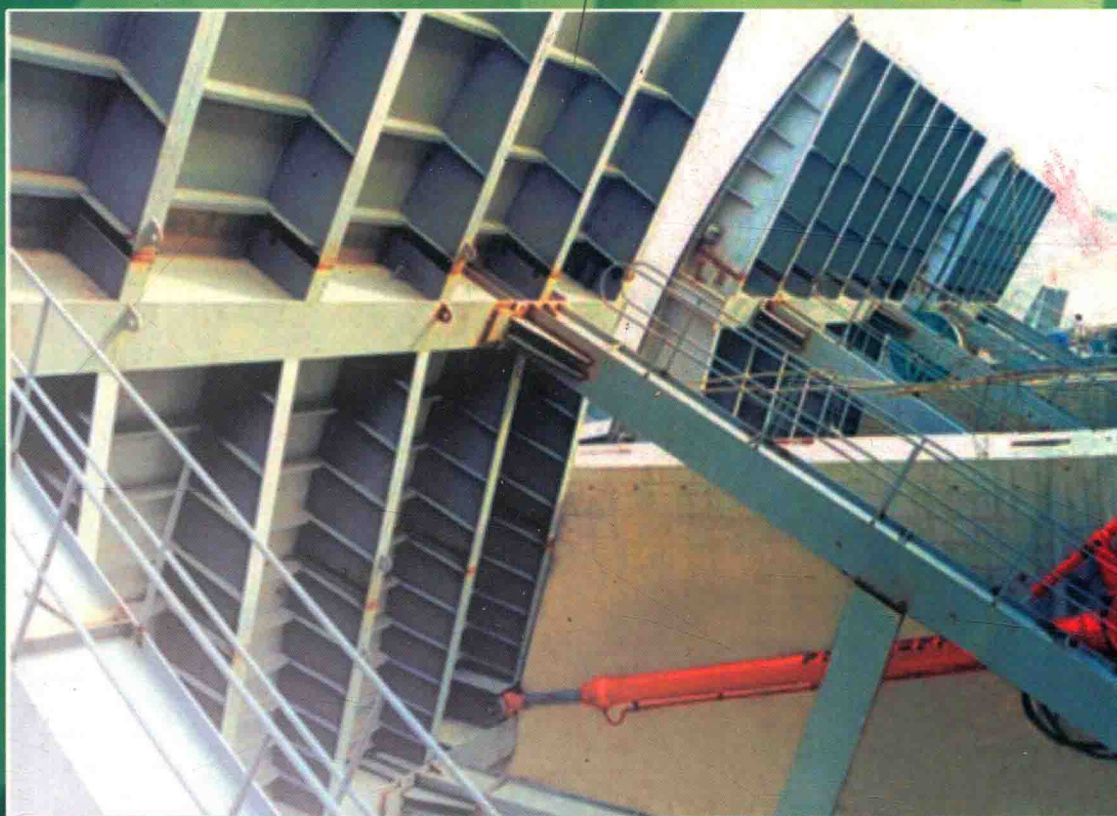


水利工程液压启闭机应用

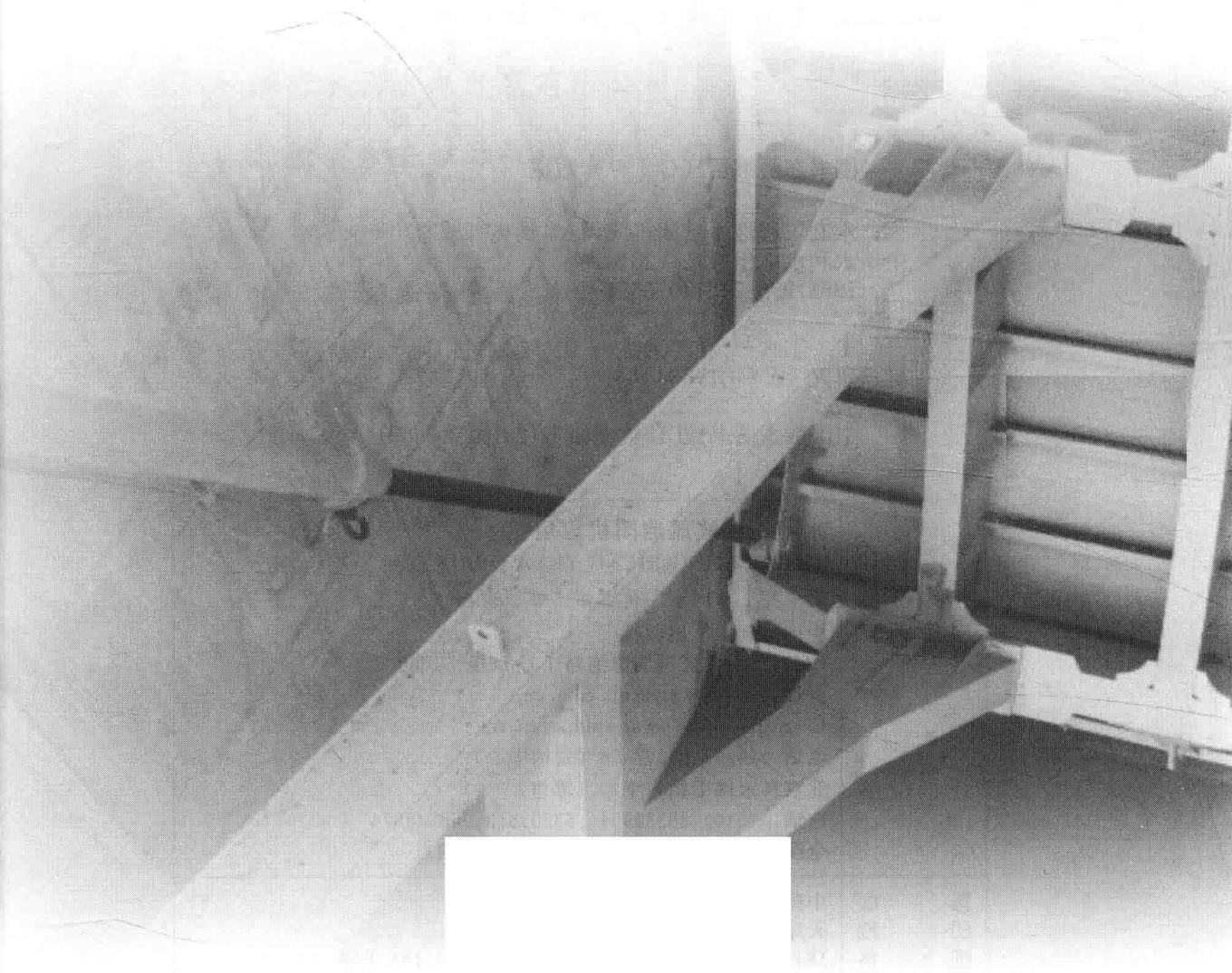
姚亮 李向东 蒋洪伟 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水利工程液压启闭机应用

姚亮 李向东 蒋洪伟 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书从水利工程液压启闭机技术的发展及应用概述、液压启闭机系统设计和技术原理、液压启闭机制造安装技术和工艺、液压启闭机的质量检测与质量控制、液压启闭机的运行管理现状、液压启闭机的维护保养和故障检查诊断及排除、液压启闭机应用问题研究等方面，对水利工程液压启闭机技术发展及应用展开全面研究和探讨，对运行管理中发现的一些问题进行了分析并给出了相应的处理对策。

本书可供水利、电力等相关行业科研、设计及管理人员参考，也可以作为有关高等院校师生研究和学习的参考用书。

图书在版编目（C I P）数据

水利工程液压启闭机应用 / 姚亮等编著. — 北京：
中国水利水电出版社，2018.6
ISBN 978-7-5170-6651-4

I. ①水… II. ①姚… III. ①水利工程—液压式启闭
机—研究 IV. ①TV664

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第156911号

书 名	水利工程液压启闭机应用 SHUILI GONGCHENG YEYA QIBIJI YINGYONG
作 者	姚 亮 李向东 蒋洪伟 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 7.75印张 184千字
版 次	2018年6月第1版 2018年6月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	39.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

本书编委会

主编单位：安徽省（水利部淮河水利委员会）水利科学研究院

参编单位：淮河水利委员会治淮工程建设管理局

水利部水利工程建设质量与安全监督总站淮河流域分站

淮河水利水电开发有限公司

安徽省六安恒源机械有限公司

审 核：宋新江 付 强

主 编：姚 亮 李向东 蒋洪伟

编写人员：赵守义 吴 琼 刘 英 王南江

赵宏郎 刘会林 刘 艳 陈传林

汤 洋 陈荣娜 袁家宝 胡 超

王之辉 沈 伟 冉 龙 李传瑞

江 龙 杨承儒

前言

水利工程运行中，通常依靠启闭机控制闸门开启和关闭来调节上下游水量，以获得防洪、灌溉、发电、通航等水利效益。启闭机和闸门的工作运行状态直接影响着运行管理调度的实际效果，一旦闸门启闭失控，轻则造成损失，严重的可能危及水利工程运行安全。近年来，液压启闭机作为一种新型的水利工程启闭机，以自身具有的技术优点得到较多应用，同时也面临着水利工程设计启闭力大、荷载变幅大、工况复杂及运行所处环境差等现实条件的考验。2014—2016年，漳山闸、台儿庄泵站、刘家道口节制闸等水利工程的液压启闭机活塞杆相继出现了锈蚀的现象，有关管理单位也反映存在运行管理要求技术高、管理难度大、维修不方便等缺点，对其应用产生了一定影响。

鉴于上述情况，安徽省（水利部淮河水利委员会）水利科学研究院对水利工程液压启闭机的应用情况进行了调研和分析总结，在调研中先后走访了启闭机设备制造厂家和多家水利工程运行管理单位，实地考察了设备制造技术条件、生产工艺过程，在工程运行中的启闭机现状和管理方面的相关情况。

本书包括7章内容和1个附录。第1章，对水利工程液压启闭机技术发展及在水利工程中应用现状作了调研分析，将液压启闭机系统与其他型式启闭机系统（如固定卷扬式启闭机）作了性能比较，指出了液压启闭机系统的相对优缺点。第2章，对液压启闭机的液压系统组成、系统设计和技术原理一一展开介绍，总结了目前水利工程液压启闭机的设计水平。第3章，详细介绍了水利工程液压启闭机典型制造企业的制造安装技术和工艺流程，对国内陶瓷活塞杆制造技术发展亦作了简单介绍。第4章，从液压启闭机系统主要零部件的制造技术要求、厂内组装及试验、现场安装等方面，把液压启闭机的质量检测与质量控制检测项目、检测数量与检测方法、检测结果评价、试验检测注意事项等作了详细说明。第5章和第6章，以蚌埠闸枢纽工程、宋家场水库工程、小浪底水利枢纽工程、刘家道口枢纽工程、曹娥江大闸工程、汤浦水库工程等大中

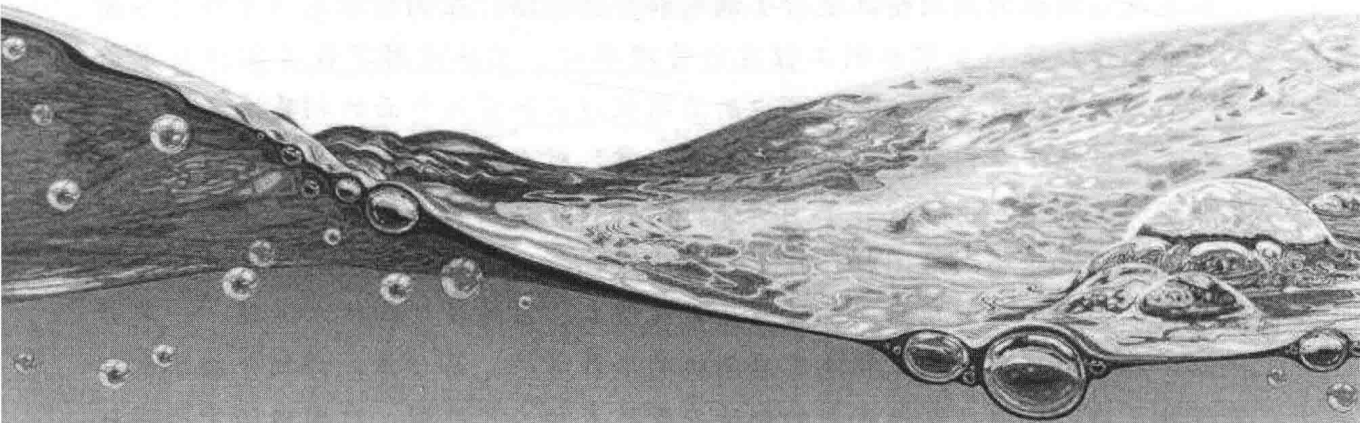
型水利工程为例，指出在水利工程液压启闭机的运行管理现状中存在的一些问题，从液压系统的运行管理、维护保养、故障检查诊断及排除等方面，对液压启闭机平衡保压、同步控制、活塞杆锈蚀处理、运行和维护管理等应用问题进行了深入分析及处理对策研究。第7章，结合运行管理中发现的问题，提出了水利工程液压启闭机设备应用与发展的建议，并在附录中给出了液压启闭机运行维护管理规程的示例。

本书旨在通过调研液压启闭机在水利工程中的应用和运行管理情况，系统地总结经验，查找不足，进一步提高液压启闭机可靠、持久的正常运行能力，进而有力保证水利工程运行安全。

鉴于编写人员的水平和经验有限，本书中难免存在疏漏、谬误等不足之处，敬请读者批评指正。

作者

2018年5月



目录 CONTENTS

前言

第 1 章 水利工程液压启闭机技术的发展及应用概述	1
1.1 国内液压技术的发展	1
1.2 液压启闭机在水利工程中的应用	3
第 2 章 水利工程液压启闭机系统设计和技术原理	6
2.1 液压系统基础知识及原理	6
2.2 液压系统组成	10
2.3 水利液压启闭机现阶段设计水平	23
2.4 液压启闭机系统性能比较	25
第 3 章 水利工程液压启闭机制造安装技术和工艺	29
3.1 水利工程液压启闭机制造典型企业基本情况	29
3.2 液压启闭机的制造技术、工艺	41
3.3 液压启闭机的安装技术、工艺	55
3.4 国内陶瓷活塞杆制造技术发展	61
第 4 章 水利工程液压启闭机的质量检测与质量控制	63
4.1 液压启闭机质量控制	63
4.2 液压启闭机质量检测与试验	65
第 5 章 水利工程液压启闭机的运行管理、维护保养、故障检查、诊断及排除	68
5.1 液压油管理和维护	68
5.2 液压启闭机的养护	69
5.3 液压设备的故障诊断与排除	70
5.4 水利工程液压启闭机运行维护管理规程	75
第 6 章 水利工程液压启闭机的运行管理现状	76
6.1 蚌埠闸枢纽工程运行管理	76
6.2 宋家场水库工程运行管理	77
6.3 小浪底水利枢纽工程运行管理	78

6.4	刘家道口枢纽工程运行管理	82
6.5	曹娥江大坝工程运行管理	84
6.6	汤浦水库工程	85
第7章	水利工程液压启闭机应用问题研究	87
7.1	液压启闭机平衡保压问题及对策研究	88
7.2	液压启闭机同步控制问题对策研究	91
7.3	液压启闭机活塞杆锈蚀处理问题对策研究	95
7.4	液压启闭机运行和维护管理问题对策研究	98
7.5	水利工程液压启闭机设备应用与发展的建议	102
附录	水利工程液压启闭机运行维护管理规程（示例）	106

第 1 章 水利工程液压启闭机技术的发展及应用概述

1.1 国内液压技术的发展

液压传动是以液体作为工作介质对能量进行传动和控制的一种传动形式。利用有压的液体经由一些机件控制之后来传递运动和动力。相对于机械传动而言，液压传动具有输出力大、重量轻、惯性小、调速方便以及易于控制等优点，因而广泛应用于工程机械、建筑机械和机床等设备上。

由于要使用原油炼制品来作为传动介质，近代液压传动技术是由 19 世纪崛起并蓬勃发展的石油工业推动起来的。国外最早实践成功的液压传动装置是舰船上的炮塔转位器，其后出现了液压六角车床和磨床，一些通用车床到 20 世纪 30 年代末才用上了液压传动。在第二次世界大战期间，一些兵器用上了功率大、反应快、动作准的液压传动和控制装置，大大提高了兵器的性能，也大大促进了液压技术的发展。第二次世界大战后，液压技术迅速转向民用，并随着各种标准的不断制订和完善，各类元件的标准化、规格化、系列化而在机械制造、工程机械、材料科学、控制技术、农业机械、汽车制造等行业中推广开来。

我国的液压技术工业开始于 20 世纪 50 年代，目前正处于迅速发展、提高的阶段。其产品最初只用于机床和锻压设备，后来才用到拖拉机和工程机械上。自 1964 年从国外引进一些液压元件生产技术，同时自行设计液压产品以来，我国的液压件生产已从低压到高压形成系列，并在各种机械设备上得到了广泛的应用。20 世纪 80 年代起更加速了对国外先进液压产品和技术有计划引进、消化、吸收和国产化工作，以确保我国的液压技术能在产品质量、经济效益、研究开发等各个方面全方位地赶上世界水平。随着工业迅猛发展并逐日发展壮大，相继建立了科研机构和专业生产厂家，从事液压技术研究和液压产品生产。他们不但能生产液压泵、液压阀等液压元件，还设计制造了许多新型液压元件，如电液比例阀、电液伺服阀等。至 2000 年以后，已形成了我国液压元件产品的生产系列。

液压技术的发展正向着高效率、高精度、高性能方向迈进。液压元件向着体积小、重量轻、微型化和集成化方向发展，交流液压等新兴的液压技术正在开拓。又由于计算机的应用，更大大地推进了液压技术的发展，像液压系统的辅助设计、计算机仿真和优化、微机控制等工作，也都取得了显著成果。目前，液压技术在实现高压、高速、大功率、高效

率、低噪声、经久耐用,高度集成化等各项要求方面都取得了重大的进展,在完善比例控制、伺服控制、数字控制等技术上也有许多新成就。液压技术的不断发展体现在如下一些比较重要的特征上。

(1) 提高元件性能,创制新元件,体积不断缩小。为了能在尽可能小的空间里传递尽可能大的功率,液压元件的结构不断地在向小型化发展。市场上出现了一种新型的被称为“肌腱”的执行元件,它的形状像一根两端有接头的软管,把它接入系统使用时,它的径向和轴向都会发生伸缩,轴向的伸缩量可达其总长的15%~30%。在相同条件下,它的作用力是普通汽缸的10倍。这种元件抗污染,运动时不会产生抖动,在有些场合还可利用它的径向膨胀去夹持工件等,是一种极有应用前景的元件,而微型元件也得到发展,如活塞直径小到2.5mm的汽缸,10mm宽的气阀以及相关的辅助元件已成为系列化产品。由于这些元件能在0.2~0.7MPa压力下工作,所以可被方便地集成到标准的系统中。新小型阀,在流量相同时,它的体积仅是过去的7%。这些小微型的元件已被应用于精密机械加工、电子、制药、食品加工和包装等行业。

(2) 高度的组合化、集成化和模块化。液压系统由管式配置、板式配置、箱式配置、集成块式配置发展到叠加式配置、插装式配置,使连接的通道越来越短。也出现了一些组合集成件,如把液压泵和压力阀作成一体,把压力阀插装在液压泵的壳体内,把液压缸和换向阀作成一体,只需接一条高压管与液压泵相连,一条回油管与油箱相连,就可以构成一个液压系统。这种组合件不但结构紧凑,工作可靠,而且简便,也容易维护保养。

(3) 与微电子结合,走向智能化。液压技术从20世纪70年代中期起就开始和微电子工业接触,并相互结合。在迄今40多年时间内,结合层次不断提高,由简单拼装、分散混合到总体组合,出现了多种形式的独立产品,如数字液压泵、数字阀、数字液压缸等,其中的高级形式已发展到把已编程的芯片和液压控制元件、液压执行元件或能源装置、检测反馈装置、数模转换装置、集成电路等汇成一体,这种汇在一起的联结体只要一收到微处理机或微型计算机输送来的信息,就能实现预先规定的任务。

液压技术的智能化阶段虽然开始不久,但是从它的实践成功的事例来看,成果已非常诱人。例如:折臂式小汽车装卸器能把小汽车吊起来,拖入集装箱内,按最紧凑的排列位置堆放好,最多时能装入8辆;装卸器内装有微型计算机,它能按预定程序操纵8个液压缸,在传感器的配合下协调连杆机构的动作,完成堆装任务;卸车时的操作按相反的顺序协调动作。

总之,液压技术在与微电子技术紧密结合后,在微型计算机或微处理机的控制下,可以进一步拓宽它的应用领域,各种形式的机器人和智能元件的使用不过是它最常见的例子而已。现在国外已在着手开发多种行业能通用的智能组合硬件,它们只需配上适当的软件就可以在不同的行业中完成不同的任务。这样一来,用户的主要技术工作将只是挑选,改编或自编计算程序。

综上所述可知,液压元件将向高性能、高质量、高可靠性、系统成套方向发展;向低能耗、低噪声、低振动、无泄漏以及污染控制、应用水基介质等适应环保要求方向发展;开发高集成化高功率密度、智能化、机电一体化以及轻小型、微型液压元件;积极采用新工艺、新材料和电子、传感等高新技术。液压工业在国民经济中的作用是很大的,它常常

可以用来作为衡量一个国家工业水平的重要标志之一。与世界上发达国家相比,我国的液压技术产品工业还存在一定差距,标准化工作有待于进一步完善,优质化的工作须形成声势,智能化的工作则刚刚准备起步,为此必须急起直追,才能迎头赶上。可以预见,为满足国民经济发展需要,液压技术也将继续获得飞速的发展,它在我国各行业中的应用将越来越广泛。

1.2 液压启闭机在水利工程中的应用

1.2.1 国内大型水利工程的应用情况

20 世纪 50 年代末期在新安江水电站设液压启闭机,标志着国内第一台液压启闭机的诞生。随着液压技术的发展,特别是液压缸体加工技术的发展,制约液压启闭机性能的瓶颈如大流量、高压力及液压阀的密封性差等问题逐步得到解决,使我国液压启闭机产品应用更加广泛。以三峡水利枢纽工程为首的一批大型水利水电工程的建设,进一步促使液压启闭机的应用与发展迈向新的台阶。三峡工程共用液压启闭机 135 套,左岸电站厂房进水口快速门液压启闭机启门力达 4000kN,持住力达 8000kN,行程长达 15m。三峡工程三大主体工程之一的三峡工程永久船闸,船闸人字闸门共 24 扇,闸门最大高度为 38.5m,单扇门最大重量达 850t,最大启闭力达 2700kN,油缸长 8668mm,内径 580mm,活塞杆行程 7276mm,是世界上闸门高度、自重和启门力最大的船闸人字门。由中船重工中南装备有限责任公司为云南华能澜沧江小湾电站设计建造的两支超大型液压启闭机,缸筒内径 850mm,外圆 1020mm,长 11.9m,重 23t,活塞杆外径 480mm,长 12.8m,净重 17t,最大启门力为 7500kN。

目前,我国液压启闭机的设计和制造能力都达到了相当高的水平和规模,最大启闭力可达 8000kN,行程超过 15m,油缸直径大于 1m,活塞杆直径大于 0.5m。表 1.1 所列内容是国内部分较有代表性的水利水电工程采用的液压启闭机。从表 1.1 可以看出,液压启闭机更多地用于操作弧形闸门、“人”字形闸门、快速闸门或高水头深孔事故闸门,主要原因是液压启闭机用于这几种形式的闸门上更能体现其优点。从国内一些工程的实际运行情况看,这几年生产的液压启闭机的质量有了很大的提高,而生产成本却有所降低,工程效益愈来愈显著。

表 1.1 国内较有代表性的液压启闭机应用情况表

序号	工程名称	闸门型式规格 (孔口宽×高一水头/m)	液压启闭机型号规格 (代号—容量/kN—行程/m)	启闭机重量/t
1	福建沙溪口	表孔弧形闸门 17×14—14	QHLY—2×1300—8.5	20
2	云南漫湾	表孔弧形闸门 13×21—21	QHLY—2×2200—8.3	31
3	湖南五强溪	表孔弧形闸门 19×23—23	QHLY—2×4500—12	—
4	四川铜街子	表孔弧形闸门 14×18.5—18	QHLY—2×1600—10.2	35
5	浙江富春江	“人”字形闸门 12.4×25	QRWY—2×750—1.84	2×15
6	江西万安	“人”字形闸门 8.9×36.2	QRWY—2×750	2×15

续表

序号	工程名称	闸门型式规格 (孔口宽×高一水头/m)	液压启闭机型号规格 (代号—容量/kN—行程/m)	启闭机重量/t
7	福建水口	“人”字形闸门 12×19	QRWY—2×630	—
8	湖北隔河岩	进口平面快速闸门 7.5×10.5—57.5	QPKY—5000/2500—10.5	40
9	湖南五强溪	进口平面事故闸门 9×13—39	QPPY—4500/3000—14	—
10	云南漫湾	进口平面事故闸门 7×9—49	QPPY—4500/2000—10	41.6
11	福建水口	进口平面事故闸门 9.2×11.5—42	QPPY—4000/2000—14.5	30
12	甘肃刘家峡	泄水洞平面工作闸门 3×8—70	QPPY—6000—9	60
13	天生桥一级	放空洞弧形闸门 6.4×7.5—130	QSHY—5000/2000—11.3	—
14	福建水口	闸首平面下沉闸门 12×13	QPPY—2×800—10.5	25

1.2.2 淮河流域液压启闭机的应用

液压启闭机在淮河流域水利工程中的应用相对较晚，最早是在石梁河水库工程上的应用。直到近年来，在江风口分洪闸、嶂山节制闸、蚌埠复线船闸、入海水道海口枢纽、刘家道口节制闸、南水北调东线工程等一系列大中型水利工程中，才开始广泛应用液压启闭机。淮河流域水利工程液压启闭机应用情况见表 1.2。

表 1.2 淮河流域水利工程液压启闭机应用情况表

序号	工 程 名 称	闸门型式规格 (宽×高一水头) /水头差/m	液压启闭机型号 (启门力/kN—行程/m)
1	石梁河水库	10.0×8.5—8.0/0.0	QHLY—2×500—5.1
2	刘家道口节制闸	16×8.5—8.2/0.0	QHLY—2×1000—6.2
3	淮河入海水道淮安枢纽工程	6.8×8.0—/1.0	QPPY I —2×125—8.5
4	蔺家坝泵站出口快速闸门	4.79×4.61—10.3/0.0	QPKY—2×200—5.5
5	台儿庄泵站出口快速闸门	6.357×4.2—10.89/0.0	QPKY—2×200—4.5
6	八里湾泵站出口快速闸门	7.1×4.24—8.6/0.0	QPKY—2×200—5.0
7	江风口分洪闸	12×9.3—9.0/0.0	QHLY—2×500—3.9
8	嶂山节制闸	10×7.5—7.0/0.0	QHLY—2×500
9	蚌埠复线船闸	13.92×11.52	QRWY—1×400/1×320

1.2.3 液压启闭机产品系列的发展

近年来，随着液压元件产品标准化、系列化推广，技术日渐成熟，产品质量进一步提高，系列发展日趋完善，液压启闭机的优势越来越明显，在水利水电工程中应用日渐普遍。根据控制对象可分为普通平面闸门液压启闭机、弧形闸门液压启闭机、“人”字形闸门液压启闭机等。目前应用于水利行业的启闭机主要有以下几种系列：

(1) 平面闸门液压启闭机 QPPY ×× 系列。按液压缸的结构型式和安装方式分为 QPPY I 型和 QPPY II 型。

QPPY I 型为柱塞式液压缸,适用于依靠自重(或配重)闭门,一般为双吊点顶升式布置,液压缸一般安装在闸墩的预留孔内,淮河入海水道淮安枢纽工作闸门启闭机的型号就是 QPPY I- $2 \times 125-8.5$,其启门力为 $2 \times 125 \text{ kN}$,最大行程为 8.5 m 。

QPPY II 型为活塞式液压缸,可双作用,既可提供启门力,又可产生闭门力。一般为单吊点布置,也可双吊点布置,其液压缸采用地脚螺栓固定在启闭机工作排架上,液压缸通过活塞杆、吊杆与闸门的吊耳用销轴连接。

(2) 快速闸门液压启闭机 QPKY 系列。该液压启闭机系列一般为单作用式液压缸,依靠自重(或配重)闭门,其安装与 QPPY II 型相同,只是液压系统采用快速阀组控制。该型式启闭机主要用来控制水电站进口快速闸门及泵站出口快速闸门。如南水北调东线工程蔺家坝、台儿庄、八里湾等泵站出口快速闸门启闭即为 QPKY 系列启闭机。

(3) 露顶式弧形闸门液压启闭机 QHLY 系列。该系列液压启闭机适用于启闭露顶式弧形闸门,一般采用活塞式液压缸。因液压缸需随着弧形闸门的启闭而摆动,故进出油管需用软管或铰接头。石梁河水库扩大泄量工程工作门液压启闭机为 QHLY- $2 \times 500 \text{ kN}$ 、刘家道口节制闸液压启闭机 QHLY 等。

(4) 深孔式弧形闸门液压启闭机 QHSY 系列。深孔式弧形闸门通常水头高,启闭摩阻力较大,一般为单吊点,采用活塞式液压缸,中部铰支,当闸门靠自重不能关闭时,可由液压启闭机产生下压力,避免配重。

(5) 船闸“人”字形闸门的液压启闭机 QRWY 系列。船闸闸室的“人”字形闸门使用的卧式液压启闭机 QRWY,采用双作用活塞式液压缸,液压缸随闸门启闭而水平摆动。

水利工程液压启闭机发展的另一个特点是随着液压传动领域里许多新技术、新产品的出现,比如电液比例阀、数字阀、插装阀技术的应用,液压启闭机技术得到了更新换代。由于电液比例阀具有常规阀和伺服阀无法媲美的优点,因此,在液压启闭机控制系统中运用电液比例技术,也是液压启闭机发展的趋势。

第 2 章 水利工程液压启闭机系统设计和技术原理

2.1 液压系统基础知识及原理

液压启闭机在水利工程中多用于闸门启闭，它是指利用液体的压力能来传递能量，从而控制闸门的开启或关闭的一种启闭机。图 2.1 和图 2.2 为露顶式弧形闸门液压启闭机 QHLY。液压启闭机一般由液压系统和液压缸组成。在液压系统的控制下，液压缸内的活塞沿缸体内壁做轴向往复运动，从而带动连接在活塞上的连杆和闸门做直线运动，以达到开启、关闭闸门的目的是。

液压启闭机的基本工作原理是：液压泵把原动机输出的机械能变为液体压力能，经过油管道及液压阀进入液压缸，通过液压缸及活塞杆把液体的压力能转变为工作机的机械能，从而驱使闸门完成开启或关闭等动作。

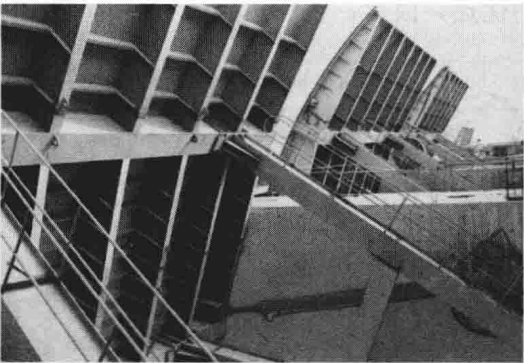


图 2.1 露顶式弧形闸门液压启闭机 1

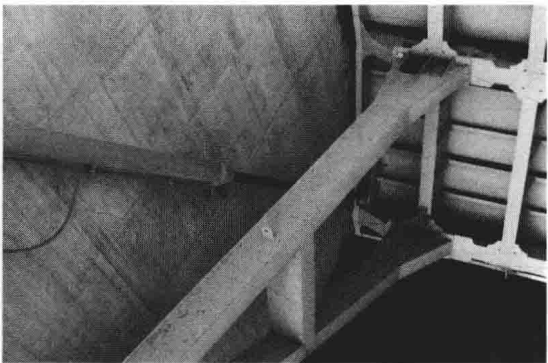


图 2.2 露顶式弧形闸门液压启闭机 2

2.1.1 液压技术基础知识

1. 液体黏度

本质是实际流体的内摩擦力。

(1) 动力黏度：工程学中，按牛顿液体内摩擦定律用式 (2.1) 计算，牛顿内摩擦定律又称黏性定律。

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \tag{2.1}$$

式中： τ 为单位面积上的摩擦应力，也叫做剪应力或者切应力，Pa 或 N/m^2 ； F 为相邻流体层间内摩擦力，N； A 为流体层接触面积， m^2 ； μ 为与流体性质相关的比例系数，通常称为动力黏性系数，或称动力黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ； du/dy 为速度梯度， $1/\text{s}$ 。

(2) 运动黏度：运动黏度为动力黏度与密度的比值，在温度 $t^\circ\text{C}$ 时，运动黏度用符号 ν 表示，在国际单位制中，运动黏度单位为斯，即平方米每秒 (m^2/s)，实际测定中常用厘斯，表示厘斯的单位为平方毫米每秒 (即 $1\text{cst}=1\text{mm}^2/\text{s}$)。运动黏度广泛用于测定喷气燃料油、柴油、润滑油等液体石油产品、深色石油产品、使用后的润滑油、原油等的黏度，运动黏度的测定采用逆流法。运动黏度 ν 用式 (2.2) 计算：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.2)$$

式中： μ 为与流体性质相关的比例系数，通常称为动力黏性系数，或称动力黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ； ρ 为液体密度， kg/m^3 。

2. 液压静压力学

液体静压力有两个重要特性：①液体静压力的方向总是沿着作用面的法线方向。这一特性可直接用液体的性质来说明。液体只能保持一定的体积，不能保持固定的方向，不能承受拉力和剪切力。所以只能承受法向压力。②静止液体中任何一点所受到各个方向压力都相等。如果液体中某一点所受到的各个方向的压力不相等，那么在不平衡力作用下，液体就要流动，这样就破坏了液体静止的条件，因此在静止液体中作用于任一点的各个方向压力必然相等。

液压静压力学定律，严格意义上仅适用于理想液体，即无质量和内摩擦，且不可压缩的液体。

3. 压力

不同外形的容器，如表面积相同 ($A_1 = A_2 = A_3$)，且所盛液体的高度 h 相等，则作用在此表面积上的压力相等 ($p_1 = p_2 = p_3$)。由于压力和面积均相等，因而作用力亦相等 ($F_1 = F_2 = F_3$)，见图 2.3。

单位面积上所受的作用力 p 用式 (2.3) 计算：

$$p = F/A \quad (2.3)$$

式中： A 为液体作用面积， m^2 ； F 为作用面积上的法向作用力，N； p 为单位面积上所受的作用力，Pa (N/m^2)、MPa (10^6 Pa)、bar (10^{-1} MPa)。

4. 帕斯卡定律

在密闭容器内的平衡液体中，任意一点的压力如有变化，该压力变化值将传递给液体中的所有各点，且其值不变。液压静压力学的基本原理是帕斯卡定律，即作用于静止流体中的作用力，在流体中会沿各个方向传递。流体产生的压力，数值上等于单位面积上的重力大小。压力总是作用在容器的约束面上，并沿其法线方向。而且，压力在各个方向的作

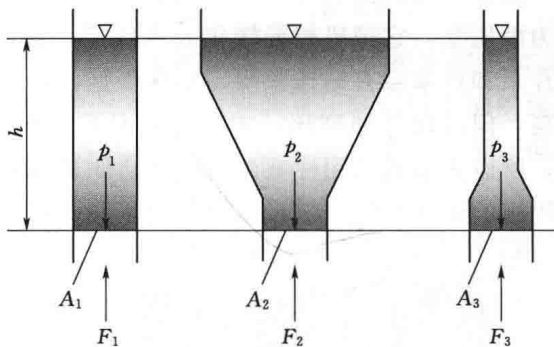


图 2.3 压力图

用相等。如忽略重力因素，则压力在各点上均相等，见图 2.4。

注：液体不能抵抗切力，故液体的压力垂直于受压表面。

5. 力的传递

由于压力沿着各个方向的作用相等，因此和容器的形状无关。下面的例子（图 2.5）表明静压力是如何被利用的。

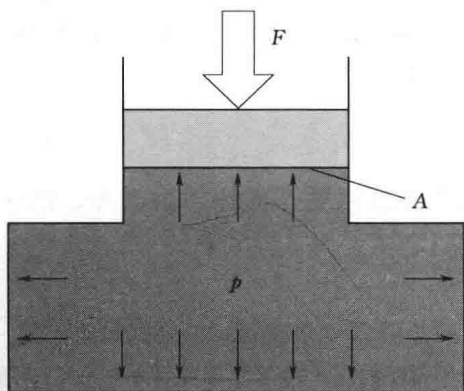


图 2.4 帕斯卡定律

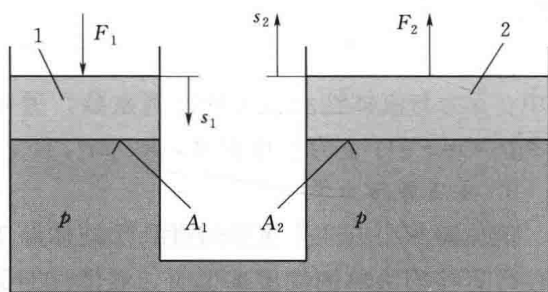


图 2.5 力的传递示意图

当力 F_1 作用于面积 A_1 时，产生压力 $p = F_1/A_1$ ，压力 p 作用于系统的每一点上，也包括面积 A_2 ，可得到的作用力 F_2 （等于需要抬升的负载）为 $F_2 = pA_2$ ；因此 $F_1/A_1 = F_2/A_2$ ，活塞 1 所做功 W_1 等于活塞 2 所做功 W_2 （理想状态）： $W_1 = F_1 s_1$ ， $W_2 = F_2 s_2$ 。

2.1.2 液压启闭机系统组成概述

液压系统包括动力装置、控制调节装置、辅助装置等（图 2.6 和图 2.7）。动力装置一般为液压泵，它把机械能转化为液压能。液压泵一般采用容积式泵，如叶片泵和柱塞泵。叶片泵和柱塞泵有结构紧凑，运转平稳，噪声较小，使用寿命长等优点。柱塞泵虽然价格较高，但可以得到高压、大流量，且流量可调。近年来，国内液压启闭机普遍采用中高压，所以大多数采用柱塞泵。多套启闭机可共用一个液压系统，另外，因其重要性，液压启闭机的液压系统一般设置两套液压泵，互为备用。

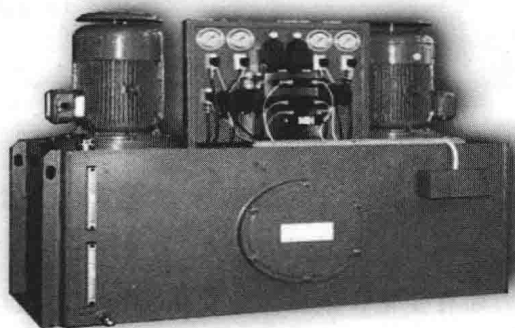


图 2.6 液压系统示例 1

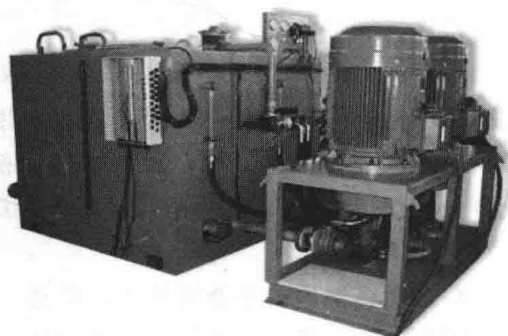


图 2.7 液压系统示例 2

控制调节装置是指液压控制阀组，包括节流阀、换向阀、溢流阀等阀组，其作用是对液

压油的流量、方向、压力等方面各自起控制调节作用，以实现 对液压系统的各种性能要求。启闭机上液压控制阀大多数是标准元件，并普遍采用插装技术。插装阀具有组合机能强，集成度高，噪声低，密封性好，机构紧凑等优点。选择不同结构及形式的先导控制阀、控制盖及集成块与插装件组合，便可获得具有换向、调压、调速等功能的插装阀组。双吊点的液压启闭机因不能像卷扬式启闭机一样采用机械同步，故控制阀组需考虑同步措施。

辅助装置包括油箱、油管、管接头、压力表、滤油器等（图 2.8 和图 2.9）。油箱的用途是储油和散热，并能沉淀油中杂质，分离油中的空气和水分等。油管、管接头把动力装置、调节控制装置、液压缸连接起来，组成一个完整的液压回路，液压油中杂质会使运动零件磨损，增加泄漏和减少元件的寿命，甚至堵塞阀组等，影响液压系统的使用，设置滤油器对液压油进行过滤是十分必要的。

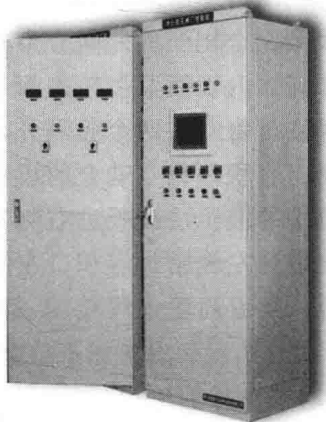


图 2.8 辅助装置和电气控制柜 1

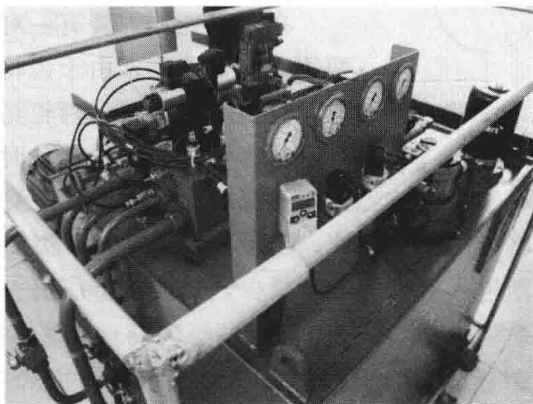


图 2.9 辅助装置和电气控制柜 2

液压缸是液压传动中的执行元件，把液压油的液压能转化为机械能。液压缸由缸体、端盖、活塞、活塞杆、吊头等零件组成（图 2.10 和图 2.11）。根据液压缸内压力油的作用方向可分为单作用液压缸和双作用液压缸两类。单作用液压缸常是柱塞式或者套筒，也可以是活塞式。双作用液压缸形成两个油腔，两个油腔都可以进出压力油。

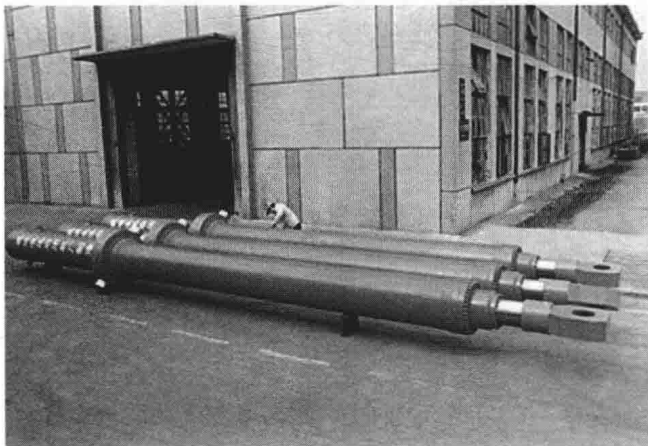


图 2.10 液压缸 1



图 2.11 液压缸 2（缸体、活塞杆等）