



国家出版基金资助项目



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

数字制造科学与技术前沿研究丛书

流体传动与 控制系统的数字化设计

Digital Design of
Fluid Transmission and Control System

孔祥东 著

 武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press



国家出版基金资助项目

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

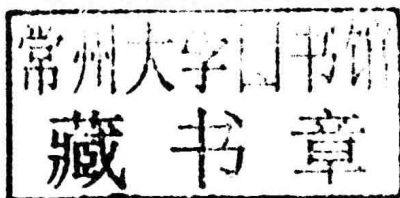


湖北省学术著作
出版专项资金

数字制造科学与技术前沿研究丛书

流体传动与控制系统的 数字化设计

孔祥东 著



武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内 容 提 要

流体传动与控制技术是现代传动和控制技术的一种主要形式,21世纪以来,其与数字化设计理念紧密结合并互相渗透。本书以流体传动与控制系统的数字化设计为题,系统地阐述了著者及其研究团队在流体传动与控制技术方面所取得的研究进展及采用的研究方法。本书共分为10章,以高集成伺服阀控缸系统与自由锻造液压机组液压控制系统的数字化设计为例,全面地论述了流体传动与控制系统的数字化设计的基本概念,给出了流体传动与控制系统的数字化设计的研究方法和步骤,制订了流体传动与控制系统多种高性能控制策略。

本书内容由浅入深,可作为流体传动与控制系统数字化设计方面的研究人员和工程技术人员的参考用书,也可作为高等院校流体传动与控制专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体传动与控制系统的数字化设计/孔祥东著. —武汉:武汉理工大学出版社,2018.1
(数字制造科学与技术前沿研究丛书)

ISBN 978-7-5629-5696-9

I. ①流… II. ①孔… III. ①液压传动-控制系统-数字化-设计 IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 302763 号

项目负责人:田 高 王兆国

责任编辑:张莉娟

责任校对:刘 凯

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉中远印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:17.75

字 数:425 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1—1500 册

定 价:98.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

• 版权所有,盗版必究 •

数字制造科学与技术前沿研究丛书

编审委员会

顾 问：闻邦椿 徐滨士 熊有伦 赵淳生

高金吉 郭东明 雷源忠

主任委员：周祖德 丁 汉

副主任委员：黎 明 严新平 孔祥东 陈 新

王国彪 董仕节

执行副主任委员：田 高

委 员（按姓氏笔画排列）：

David He	Y. Norman Zhou	丁华锋	马 辉	王德石
毛宽民	冯 定	华 林	关治洪	刘 泉
刘 强	李仁发	李学军	肖汉斌	陈德军
张 霖	范大鹏	胡业发	郝建平	陶 飞
郭顺生	蒋国璋	韩清凯	谭跃刚	蔡敢为

秘 书：王汉熙

总责任编辑：王兆国

总 序

当前,中国制造 2025 和德国工业 4.0 以信息技术与制造技术深度融合为核心,以数字化、网络化、智能化为主线,将互联网+与先进制造业结合,正在兴起全球新一轮数字化制造的浪潮。发达国家特别是美、德、英、日等制造技术领先的国家,面对近年来制造业竞争力的下降,最近大力倡导“再工业化、再制造化”的战略,明确提出智能机器人、人工智能、3D 打印、数字孪生是实现数字化制造的关键技术,并希望通过这几大数字化制造技术的突破,打造数字化设计与制造的高地,巩固和提升制造业的主导权。近年来,随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,同时也是提高企业核心竞争力的重要手段。由此可见,在知识经济时代的今天,随着第三次工业革命的深入开展,数字化制造作为新的制造技术和制造模式,同时作为第三次工业革命的一个重要标志性内容,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力,数字化制造的相关技术已逐步融入制造产品的全生命周期,成为制造业产品全生命周期中不可缺少的驱动因素。

数字制造科学与技术是以数字制造系统的基本理论和关键技术为主要研究内容,以信息科学和系统工程科学的方法论为主要研究方法,以制造系统的优化运行为主要研究目标的一门科学。它是一门新兴的交叉学科,是在数字科学与技术、网络信息技术及其他(如自动化技术、新材料科学、管理科学和系统科学等)与制造科学与技术不断融合、发展和广泛交叉应用的基础上诞生的,也是制造企业、制造系统和制造过程不断实现数字化的必然结果。其研究内容涉及产品需求、产品设计与仿真、产品生产过程优化、产品生产装备的运行控制、产品质量管理、产品销售与维护、产品全生命周期的信息化与服务化等各个环节的数字化分析、设计与规划、运行与管理,以及产品全生命周期所依托的运行环境数字化实现。数字化制造的研究已经从一种技术性研究演变成为包含基础理论和系统技术的系统科学研究。

作为一门新兴学科,其科学问题与关键技术包括:制造产品的数字化描述与创新设计,加工对象的物体形位空间和旋量空间的数字表示,几何计算和几何推理、加工过程多物理场的交互作用规律及其数字表示,几何约束、物理约束和产品性能约束的相容性及混合约束问题求解,制造系统中的模糊信息、不确定信息、不完整信息以及经验与技能的形式化和数字化表示,异构制造环境下的信息融合、信息集成和信息共享,制造装备与过程

的数字化智能控制、制造能力与制造全生命周期的服务优化等。本系列丛书试图从数字制造的基本理论和关键技术、数字制造计算几何学、数字制造信息学、数字制造机械动力学、数字制造可靠性基础、数字制造智能控制理论、数字制造误差理论与数据处理、数字制造资源智能管控等多个视角构成数字制造科学的完整学科体系。在此基础上,根据数字化制造技术的特点,从不同的角度介绍数字化制造的广泛应用和学术成果,包括产品数字化协同设计、机械系统数字化建模与分析、机械装置数字监测与诊断、动力学建模与应用、基于数字样机的维修技术与方法、磁悬浮转子机电耦合动力学、汽车信息物理融合系统、动力学与振动的数值模拟、压电换能器设计原理、复杂多环耦合机构构型综合及应用、大数据时代的产品智能配置理论与方法等。

围绕上述内容,以丁汉院士为代表的一批我国制造领域的教授、专家为此系列丛书的初步形成,提供了他们宝贵的经验和知识,付出了他们辛勤的劳动成果,在此谨表示最衷心的感谢!对于该丛书,经与闻邦椿、徐滨士、熊有伦、赵淳生、高金吉、郭东明和雷源忠等我国制造领域资深专家及编委会成员讨论,拟将其分为基础篇、技术篇和应用篇3个部分。上述专家和编委会成员对该系列丛书提出了许多宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢!

数字制造科学与技术是一个内涵十分丰富、内容非常广泛的领域,而且还在不断地深化和发展之中,因此本丛书对数字制造科学的阐述只是一个初步的探索。可以预见,随着数字制造理论和方法的不断充实和发展,尤其是随着数字制造科学与技术制造企业的广泛推广和应用,本系列丛书的内容将会得到不断的充实和完善。

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》编审委员会

前 言

流体传动与控制系统具有功重比大、响应速度快、抗负载能力强和布置灵活等优点,在航空航天、船舶等工业领域应用广泛,其技术水平已成为一个国家工业发展水平的重要标志。

流体传动与控制系统的多样性、复杂非线性、参数时变性等,是制约流体传动与控制系统发展的主要障碍。在数字化设计理念发展成熟并得到广泛应用之前,流体传动与控制系统设计主要源于多年的设计实践经验所形成的经验公式、设计手册、禁忌手册等,通过手动方式完成必要的图纸设计、尺寸设计、性能分析等,基于实物模型或者物理样机的试验测试来核查、验证及改进。以上设计模式的缺陷不仅体现在流体传动与控制系统的研发实时性滞后,而且还使其难以与其他设计方法相融合,不利于研发目标的达成。

现今,数字化设计理念已经普遍应用于流体传动与控制系统中,通过数字化设计理念,可以完成系统设计分析、方案论证、建模仿真、控制改良等研发工作,可以分析系统在真实工况下可能存在的问题,并验证解决措施的可行性和有效性,使流体传动与控制系统达到最优设计的目标。

全书共分为 10 章。第 1 章介绍了流体传动与控制系统的发展、工作原理及基本特征、典型应用,阐述了数字化设计的概念及方法。第 2 章介绍了高集成伺服阀控缸系统的组成及特点。第 3 章阐述了伺服阀控缸位置控制系统的建模及控制方法。第 4 章阐述了伺服阀控缸力控制系统的建模及控制方法。第 5 章阐述了伺服阀控缸系统柔顺控制的建模及控制方法。第 6 章阐述了自由锻造液压机组的组成和基本原理。第 7 章阐述了自由锻造液压机液压控制系统的数学建模方法。第 8 章阐述了自由锻造液压机液压控制系统的高精度位置控制方法。第 9 章阐述了自由锻造液压机液压系统的节能控制方法。第 10 章阐述了自由锻造操作机液压系统的协同建模及控制性能。

全书由燕山大学孔祥东教授策划并统稿,俞滨、姚静、翟富刚、巴凯先等参与了部分章节的编著。本书的相关研究内容得到了国家自然科学基金项目“高性能足式仿生机器人腿部液压驱动系统主被动复合柔顺控制”(项目编号:51605417)、国家自然科学基金项目“基于虚拟技术的锻造液压机液压控制系统基础理论与应用研究”(项目编号:50875229)和国家自然科学基金项目“液压机多源网络系统构型及能量调控研究”(项目编号:51575471)的支持,在此一并表示衷心感谢。

作为介绍流体传动与控制系统数字化设计理论和技术方面的书籍,本书有效地融合了著者及其研究团队的相关研究成果。限于著者水平,书中可能存在一些疏漏或不足之处,恳请广大读者批评指正。

著 者

2017 年 9 月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 流体传动与控制系统的的发展	(1)
1.1.1 历史回顾	(1)
1.1.2 发展现状	(2)
1.1.3 未来展望	(4)
1.2 流体传动与控制系统的的工作原理及基本特征	(5)
1.2.1 流体传动与控制系统的的工作原理	(5)
1.2.2 流体传动与控制系统组成	(8)
1.3 流体传动与控制系统的分类及组成	(8)
1.3.1 开关阀式控制技术	(8)
1.3.2 电液比例控制技术	(8)
1.3.3 电液伺服控制技术	(9)
1.3.4 电液数字控制技术	(9)
1.4 流体传动与控制系统的优缺点	(10)
1.4.1 流体传动与控制系统的优点	(10)
1.4.2 流体传动与控制系统的缺点	(11)
1.5 流体传动与控制系统的典型应用	(11)
1.5.1 锻造液压机	(11)
1.5.2 锻造操作机	(13)
1.5.3 液压型风力发电机组	(14)
1.5.4 液压驱动型四足机器人	(16)
1.5.5 冷轧机液压 AGC 系统	(17)
1.6 流体传动与控制系统数字化设计概述	(18)
1.6.1 数字化设计概念	(18)
1.6.2 数字化设计与流体传动和控制系统的关联	(19)
1.7 流体传动与控制系统数字化设计方法及典型分析工具	(20)
1.7.1 MATLAB/Simulink 软件简介	(20)
1.7.2 FLUENT 软件简介	(21)
1.7.3 AMESim 软件简介	(21)
1.7.4 LabVIEW 软件简介	(23)
1.7.5 ADAMS 软件简介	(23)

第一篇 高集成伺服阀控缸系统数字化技术

2	高集成伺服阀控缸系统概述	(27)
2.1	伺服阀控缸系统的组成及各部分特点	(27)
2.2	伺服阀控缸系统的主要性能指标及主要影响参数	(28)
2.3	高集成伺服阀控缸系统的数字化设计的目的和意义	(28)
2.4	高集成伺服阀控缸系统性能测试实验台	(29)
2.4.1	液压部分介绍	(29)
2.4.2	电控部分介绍	(30)
3	伺服阀控缸位置控制系统分析及控制技术	(31)
3.1	伺服阀控缸位置控制系统数学建模及仿真建模	(31)
3.1.1	引言	(31)
3.1.2	高集成伺服阀控缸系统数学建模	(31)
3.1.3	高集成伺服阀控缸位置控制系统的非线性数学建模	(34)
3.1.4	高集成伺服阀控缸位置控制系统仿真建模	(38)
3.2	伺服阀控缸位置控制系统特性分析	(41)
3.2.1	摩擦力测量	(41)
3.2.2	仿真模型试验验证	(42)
3.2.3	工作参数对位置控制动态特性的影响	(44)
3.2.4	负载对位置控制动态特性的影响	(46)
3.2.5	位移阶跃响应特性指标量化	(48)
3.3	伺服阀控缸位置控制系统灵敏度优化设计	(49)
3.3.1	概述	(49)
3.3.2	高集成伺服阀控缸位置控制系统灵敏度方程	(49)
3.3.3	位移阶跃响应特性参数的灵敏度分析	(54)
3.4	伺服阀控缸位置控制系统高精度控制技术	(61)
3.4.1	概述	(61)
3.4.2	高集成伺服阀控缸位置控制系统 PI 控制器设计	(62)
3.4.3	负载压力观测器设计	(65)
3.4.4	高集成伺服阀控缸系统位置抗扰控制方法研究	(69)
4	伺服阀控缸力控制系统分析及控制技术	(74)
4.1	伺服阀控缸力控制系统数学建模及仿真建模	(74)
4.1.1	力反馈两级电液伺服阀数学模型	(74)
4.1.2	阀控缸系统基本方程	(76)
4.1.3	高集成伺服阀控缸力控制系统数学建模	(78)

4.2 伺服阀控缸力控制系统负载特性模拟	(80)
4.2.1 负载特性模拟数学模型	(80)
4.2.2 负载特性模拟效果分析	(82)
4.3 伺服阀控缸力控制系统高鲁棒控制技术	(88)
4.3.1 高集成伺服阀控缸力控制系统 PID 控制器参数优化	(88)
4.4.2 高集成伺服阀控缸系统变刚度阻尼负载特性补偿控制方法研究	(89)
4.4.3 几种刚度阻尼负载特性下补偿控制效果	(92)
5 伺服阀控缸系统柔顺控制技术	(97)
5.1 引言	(97)
5.2 伺服阀控缸系统柔顺控制实现方法	(97)
5.2.1 传统阻抗控制方法	(97)
5.2.2 高集成伺服阀控缸系统柔顺控制原理	(98)
5.3 伺服阀控缸系统柔顺控制建模	(99)
5.3.1 阻尼控制方法建模	(99)
5.3.2 刚度控制方法建模	(101)
5.3.3 柔顺控制框图	(103)
5.4 伺服阀控缸系统柔顺控制分析	(103)
5.4.1 阻尼控制方法试验分析	(103)
5.4.2 刚度控制方法试验分析	(105)
5.4.3 柔顺控制方法试验分析	(107)

第二篇 自由锻造液压机组液压控制系统数字化设计

6 自由锻造液压机组概述	(113)
6.1 概述	(113)
6.1.1 自由锻造液压机组	(113)
6.1.2 自由锻造液压机机架	(113)
6.2 自由锻造液压机液压系统发展现状	(115)
6.2.1 自由锻造液压机分类与特点	(115)
6.2.2 自由锻造液压机性能要求	(116)
6.3 自由锻造操作机液压系统	(119)
6.3.1 自由锻造操作机组成	(119)
6.3.2 液压锻造操作机的工作原理	(121)
7 自由锻造液压机组液压控制系统数学建模	(123)
7.1 自由锻造液压机液压控制系统数学建模	(123)
7.1.1 溢流阀建模研究	(123)
7.1.2 电液比例插装阀建模研究	(124)

7.1.3	快锻液压机快锻系统数学建模	(127)
7.1.4	快锻液压机快锻系统仿真研究	(129)
7.2	正弦泵控蓄能器快锻压机系统数学建模	(133)
7.2.1	正弦泵控蓄能器快锻压机系统原理介绍	(133)
7.2.2	主要环节功率键合图及仿真模型	(134)
7.2.3	正弦泵控液压机蓄能器快锻子系统功率键合图及仿真模型	(146)
7.3	开式泵控锻造油压机液压控制系统数学建模	(155)
7.3.1	比例变量径向柱塞泵数学模型	(155)
7.3.2	开式泵控锻造油压机负载模型	(162)
7.3.3	开式泵控锻造油压机机架模型	(164)
7.3.4	开式泵控锻造油压机液压系统模型	(165)
8	自由锻造液压机液压控制系统控制技术	(169)
8.1	比例控制快锻系统 PID 控制	(169)
8.1.1	比例控制快锻系统工作原理	(169)
8.1.2	比例控制快锻系统 PID 控制	(170)
8.2	基于遗传算法的比例控制快锻系统 PID 在线优化	(171)
8.2.1	遗传算法简介以及实现的基本过程	(171)
8.2.2	对待优化 PID 参数进行编码	(171)
8.2.3	选取初始种群	(172)
8.2.4	适应度函数的确定	(172)
8.2.5	遗传操作算子设定	(173)
8.2.6	对适应度函数进行尺度变换的改进遗传算法	(175)
8.3	正弦泵控液压机蓄能器快锻子系统	(178)
8.4	泵控直传液压机液压系统控制技术	(183)
8.4.1	常锻时泵控油压机液压系统特性	(183)
8.4.2	常锻系统特性试验	(187)
8.4.3	快锻时泵控油压机液压系统特性	(189)
8.4.4	快锻时泵控油压机液压系统试验	(192)
8.5	开式泵控锻造液压机	(195)
8.5.1	开式泵控锻造液压机流量/压力复合控制技术	(195)
8.5.2	开式泵控锻造液压机负载容腔独立控制技术	(198)
9	自由锻造液压机节能控制技术	(209)
9.1	基于变频调节的快锻液压系统	(209)
9.2	基于泵阀复合控制的快锻系统原理	(210)
9.2.1	泵阀复合控制原理	(211)
9.2.2	系统节能理论分析	(211)
9.2.3	基于泵阀复合控制系统能耗分析	(212)

9.2.4 基于泵阀复合控制系统节能分析	(213)
9.3 基于位置-双压力复合控制的快锻系统	(214)
9.3.1 基于位置-双压力复合控制的快锻系统原理	(214)
9.3.2 位置-双压力复合控制原理	(215)
9.4 自由锻造液压机复合控制	(216)
9.5 泵控直传液压机液压系统节能技术	(224)
9.5.1 泵控直传液压机液压系统节能机理	(224)
9.5.2 常锻能耗特性	(229)
9.5.3 常锻能耗试验分析	(231)
9.5.4 快锻能耗特性	(232)
9.6 开式泵控锻造液压机负载容腔独立控制节能技术	(234)
9.6.1 开式泵控锻造液压机节能机理	(234)
9.6.2 负载容腔独立控制能耗试验分析	(236)
10 自由锻造操作机液压系统控制特性	(239)
10.1 锻造操作机虚拟样机协同仿真建模	(239)
10.1.1 锻造操作机虚拟样机模型构成	(239)
10.1.2 多学科协同仿真方法	(240)
10.1.3 协同仿真方法	(241)
10.1.4 锻造操作机协同仿真模型接口	(241)
10.1.5 锻造操作机虚拟样机协同仿真模型	(245)
10.1.6 验证结果	(247)
10.2 单项动作控制特性研究	(252)
10.2.1 进给量不同时的控制特性	(252)
10.2.2 负载不同时的控制特性	(253)
10.2.3 蓄能器状态不同时的控制特性	(255)
10.2.4 马达排量不同时的控制特性	(255)
10.3 复合动作控制特性研究	(257)
10.3.1 联动方式	(257)
10.3.2 蓄能器参数对连续复合动作的控制特性影响	(258)
10.3.3 主泵排量对连续复合动作控制特性影响	(260)
10.3.4 锻造行程次数对连续复合动作控制特性影响	(260)
10.4 控制方式研究	(261)
参考文献	(267)

1 绪 论

1.1 流体传动与控制系统的的发展

1.1.1 历史回顾

流体传动与控制系统也称作液压控制系统。作为流体传动与控制理论基础的流体力学、流体传动理论是人类在生产实践中逐步发展起来的。

对流体力学学科的形成做出第一个贡献的是阿基米德(Archimedes),他确立了静力学与流体静力学的基本原理。1648年,帕斯卡(B. Pascal)首次提出了静止液体中压力传递的基本规律——静压传递原理(帕斯卡原理),由此奠定了液体静力学基础。17世纪,力学奠基人牛顿(Newton)研究了在流场中运动的物体受到的阻力,针对黏性流体运动时的内摩擦力提出了牛顿黏性定律。1738年,欧拉(L. Euler)采用了连续介质的概念,把静力学中的压力概念推广到运动流体中,建立了欧拉方程,正确地用微分方程组描述了无黏性流体的运动。伯努利(D. Bernoulli)从经典力学的能量守恒定律出发,研究供水管中水的流动,通过试验分析,得到了流体常定运动下的流速、压力、流道高度之间的关系——伯努利方程。1827年,纳维(C. L. M. Navier)建立了黏性流体的基本方程;1845年,斯托克斯(G. G. Stokes)又用更合理的方法建立了这组方程,这就是沿用至今的N-S方程,它是流体动力学的理论基础。1883年,雷诺发现液体具有两种不同的流动状态——层流和湍流,并建立了湍流基本方程——雷诺方程。

20世纪是流体传动技术走向工业应用的时期,它基于流体力学成果,而工业革命以来的产业需求为液压技术的发展创造了先决条件。

1795年,布拉默(J. Bramash)发明了第一台液压机,它的问世是流体动力学应用于工业的成功典范。1826年,液压机已广泛应用于工业,此后还设计了许多水压传动控制回路,并且采用机能符号取代具体的设计和结构,促使了液压技术进一步发展。1905年,詹尼(Janney)首先把矿物油引入传动介质,并设计研究了带轴向柱塞机械的液压传动装置,并于1906年应用于舰船的炮塔装置上,为现代液压技术的发展揭开了序幕。1922年,托马(H. Thoma)发明了径向柱塞泵;1936年,威克斯(H. Vickers)一改传统的直动式机械控制机构,发明了先导控制式压力控制阀,随后电磁阀和电液换向滑阀的问世使先导控制式多样化。

20世纪是流体传动与控制技术飞速发展并日趋成熟的时期,也是控制理论与工程实践相结合并飞速发展的时期,它为流体控制工程的进步提供了强有力的理论基础和技术支持。

1922年,米诺斯基(N. Minorsky)提出了用于船舶驾驶伺服机构的比例、积分、微分

(PID)控制方法;1932年,奈奎斯(H. Nyquist)提出了根据频率响应判断系统稳定性的准则;1948年,埃文斯(W. R. Evans)提出了根轨迹分析方法,同年申农(C. E. Shannon)和维纳(N. Wiener)发表了《信息论》与《控制论》。至此,线性控制理论基本形成,它对液压控制技术的发展产生了深远影响。1950年,摩根(Moog)成功研制了采用微小输入信号的电液伺服阀,美国麻省理工学院的布莱克本(Blackburn)、李(Lee)等人在系统高压化和电液伺服机构方面进行了深入研究,使电液伺服机构首先应用于飞机、火炮的液压控制系统,后来也广泛应用于机床和仿真装置等伺服驱动中。1970年,信号功率介于开关控制和伺服控制之间的比例阀问世,随后又出现了负载敏感系统、功率协调系统,80年代进而出现了二次调节系统。

由于微电子技术的不断进步,微处理机、电子功率放大器、传感器和液压控制单元相互集成,形成了机械电子一体化产品,通过标准的现场总线、无线传输与上位机实现数字交互,形成智能化数字电液控制系统,不但提高了系统的静/动态控制精度,而且提高了系统对负载、环境以及自身变化的自适应能力。

1.1.2 发展现状

20世纪90年代后期,随着自动控制技术、计算机技术、微电子技术、可靠性技术的发展以及新材料的应用,液压传动与控制技术在节能环保、控制技术等方面均有新的进展,使流体传动与控制系统日趋成熟。

(1) 节能环保方面

液压传动与控制技术正如其他技术的发展一样,针对其自身存在效率低、噪声大、泄漏污染环境等缺点进行改进,以期达到人们提出的更高要求。

目前,在节能环保方面的成果主要有:

① 传动方面主要体现在与原动机传动结合的交频变量技术、容积调速技术所包含的静液压技术及二次调速技术、蓄能器技术、负载感应技术、减少内外泄漏的措施(如提高元件加工精度、元件小型化、螺纹插装阀的大量采用等)。西安交通大学王世民课题组分析了交流变频容积调速回路的调速特性,并采取模糊控制策略提高了液压马达的响应速度及转速稳定性。广州工业大学黎松辉提出了一种基于二次调节技术的盾构土压平衡系统,在系统制动过程中调节二次元件的排量作为泵工况,在螺旋输送机的惯性带动下向系统回馈能量。德国克拉斯自走式收割机械将静液压传动技术引入装卸搬运系统中,能最大限度地优化机械的工作性能,使传动系统的能耗减少30%以上。

② 介质方面主要是纯水液压技术,其技术从20世纪60年代开始进行研究,目前美、英、德、日等国家都已在相关领域有所应用。浙江大学已成功研制最高压力为14 MPa、流量为100 L/min的纯水柱塞泵及一系列的纯水液压控制阀,并在摩擦副材料的研究上取得了重大进步。燕山大学高殿荣课题组研制出径向柱塞式多作用内曲线式低速大扭矩海/淡水液压马达物理样机,并在华中科技大学液压气动技术研究中心的水压综合实验台上对研制的马达物理样机进行了空载和加载性能试验。

③ 生产方面主要是将液压元件的生产与铸造脱离,努力发展插装阀、泵等。瑞士Bieri公司开发了六通径电磁座式高压插装阀,其工作压力为70 MPa,开关时间40~120 ms,控制功率31 W,该阀换向噪声小、不漏油、工作可靠。

④ 系统方面主要是提高系统的效率,省电节能。目前已有快的响应速度、高的控制精度和重复精度的比例阀、比例泵、伺服阀投入应用,如由转速可调的伺服电机+柱塞泵、伺服马达螺杆驱动、蓄能器+高速伺服阀组成闭环回路控制油电式高速注塑机液压系统。

(2) 控制技术方面

随着微电子技术、计算机技术及网络的发展,液压技术与其结合发挥二者的优势是必然趋势。在控制理论方面,自适应控制、鲁棒控制、模糊控制及神经网络控制等均得到了不同程度的运用。在流体传动及控制中应用较多的智能控制方法是模糊控制和神经网络控制。

模糊控制是通过定义模糊变量、模糊集合及相应的隶属度函数,采用一组模糊条件句来描述输入与输出之间的映射关系,它已广泛应用于液压系统的控制中。北京理工大学高建臣等人进行了液压缸位置伺服系统的模糊控制研究,试验证明:模糊控制具有较强的抗负载扰动能力和较快的动态响应特性。西安交通大学进行了液压旁路速度伺服系统及电液振动台伺服控制系统的模糊控制研究。上海交通大学进行了非线性多变量液压控制系统、轧机液压压下系统的轧辊控制和液压实验台液压参数控制的模糊控制研究。哈尔滨工业大学进行了双模式二次调节液压伺服控制系统的模糊控制研究。

神经网络具有学习和自适应能力,而且具有一般非线性系统的特性,因此更适用于时变的非线性的液压控制系统。目前国内神经网络控制技术在液压系统中的应用主要有:采用CMAC再励学习控制策略进行电液位置伺服系统的快速跟踪控制,结果显示系统具有良好的处理非线性能力和抑制干扰能力;采用B样条算法对电液位置伺服系统的液压管道脉动进行控制,结果显示了较好的鲁棒性;采用模糊神经网络对电液位置伺服系统进行控制,结果显示出了较强的鲁棒性和良好的跟踪特性;对电液飞行模拟器采用BP网络控制策略抗负载干扰,取得了较好的控制效果。

(3) 应用需求方面

随着液压技术与其他技术的结合,其应用领域不断扩展,对液压元件也提出了更高的要求。

① 高压始终是液压技术的追求指标之一。目前,美国Parker公司研制的F12型柱塞泵压力高至48 MPa,法国Denison公司研发的叶片泵压力可至32 MPa,德国力士乐公司研制的改进型齿轮泵压力为30 MPa。

② 随着新技术、新工艺的采用,液压元件在质量提高的同时,其寿命也大大延长,例如泵运行可达10000 h,阀运行可达1000万次,缸运行可达100 km,高速阀运行可达2亿次等。

③ 工程陶瓷、工程塑料、聚合物等复合材料的应用,在提高质量、降低成本的同时,还提高了其核心竞争力。例如南通高欣金属陶瓷复合材料有限公司将等离子喷涂金属陶瓷材料应用到液压柱塞上,结果发现液压柱塞更加耐磨、耐腐蚀,使用寿命延长了3~5倍,具有较好的综合经济与技术效益。

④ 数字技术在液压元件上的发展,也随之出现了数字阀、数字缸、数字泵等。德国亚琛工业大学流体传动及控制研究所(IFAS)通过采用压电堆叠串联从而驱动压电伺服阀,可使阀芯达到 $-1\sim 1$ mm的行程。我国也研制了多种数字液压缸,它们的结构设计巧妙灵活,充分运用了计算机技术、传感器技术、机械技术和液压技术的优点(图1-1)。

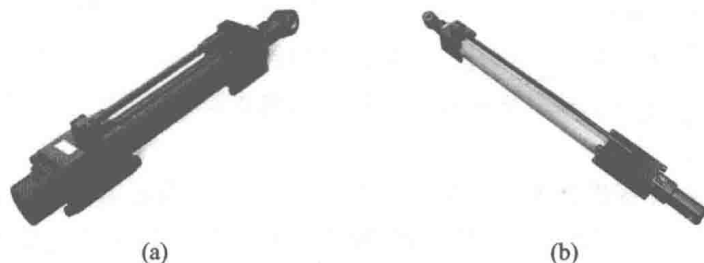


图 1-1 数字液压缸

(a) 数字伺服液压缸;(b) 六自由度运动仿真平台用数字液压缸

浙江工业大学流体传动与控制实验室的研究人员多年来始终致力于数字阀的开发研究,主要是旋转和轴向运动的双自由度的 2D 数字阀,并得到了成功应用。正如前所述,流体传动与电子、计算机、通信等技术相结合,大大促进了流体传动元件及系统的发展。

1.1.3 未来展望

有统计资料表明:近 20 年来,液压技术的发展来源于自身科研成果的仅占 20%,来源于其他领域发明的占 50%,移植其他技术研究成果的占 30%,没有任何一门学科能独立发展,这也是所有学科的共同趋势。未来的液压技术应当主要靠现有技术的改进和发展,不断扩大其应用领域以满足未来的要求。其主要的发展趋势将集中在以下几个方面。

(1) 流体传动与控制系统更加注重环保性能

污染环境是流体传动工业面临的最大挑战之一,也是阻碍它与电气和机械传动系统有效竞争的一大因素。泄漏控制是液压传动与控制系统需要解决的首要问题。它主要包括两个方面:既要防止液体泄漏到外部造成环境污染,又要防止外部环境对系统的侵害。今后将发展无泄漏元件和系统,发展集成化和复合化的元件和系统,实现无管连接,研制新型密封和无泄漏管接头、电动机泵组合装置。

另一考虑是加大非石油基液压油的使用力度。为了保护环境,减少泄漏油对环境的危害,可采用降解迅速的液体介质及水基液压油。

为进一步降低污染,必须采用先进的污染控制和过滤技术,使液压油保持清洁,并发展封闭式密封系统,防止污染物进入系统。针对来自零件制造和装配过程的污染物,将建立相关的保证元件清洁度的技术规范和经济有效的清洗方法。

(2) 流体传动及控制系统变得更为集成化、智能化、网络化

由电子直接控制的元件将得到广泛应用,如电子直接控制泵,只要改变电子控制程序,即可实现液压泵的各种调节方式,实现功率合理分配,自动保持最佳状态,实现软启动等功能。具有内置式标准化传感器和计算机的智能化液压元件也将成为应用的主流。

借助现场总线,实现高水平的信息传递,可以对流体传动与控制系统实现综合多目标的最优控制——效率最优、功能最优或者预选目标最优。可以对液压系统的流量、压力、温度和油液污染等数值实现自动测量和诊断,实现系统主动维护。

流体传动与控制系统可实现加工、装配和调试等过程的全球化虚拟制造,并对研究过程、生产过程、营销过程实现全球网络化实时管理与经营。

(3) 新材料的发展与使用

在新材料的发展方面,陶瓷材料由于其优越的耐磨性、抗气蚀性、化学稳定性,在纯水液压泵和阀中得到了应用。陶瓷液压件的生产工艺将进一步成熟,其成本降低后,可以在工业中得到推广。

纳米材料、纳米工艺的发展,将为流体传动与控制技术发展开拓新的前景。流体元件加工进度及表面质量达到纳米数量级,从而使元件效率、寿命得以提高,纳米技术将可能使流体传动与控制系统成为微机械系统的重要组成部分,它的研究已成为流体传动与控制技术新的前沿。

1.2 流体传动与控制系统的的工作原理及基本特征

1.2.1 流体传动与控制系统的的工作原理

系统由原动机、工作机和传动机构组成,如图 1-2 所示。

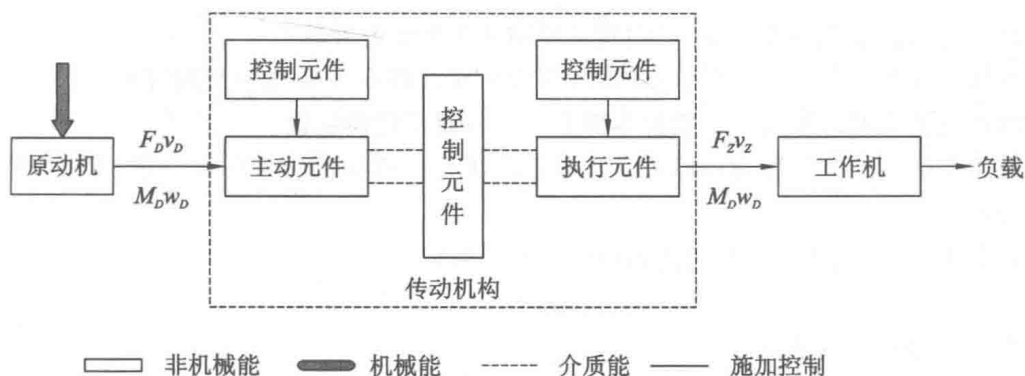


图 1-2 系统的组成

原动机将非机械能转换成机械能,其中机械能常用机械功率来描述。工作机接受从原动机传输过来的机械能,克服机器阻力(负载力)来驱动负载运动。传动机构不但把原动机的机械功率传输给工作机,而且要把原动机输出的力因素和运动因素变换成工作机需要的力因素和运动因素。传动机构的主要元件用来接收原动机的机械功率,并换成某种介质(机械、流体或电气)的能量。传动机构的被动元件把介质的能量变换成工作机需要的机械效率。此外,传动机构还需要控制元件来协调原动机、运动性能与工作机之间的矛盾。根据传动机构中介质的不同,有机械传动、电气传动和流体传动之分。以流体为介质的流体传动又分为以液压为介质的液压传动和以气体为介质的气动传动。

液压传动工作原理可用图 1-3 所示的液压千斤顶原理图说明。

液压传动机构的主动元件是液压泵,它将原动机的机械功率转变成液体的液压功率。液压泵主要由活塞 2 和缸体 3 组成,泵内充满密封的液体。活塞 2 接受原动机(杠杆)的机械能,对液压泵腔内的液体做功,使液压泵的容积不断缩小,迫使液体以一定的压力和速度经过单向阀 5 进入液压执行元件。执行直线运动的执行元件叫液压缸,是液压传动机构的被动元件。液压缸由活塞杆 6 和缸体 7 组成。有压液体进入液压缸后,推动活塞杆 6 上升,举起重物 W ,把液压功率转变成机械功率。图中的控制阀 4、5、8 为液压传动机构的控制元件,单向阀 5 控