计,它能完成如下所示的全部功能。



由此可见,仅仅完成模型解析仿真运算,充其量只能把它叫做计算机辅助分析。虽然,目前还未达到计算机自动化设计阶段,但真正的CAD起码应理解为:具有模型库、数据库和较完善的外围设备,计算机除了承担一般复杂运算功能外,能完成优化处理、仿真以及图形显示,通过人机对话及光笔修改能重新进行设计和运算并自动择优,最终获得满意的结果。简言之,能进行人机交流,替代人的部分思维,并能完成择优过程,真正地起着一个优秀设计助手作用,才算是全面的计算机辅助设计。

综上所述,液压系统研究方法现代化的重大意义在于:

(1) 凡人所承担的常规、单调、重复性的工作,如冗长的数字分析运算,都可交由计算机来完成,而科技人员的精力则着重花在创造性的工作方面。其效果相当于人脑功能的扩展,科技人员生命的延长。

(2) 样机造出之前,即在设计的早期阶段,就能根据计算机仿真,发现存在的缺陷和可能的故障,并设法加以改进和排除,这样能使产品从研制到投产的时间大大地缩短,费用大大地降低。

(3) 仿真技术能够完成由于仪器、设备费用太大,而难于实现、甚至不能实现的实验,如多方案对比实验、极限承载能力破坏性实验等等,从这个意义上讲,它所起的作用超出了现代化实验室所能起的作用。

(4) 能在很复杂的多目标、多约束条件情况下,将全部可能的方案进行筛选,寻求出最优方案。

(5) 避免了对元件孤立地进行研究,为把元件放到系统中去综合起来研究创造了有利的条件。这不仅有利于促进对原有元件的改进,而且可促进新功能元件的构思和开发。

科学技术的发展,必然会导致世界商品市场的竞争加剧,促使各国都把产品的更新和开发作为企业竞争的重要手段。而对产品的设计周期要求愈来愈短、对产品的质量要求愈来愈高,将迫使人们去寻求高效率、高质量的研究手段和方法,这也是促进现代研究方法发展的社会动力。总之,形势要求流体动力控制科技工作者,不能只停留在过去的那套以经验为主的静态设计研究水平上,而应尽快地过渡到计算机辅助优化设计的现代研究水平上来。

必须指出:以借助计算机为主要手段的现代研究方法亦不是万能的,传统的试验法、类比法还是有用的。只有在获得可靠的模型和数据的前提下,仿真及优化设计的结果才能比较符合于实际。

第二章 流体动力控制的本质

流体动力控制问题可抽象、概括为压力(P)、流量(Q)两个变量与流阻(R)、流容(C)、流感(I)三个参量之间的关系问题。弄清它们之间相互联系、相互制约的内在规律后,就能揭示流体动力控制系统所固有的、决定其性质的根本属性。这就为建立简洁、正确的数学模型打下了基础,也为把机、电、液系统统一起来进行综合研究提供了理论依据。

§2-1 动力系统的变量和参量

量是人们认识、分析、区别事物的一种重要参数,建立模型更离不开量。数学模型就是由常量、变量、参量以及它们之间的函数关系四部分组成的。建立一个简洁、实用的数学模型,需要弄清:哪些量对系统的影响是很小的,因而可以不予考虑;哪些量虽然对系统有影响,但不是研究的对象;哪些量真正揭示了事物本质,是需要着重研究的目标量。

对于性质不同的各种动力系统,可以根据它们的物理相似性,找到它们之间具有的相类似的广义量。认识这种共性规律,在研究它们时,有利于理论上的相互借鉴,有利于对复杂系统的综合分析。本节讨论的变量和参量,对机、电、液、气动力系统都是适合的。

任何动力系统欲要推动外负荷而作功,不仅要具备内在的作功能力,称广义变量“势”(effort),而且要有传递能量的载体,称广义变量“流”(flow),势表征动力系统具备的潜在的作功本领,是作功的内在依据,流则是作功的外部表现。对任何动力系统来说,两者都必须具备,缺一不可。然而,对于不同性质的动力系统,势和流有其特定的内容和名称;在机械系统中是指“力”和“速度”;在电气系统中是指“电压”和“电流”;在流体(液体和气体)动力系统中则是指“压力”和“流量”。任何动力系统势和流,皆是随工作点的位置不同而变化的,而且它们受许多因素的影响,甚至是随时间而变化的,故称之为动力系统的两个基本变量。研究它们的性质、相互关系以及与其他参量之间的制约规律,正是实现动力系统有效控制的核心问题。

势(e)和流(f)具有以下主要性质:

- (1) 势流之乘积就是单位时间内所作的功称为功率(P),即

$$P = ef.$$

- (2) 稳态工作状态下,流决定于势,产生单位流变所需的势变,就是表征系统性质的阻性(R),即

$$R = \Delta e / f.$$

- (3) 一般情况下,势、流的瞬态值之比称为阻抗(Z),即

$$Z = e(t) / f(t).$$

- (4) 势与流对时间的微分成正比,流与势对时间的微分成正比,即

$$e(t) = I \frac{df(t)}{dt}, \quad f(t) = C \frac{de(t)}{dt},$$

式中, I 和 C 为比例系数,它们均具有重要的物理意义:系数 C 定义为流与势对时间变化率的比值,表示系统的容性;系数 I 定义为势与流对时间变化率的比值,表示系统的感性。容性和感性不同于阻性,它们均具有贮、放能量的性质,所以它们是决定系统动态特性的两个

重要参量。而阻性仅具有耗能性质，是决定系统稳态性能的参量。

任何动力系统工作时都占有空间和时间，当介质的诸运动参量在空间的变化相对于时间的变化可以忽略不计时，就可近似地以空间某一点或几点的运动参量去表征它们，以“集中”参数的模式来描述它们。这就是工程中普遍应用的集中参数法。在流体动力系统分析中，此法就是把系统的各种变化视为由流阻、流容、流感三个参量的变化所引起的，并认为它们集中发生在研究区域的某几个点，同时忽略了它们三者之间的相互影响。将影响系统性能的结构因素，按性质抽象归纳为流阻、流容、流感三个集中参量，实质上是将一个有无限多自由度的系统用一个单自由度的系统去近似，实践证明这种处理方法，在管路不十分长时，是接近实际情况的，不致产生实质性的误差。集中参数的近似处理方法为研究流体动力系统带来了极大方便。

流体动力系统的性能决定于系统各处的压力、流量两个变量，而压力和流量两个变量又与流阻、流容、流感三个参量之间有着密切的关系，弄清这两个变量与三个参量之间的内在关系和相互制约的规律，才能实现有效控制。

§2-2 流阻的控制作用

仅由液压泵、液压缸或液压马达加上管道联接，尚不能构成一个液压动力控制系统，它至少还需要增加一个可以调节、控制的流阻 R ，才能组成一个最简单的液压动力控制系统，如图2.1所示。

众所周知，流体动力系统的控制主要表现在按既定目标，实现对流量和压力的调节和控制。在图2.1所示的回路中，只要调节可调流阻 R 的阻值，就可实现对液压缸动作的控制。假设 R 是一个普通节流阀，当节流阀口在全开状态时，由于 R 的旁路作用，泵的出口压力 p 较小，不能推动活塞。随着节流阀开口的逐渐关小， R 的阻值将逐渐增大，泵出口压力 p 将随之升高。由此可见，对 R 阻值的调节，即可实现对系统压力的控制。但是在液压缸动作以前，泵的流量仍然全部流经旁路流阻 R ， R 对流量 Q 并不起调节作用。随着 R 的阻值继续增大，泵的出口压力将不断增大，直至增大到足以克服活塞和外载的压力值后，活塞开始启动并推动负载一起向上运动，此时旁路流量开始减小。如果节流阀口继续调小，则活塞的上升速度就会不断增大；当阀口关闭时，活塞的上升速度就会达到最高。在活塞开始运动到以全流量高速上升的这段时间内，流阻 R 不仅对系统的压力起控制作用，而且对旁路流量和活塞的运动速度也起控制作用。这时，系统的压力决定于外载。反之，当流阻 R 的阻值由大变小时，随着支承外载的压力降低，活塞和负载就会一起向下运动，其下降速度也将受到流阻 R 的控制。

粘性流体在流动中无时无处不存在阻力。本节所讨论的流阻控制作用，不是指这种不可避免的、处处存在的流动阻力，而是指为了达到控制目的，由人们有意设置并加以利用的阻力。无论哪种流阻，都将导致能量损失，并以管路压降和系统温升的形式表现出来，因此流阻控制作用是以能量损失为代价的。

按流阻在系统中的工作特征，可以将流阻划分为四类：

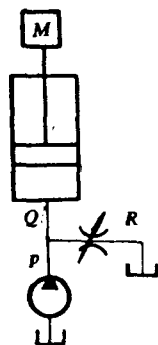


图 2.1

(1) 固定流阻 它是指过流面积固定的常通的不可调节的流阻, 其职能符号如图 2.2a) 所示。根据小孔流量特性, 其流量-压力特性曲线是呈近似二次抛物线型的, 如图 2.2b) 所示。在系统中, 常用它来作为固定阻尼或利用它产生流量或压力的检测信息。

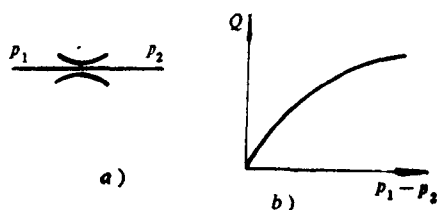


图 2.2

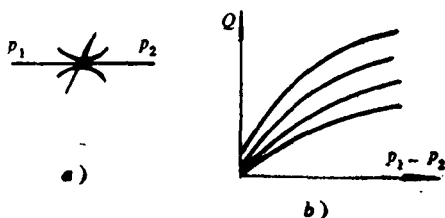


图 2.3

(2) 可调流阻 它是指过流面积可以根据需要由人工来调节的流阻, 其职能符号如图 2.3a) 所示。但它调好以后, 就是一个固定流阻。对应于每个特定的调节开口量, 就可以得出一条相应的流量-压力特性曲线, 对于全调节范围, 可以获得一组特性曲线族, 如图 2.3b) 所示。在系统中, 常用它来调节系统的流量或管路的阻尼, 节流阀即为其典型的实例。

(3) 启闭流阻 它是指仅在最小和无穷大两个极限工况下工作的流阻, 其阻值要么为最小, 要么为最大。它启闭的过程是短暂而迅速的, 可以由人工或用其他方式操纵。方向阀即为其典型的实例。启闭流阻的示意符号及特性曲线见图 2.4, 图 b) 中的 f_1 和 f_2 分别为在两个极限工况下的特性曲线。

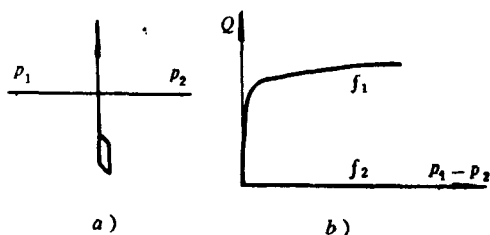


图 2.4

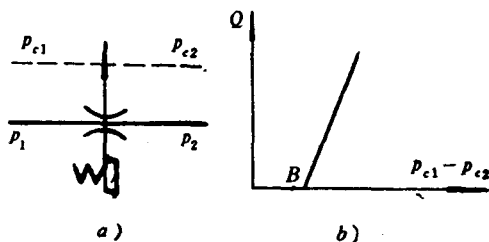


图 2.5

(4) 可控流阻 它是一种阻值可随时变化的可变流阻, 但其阻值不是由人进行调节, 而是由系统压力的检测信息控制, 能随时自动地作有目的、有规律的适应性变化。按结构形式, 它又分为常闭型和常开型两种。常闭可控流阻的示意符号见图 2.5a)。当流阻的前后压差不变, 即 $p_1 - p_2$ 保持常数时, 流阻的开启量和过流量近似地与控制压差成线性关系, 如图 2.5b) 所示。

直动式溢流阀是常闭可控流阻的实例之一, 这时, $p_{c1} = p_1$, $p_{c2} = p_2 = 0$, 当溢流量变动产生的控制压力信息, 可使其过流面积作相适应的变化时, 除开启初始阶段外, 可得到近似于图 2.5b) 所示的线性特性曲线。

按过流阻力是否受流量影响, 以上四类流阻又可归纳为非恒荷流阻和恒荷流阻两大类。固定流阻、可调流阻、启闭流阻均属非恒荷流阻, 当可控流阻的线性特性曲线斜率接近于无