



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

中国制造
2025



海洋智能装备 液压技术

刘延俊 薛钢 编著



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目



“中国制造2025”
出版工程

海洋智能装备 液压技术

刘延俊 薛钢 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要介绍应用于海洋装备中的液压传动技术。全书将传统的液压技术基本知识与近年来其在海洋装备中的实际应用相结合,全面介绍了液压流体力学基础、主要元器件(包括液压泵、液压马达、液压缸、液压控制阀、液压辅助装置等)、基本回路、典型液压系统、伺服系统及其在海洋中的应用,同时,介绍了海洋装备液压系统的设计与计算。本书中的许多实例是作者近三十年在液压技术和海洋工程交叉领域科研方面所做的工作。书中元件的图形符号、回路以及系统原理图全部采用国家最新图形符号绘制,并在附录一中列出;附录二列出了常见液压元件、回路、系统常见的故障与排除措施。

本书可供从事海洋工程与装备技术工作者参阅使用,也可作为工科专业相关研究方向的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

海洋智能装备液压技术/刘延俊,薛钢编著. —北京:化学工业出版社,2019.2

“中国制造2025”出版工程

ISBN 978-7-122-33488-6

I. ①海… II. ①刘…②薛… III. ①海洋工程-工程设备-液压技术 IV. ①TH137

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第288085号

责任编辑:曾越 张兴辉
责任校对:边涛

文字编辑:陈喆
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印装:三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张18½ 字数343千字 2019年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888
网 址: <http://www.cip.com.cn>

售后服务:010-64518899

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:98.00元

版权所有 违者必究

科学是永无止境的，它是一个永恒之谜。

——爱因斯坦



“中国制造2025”
出版工程

《“中国制造 2025”出版工程》

编委会

主任

孙优贤（院士）

副主任（按姓氏笔画排序）

王天然（院士） 杨华勇（院士） 吴澄（院士）

陈纯（院士） 陈杰（院士） 郑南宁（院士）

桂卫华（院士） 钱锋（院士） 管晓宏（院士）

委员（按姓氏笔画排序）

马正先 王大轶 王天然 王荣明 王耀南 田彦涛

巩水利 乔非 任春年 伊廷锋 刘敏 刘延俊

刘会聪 刘利军 孙长银 孙优贤 杜宇雷 巫英才

李莉 李慧 李少远 李亚江 李嘉宁 杨卫民

杨华勇 吴飞 吴澄 吴伟国 宋浩 张平

张晶 张从鹏 张玉茹 张永德 张进生 陈为

陈刚 陈纯 陈杰 陈万米 陈长军 陈华钧

陈兵旗 陈茂爱 陈继文 陈增强 罗映 罗学科

郑南宁 房立金 赵春晖 胡昌华 胡福文 姜金刚

费燕琼 贺威 桂卫华 柴毅 钱锋 徐继宁

郭彤颖 曹巨江 康锐 梁桥康 焦志伟 曾宪武

谢颖 谢胜利 蔡登 管晓宏 魏青松

序

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。近十年来，我国制造业持续快速发展，综合实力不断增强，国际地位得到大幅提升，已成为世界制造业规模最大的国家。但我国仍处于工业化进程中，大而不强的问题突出，与先进国家相比还有较大差距。为解决制造业大而不强、自主创新能力弱、关键核心技术与高端装备对外依存度高等制约我国发展的问题，国务院于2015年5月8日发布了“中国制造2025”国家规划。随后，工信部发布了“中国制造2025”规划，提出了我国制造业“三步走”的强国发展战略及2025年的奋斗目标、指导方针和战略路线，制定了九大战略任务、十大重点发展领域。2016年8月19日，工信部、国家发展改革委、科技部、财政部四部委联合发布了“中国制造2025”制造业创新中心、工业强基、绿色制造、智能制造和高端装备创新五大工程实施指南。

为了响应党中央、国务院做出的建设制造强国的重大战略部署，各地政府、企业、科研部门都在进行积极的探索和部署。加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，推动我国制造模式从“中国制造”向“中国智造”转变，加快实现我国制造业由大变强，正成为我们新的历史使命。当前，信息革命进程持续快速演进，物联网、云计算、大数据、人工智能等技术广泛渗透于经济社会各个领域，信息经济繁荣程度成为国家实力的重要标志。增材制造（3D打印）、机器人与智能制造、控制和信息化技术、人工智能等领域技术不断取得重大突破，推动传统工业体系分化变革，并将重塑制造业国际分工格局。制造技术与互联网等信息技术融合发展，成为新一轮科技革命和产业变革的重大趋势和主要特征。在这种中国制造业大发展、大变革背景之下，化学工业出版社主动顺应技术和产业发展趋势，组织出版《“中国制造2025”出版工程》丛书可谓勇于引领、恰逢其时。

《“中国制造2025”出版工程》丛书是紧紧围绕国务院发布的实施制造强国战略的第一个十年的行动纲领——“中国制造2025”的一套高水平、原创性强的学术专著。丛书立足智能制造及装备、控制及信息技术两大领域，涵盖了物联网、大数

据、3D 打印、机器人、智能装备、工业网络安全、知识自动化、人工智能等一系列核心技术。丛书的选题策划紧密结合“中国制造 2025”规划及 11 个配套实施指南、行动计划或专项规划，每个分册针对各个领域的一些核心技术组织内容，集中体现了国内制造业领域的技术发展成果，旨在加强先进技术的研发、推广和应用，为“中国制造 2025”行动纲领的落地生根提供了有针对性的方向引导和系统性的技术参考。

这套书集中体现以下几大特点：

首先，丛书内容都力求原创，以网络化、智能化技术为核心，汇集了许多前沿科技，反映了国内外最新的一些技术成果，尤其使国内的相关原创性科技成果得到了体现。这些图书中，包含了获得国家与省部级诸多科技奖励的许多新技术，因此，图书的出版对新技术的推广应用很有帮助！这些内容不仅为技术人员解决实际问题，也为研究提供新方向、拓展新思路。

其次，丛书各分册在介绍相应专业领域的新技术、新理论和新方法的同时，优先介绍有应用前景的新技术及其推广应用的范例，以促进优秀科研成果向产业的转化。

丛书由我国控制工程专家孙优贤院士牵头并担任编委会主任，吴澄、王天然、郑南宁等多位院士参与策划组织工作，众多长江学者、杰青、优青等中青年学者参与具体的编写工作，具有较高的学术水平与编写质量。

相信本套丛书的出版对推动“中国制造 2025”国家重要战略规划的实施具有积极的意义，可以有效促进我国智能制造技术的研发和创新，推动装备制造业的技术转型和升级，提高产品的设计能力和技术水平，从而多角度地提升中国制造业的核心竞争力。

中国工程院院士

潘雲鶴

前言

液压技术的应用已有 200 余年的历史。1795 年，世界上第一台水压机问世。然而，直到 20 世纪 30 年代，液压传动才真正得到推广应用。液压传动具有刚性好、结构紧凑、承载能力强、功率重量比大、响应速度快、远距离控制灵活等特点，十分适合在海洋装备中进行应用。液压技术在海洋方面最开始应用于舰载火炮的回转、俯仰以及操舵装置。第二次世界大战后，液压技术开始应用到渔船的绞车等装置上。随着海洋活动的增加和液压产品性能的提升，液压技术逐渐应用到各种船舶、海洋钻井平台、深海探测器以及新能源开发装置等海洋装备中。

海洋环境的特殊性给液压技术带来了新的技术问题，如远距离控制、密封与润滑、压力补偿、防腐蚀、失效与故障诊断等。这些问题的解决对液压技术在海洋装备中的应用有重要意义。

笔者近年来一直从事液压系统的比例与伺服控制（流体动力控制）、海洋可再生能源、深海装备开发利用技术、机械系统智能控制与动态检测技术的研究工作，在海洋工程和液压传动交叉技术领域积累了大量的科研成果和工程经验，对液压系统在海洋装备中的应用有较为深入和全面的了解。因此，为了推动我国海洋工程装备的发展，普及液压技术的相关知识，促进其在海洋中的可靠广泛应用，基于笔者的专业积累，编著此书。

本书全面介绍了液压流体力学基础、主要液压元器件、液压基本回路、液压伺服系统及其在海洋中的应用，总共分为 10 章。第 1 章为绪论，主要介绍了海洋装备液压传动的发展概况、液压传动的工作原理及其组成部分，海洋装备液压传动的特点及应用概况。第 2 章主要介绍了海洋装备中液压系统的流体力学基础知识，包括液压油、静力学、动力学、流动阻力和能量损失、孔口和缝隙流量、空穴现象和液压冲击等。第 3~6 章分别介绍了液压泵和液压马达、液压缸、液压控制阀及液压辅助装置的分类、特点、计算和应用等。第 7 章介绍了几种液压基本回路，并补充了

深海压力补偿技术。第8章介绍了几种典型的海洋装备液压系统，是笔者近三十年在液压技术和海洋工程交叉领域科研、设计、制造、调试方面所做的相关工作，如120kW漂浮式液压海浪发电站、“蛟龙号”液压系统、海底底质声学现场探测设备液压系统等，这些实例旨在提高读者对海洋装备液压技术的认识，启发我们探索更多更可靠更先进的技术。第9章给出了海洋装备液压系统的设计和计算步骤及实例。第10章介绍了液压伺服系统及其在海洋装备中的应用。

本书由山东大学机械工程学院、高效净机械制造教育部重点实验室、海洋研究院刘延俊、薛钢编著。在编写工程中张伟、张健、刘科显、丁洪鹏、武爽、孙景余、杨晓玮、颜飞、丁梁锋、刘婧文、漆焱做了大量的文献查阅、资料整理等工作。

感谢本书编写过程中给予大力支持的单位和个人。由于笔者学识水平有限，书中不足之处在所难免，恳请广大读者和从事相关研究的专家及同行们批评指正。

1 第1章 绪论

- 1.1 海洋装备液压传动的发展概况 / 1
- 1.2 液压传动的工作原理及其组成部分 / 2
 - 1.2.1 液压传动的工作原理 / 2
 - 1.2.2 液压传动系统的组成与图形符号 / 2
- 1.3 海洋装备液压传动的优缺点 / 4
 - 1.3.1 海洋装备液压传动的优点 / 4
 - 1.3.2 海洋装备液压传动的缺点 / 6
- 1.4 液压传动在海洋装备中的应用 / 7
 - 1.4.1 液压传动与海洋油气资源开发装备 / 7
 - 1.4.2 液压传动与海洋新能源利用装备 / 8
 - 1.4.3 液压传动与水下飞行器 / 8

10 第2章 海洋液压流体力学基础

- 2.1 海洋装备液压油 / 10
 - 2.1.1 海洋装备液压油的种类 / 10
 - 2.1.2 海水液压油的优缺点 / 10
 - 2.1.3 液压油的性质 / 11
 - 2.1.4 对海洋装备液压油的要求 / 15
 - 2.1.5 海洋装备液压油的选择 / 15
 - 2.1.6 海洋装备液压油的污染与防治 / 16
- 2.2 液体静力学 / 17
 - 2.2.1 静压力及其特性 / 17
 - 2.2.2 重力作用下静止液体中的压力分布(静力学基本方程) / 18
 - 2.2.3 压力的表示方法和单位 / 19
 - 2.2.4 静止液体中压力的传递(帕斯卡原理) / 20
 - 2.2.5 液体静压力作用在固体壁面上的力 / 21
- 2.3 液体动力学 / 22
 - 2.3.1 基本概念 / 22

- 2.3.2 连续性方程 / 25
- 2.3.3 伯努利方程 / 26
- 2.3.4 动量方程 / 32
- 2.4 流动阻力和能量损失(压力损失) / 34
 - 2.4.1 流动阻力及能量损失(压力损失)的两种形式 / 34
 - 2.4.2 流体的两种流动状态 / 35
 - 2.4.3 圆管层流 / 38
 - 2.4.4 圆管紊流 / 39
 - 2.4.5 沿程阻力系数 λ / 41
 - 2.4.6 局部阻力系数 ξ / 43
- 2.5 孔口和缝隙流量 / 45
 - 2.5.1 孔口流量 / 45
 - 2.5.2 缝隙流量 / 47
- 2.6 空穴现象和液压冲击 / 49
 - 2.6.1 空穴现象 / 49
 - 2.6.2 液压冲击 / 50

第3章 液压泵及液压马达

- 3.1 液压泵概述 / 53
 - 3.1.1 液压泵的基本工作原理 / 53
 - 3.1.2 液压泵的分类 / 54
 - 3.1.3 液压泵的图形符号 / 54
 - 3.1.4 液压泵的主要性能参数 / 54
 - 3.1.5 液压泵特性及检测 / 56
- 3.2 齿轮泵 / 58
 - 3.2.1 外啮合齿轮泵的结构及工作原理 / 58
 - 3.2.2 外啮合齿轮泵的流量计算 / 59
 - 3.2.3 齿轮泵结构中存在的问题及解决措施 / 59
 - 3.2.4 内啮合齿轮泵 / 61
 - 3.2.5 齿轮泵的优缺点 / 61
- 3.3 叶片泵 / 62
 - 3.3.1 双作用式叶片泵 / 62
 - 3.3.2 单作用式叶片泵 / 65
 - 3.3.3 双联叶片泵 / 68
 - 3.3.4 叶片泵的优缺点 / 69
- 3.4 柱塞泵 / 69

- 3.4.1 径向柱塞泵 / 70
- 3.4.2 轴向柱塞泵 / 71
- 3.4.3 柱塞泵的优缺点 / 73
- 3.4.4 柱塞泵在海洋中的应用 / 73
- 3.5 螺杆泵 / 74
- 3.6 液压马达简介 / 75
 - 3.6.1 液压马达的分类 / 75
 - 3.6.2 液压马达的工作原理 / 75
 - 3.6.3 液压马达的主要性能参数 / 76
 - 3.6.4 液压马达的图形和符号 / 77
- 3.7 液压泵的性能比较及应用 / 78

79 第4章 液压缸

- 4.1 液压缸种类和特点 / 79
 - 4.1.1 活塞缸 / 79
 - 4.1.2 柱塞缸 / 82
 - 4.1.3 摆动缸 / 83
 - 4.1.4 其他形式的液压缸 / 84
- 4.2 海洋液压缸结构 / 85
 - 4.2.1 缸筒及缸盖组件 / 85
 - 4.2.2 活塞与活塞杆组件 / 87
 - 4.2.3 缓冲装置 / 93
 - 4.2.4 排气装置 / 94
- 4.3 液压缸的设计与计算 / 94
 - 4.3.1 液压缸的设计依据与步骤 / 95
 - 4.3.2 液压缸的主要尺寸确定 / 95
 - 4.3.3 强度及稳定性校核 / 97
 - 4.3.4 缓冲计算 / 99

101 第5章 液压控制阀

- 5.1 液压控制阀概述 / 101
 - 5.1.1 液压阀的分类 / 101
 - 5.1.2 海洋装备对液压阀的基本要求 / 102
 - 5.1.3 液压阀在海洋环境中的应用方法 / 102
- 5.2 方向控制阀 / 103

- 5.2.1 单向阀 / 103
- 5.2.2 换向阀 / 104
- 5.3 压力控制阀 / 110
 - 5.3.1 溢流阀 / 110
 - 5.3.2 减压阀 / 115
 - 5.3.3 顺序阀 / 117
 - 5.3.4 压力继电器 / 118
- 5.4 流量控制阀 / 119
 - 5.4.1 节流口的流量特性 / 120
 - 5.4.2 节流阀 / 121
 - 5.4.3 调速阀 / 124
 - 5.4.4 温度补偿调速阀 / 125
 - 5.4.5 溢流节流阀 / 126
 - 5.4.6 分流集流阀 / 127
- 5.5 其他类型的控制阀 / 129
 - 5.5.1 比例控制阀 / 129
 - 5.5.2 插装阀(逻辑阀) / 133
 - 5.5.3 叠加阀 / 136

第6章 液压辅助装置

- 6.1 蓄能器 / 137
 - 6.1.1 蓄能器的功用 / 137
 - 6.1.2 蓄能器的分类 / 138
 - 6.1.3 蓄能器的容量计算 / 140
 - 6.1.4 蓄能器的安装和使用 / 141
- 6.2 油箱及热交换器 / 141
 - 6.2.1 油箱的作用和结构 / 141
 - 6.2.2 油箱的设计要点 / 142
 - 6.2.3 油箱容积的确定 / 143
 - 6.2.4 热交换器 / 143
- 6.3 过滤器 / 145
 - 6.3.1 过滤器的功用 / 145
 - 6.3.2 过滤器的性能指标 / 145
 - 6.3.3 过滤器的典型结构 / 146
 - 6.3.4 过滤器的选用 / 149
 - 6.3.5 过滤器的安装 / 149

- 6.4 连接件 / 150
 - 6.4.1 油管 / 150
 - 6.4.2 管接头 / 152
- 6.5 密封装置 / 153
 - 6.5.1 O形圈密封 / 154
 - 6.5.2 间隙密封 / 154
 - 6.5.3 压力补偿器 / 156

158 第7章 海洋液压基本回路

- 7.1 海洋压力控制回路 / 159
 - 7.1.1 海洋调压回路 / 159
 - 7.1.2 海洋减压回路 / 160
 - 7.1.3 海洋增压回路 / 160
 - 7.1.4 海洋保压回路 / 161
 - 7.1.5 海洋卸荷回路 / 163
 - 7.1.6 海洋平衡回路 / 163
 - 7.1.7 海洋锁紧回路 / 164
- 7.2 海洋速度控制回路 / 164
 - 7.2.1 海洋调速回路 / 164
 - 7.2.2 海洋快速运动回路 / 177
 - 7.2.3 海洋速度换接回路 / 179
 - 7.2.4 海洋工程装备实例 / 180
- 7.3 方向控制回路 / 186
 - 7.3.1 简单方向控制回路 / 186
 - 7.3.2 复杂方向控制回路 / 186
- 7.4 多执行元件控制回路 / 188
 - 7.4.1 顺序动作回路 / 188
 - 7.4.2 同步回路 / 192
 - 7.4.3 多缸工作运动互不干扰回路 / 194
- 7.5 深海压力补偿技术 / 195
 - 7.5.1 压力补偿技术 / 196
 - 7.5.2 深海油箱设计实例 / 196
 - 7.5.3 压力补偿技术的应用 / 198

200 第8章 海洋装备典型液压系统



- 8.1 液压系统图的阅读和分析方法 / 200
 - 8.1.1 液压系统图的阅读 / 200
 - 8.1.2 液压系统图的分析 / 201
- 8.2 120kW 漂浮式液压海浪发电站 / 201
 - 8.2.1 概述 / 201
 - 8.2.2 120kW 漂浮式液压海浪发电站液压系统工作原理 / 202
- 8.3 “蛟龙号” 液压系统 / 203
 - 8.3.1 概述 / 203
 - 8.3.2 “蛟龙号” 液压系统的工作原理 / 204
 - 8.3.3 “蛟龙号” 液压系统的特点 / 204
- 8.4 海底底质声学现场探测设备液压系统 / 206
 - 8.4.1 概述 / 206
 - 8.4.2 海底底质声学现场探测设备液压系统的工作原理 / 206
- 8.5 海水泵架液压油缸升降系统 / 207
 - 8.5.1 概述 / 207
 - 8.5.2 海水泵架液压油缸升降系统的工作原理 / 208
 - 8.5.3 海水泵架液压油缸升降系统的特点 / 209
- 8.6 深水水平连接器的液压系统 / 209
 - 8.6.1 概述 / 209
 - 8.6.2 深水水平连接器的液压系统的工作原理 / 211
- 8.7 海洋固定平台模块钻机转盘的液压系统 / 213
 - 8.7.1 概述 / 213
 - 8.7.2 海洋固定平台模块钻机转盘液压系统的工作原理 / 214
 - 8.7.3 海洋固定平台模块钻机转盘液压系统的特点 / 215

216

第 9 章 海洋装备液压系统的设计与计算

- 9.1 概述 / 216
- 9.2 明确系统的设计要求 / 216
- 9.3 分析工况编制负载图 / 217
- 9.4 确定系统的主要参数 / 219
- 9.5 拟订系统原理图 / 221
- 9.6 选取液压元件 / 224
- 9.7 系统性能的验算 / 232
- 9.8 绘制工作图、编制技术文件 / 235

237

第 10 章 液压伺服系统

- 10.1 概述 / 237
 - 10.1.1 液压伺服系统的工作原理 / 237
 - 10.1.2 液压伺服系统的构成 / 238
 - 10.1.3 液压伺服系统的分类 / 240
- 10.2 典型的液压伺服控制元件 / 240
 - 10.2.1 滑阀 / 240
 - 10.2.2 射流管阀 / 243
 - 10.2.3 喷嘴挡板阀 / 243
- 10.3 电液伺服阀在海洋装备液压系统中的应用 / 245
 - 10.3.1 喷嘴挡板式电液伺服阀的组成 / 246
 - 10.3.2 电液伺服阀的特性 / 246
 - 10.3.3 电液伺服阀的选用 / 248
 - 10.3.4 电液伺服阀的研究现状和在海洋装备中的应用 / 250

254 附录

附录 1 常用液压与气动元(辅)件图形符号

(摘自 GB/T 786.1—2009) / 254

附录 2 常见液压元件、回路、系统故障与排除措施 / 260

276 参考文献

277 索引

海洋装备液压传动的发展概况

海洋占地球总面积的 71%，蕴藏着丰富的资源，具有重要的战略意义。随着科学技术的进步和陆地资源的日益匮乏，世界各国逐渐重视海洋资源的开发利用。发展海洋装备技术是开发利用海洋资源的重中之重。

液压传动相对机械传动来说，是一门新的技术。1795 年，世界上第一台水压机问世，至今已有 200 余年的历史。然而，液压传动直到 20 世纪 30 年代才真正得到推广应用。液压传动具有刚性好、结构紧凑、承载能力强、功率重量比大、响应速度快、远距离控制灵活等特点，在海洋装备上得到广泛的应用。

液压传动技术在海洋方面最开始应用于舰载火炮的回转、俯仰以及操舵装置。第二次世界大战之后，液压传动技术开始应用到渔船的绞车等装置上。随着海洋活动的增加和液压产品性能的提升，液压传动技术逐渐广泛应用到各种船舶、海洋钻井平台、深海探测器等装置中。

海洋环境对液压系统正常工作的最大危害是对液压元件的腐蚀。海水是含有生物、悬浮泥沙、溶解气体、腐烂有机物和多种盐类的复杂溶液，它对金属的腐蚀受诸多因素的影响，其中主要有海水中的溶氧浓度、海水温度、流速和生物活性等。

在有些情况下液压元件要同海水直接接触，如液压缸活塞杆，它是完全浸泡在海水中工作的，如果海水通过缸盖进入液压缸，会引起系统性能变差，甚至使系统失效，因此，如何防止海水进入液压元件、如何设计系统的密封也是海洋装备液压系统设计中的一个重要方面。

有些液压系统是在深水中工作的，如水下机器人、深潜器等，因此，就要求液压元件能承受高压，而许多液压元件并不具有抗外压能力，如电液伺服阀、力矩电动机的防护壳。

当液压执行器在深水中工作，而液压动力源又在海面上时，工作介质必须通过几百米长的软管输送，从而引起较大的压力损失，影响系统的工作性能与效率。