

电液(气)直接数字控制技术

阮 健 著

浙江大学出版社



封面设计：宋纪浔

ISBN 7-308-02117-3



9 787308 021173 >

ISBN 7-308-02117-3/TP • 273

定价：12.00元

浙江大学流体传动及控制国家重点实验室基金项目

电液(气)直接数字 控制技术

阮 健 著

浙江大学出版社

内容简介

随着计算机技术在工程控制中的不断应用和发展,电液(气)控制系统及其元件的数字化成为一种必然的趋势。本书在分析流体控制元件的基本工作原理和设计理论的基础上提出了电液(气)控制元件设计的新方法;为了解决传统的步进式数字控制元件所固有的量化精度和响应速度之间的矛盾,提出了步进电机连续跟踪控制的新方法,并利用单片机技术对其进行实时跟踪控制以同时获得阀的高精度和高频响应特性。书中并阐述了液压及气动控制元件的基本结构理论及相关的流体力学基础,并以实例介绍电液(气)直接数字控制系统的理论及控制软件设计方法。

本书可作为高等学校机电类高年级学生或研究生教材,也可供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电液(气)直接数字控制技术/阮健著. —杭州:
浙江大学出版社, 1999. 6
ISBN 7-308-02117-3

I. 电… II. 阮… III. 自动化元件: 液压元
件-数字控制 N. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 22975 号

浙江大学出版社出版发行
(杭州玉古路 20 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

责任编辑 徐宝澍

浙江大学出版社电脑排版中心排版

浙江省煤田地质局制图印刷厂印刷

浙江省新华书店经销

* * *

850mm×1168mm 32 开 9.25 印张 232 千字

2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月第 1 次印刷

印数: 0001—1200

ISBN 7-308-02117-3/TP·273 定价: 12.00 元

前 言

自第二次世界大战末期电液(气)控制技术出现以来,满足工程实际应用的要求始终贯穿其主要的发展历程。随着计算机技术在工程控制中的不断应用和发展,电液(气)控制系统及其元件的数字化成为一种必然的发展趋势;同时,电液(气)直接数字控制技术的发展也备受人们的关注。现有的电液(气)直接数字控制的实现方法有两种:其一为以脉宽调制(Pulse-width-modulation)为代表的控制方法;其二为采用步进电机作为电-机械信号转换口元件的增量式控制方法。本书在综合这两种控制方法优点的基础上提出直接数字控制的新方法,并采用单片机对流体控制元件实现嵌入式数字控制。此外,本书在论述流体控制元件的基本工作原理和设计理论的基础上提出了液压及气动控制元件利用阀芯双自由度的新设计方法;该设计方法不仅使流体双级控制元件所具有的良好特性得到充分发挥,而且结构得到简化,抗污染能力增强及导控级的零位泄漏损失被降低到很低的水平。

本书共九章,第二、三章主要介绍与流体控制相关的流体力学基本理论及流体控制元件的结构原理学;第四、五及六章介绍流体控制元件的双自由度设计方法及相应控制元件的性能分析;第七、八章介绍流体控制元件的直接数字控制方法及其主要特性;第九章主要介绍电液(气)直接数字控制系统的设计及实际运用。

在使用本书时,读者需同时具备工程控制理论及计算机软、硬件方面的基础知识。

阮 健

1999 年 2 月

符号表

A	面积、阀芯端面面积
A_0	阀口开启面积；
b	阻尼槽宽度；
C	常数，阻尼管综合结构系数；
C_c	收缩系数；
C_d	流量系数；
C_v	速度系数；
C_v	阀口流量增益；
C_p	阀口流量-压力系数；
D, d	直径；
D_e	水力直径；
e	偏心率；
$^{\circ}E$	恩氏度；
f	频率；
F	力；
G_m	质量流量；
i, I	电流；
J	转动惯量；
k	绝热指数；
K	弹簧刚度；
K_L	液动力弹簧刚度；
K_v	阻力半桥流量增益；
K_p	阻力半桥的流量-压力系数；
l, L	长度，阻尼管长度；
L_e	进口段长度；
m	质量；

p ——压力；
 q, Q ——液体体积流量；
 Q_m ——气体名义体积流量；
 r, R ——半径；
 Re ——雷诺数；
 s ——拉氏算子；
 S ——弧长，流线；
 t ——时间，时刻；
 T ——绝对温度；
 T ——脉冲周期；
 U ——流体质点的速度；
 V ——平均速度；
 V ——电压；
 W ——阀口面积梯度；
 X ——阻尼管调压位移输入；
 x_v ——阀位移；
 y_v ——主阀位移；
 β_c ——压缩性系数；
 β_L ——粘性系数；
 μ ——动力粘度；
 γ ——运动粘度；
 θ ——步进电机转角、阀芯转角；
 $\Delta\theta$ ——步进电机步距角；
 τ ——时间常数；
 ξ ——阻尼比；
 ρ ——密度。

目 录

第一章 绪 论

第一节 流体动力控制技术的发展历史	1
第二节 电液(气)直接数字控制技术的发展	2

第二章 流体力学基础

第一节 流体的基本概念和基本特性	5
一、密度	5
二、理想气体状态方程	5
三、流体的压缩性	6
四、粘性	7
五、湿度与含气	8
第二节 流体动力学基本方程	9
一、连续性方程	9
二、伯努利方程	10
三、动量方程	13
第三节 阀口流动及其流量系数	14
一、不可压缩流体的薄刃孔口出流	14
二、可压缩气体的薄刃孔口出流	16
三、阀口的流量系数	19
第四节 短管(孔)的流动	23
第五节 长管流动	26
一、不可压缩流体的长管流动	26
二、可压缩气体的长管流动	27
第六节 流体阀口流动对阀芯的作用力	33
一、稳态作用力	33

二、瞬态作用力	36
第七节 与流体控制元件相关的几个问题	38
一、节流气穴	38
二、阀芯的侧向力	39
三、节流口输出功率	41
第三章 流体控制元件的结构原理学	
第一节 方向控制元件的基本结构原理	43
一、阀口的构成及分类	43
二、换向阀的基本结构学	45
第二节 机械信号转换基本单元	49
一、力—位移或位移—力单元	49
二、压力—力转换单元	50
三、流量—压差(压力比)转换环节	52
第三节 流体阻力桥路及网络	53
一、阻力的线性表示	53
二、阻力半桥	56
三、改进型阻力半桥	57
第四节 阀机构	59
一、压力—位移机构	59
二、流量—阀位移机构	63
三、位移—位移机构	65
第五节 阀机构特性分析	68
一、阀机构的频率特性	68
二、主要性能参数分析	71
三、液压阀机构与气动阀机构的性能比较	73
第六节 定值控制元件结构原理	74
一、压力控制元件	75
二、比例换向控制阀	82
三、压力补偿型流体控制元件	84
第七节 模拟式电—机械转换元件	87

一、永磁动铁式力矩马达	88
二、动圈式力马达	91
三、螺管式比例电磁铁	92
第四章 阻尼管调压技术	
第一节 阻尼管调压器	95
第二节 液压阻尼管调压器特性	97
第三节 配合间隙对调压特性的影响	100
第四节 可压缩气体的阻尼管调压器特性	105
第五节 变断面阻尼管调压器	108
一、变断面阻尼管调压器	108
二、线性气动阻尼管调压器	110
第六节 阻尼管调压器的应用	112
一、构成阻力半桥	112
二、缓冲调压装置	113
三、静态弹簧	114
第五章 滑阀阀芯的双自由度原理及新型流体控制元件	
第一节 阀芯的运动自由度与换向控制元件	116
第二节 伺服螺旋机构及比例换向元件	120
一、伺服螺旋机构	121
二、液压伺服螺旋机构特性分析	125
三、气动伺服螺旋机构特性分析	132
四、伺服螺旋型比例换向阀及其特点	135
第三节 调压螺旋及定值压力控制阀	139
一、调压螺旋机构	139
二、定值控制元件的性能分析	141
三、溢流阀的静态特性	146
第四节 阻尼管型压力阀	147
一、定比减压阀	147
二、溢流阀	152

三、四通型压力阀	159
第五节 压力补偿型流量控制元件	161
一、定差减压型流量阀	161
二、定差溢流型流量阀	164
三、导控型压力补偿流量阀	166
第六章 高速开关元件	
第一节 高速开关元件的应用及分类	167
第二节 高速开关元件的相似性分析	172
一、尺寸与动作时间	173
二、尺寸与线圈的时间常数	173
三、电磁及气液驱动的快速性	174
四、力矩马达与直动式电磁铁的比较	175
五、电磁铁工作时制与温升	176
第三节 功率驱动放大电路	178
一、弹簧复位的电磁铁的驱动电路	179
二、双稳电磁铁的驱动	180
第四节 双自由度高速开关元件的性能分析	181
一、力矩马达的性能分析	182
二、阀性能分析	187
第五节 实验研究	189
一、驱动电路介绍	189
二、力矩马达的实验	190
三、双级高速开关阀的实验	192
四、讨论	193
第七章 步进电机的连续跟踪控制及电液(气)数字控制元件	
第一节 电液数字控制元件的分类与发展	194
第二节 步进电机及其驱动电路	198
一、步进电机工作原理	199
二、步进电机的基本技术参数和特性	202
三、步进电机驱动电路	205

第三节 步进电机的数学模型	209
一、反应式步进电机的数学模型	209
二、混合式步进电机的数学模型	213
三、二相混合式步进电机的连续控制模型	216
第四节 步进电机的连续跟踪控制及单级数字伺服阀的 动态特性	218
一、步进电机的连续角位移控制	218
二、旋转磁场的实时连续跟踪控制及其信号分析	219
三、连续跟踪控制下单级数字伺服阀的动特性	222
第五节 跟踪控制信号的频率特性分析	229
一、跟踪控制信号的非线性分析	229
二、跟踪控制的频响特性	232
三、跟踪控制信号的收敛性分析	234
第六节 数字阀及其特性	236
一、数字换向阀(伺服阀)	236
二、2D 数字溢流阀	241
三、2D 数字 P-Q 阀	242
四、数字阀的性能特点	243
第八章 数字阀控制器	
第一节 控制器结构及其主要功能	246
第二节 控制程序设计	250
一、初始化	251
二、死区补偿和系隙补偿	252
三、跟踪控制算法	253
第三节 控制信号传送接口	253
一、并行接口电路	254
二、串行接口	258
三、A/D 接口	262
第九章 电液(气)直接数字控制系统的设计及应用	
一、电液(气)直接数字控制系统的结构及特点	266

二、控制系统的静态设计	267
三、控制软件设计	269
四、控制系统的动静特性分析	271
五、数字阀控制器拨挡开关的设定	272
六、30 吨水泥强度试验机电液数字控制系统	273
参考文献	276
后记	281

第一章 绪 论

第一节 流体动力控制技术的发展历史

人类对流体的控制和利用几乎与其文明的发展具有同样长的历史。早在文明初期人类已懂得利用各种水闸来控制水流,达到排涝和灌溉的目的。但是,现代流体动力控制技术却是伴随着第一次工业革命中蒸汽机的发明而出现的。当时用于控制蒸汽工质进出蒸汽机工作容腔的装置便是滑阀,这种滑阀与今天流体动力系统中普遍采用的滑阀在结构和原理上已无多大差别。流体动力控制技术与基础工业密切相关,生产加工工艺的改进以及新材料的应用对流体控制元件的发展有着巨大的推动作用;同时,流体动力控制技术自身也经历了以下几个重要发展过程。

首先是导控技术在流体控制元件中的应用与发展。它以 1936 年美国工程师 Harry Vickers 所发明的导控溢流阀为标志。在高压大流量的情况下导控型溢流阀与直动型溢流阀相比具有定压精度高、过流能力大的优点,在压力控制中被普遍采用。但是,从现代的角度看来,Harry Vickers 不仅仅发明了一种阀,更重要的是把导控思想引入流体控制元件的设计中,以后所出现的各种导控型元件乃至多级控制元件,与其说是在结构原理上的创新,不如说是导控技术的发展与完善。导控技术后来被广泛应用于电液(气)控制元件的设计。

其次是流体动力控制理论的建立及电液伺服阀的发明。它以

50年代美国麻省理工学院的 Blackburn、Lee 及 Moog 等人所完成的经典理论及所发明的电液伺服阀为代表。其主要意义在于把电子与电磁控制技术引入了流体控制元件中,为电液(气)伺服控制技术工程应用奠定了基础。

最后是 80 年代初出现的各类电液(气)比例控制元件,这些元件是应民用工业对廉价、抗污染电液(气)控制元件的要求而发展起来的。与此同时,随着计算机技术在流体动力控制系统中的大量应用,流体动力控制元件及系统的数字化发展势在必行,人们也在这方面做了大量的工作。

第二节 电液(气)直接数字 控制技术的发展

随着计算机技术在流体控制系统中的大量应用,流体控制元件的数字化成了一种必然的趋势。采用传统的比例阀或伺服阀等模拟信号控制元件构成的系统一般通过 D/A 接口实现数字控制,这是目前国内、外液压与气动数字控制流行的方法。这是一种间接数字控制方法,这种方法存在如下的缺点:①由于控制器中存在着模拟电路,易于产生温飘和零飘,这不仅使得系统易受温度变化的影响;同时,也使得控制器对阀本身的非线性因素如死区、滞环等难以实现彻底补偿。②增加了 D/A 接口电路。③用于驱动比例阀和伺服阀的比例电磁铁和力矩马达存在着固有的磁泄现象,导致阀的外控特性表现出 2%~8% 的滞环。采用阀芯位置检测和反馈等闭环控制的方法可以基本消除比例阀的滞环,但却使阀的造价大大增加。④由于结构特点所决定,比例电磁铁的磁路一般只能由整体式磁性材料构成,在高频信号作用下,由铁损而引起的温升较为严重。与间接方法相对应的有两种直接数字控制方法备受人们

关注。

其一是对高速开关阀的 PWM(脉宽调制)控制。通过控制开关元件的通断时间比,以获得在某一段时间内流量的平均值,进而实现对下一级执行机构的控制。在流体动力系统中,这种控制方式的控制信号是开关量,因而本质上是直接数字控制。该思想源于电机的 PWM 控制,流体动力的 PWM 控制最早开始于 50 年代末对电液伺服阀的开关特性的研究。从那时起特别是自 80 年代以后,人们对电液(气)控制系统 PWM 控制的性能提高及工程实际应用做了大量的工作。该控制方式具有不堵塞、抗污染能力强及结构简单的优点。但是存在以下缺点:①由于高速开关阀的 PWM 控制最终表现为一种机械信号的调制,噪声大,易于诱发管路中的压力脉动和冲击,从而影响元件自身和系统的寿命及工作可靠性。②元件的输入与输出之间没有严格的比例关系,一般不能用于开环控制。③控制特性受机械调制频率不易提高的限制。

其二是利用数字执行元件步进电机加适当的旋转—直线运动转换机构驱动阀芯实现直接数字控制。由于这类数字控制元件一般按步进的方式工作,因而常称为步进式数字阀或离散式比例阀。通过合理的设计,这类阀具有重复精度高及无滞环的优点。但是,步进式数字阀是通过阀芯的步进运动将输入的信号量化为相应的步数(脉冲数),因而存在着量化误差,通过增加阀的工作步数可以减小量化误差,但却使阀的响应速度大大降低。

针对步进数字阀的量化误差与响应速度之间的矛盾,本书提出了步进电机的连续跟踪的控制方法,在步进控制中引入脉宽调制控制技术使得步进电机输出的角位移开环连续可控。这样不仅消除了步进式数字阀所固有的量化误差,同时也使该数字阀的响应速度得到很大提高。图 1-1 为运用阀芯双运动自由度设计的 2D 数字伺服阀的频率特性。

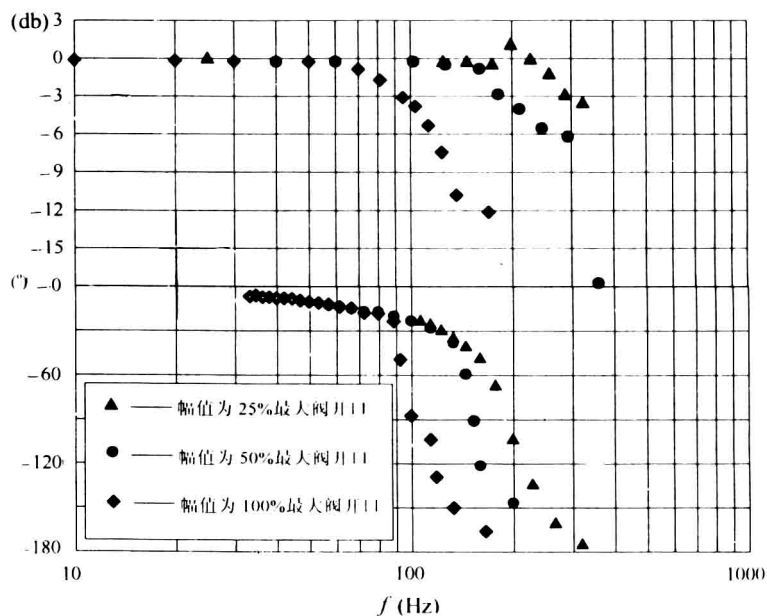


图 1-1 运用阀芯双运动自由度设计的 2D 数字伺服阀的频率特性