增量式数字液压控制技术

彭利坤 陈佳 宋飞 徐世杰 著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

增量式数字液压控制技术

彭利坤　陈　佳　宋　飞　徐世杰　著
邢继峰　主　审

安徽理工大学 藏書 图書馆

机械工业出版社

本书在总结数字液压领域已取得的最新研究成果的基础上，给出了数字液压的明确定义，介绍了典型的数字液压元件，探讨了数字液压技术在实际应用中的控制问题。本书主要内容包括数字液压阀、数字液压缸建模与仿真、一体化数字液压舵机、调距桨数字液压系统模型参考自适应控制和返步鲁棒自适应控制、变频数字液压系统自适应控制、数字液压负载敏感系统非线性鲁棒控制、数字液压减摇鳍鲁棒控制及数字液压缸驱动的Stewart平台控制技术等。

本书可供液压领域的科研人员、工程技术人员使用，也可供相关专业的院校师生使用。

图书在版编目（CIP）数据

增量式数字液压控制技术/彭利坤等著. —北京：机械工业出版社，2019.12

ISBN 978-7-111-64159-9

Ⅰ.①增… Ⅱ.①彭… Ⅲ.①数字技术-应用-液压控制 Ⅳ.①TH137-39

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第251635号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：张秀恩 责任编辑：张秀恩 王彦青

责任校对：陈 越 封面设计：严娅萍

责任印制：张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2020年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·20.25印张·415千字

0 001—1 900册

标准书号：ISBN 978-7-111-64159-9

定价：79.00元

电话服务 网络服务

客服电话：010-88361066 机 工 官 网：www.cmpbook.com

010-88379833 机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

010-68326294 金 书 网：www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版 机工教育服务网：www.cmpedu.com

前　言

液压传动与控制技术作为现代工业的基础和支柱，在国防军工、工程机械、交通运输、冶金化工等领域发挥着不可或缺的作用。近年来，随着电子技术、计算机控制技术与液压技术的有机融合，数字液压技术得到了快速发展，有效助力了我国工程技术的腾飞。国外电液数字技术虽然可追溯至20世纪30年代汽车ABS的开发，但真正意义上的数字液压研发在20世纪60年代末期才开始，国内20世纪70年代末至80年代初期也相继开展了相关研究，至2005年左右取得了较多的技术进展，时至今日其应用也日益广泛。历经40多年的发展，数字液压技术无论在理论研究，还是在技术应用上均取得了较大的进展和较多的成果。

目前，对于数字液压的定义国内外比较主流的观点有如下几种。芬兰坦佩雷理工大学（Tampere University of Technology）的Matti Linjiama多年致力于数字液压元件的研究，他认为“液压或气动系统依靠一定数量离散的元件灵活地控制系统的输出”。国内一些学者认为，数字液压技术是将液压终端执行元件直接数字化，通过接受数字控制器发出的脉冲信号和计算机发出的脉冲信号，实现可靠工作的液压技术，将控制还回给电，而数字化的功率放大留给液压。从以上的主流观点可以将数字阀归结为狭义的数字阀（坦佩雷理工大学研究者的观点）与广义的数字阀。据此，具有流量离散化（Fluid Flow Discretization）或控制信号离散化（Control Signal Discretization）特征的液压元件，称为数字液压元件（Digital Hydraulic Component），由数字液压元件构成的液压系统称为数字液压系统（Digital Hydraulic System）。从数字液压阀控液压系统来看，主要有两个方向：增量式数字阀与高速开关式数字阀控制系统。本书主要研究增量式数字阀（或称数字步进阀）控制的液压系统。

作者所在教研团队历经近30年的积极跟踪与研究，在数字步进阀控液压缸及其相关领域从系统理论建模、控制算法开发、驱动电路设计、实验台架搭建到工程应用实践等方面开展了一系列工作，先后研制了数字液压驱动的6自由度舰艇操纵模拟器、海洋环境模拟摇摆台，共计11台套，新研或改造了共计20余艘舰艇的减摇鳍，并在舰船调距桨、飞弹折叠翼、一体化舵机等领域开展了相关试验研究，优点和效果明显。同时，获国家、军队科技进步奖4项，发表数字液压及其控制技术相关论文50余篇（其中EI收录10余篇），以数字液压为题培养博士后1人、博士4人、硕士11人。基于此，现阶段拟对数字液压控制技术的发展现状及研究成果进行梳理归纳、总结反思和展望，形成一本相关的学术专著，以进一步夯实数字液压控制系统设计分析的理论基础及开发应用的实践经验，扩大与同行的学术交流和

技术共享，并为后续人才培养与相关技术开发奠定更加坚实的基础。

本书第1章介绍了数字液压元件和控制技术的发展概况，第2、3章介绍了增量式数字液压阀和数字液压缸的结构形式及其工作原理，建模和性能研究。第4~10章介绍了数字液压技术在一体化舵机、调距桨、减摇鳍和6自由度Stewart运动平台上的应用研究。本书第1、10章由彭利坤负责编写，第2~4章由陈佳负责编写，第5、6章由宋飞负责编写，第7~9章由徐世杰负责编写。本团队进行数字液压技术研究是在邢继峰教授的引领下开展的，同时他也是本书的主审专家，在此对他表示由衷地感谢。同时还要感谢曾晓华高工、肖志权博士后、吕帮俊博士、何曦光讲师、熊先锋讲师、潘炜博士、张阳阳博士、刘磊硕士、王圣利硕士、郭靖硕士等，正是由于大家的接力研究才使数字液压技术有了今天的成果，可以说本书也是集体智慧的结晶。同时，本书也参考了一些国内外同行的文献与研究成果，在此一并表示感谢。由于时间与水平限制，书中定有不足或错漏之处，敬请读者批评指正。

本书得到了湖北省自然科学基金项目“一体化数字液压作动器效率最优控制策略研究”资助。(项目编号：2016CFB614)”

作 者

目　录

前　言
第1章　绪论 …… 1
1.1　液压控制技术的发展与应用 …… 1
1.1.1　流体控制相关理论的发展 …… 1
1.1.2　液压控制技术的发展及应用 …… 2
1.2　数字液压元件 …… 3
1.2.1　数字液压技术简介 …… 3
1.2.2　数字液压阀 …… 5
1.2.3　数字液压缸 …… 6
1.2.4　数字液压泵 …… 7
1.2.5　数字液压马达 …… 9
1.3　数字液压阀的新发展 …… 10
1.3.1　高速开关电－机械执行器的发展 …… 10
1.3.2　高速开关阀阀体结构优化与创新 …… 11
1.3.3　高速开关阀并联阀岛研究 …… 13
1.3.4　高速开关阀应用新领域 …… 15
1.4　数字阀控制技术 …… 16
参考文献 …… 18
第2章　数字液压阀 …… 19
2.1　典型增量式数字阀结构形式 …… 19
2.1.1　单步进电动机数字阀 …… 20
2.1.2　双步进电动机数字阀 …… 23
2.1.3　2D数字阀（液压螺旋伺服式数字阀） …… 24
2.2　增量式数字阀建模 …… 26
2.2.1　数学模型 …… 26
2.2.2　AMESim模型 …… 28
2.3　增量式数字阀仿真分析 …… 33
2.3.1　阀口截面形式影响分析 …… 33
2.3.2　阀芯遮盖形式影响分析 …… 43
2.3.3　输入信号形式影响分析 …… 47
2.4　小结 …… 51
参考文献 …… 52
第3章　数字液压缸建模与仿真 …… 54
3.1　典型的内驱式数字液压缸结构形式 …… 54

3.1.1 机械反馈式数字液压缸 …… 54
3.1.2 磁力耦合式数字液压缸 …… 55
3.1.3 螺旋伺服式数字液压缸 …… 56
3.1.4 内循环式数字液压缸 …… 58
3.1.5 多闭环控制数字液压缸 …… 58
3.2 数字液压缸建模 …… 59
3.2.1 传递函数模型 …… 60
3.2.2 状态方程模型 …… 67
3.3 理论解析 …… 76
3.3.1 控制结构和参数意义解析 …… 76
3.3.2 系统位移响应特性分析 …… 77
3.3.3 速度特性分析 …… 82
3.3.4 活塞及阀芯平衡位置分析 …… 82
3.3.5 补偿控制分析 …… 84
3.4 仿真分析 …… 87
3.4.1 系统阶跃响应特性分析 …… 87
3.4.2 系统供油压力和数字滑阀死区影响仿真分析 …… 87
3.4.3 数字滑阀径向泄漏及传动间隙影响仿真分析 …… 92
3.4.4 反馈形式及刚度影响仿真分析 …… 99
3.4.5 非线性摩擦及 Stribeck 速度影响仿真分析 …… 99
3.4.6 非对称阀控非对称缸方式分析 …… 104
3.5 小结 …… 108
参考文献 …… 109
第 4 章 一体化数字液压舵机 …… 112
4.1 一体化数字液压舵机系统方案设计 …… 113
4.1.1 设计要求 …… 113
4.1.2 系统方案 …… 113
4.2 转舵机构及负载特性分析 …… 116
4.2.1 转舵机构分析 …… 116
4.2.2 负载特性分析 …… 117
4.3 试验平台设计 …… 123
4.3.1 硬件设计 …… 124
4.3.2 软件系统设计 …… 127
4.4 试验与分析 …… 131
4.4.1 空载试验 …… 131
4.4.2 加载试验 …… 137
4.5 小结 …… 145
参考文献 …… 146

第 5 章　调距桨数字液压系统模型参考自适应控制 …… 147
5.1　模型参考自适应控制的理论基础 …… 149
5.1.1　Popov 超稳定理论 …… 149
5.1.2　无零点系统的模型跟随问题 …… 149
5.2　模型参考自适应控制器设计 …… 151
5.2.1　系统描述 …… 151
5.2.2　控制器设计 …… 152
5.3　控制器仿真研究 …… 156
5.3.1　对阶跃信号响应的仿真研究 …… 158
5.3.2　对外负载扰动的仿真研究 …… 159
5.3.3　对噪声干扰的仿真研究 …… 161
5.3.4　对输入干扰的仿真研究 …… 163
5.4　试验验证 …… 165
5.4.1　调距桨数字液压系统试验平台 …… 165
5.4.2　调距桨数字液压系统试验研究 …… 170
本章小结 …… 175
5.5　小结 …… 176
参考文献 …… 176
第 6 章　调距桨数字液压系统返步鲁棒自适应控制 …… 178
6.1　鲁棒自适应控制的理论基础 …… 178
6.2　模型参考 Backstepping 鲁棒自适应控制器设计 …… 179
6.2.1　系统描述 …… 179
6.2.2　自适应律求解 …… 180
6.2.3　控制器稳定性证明 …… 184
6.3　参考模型优化 …… 185
6.4　控制器仿真研究 …… 187
6.4.1　对阶跃信号响应的仿真研究 …… 188
6.4.2　对外负载扰动的仿真研究 …… 188
6.4.3　对噪声干扰的仿真研究 …… 190
6.4.4　对时变参数的仿真研究 …… 192
6.5　小结 …… 194
参考文献 …… 194
第 7 章　变频数字液压系统自适应控制 …… 195
7.1　变频数字液压系统数学模型及其不确定参数分析 …… 195
7.1.1　变频数字液压系统工作原理 …… 195
7.1.2　变频数字液压系统非线性模型 …… 197
7.1.3　变频数字液压系统非线性模型中的不确定参数及输入饱和现象分析 …… 200
7.2　基于自适应滑模控制的变频数字液压系统控制研究 …… 201
7.2.1　不考虑输入饱和的自适应滑模控制器设计 …… 202

7.2.2 考虑输入饱和的自适应滑模控制器设计 …… 204
7.2.3 考虑输入饱和的自适应滑模控制器仿真分析 …… 205
7.3 基于自适应模糊控制的变频数字液压分级压力控制研究 …… 208
7.3.1 变频数字液压系统分级压力控制方案设计 …… 208
7.3.2 系统中不确定函数的最佳模糊逼近 …… 209
7.3.3 不考虑输入饱和的自适应模糊控制器的设计 …… 210
7.3.4 考虑输入饱和的自适应模糊控制器的设计 …… 213
7.3.5 考虑输入饱和的自适应模糊控制器仿真分析 …… 215
7.4 小结 …… 217
参考文献 …… 217
第8章 数字液压负载敏感系统非线性鲁棒控制 …… 220
8.1 数字液压负载敏感系统非线性建模及负载敏感压力设定值研究 …… 220
8.1.1 数字液压负载敏感系统工作原理 …… 220
8.1.2 数字液压负载敏感系统非线性模型 …… 221
8.1.3 数字液压负载敏感系统非线性模型中的不确定参数分析 …… 225
8.1.4 负载敏感压力设定值对系统动态特性的影响及能耗特性的影响 …… 227
8.2 不考虑输入饱和的数字液压负载敏感系统动态反馈控制研究 …… 230
8.2.1 数字液压负载敏感系统鲁棒动态反馈控制器设计 …… 230
8.2.2 数字液压负载敏感系统鲁棒动态反馈控制器仿真分析 …… 234
8.3 考虑输入饱和的数字液压负载敏感系统静态补偿控制研究 …… 237
8.3.1 考虑输入饱和的静态补偿器设计 …… 237
8.3.2 考虑输入饱和的静态补偿器仿真分析 …… 241
8.4 数字液压负载敏感、分级压力、变频控制对比研究 …… 243
8.5 小结 …… 245
参考文献 …… 245
第9章 数字液压减摇鳍鲁棒控制 …… 247
9.1 数字液压减摇鳍执行机构原理 …… 248
9.2 数字液压减摇鳍仿真模型 …… 249
9.2.1 海浪模型 …… 249
9.2.2 船舶横摇模型 …… 250
9.2.3 减摇鳍模型 …… 252
9.2.4 转鳍机构及液压系统建模 …… 252
9.2.5 船舶－减摇鳍－数字液压系统建模 …… 254
9.3 考虑输入饱和及状态饱和的减摇鳍控制器设计及减摇仿真 …… 256
9.3.1 考虑输入饱和的状态反馈控制器设计 …… 257
9.3.2 船舶－减摇鳍－液压系统减摇仿真分析 …… 262
9.4 基于DSP的数字液压减摇鳍半实物仿真平台组成及工作原理 …… 265
9.4.1 数字液压减摇鳍半实物仿真平台硬件组成 …… 266
9.4.2 上位机程序设计 …… 267

9.5 数字液压减摇鳍性能试验及结果分析 …… 268
9.5.1 数字液压减摇鳍鳍角跟踪试验 …… 268
9.5.2 数字液压减摇鳍生摇试验 …… 269
9.5.3 数字液压减摇鳍减摇试验 …… 271
9.6 小结 …… 273
参考文献 …… 273
第10章 数字液压缸驱动的Stewart平台控制技术 …… 275
10.1 数字液压缸驱动的Stewart平台系统组成 …… 276
10.1.1 总体构成 …… 276
10.1.2 控制系统 …… 277
10.1.3 测试系统 …… 278
10.1.4 软件设计 …… 279
10.2 Stewart平台系统振动的微分方程 …… 280
10.2.1 系统刚度矩阵 …… 280
10.2.2 分支局部坐标系 …… 282
10.2.3 RPY角描述 …… 282
10.2.4 系统振动的微分方程 …… 283
10.3 液压Stewart平台的起动与换向振动 …… 285
10.3.1 液压Stewart平台振动的解析表达式 …… 285
10.3.2 液压Stewart平台起动平稳性分析 …… 288
10.3.3 运动惯性引起的液压冲击 …… 290
10.3.4 非对称结构引起的压力跃变 …… 291
10.3.5 试验结果与讨论 …… 293
10.4 数字液压缸驱动Stewart平台的鲁棒抑振控制 …… 296
10.4.1 并联6分支液压伺服系统的数学模型 …… 297
10.4.2 液压Stewart平台的控制策略探讨 …… 299
10.4.3 基于摩擦力观测器和理想分支力的前馈力补偿 H_∞ 抑振控制 …… 300
10.5 小结 …… 310
参考文献 …… 311

第1章 绪 论

本章介绍了液压控制技术的发展与应用，并从数字液压阀、数字液压缸、数字液压泵、数字液压马达等方面说明了数字液压技术，也介绍了近十年来数字液压阀的发展以及相关控制技术。

1.1 液压控制技术的发展与应用

液压传动与控制技术是人类在生产实践中逐步发展起来的。随着现代科学技术的飞速发展，它不仅充当一种传动方式，而且作为一种控制手段，连接了现代微电子技术和大功率控制对象之间的桥梁，成为现代控制工程中不可或缺的重要技术手段。

1.1.1 流体控制相关理论的发展

对流体力学学科的形成作出第一个贡献的是古希腊人阿基米德（Archimedes），他建立了物理浮力定律和液体平衡理论。1648 年法国人帕斯卡（B. Pascal）提出静止液体中压力传递的基本定律，奠定了液体静力学基础。17 世纪，力学奠基人牛顿（Newton）研究了在流体中运动的物体所受到的阻力，针对黏性流体运动时的内摩擦力提出了牛顿黏性定律。

1738 年瑞士人欧拉（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出发，研究供水管道中水的流动，进行试验分析，得到了流体定常运动下的流速、压力、流道高度之间的关系——伯努利方程。欧拉方程和伯努利方程的建立，是流体动力学作为一个分支学科建立的标志，从此开始了用微分方程和试验测量进行流体运动定量研究的阶段。

1827 年法国人纳维（C. L. M. Navier）建立了黏性流体的基本运动方程；1845 年英国人斯托克斯（G. G. Stokes）又以更合理的方法导出了这组方程，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 年英国人雷诺（O. Reynolds）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。

在 20 世纪流体传动与控制技术飞速发展并日趋成熟，控制理论与工程实践相互结合飞速发展，这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 年美国人米诺尔斯基（N. Minorsky）提出用于船舶驾驶伺服机构的比例、积

分、微分（PID）控制方法。1932 年瑞典人奈奎斯特（H. Nyquist）提出根据频率响应判断系统稳定性的准则。1948 年美国科学家埃文斯（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）出版《信息论》与《控制论》专著。

1.1.2 液压控制技术的发展及应用

技术进步的需要是液压控制技术发展的推动力，液压控制技术是早已成熟的液压传动技术的新发展，是自动控制领域的一个重要组成部分。

1795 年英国人布拉默（J. Bramsh）发明了第一台液压机，它的问世是流体动力应用于工业的成功典范，到 1826 年液压机已被广泛应用，此后还发展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，方便了液压技术的进一步发展。19 世纪是流体传动技术走向工业应用的世纪，它奠基于流体力学成果之上，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。

1905 年美国人詹尼（Janney）首先将矿物油引入传动介质，并设计研制了带轴向柱塞机械的液压传动装置，并于 1906 年应用于军舰的炮塔装置上，为现代液压技术的发展揭开了序幕。1922 年瑞士人托马（H. Thoma）发明了径向柱塞泵。1936 年美国人威克斯（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。稍后电磁阀和电液换向滑阀的问世，使先导控制形式多样化。

20 世纪 40 年代由于军事刺激，高速喷气式飞行器要求响应快且精度高的操纵控制，1940 年年底，在飞机上出现了电液伺服系统，坦克装甲车上开始应用机液伺服转向系统。作为电液转换器，当时滑阀由伺服电动机驱动，由于电动机惯量大，所构成的电液转换器时间常数大，限制了整个系统的响应速度。

第二次世界大战后液压技术在航天、国防、汽车和机床工业中得到广泛应用，并且走向产业独立发展，西方各国相继成立了行业协会和专业学会，液压传动和控制作为新兴技术得到重视，这一时期称得上是液压工业的黄金岁月。

1950 年摩根（Moog）研制成功采用微小输入信号的电液伺服阀后，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。20 世纪 60 年代，结构多样的电液伺服阀相继出现，尤其是干式力矩马达的研制成功，使得电液伺服阀的性能日趋完善，促使电液伺服系统迅速发展。1960 年布莱克本的《液动气动控制》和 1967 年梅里特（Merritt）的《液压控制系统》两部科学著作相继问世，对液压控制理论作出了系统、科学的阐述，标志着液压控制技术已开始走向成熟。

1970 年前后信号功率介于开关控制和伺服控制之间的比例阀开始出现，但应用还不多。20 世纪 80 年代以后，随着材料和工艺技术的进步，电液伺服阀的成本不断降低，性能明显提高，使得电液伺服系统应用更加广泛。但是，由于电液伺服阀对液体的清洁度要求十分苛刻，系统效率低、能耗大，综合费用还是相当高。由

此，一种可靠、价廉、控制精度和响应速度均能满足工业控制需要的电液比例控制技术应运而生，得到了比电液伺服阀更为广泛的应用。

液压控制技术在军事工业中，用于飞机的操纵系统、雷达跟踪和舰船舵机、导弹的位置控制、坦克火炮的稳定装置等。在民用工业中，用于仿形或数控机床，船舶舵机和减摇系统，冶金工业的钢带跑偏控制、张力控制，工程领域盾构掘进装置、工程车辆中各类力控制装置，汽车的无人驾驶、自动变速、主动悬挂，试验装置方面的抗振试验台、材料试验机、道路模拟试验系统等。总之，液压控制技术应用越来越加广泛，在各个工业部门发挥着越来越重要的作用。尤其是计算机的大量应用促使液压控制技术得到更迅速的发展和更广泛的应用。

1.2 数字液压元件

1.2.1 数字液压技术简介

自动化工业的发展主要依靠两大基础技术，电传动技术和流体传动技术，在某种程度上可以说，发达国家正是利用这两大技术完成了工业革命。其中，流体传动技术又以液压传动技术为主，在大量的工业主机和自动化作业线中，液压传动和液压控制技术应用极为广泛。

传统液压技术是一种模拟量控制技术，主要分为开关控制、比例控制和伺服控制，这种系统尤其是伺服控制结构复杂、易受干扰、价格高昂，需要专门的流控专业人员才能掌握。自20世纪70年代以来，计算机控制技术和集成传感技术发展得越来越完善，这为微电子技术和液压技术的结合创造了良好的条件。随着计算机的功能越来越强大，数字控制技术在国民经济各部门的广泛应用，其与液压技术和微电子技术的结合已成为一种必然趋势，这就催生了数字液压技术。

其实数字液压雏形可以追溯到20世纪30年代，德国博世公司第一个将高速开关阀应用到汽车ABS中，实现了对轮缸制动压力的控制。高速开关阀作为ABS的关键元件，其本质上就是一个数字阀，而ABS系统本质上就是一个数字伺服系统。此后较长的一段时间内，ABS的发展史就是数字液压的发展史，但此时并没有数字液压的概念。

2010年10月，来自7个国家的115名专家学者召开了第三届数字流体动力会议，众多专家学者对数字液压表现出浓厚的兴趣，但数字液压的概念，目前国际上并没有一个统一的标准，不同国家的专家学者有不同的理解。为此，2011年在芬兰坦佩雷恩理工大学召开的第十二届国际流体会议上，坦佩雷恩理工大学Matti Linjama给出了数字液压即数字流体动力（Digital Fluid Power，简称DFP）的定义：液压或气动系统依靠一定数量离散的元件灵活地控制系统的输出。DFP主要分为两大类：一类是通过PCM（Pulse Code Modulation）控制多个并行排布元件的组合状

态实现不同需求的输出；另一类是通过调节频率信号的频率或者 PWM（Pulse Width Modulation）信号的占空比控制单个元件实现不同的输出特性。有时也将步进电动机或 bang－bang 控制滑阀算为广义上的数字液压。此外，有些学者将比例或伺服元件在阀内部集成了 D/A 转换元件，故从外部看为数字控制，但其最终被控量依然是模拟量，并不是数字液压。

国内，针对数字液压并没有一个权威的定义，有的将比例或伺服元件的数字化控制理解为数字液压，有的将开关液压元件理解为数字液压。某公司给出了数字液压的定义：液压执行器件（缸、马达）的运动特性与电脉冲一一对应，电脉冲的频率对应液压缸的运动速度（液压马达角速度），电脉冲的数量对应液压缸的运动行程（液压马达角度），执行器件的精度几乎不因负载、油压甚至是泄漏等的影响而发生变化，这样的液压技术，称之为数字液压。

由此可知，国内外专家学者对数字液压概念的认知存在较大差别。因此本书很难给出一个数字液压的标准定义。为了概要介绍和理解数字液压的概念，本章将简要介绍几类常见的数字液压。目前研究的数字液压大致可以分为以下几类：

1）控制方式数字化。即控制信号采用 PWM 信号，而非模拟信号。由于控制信号只有高电平和低电平，故有学者将之称为数字液压。该类数字液压通过 PWM 信号驱动比例阀或伺服阀的力或力矩马达，进而控制阀芯的运动。该原理实现了控制方式的数字化，省去了 D/A 卡，且抗干扰能力、稳定性及动态响应都有所提高。20 世纪 80 年代后期以来，随着步进电动机的发展，逐渐出现了用步进电动机代替力或力矩马达的新型比例或伺服阀，其控制方式也为数字控制，且阀芯位移和脉冲数量有关。本书大多数研究内容即是基于步进电动机控制的数字控制技术。

2）元件数字化。即将元件按照一定的规则进行排列组合，通过元件之间的组合实现对系统的控制，此种控制方式因元件只有 0 和 1 两种状态，即只有开和关，故也称之为数字液压。例如将阀的通流面积、泵或马达的排量、液压缸的容腔等按照 1、2、4、8……即二进制的规则进行排列，工作时通过不同元件的组合实现输出流量的数字化。该种数字液压本质上是将原本连续的流量输出转变为离散的流量输出。

3）高速开关元件。主要为高速开关阀，其控制方式采用 PWM 控制，通过阀的高频开关实现对系统平均流量的控制，因其控制信号是 PWM 信号，且阀的输出流量也为数字化流量，故未将此控制归为上述两种类型。

目前，国内外专家学者围绕 DFP 的概念提出了数字阀、数字泵、数字缸、数字变压器、数字马达等概念，并做了初步的工作原理分析，阐述了可能存在的优点。部分学者通过仿真和试验证明了数字液压系统在节能、无泄漏、高控制自由度、抗污染性、高冗余性、多功能性等方面有着模拟量控制系统无可比拟的优势，是未来液压传动理论与技术的重要发展方向之一。通过对比发现，数字液压技术和传统的液压技术相比，有如下优点：

1）鲁棒性强，结构简单，可靠性高；所用元件均为开关或集成元件，加工制造相对简单，成本较低，可靠性高。

2）更好的特性，较高的灵活性和可编程程度；省去了D/A卡，方便与计算机通信，可编程性好。

3）特性主要由控制软件决定，数字系统对硬件要求简单，不依靠节流达到控制效果，但需要新颖的或复杂的控制策略。

当然，数字液压也面临一些挑战，例如噪声和压力冲击，开关技术的寿命和耐久性，并行连接技术的成本和体积，复杂的非线性控制等。以下分别简要介绍数字阀、数字缸、数字泵、数字马达等。

1.2.2 数字液压阀

用数字信息直接控制的阀，称为电液数字阀，简称数字阀。数字阀可直接与计算机接口，不需要D/A转换器。与伺服阀、比例阀相比，这种阀结构简单、工艺性好、价廉、抗污染能力好、重复性好、工作稳定可靠、功耗小。它的应用也最为广泛，将其与普通的液压缸、泵、马达组合起来，就可以得到不同的数字缸、数字泵、数字马达等。在计算机实时控制的电液系统中，它已部分取代了比例阀或伺服阀，为计算机在液压系统中的应用开拓了一条新的道路。

目前数控液压系统中应用的数字阀按控制方式的不同大致可以分为3种：二进制组合阀、步进式数字阀和高速开关阀。

1. 二进制组合阀

二进制组合阀的驱动信号是二进制驱动信号，可方便地与计算机或其他数字式控制装置直接连接。这种数字阀是由多个按二进制排列的阀门组成的阀组。每个阀门的流量系数按二进制序列设计，即按2的幂次设计，例如2^{-2}、2^{-1}、2^{0}、2^{1}、2^{2}、2^{3}等设计。例如，8位数字阀由8个二进制信号驱动，当这8个二进制数取不同的值时，可以得到0～255的数值，可调比达255∶1，增加数字阀的位数，可提高可调比。组成数字阀的各阀是开关阀，即只有开和关两种状态。因此，对它们的控制可采用电磁阀或带弹簧返回的活塞式执行机构实现。该阀的特点是分辨率高（数字阀的位数越多，可控制的流量分辨率越高）、精度高、响应速度快、关闭特性好、复现性好、跟踪性好，但缺点是结构复杂，价格高，数字阀位数越多，控制元件越多，结构越复杂，价格也越高，因此影响了其使用范围。

2. 步进式数字阀

步进式数字阀是利用步进电动机作为电机械转换器的，步进电动机接收脉冲序列的控制，输出位移转角，转角与输入的脉冲数成正比。然后通过机械转换装置，一般为齿轮减速的凸轮机构或螺杆机构，把转角变成阀芯的阀位移，使阀口开启或关闭。步进电动机转过一定的角度相当于数字阀的一定开度。因此，这种阀可以控制相当大的流量和压力范围。其实，该数字阀的控制主要在于步进电动机的控制，

步进电动机则可采用计算机或可编程控制器（PLC）来进行控制。实际上，由于步进电动机的控制方式为步进的，对输入的脉冲数有记忆作用，所以每一采样周期的步数是在原有采样周期步数的基础上增加或减少一些步数来实现，即增量控制法。用这种方法进行控制的阀，又被称为增量式数字阀。步进式数字阀按其结构可以分为滑阀式、锥阀式、转阀式和喷嘴挡板式，按其功能又可分为数字溢流阀、数字流量阀、数字方向流量阀。目前在国内还处在开发研制试验阶段，也可见到不少的产品和种类，但尚未形成系列化，而国外已有系列化的数字流量阀、压力阀和方向流量阀等。

3. 高速开关阀

高速开关阀早期主要是应用在一些要求快速操作的液压系统中，其后，由于其数字化的特征在计算机控制的液压系统中越来越受到重视。按电—机械转换装置可分为螺管电磁铁式、盘式电磁铁式、力矩马达和压电晶体式等。目前应用最广泛的是高速电磁开关阀，采用脉宽控制（PWM）方式，借助于电磁铁所产生的吸力，使得阀芯高速正反向运动，从而使液流在阀口处产生交替通断，达到对流量进行连续控制的目的。我国的高速电磁开关阀研究始于20世纪80年代后期，与国外相比，起步较晚，响应时间一般在几毫秒和几十毫秒之间，而响应时间小于1ms的只在日本、美国、德国和英国等少数国家有报道。

1.2.3 数字液压缸

有关数字液压缸的研制，国外早在20世纪六七十年代就开始了，相比之下，国内的起步较晚。1970年，德国力士乐公司研制出一种基于螺纹伺服机构的液压脉冲缸，但它在本质上还属于机液伺服机构，利用三通阀来控制差动缸，这种缸零件少，结构紧凑，但加工难度较高，不利于大规模推广应用。1977年，日本东京计器公司推出一种电液脉冲缸，其原理是利用位置反馈把丝杆装在活塞杆里，使活塞位置直接机械反馈到阀芯，其特点是结构简单，定位精度高。但这些国外产品的价格十分高昂，还达不到工业应用的要求，所以没有得到广泛的应用。

国内研究人员对该技术的研究，则起步于20世纪70年代末，一直在进行不断的研究与改善，尤其是2002年纳入国家“十五”攻关项目后，更进一步促进了该技术的发展。其中，以北京亿美博有限公司为代表，该公司承担了“十五”国家科技攻关计划，于2003年在北京通过专家组验收。

这种数字液压缸实质上是一种增量式电液步进液压缸，具有结构紧凑、可靠性高、使用维护简单等优点，只需一般的技术人员便可掌握，调试十分方便，发展潜力大。它的基本思想是将液压缸、数字阀、传感器设计成一个整体，全部封装在缸内，实物图如图1-1所示，控制器是独立于缸体之外的部分，具有智能性，操作简单易懂。目前开发出的数字缸及其智能型傻瓜控制器，已经可以完成从公斤级到千吨级的精确控制，其速度范围可以实现0.1～500mm/s，可以满足工业控制领域中

绝大部分自动控制的要求。

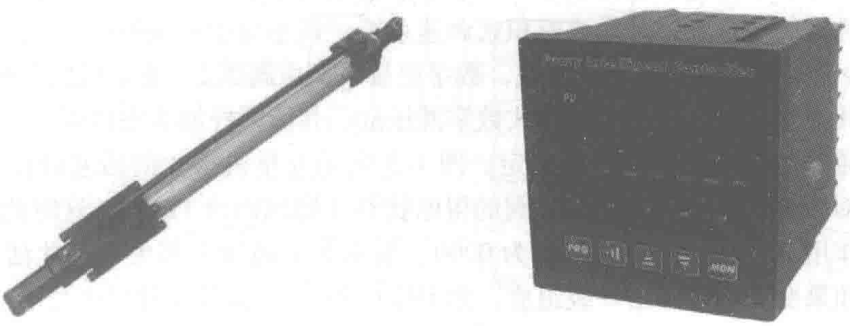


图 1-1 数字液压缸及智能控制器

此类步进液压缸的控制原理如图 1-2 所示，数字阀靠步进电动机驱动，步进电动机可以由计算机或可编程控制器（PLC）发出的脉冲序列来进行控制。利用阀来控制油路的通断进而达到控制液压缸运动的目的，液压缸的运动方向由步进电动机的转动方向控制，液压缸的运动速度和位移与步进电动机的转速和角位移是一一对应的正比关系，而步进电动机的转速和角位移与控制脉冲的频率和个数也是一一对应成正比的，所以通过给计算机或 PLC 输入一些简单的设定值，就可以完成缸的全部控制。同时由于缸体内置传感器可将运动信息反馈给数字阀，就极大地提高了控制精度，也简化了缸体外部的控制系统，由原来非常复杂的液压伺服闭环控制变成简单的“近似”开环控制，这也是其最突出的一点。

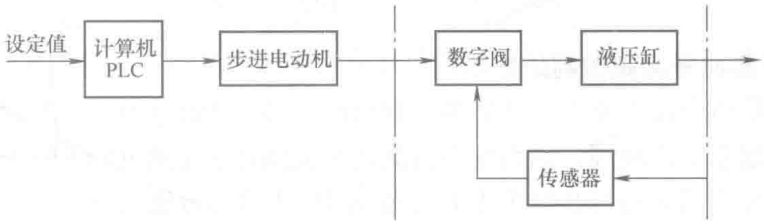


图 1-2 步进液压缸的控制原理

1.2.4 数字液压泵

数字泵通常由变量泵和计算机控制器两部分组成，因泵的变量机构接受计算机发送的数字信号而得名。它具有抗介质污染强、滞环误差小、重复精度高、调节灵活、节能、便于与液压设备主机组成机电液一体化系统等特点。根据变量机构执行元件的不同，可归结为 4 种：基于组合缸控制的数字泵、基于高速开关阀控制的数字泵、基于步进电动机控制的数字泵和基于变频器控制的数字泵。