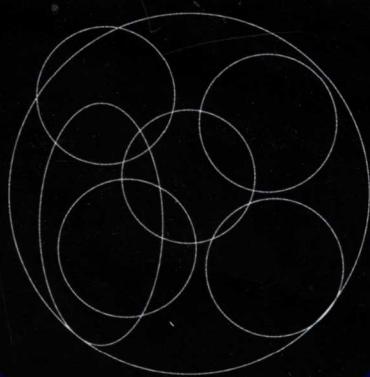


国家自然科学基金项目(50179032) 资助
江苏省水利科技重点项目(2001055)

大中型水泵装置 理论与关键技术

©仇宝云 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国家自然科学基金项目 (50179032) 资助
江苏省水利科技重点项目 (2001055)

大中型水泵装置 理论与关键技术

©仇宝云 著

内 容 提 要

本书从提高泵机组可靠性和泵装置效率出发,详细论述了大中型水泵机组结构型式与功能的选用原则、水泵机组部件配合质量控制的关键技术和泵站变工况经济运行,创建了水泵导轴承概率荷载理论和基于可靠度的配套电机功率备用系数理论,对水泵进、出水流道流场与水力特性及其对泵装置性能的影响作了较全面的研究,提出了泵装置优化设计原则和方法。本书内容主要针对南水北调东线工程梯级泵站等大中型调水、抗旱、排涝泵站,其结论与成果亦适用于其他泵站。

本书可供从事泵站和水泵规划、研究、设计、安装、检修和运行管理的技术人员学习使用,也可供相关专业的教师、研究生和大学生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大中型水泵装置理论与关键技术/仇宝云著. —北京:
中国水利水电出版社, 2005
ISBN 7-5084-2828-5

I. 大... II. 仇... III. ①水泵—基本知识②泵站—基本知识 IV. TV675

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 030430 号

书 名	大中型水泵装置理论与关键技术
作 者	仇宝云 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 12 印张 285 千字
版 次	2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	32.00 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

前言

我国地形复杂，地区之间气候差异很大，降雨时空分布不均。北方地区降雨少、地势高，南方地区降雨多、地势低，这就形成了北方地区干旱缺水的局面。特别是人口密度高、经济较发达的华北地区，缺水问题更是日益突出，严重影响了工农业生产和人民生活，并造成生态恶化。随着经济的发展和经济实力的提高，党和政府果断地作出决策，开工兴建南水北调东线工程这一宏伟的世纪工程，将南方江苏境内长江的余水提升后沿京杭大运河及其平行河道输送到华北地区的山东、河北、天津等地。输水路线地势以黄河地区为最高，据规划，黄河以南以江苏省江水北调工程为基础，将建设 13 级大型梯级泵站，逐级提水北上；黄河以北则可自流到天津。因此，大型梯级泵站是南水北调东线工程的关键。

我国人均耕地较少，需要对有限的土地精耕细作，提高单产。为保证旱涝保收，1949 年新中国成立以来兴建了众多的灌排泵站。据 2004 年最新调查统计，我国目前机电排灌保有量达 7000 多万 kW，居世界第一。其中大中型泵站 5500 多座，主要分布在江苏、安徽、湖北、湖南、浙江、山东、广东等省份。近年来，随着经济的发展和城市化的进程，各地又兴建了一批进行城市和地区调水、排涝的泵站和污水泵站。大中型泵站在远距离调水、农田抗旱排涝、保证经济顺利发展、保障城市和人民生命财产安全等方面，起着关键作用。

20 世纪 60 年代初期建成的江苏省江都第一抽水站，是国内最早的大型泵站。此后，经过两代人 40 余年的不懈努力，我国大中型泵站规模有了很大发展，水平有了很大提高，在规划、设计、施工、安装和运行管理

等方面积累了丰富的经验，有关部门组织编写出版了多部相关标准、规范、规程，对提高我国泵站建设和管理水平起了重要作用。江苏省江都第四抽水站、皂河抽水站先后荣获国家工程建设金质奖，多座大型泵站获得银质奖。

随着科学技术的发展，水泵及泵站研究向三元化、系统化深入，可靠性与经济性并重。南水北调东线工程梯级泵站设计年运行时间超过 5000 小时，年运行费用达数十亿元，特别是如果其中一级泵站出现问题，将可能影响到整个调水工程的正常运行，因而，梯级泵站的可靠性和经济性都很重要，并且可靠性是第一位的，此外，灌溉和排涝泵站的可靠性也很重要。为此，本书针对南水北调东线工程的特点，在充分调查、搜集资料和分析总结经验的基础上，结合相关研究课题和多年教学实践撰写了本书。其主要内容有：南水北调东线工程梯级泵站水泵机组结构功能选择，大中型水泵机组部件配合质量控制，大中型水泵导轴承应用分析与概率荷载理论，大中型水泵配套电机过载因素分析与基于可靠度的功率备用系数理论，大中型水泵装置能量特性与泵站变工况经济运行，以及大中型水泵进、出水流道流场与水力特性研究等。其结论与成果，同样也适用于其他大中型泵站。

在本书撰写过程中，袁寿其教授、刘超教授、储训教授给予了热情的支持、鼓励和指导，在此谨向他们表示衷心的感谢。我的研究生黄季艳、林海江、冯晓莉参与了实验室试验、泵站现场测试及绘图工作；汤方平副教授、袁家博副教授、周济人副教授、成立博士及何钟宁工程师参与了泵站现场测试工作；在现场调研和测试中，诸多泵站技术管理人员给予了大力支持和无私帮助，恕难一一历数，在此也一并向他们致以真诚的感谢。

作者衷心欢迎读者对本书提出宝贵意见。

仇宝云

2005 年 1 月于扬州大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 大中型低扬程水泵及泵站的回顾与现状	1
1.2 大中型低扬程泵装置存在的问题	16
1.3 国内外大型调水工程简介	18
1.4 南水北调东线工程简介与对大型泵站的要求	20
第 2 章 泵站功能与水泵机组结构型式	23
2.1 泵站功能选择原则	23
2.2 水泵机组结构型式选择	27
2.3 小结	32
第 3 章 大中型立式水泵机组部件配合质量控制关键技术	33
3.1 部件配合要素对机组运行的影响	33
3.2 部件配合要素的质量控制	35
3.3 小结	46
第 4 章 大中型水泵导轴承与概率荷载理论	47
4.1 大中型水泵导轴承特点及选用原则	47
4.2 导轴承荷载影响因素	50
4.3 导轴承概率荷载理论	54
4.4 小结	58
第 5 章 泵站电机过载与基于可靠度的功率备用系数理论	60
5.1 大中型泵站电机过载问题	60
5.2 水泵最大理论轴功率	61
5.3 泵机组过载因素	62
5.4 基于可靠度的功率备用系数理论	66
5.5 小结	71
第 6 章 大中型泵装置效率特性与泵站变工况经济运行	72
6.1 泵装置效率特性	72
6.2 全调节泵站变角经济运行	75
6.3 大中型泵站变速经济运行	79

6.4	全调节泵站变速变角综合经济运行	84
6.5	大中型泵站其他经济运行方式	87
6.6	小结	88
第7章	水泵流场五孔探针测量系统影响因素	89
7.1	探针测量系统	89
7.2	探针系统测定流场反应特性研究	91
7.3	探针杆挠曲影响与误差修正	96
7.4	探针杆水力共振的影响	103
7.5	小结	104
第8章	大中型立式轴流泵叶片进口流场及其对水泵的影响	106
8.1	叶片进口流场研究现状	106
8.2	叶片进口流场数值模拟与理论分析	107
8.3	叶片进口流场现场实测	111
8.4	叶片进口流场对水泵的影响	113
8.5	小结	114
第9章	立式轴流泵出水流道流速分布测定	116
9.1	试验装置与方法	116
9.2	泵出水室内流速分布	119
9.3	等直水管内流速分布	123
9.4	无隔板渐扩出水流道内流速分布	127
9.5	设中隔板渐扩出水流道内流速分布	131
9.6	轴流泵出水流道内流动机理分析	133
9.7	小结	139
第10章	立式轴流泵出水流道水力损失	140
10.1	出水流道管壁的压力特性	140
10.2	出水流道断面能量的测定方法	142
10.3	水力损失的测定结果	145
10.4	水力阻力系数与泵扬程的关系	146
10.5	无隔板渐扩流道与等圆管阻力的比较	146
10.6	出水流道隔板消旋减阻的分析	147
10.7	出水流道两孔水力损失的对比	148
10.8	水力损失的数值计算	150
10.9	小结	151
第11章	大中型水泵出水流道与后导叶优化设计	152
11.1	水泵装置出水部分优化设计的原则与方法	152
11.2	出水流道的优化设计	152

11.3 基于出水流道的后导叶优化设计 159

11.4 小结 166

第 12 章 探针测定大中型水泵流量 167

12.1 探针测定水泵流量的原理与方法 167

12.2 提高测量精度的措施及误差分析 170

12.3 测量实例 171

12.4 小结 171

第 13 章 结论与展望 172

参考文献 176

1.1 大中型低扬程水泵及泵站的回顾与现状

1.1.1 大中型低扬程水泵及泵站的作用

水泵是一种提水或压水机械，它将动力机的机械能转换为被抽送水体的位置势能和压力势能，从而达到提升和输送水体的目的。

水泵、配套动力机及传动装置的总体称为泵机组。泵装置包括水泵、进出水流道（管道）及其附件（包括断流设施），有时将动力机及其传动装置也包含在内。泵站是用以固定、安装和保护水泵及其动力机、配电设备和其他附属设备的水工建筑物，广义上的泵站是包括泵站建筑物（包括主、辅站房和引、送水建筑物等）和机电设备的总称^[1]。

水泵按工作原理分为叶片泵、容积泵和其他类型泵，抗旱排涝和调水广泛采用叶片泵。叶片泵主要有轴流泵、混流泵（斜流泵）和离心泵，其中轴流泵和高比转速混流泵具有扬程低、流量大的特点（通常扬程小于 10~15m），比较适用于平原地区泵站^[2]。对低扬程水泵，叶轮直径 D 为 0.9~1.5m 为中型水泵， D 大于 1.5m 为大型水泵，安装大中型水泵的泵站分别称为大、中型泵站。

大中型低扬程泵站因其工程占地小、效率高、作用大、管理方便，在大范围的农田和区域抗旱、排涝、城镇供水、污水排放、远距离调水等方面起着关键作用，为保障人民生命财产安全，保证国民经济建设顺利进行和生态良性发展作出了重大贡献。

我国人多地少，为解决人口居世界第一大国的吃饭问题，需要对有限的土地精耕细作，以获得较高的单产，而实现旱涝保收是关键。1949 年新中国成立以来兴建了众多的排灌泵站，据最新调查统计，我国目前机电排灌保有量达 7000 多万 kW，居世界第一，其中大中型泵站 5500 多座^[3]。大中型低扬程泵站主要分布在江苏、安徽、湖北、湖南、浙江、山东、广东、福建等省份。

我国地形复杂，地区气候差异很大，降雨量时空分布不平衡。如北方地区降雨少、地势高，南方地区降雨多、地势低，这就需要利用泵站将南方的余水经提升后输送到北方。

国内最早的大型泵站是 20 世纪 60 年代初期建成的江苏省江都第一抽水站^[4]，当时采用的是立式轴流泵，其结构由小型轴流泵放大而来，故与小型轴流泵相似，叶轮直径 1.54m，设计扬程 8m，设计流量 $7\text{m}^3/\text{s}$ ，全站装机 8 台套。此后江苏、湖南、湖北、安徽、山东、广东和天津等省市陆续兴建了一大批区域性大范围抗旱排涝泵站和远距离、跨流域提水调水工程。原水利电力部于 1987 年组织编写出版了《泵站技术规范》设计分册、

安装分册、验收分册和技术管理分册,设计分册于1997年修订更名为《泵站设计规范》作为国家标准颁布^[5],并于2004年再次修订;安装分册与验收分册于2003年修订合并为《泵站安装及验收规范》,于2005年颁布实施。

1.1.2 大中型低扬程水泵的结构型式

大中型水泵因体积大、重量重,一般都安装在固定泵站中,采用电动机作为配套动力,国外(如日本)也有用柴油机驱动大中型水泵的泵站。大中型低扬程水泵按叶轮对水体做功原理分为轴流泵和混流泵。轴流泵通常设置后导叶用以消除叶轮出流环量、减小轴向流速^[6],以减小水流在出水水道中的水力损失。后导叶中部轮毂内设置导轴承,导轴承是水泵最重要的易磨易损部件^[7]。叶轮直径在2.8m及以上的轴流泵一般设置带有直叶片的前导叶,前导叶具有整流作用,但泵流量和扬程略有减小,最优工况点流量也随之减小^[8]。前导叶可用于临时搁支叶轮及泵轴,为机组安装提供方便^[9]。陈坚等人研究了轴流泵前置导轮对水泵能量与汽蚀性能的影响^[10],结果表明,采用前置导轮后,叶轮进口断面压力变均匀,振动减小,泵的汽蚀和能量性能有了综合改善。轴流泵叶轮叶片大都采用航空机翼翼型,如德国哥丁根翼型、美国NACA翼型、英国RAF-6翼型等^[11],具有单向抽水功能。近年来,汤方平等人研制的S型叶片双向泵,具有较好的正反向抽水性能,但单向效率稍低于单向叶轮效率^[12]。宋文武等人研制了用于抽送盐水的蜗壳式轴流泵^[13]。

轴流泵出水室最早采用金属弯管,即弯管式轴流泵,弯管式轴流泵叶轮直径一般小于1.8m,如江苏省江都第一、第二抽水站、江苏省淮安第一抽水站等。叶轮直径在2.0m及以上时,出水室通常采用井筒式和圪工式结构^[7]。采用井筒式轴流泵的有:江苏省江都第三抽水站(具有反向发电功能)、江都第四抽水站、连云港临洪泵站、淮阴泵站等;采用圪工式轴流泵的有:江苏省镇江谏壁泵站、安徽省驷马山泵站等。

大中型混流泵主要有立式导叶式和立式圪工蜗壳式两种。位于南水北调东线工程调水线上的江苏省徐州沙集抽水站即采用了立式导叶式混流泵。江苏省宿迁皂河泵站安装了2台6HL立式蜗壳式混流泵(叶轮直径5.7m);安徽滁河梯级泵站采用了3HL立式蜗壳式混流泵,结构型式与6HL立式蜗壳式混流泵相似,叶轮直径缩小了一半。

上海黄浦江上游二期引水工程松浦原水厂采用了上海凯士比泵有限公司生产的SEZ2000—1625VR型大型立式导叶式抽芯混流泵^[14],泵出口管径2m,最优工况点为:流量 $9\text{m}^3/\text{s}$,扬程11.7m,转速297r/min,效率89.5%,该种泵采用了可调进口导叶来调节水泵性能。德国KSB公司开发了一种用于泵进口导叶的非对称翼型叶片并获专利(德国专利号:No.1116973),理论计算和试验及实际运行都证明了这种翼型具有良好的性能。进口导叶调节性能的特点是扬程在较大范围内变化时,流量变化不大。由于调节机构是安装布置于固定部件上,故机组结构简单可靠、运行受力小、造价低。近年来,江苏大学与江苏省水利厅合作专为南水北调东线工程开发出了211斜流泵模型,该水力模型具有比转速高,高效区宽,无明显不稳定区等优点^[15~16]。但总的来说,目前采用混流泵的大型低扬程泵站仍较少。

大中型水泵按轴线形式分为立式、斜式、卧式及贯流泵机组。立式泵泵轴垂直于水平面,国内使用最早,技术最为成熟,特点是水泵导轴承受力小,配套电机运行环境好,安装检修方便,国内绝大部分泵站都采用了立式机组^[17]。

斜式水泵泵轴与水平面成 15° 、 30° 或 45° 夹角, 导轴承受力复杂, 对动力机要求高。国内采用的有 1991 年投入运行的内蒙古红圪卜叶轮直径 2.5m 斜 45° 水泵; 1997 年投入运行的广东顺德贵畔海叶轮直径 2.0m 斜 45° 水泵; 1998 年投入运行的江苏江阴新夏港叶轮直径 2.0m 斜 30° 水泵; 1999 年投入运行的浙江盐官叶轮直径 3.8m 斜 15° 水泵; 2003 年投入运行的江苏太浦河叶轮直径 4.1m 斜 15° 水泵等近 10 座泵站, 但应用效果不够理想。

卧式水泵机组有采用平面 S 型流道的水平轴伸式水泵、猫背式水平轴伸式水泵等形式。如江苏省南京市秦淮新河泵站和江苏省东台市安丰泵站等。贯流泵机组将电机与水泵做成一体, 电机设置在灯泡体内, 有前置灯泡式和后置灯泡式, 水流从灯泡体四周经过, 对密封要求较高, 机组安装检修不太方便, 如江苏省淮安第三抽水站采用了后置灯泡式贯流泵机组。2004 年出现了采用伞形齿轮传动的贯流泵机组, 电机可置于泵体之外, 灯泡体大大减小。表 1-1、表 1-2 为常用大中型水泵结构型式及性能参数。

表 1-1 常用大中型水泵的结构型式及性能参数

水泵型号		叶轮直 径 D (m)	比转 速 n_s	扬程 H (m)	流量 Q (m^3/s)	转速 n (r/min)	效率 η (%)	调节范围 α ($^{\circ}$)	结构型式	配套功 率 N (kW)	配套电机型号
轴 流 泵	64ZLB—50	1.54	500	8	7	250	85	+4~—4	立式直联	800	TL800—24/2150
	16CJ—80	1.54	500	8	7	250	87	+2~—10	立式直联	800	TL800—24/2150
	18CJB—34	1.8	700	3.4	9.9	250	86.2	+4~—6	立式直联	630	630/120—16/32
	18CJ—63	1.8	700	6.3	10.1	250	87.3	+2~—10	立式直联	800	TL800—24/2150
	ZL13.5—8	2.0	700	8	13.5	250/125	86	+6~—6	立式可逆	1600	1600/600 变极
	28CJ—56	2.8	760	5.6	21	150	89	+8~—6	立式直联	1600	TL1600—40/3250
	28CJ—90	2.8A	500	9	25.2	150	89	+8~—8	立式直联	2800	TDL325/56—40
	30CJ—30	3.0	700	3.1	18.1	105	81	+4~—6	立式间传	800	800 卧式
	ZL30—7	3.1	700	7	30.2	150	87	+6~—6	立式直联	3000	TK3000—40/3250
	40CJ—95	4.0	500	9.5	53	107	89	+6~—8	立式直联	6000	TDL535/60—56
45CJ—90	4.5	700	7	60	100	90	+4~—8	立式直联	5000	TDL550/45—60	
混 流 泵	28CJH—56	2.8	500	5.6	20.8	150	90	+4~—8	立式直联	1600	TL1600—40/3250
	28CJH—90	2.8	500	9	25.9	150	87	+4~—4	立式直联	2800	TDL325/56—40
	3HL	2.85	500	9.8	23.2	150	88	+4~—4	立式直联	3000	TL3000—40/3250
	6HL	5.7	700	5.95	97.5	75	92.1	0~—8	立式直联	7000	TDL740/61—80
	1400HL—1	1.1	300	16	5	375	88	+4~—4	立式直联	1600	TL1250—16/2150

表 1-2 配套电动机主要性能参数

电动机型号	额定功率 (kW)	额定电压 (V)	额定电流 (A)	额定转速 (r/min)	起动电流 (A)	效率 (%)	推力轴承荷重 (kN)
TL800—24/2150	800	6000	92	250	506	92	300
TD143/54—8	800	6000		750	1045	90	
1600/600 变极	1600/600	6000/6300	186/68.8	250/125	1302	92/89	700
TL1600—40/3250	1600	6000	183	150	904	92.5	700
TDL325/56—40	2800	6000	314	150	1570	92	830
TL3000—40/3250	3000	6000	340	150	1530	94	800
TDL550/45—60	5000	6000	563	100	2443	94	2300
TDL535/60—56	6000	6000	668	107	3534	96	2300
TDL740/61—80	7000	10000	475	75	2850	95	3500

目前,我国大中型低扬程水泵叶轮直径为0.9~5.7m,扬程为3~9.5m,单泵流量为2.8~97.5m³/s,单机功率为200~7000kW。最大的3种叶片泵性能参数如下:

最大的轴流泵为:叶轮直径4.5m,单泵流量65m³/s,单机功率为5000kW,安装在江苏省淮安第二抽水站。

最大的混流泵为:叶轮直径5.7m,单泵流量97.5m³/s,单机功率7000kW,安装在江苏省皂河抽水站。

功率最大的离心泵为:叶轮直径1.2m,单泵流量2.2m³/s,单级扬程225m,单机功率8000kW,安装在陕西省东雷电灌站。

采取适当的工程和技术措施可以实现泵站多功能化,如可采用“一站四闸”型式^[4]、双向流道^[18]和双向泵^[12]等,泵站可以实现双向抽水功能,如江苏省镇江谏壁抽水站、常州魏村泵站等采用立面X型双向流道,南京市秦淮新河泵站采用双向泵等。泵站还可以采取一些技术措施利用上游余水进行发电,如江苏省江都第三抽水站、泗阳第二抽水发电站^[19~20]和宿迁刘老涧泵站^[21]等。泵站采用变频技术可以提高倒转发电效率。

1.1.3 大中型低扬程水泵装置的流道形式

1.1.3.1 进水流道形式

为满足汽蚀性能要求,低扬程水泵一般要求叶轮安装在进水池水面以下,小型轴流泵和导叶式混流泵进口仅有一只喇叭管淹没于进水池内。进水池形状与流态直接影响水泵进流流态,影响水泵性能。由于大中型水泵较为重要,采用进水流道能为水泵提供较好的进流条件,进水流道断面渐缩并由方渐圆,由水平逐渐过渡到与水泵平滑连接。卧式泵和斜式泵进水流道形状较为简单,立式泵进水流道形式较多且复杂,有肘形、钟形、簸箕形及双向进水流道等^[22]。肘形进水流道使用最早,采用的泵站较多,其特点是形线较为简单,但流道高度大,要求站房施工基坑开挖较深,施工费用较大。采用肘形进水流道的泵站如江苏省江都第一至第四抽水站。而钟形进水流道高度小,流道宽度大,形线较复杂,采用钟形进水流道的如安装28CJ—90型圪工式轴流泵机组的湖南省坡头泵站、安装3HL型立式混流泵机组的安徽省滁河一站。簸箕形进水流道最早由荷兰采用^[23],特点是工程量较小,采用簸箕形进水流道的如江苏省刘老涧泵站。

进水流道由于为渐缩管且长度较短,本身的水力损失较小,主要设计 requirements 是能够为水泵叶轮提供均匀轴向来流,以保证水泵运行稳定、振动小,有较好的能量和汽蚀性能。

1.1.3.2 出水流道形式

大中型水泵出水流道是从水泵导叶出口到出水池之间的过流通道,常采用渐扩并由圆渐方断面,以减小水流流速,变动能为压力能,从而减小流动水力损失。出水流道的前段为出水室,常见的有弯管出水室和蜗壳出水室两种,近年出现了适用于超低扬程泵站的方箱出水室^[24]。出水流道的后段通常称为出水流道,根据水泵结构型式、泵站布置、断流要求及出水池水位变化情况,出水流道的形式有虹吸式、平直管式、屈膝式、猫背式、斜式以及双向出水式等。

在国内已建泵站中,弯管出水室采用最多。弯管出水室紧接在轴向出水的水泵导叶之后,经过一定长度的扩散和弯曲后,水流由垂直方向转为水平方向或斜向上方向。蜗壳出水室采用较少,主要用于3HL型和6HL型混流泵,用钢筋混凝土现场浇筑。蜗壳出水室

紧接水泵导叶之后,水流进入蜗室后沿水平方向导出。

虹吸式出水流道由上升段、驼峰段、下降段和出口段组成。为连接方便,一般采用弯管出水室与虹吸式出水流道相接。采用虹吸式出水流道的机组起动过程就是水流充满管段、空气排出管外,使驼峰处形成一定真空的过程。

直管式出水流道进口接弯管出水室或蜗壳出水室,纵向沿水平或向上倾斜布置至出水池,出口淹没在出水最低工作水位以下。

若平直管式出水流道沿向下倾斜布置至出水池,则成屈膝式出水流道。对于卧式机组,出水流道弯曲向下接出水池的形式即为猫背式流道。斜式出水流道与斜式轴伸泵装置配套使用,其进口与水泵导叶出口直接相接。

大中型水泵装置典型出水流道形式如图 1-1 所示。

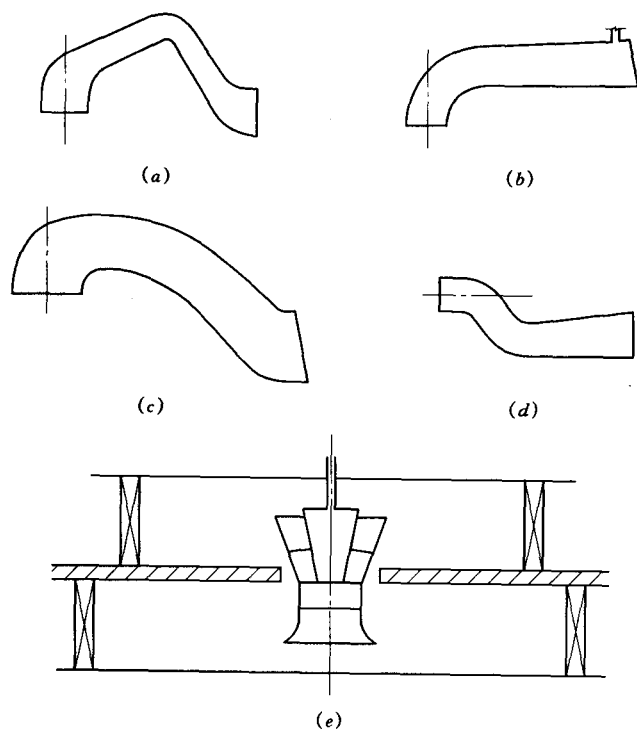


图 1-1 大中型水泵装置出水流道形式

(a) 虹吸式出水流道; (b) 直管式出水流道; (c) 屈膝式出水流道;
(d) 猫背式出水流道; (e) 方箱式双向出水流道

虹吸式出水流道采用真空破坏阀断流。事实上,由于真空破坏阀断流可靠、安全,采用虹吸式出水流道的目的就是为便于采用真空破坏阀断流。机组停机时,打开驼峰顶部的真空破坏阀,大气进入流道破坏真空,迅速切断水流,防止出水池水流倒灌,使机组很快停稳。

直管式、屈膝式、斜式出水流道和双向流道都可以采用快速闸门断流。快速闸门配用液压启闭机,机组停机时,快速闸门在液压作用下迅速下落,切断水流。对于出水流道闸

门淹没深度不大的泵站,可以直接采用卷扬式闸门断流,不需使用快速闸门和液压启闭系统,但要保证门体正常下落。

直管式、屈膝式、猫背式、斜式出水流道和双向流道也可以采用拍门断流。拍门是一种单向闸门,机组起动时,拍门在水流的冲击下自动打开,机组停机时,靠拍门自重和反向水流作用力自动关闭。拍门包括普通拍门、带平衡锤的拍门、带液压缓冲装置的拍门和带浮箱的拍门。在拍门缓冲失效或无缓冲设施停泵动态过程中,闭门会产生对泵站及拍门自身的危害性撞击,缓冲装置回油口面积对缓冲效果有很大影响^[25]。文献[26]试验表明,带浮箱拍门的相对密度对水力损失有影响,建立了拍门水力损失系数与流道尺寸、浮动转矩和门体开启角度间的关系式。

立式机组宜采用虹吸式、直管式、屈膝式出水流道或双向流道,卧式机组宜采用猫背式、直管式出水流道,斜式机组宜采用平直管出水流道。虹吸式出水流道对出水池水位变化幅度有限制,出水池最高工作水位不得高于出水流道驼峰,由于驼峰顶部真空度的限制,驼峰相对于出水池最低工作水位的高度应有限制。

直管式出水流道适用于出口最低工作水位相对于叶轮中心高程较高的泵站。流道纵向上倾斜,可以减小出水弯管的弯曲角,从而减小其水头损失,而且在机组起动时,流道内的空气容易排除、水流压力脉动较小。

屈膝式出水流道适用于出水水位变化幅度较大而最低工作水位较低的立式泵站。猫背式出水流道适用于出水水位较低的卧式泵站。双向出水流道适用于内外水位变化频繁、高低交错的沿江圩区特低扬程泵站。

虹吸式出水流道断面逐渐过渡,无拍门局部损失,出口损失小,但沿程损失和弯管损失稍大,故总水头损失稍大。直管式、屈膝式、猫背式出水流道则相反。虹吸式出水流道弯道较多,流道断面形状变化复杂,土建工程量大,给混凝土施工立模、浇筑带来一定不便,与直管式、屈膝式和猫背式出水流道相比,土建工程量和投资较大。

泵站采用真空破坏阀断流,断流设施简单,管理方便,特别是安全可靠,维修工作量小。

采用快速闸门断流的轴流泵站,若机组起动时闸门开启过迟或太慢,就会增加水泵的起动扬程,从而导致电机过载和机组振动;如果闸门开启过早或太快,则可能使水泵排出的水与从闸门外流进的水在流道内相撞,导致流道内压力脉动及排气困难。停机时门体下降时刻和速度难以控制,容易造成闭阀运行而超载,或倒转飞逸,影响机组和泵站安全。混流泵流量功率曲线 $Q \sim N$ 比较平缓,流量变化时水泵轴功率变化不大,适合采用快速闸门断流^[27]。

采用拍门断流的泵站,由于拍门长期浸没于水下,受出水的冲击摆动,门铰容易因锈蚀和疲劳而损坏,导致拍门冲落,造成停机倒流。拍门关闭对流道出口的撞击力很大。出水池泥沙淤积阻碍拍门开启,对于轴流泵,容易造成机组闭门起动而超载^[27]。

采用快速闸门或拍门断流,断流装置随机组增大而复杂,尺寸增大,金属耗量增多,投资较大。快速闸门需要油压启闭系统,拍门断流投资相对较省。出水流道形式与断流方式的比较如表1-3所示。

刘超^[28]分析总结了我国低扬程泵装置的发展,并进行了展望。丘传忻^[29]着重分析了

低扬程大中型泵选型的主要影响因素,提出了具体选型方法。储训^[30]提出了采用模糊决策理论进行大型水泵机组的选型。葛强^[31]提出了大型泵站采用同步电机与异步电机混装方法可提高功率因素。

表 1-3 几种出水水道形式及断流方式的比较

比 较 项 目		泵 型	出水池水位适应性	水头损失	工程量或投资	安全可靠
出水流 道形式	虹吸式出水水道	立式	差	较大	大	
	直管式出水水道	立式	较好	较小	小	
	屈膝式出水水道	立式	好	较大	小	
	猫背式出水水道	卧式	好	一般	小	
	双向出水水道	立式	一般	较大	大	
断流方式	真空破坏阀			小	小	好
	快速闸门			小	大	较差
	拍 门			大	较大	差

国外大中型水泵及泵站应用和研究水平较高的国家有日本、前苏联、美国、荷兰、德国等。Nesbitt^[32]介绍了泵装置运行过程中可靠性和经济性的重要意义,提出一种智能泵装置,通过远程检测、诊断和测试等手段来提高装置的可靠性,降低运行费用。Brown^[33]提出通过添加机械控制系统对动力机变速来提高电机效率从而节省水泵运行费用的方法。Szycha^[34~35]分析了泵装置效率与流量、扬程和转速之间的关系,提出了装置效率与这些参数之间的函数关系,研究提出了一种自动控制系统,根据泵装置运行扬程,通过变速调节使装置效率最高。

1.1.4 大中型低扬程泵机组的可靠性、耐久性与稳定性

1.1.4.1 泵机组可靠性、耐久性与稳定性的概念

对大中型水泵系统,可靠性(reliability)是指系统在规定时间内和规定工作条件下完成规定工作或任务的可能性^[36],用可靠度度量。广义的可靠性还包括机组设备的安装维修性。安装维修性是指机组设备发生故障时,能在较短或规定时间内恢复完好状态的特性。可靠性有四大要素:①可靠性对象。包括水泵系统的水泵、电机、断流设施、传动装置等设备,而且包括人的因素。②规定的功能。即水泵系统能够实现抽水并达到规定流量或水量的预期功能。③规定的条件。指水泵系统运行的泵站扬程和环境条件(如温度、湿度)及维护保养条件。④规定的时间。指水泵系统新安装后或大修后的一个运行周期。有两种规定方法:日历时间法和运行时数法,泵站技术规范(技术管理分册)^[37]规定主水泵大修周期为3~5年或2500~15000h,主电机的大修周期为3~8年或3000~20000h。事实上对许多泵站,机组运行时数与日历时间往往不一致,规定的运行时数范围很大,不易操作。仇宝云^[38]对大中型水泵机组的大修周期影响因素及其确定原则和方法进行了详细分析研究。

耐久性(durability)是水泵系统某个主要设备部件发生随时间渐进性的变化(不是突变),而这种变化最终会导致系统失效不能运行,其渐进时间长短的特性即为耐久性。如水泵导轴承随运行时间的增加,磨损逐渐增大,最终将因轴承间隙过大,导致叶轮动摆度过大,直至发生碰壳而必须停止运行。

稳定性(stability)是指水泵系统运行时振动小、噪声低,各处运行特征(如轴承温度)正常、符合规定的特性。

1.1.4.2 泵机组故障分析

由于设计、制造、施工、安装和维护问题,大中型水泵系统时常发生故障,特别是在排涝、抗旱的关键时刻发生故障停机,严重影响了机组的可靠性和泵站功能的发挥。有些机组的重要部件运行寿命极短,需要经常更换,部件耐久性差,检修维护费用大。

仇宝云^[39]根据调查,列举了我国大中型泵站常见的机械和水力故障,分析了故障的影响及其产生的原因,总结了处理方法和预防对策。影响水泵系统可靠性的主要因素有:电机推力轴承推力瓦烧熔损坏,水泵油润滑导轴承浸水受损,水泵机械式叶片全调节机构故障,水泵快速闸门失灵,拍门掉落及其他突发性因素等。影响水泵系统耐久性的主要因素有:水泵非金属导轴承磨损加剧,水泵汽蚀加快,电机线圈绝缘老化等。文献[27]简述了我国大型低扬程水泵机组结构功能形式,从安全性、稳定性、可靠性、耐久性、安装维修性和系统效率等方面,对各种结构功能进行了较全面的比较,分析了关键部件结构故障失效机理,提出了机组设计、选用的对策。丁军^[40]利用虚拟仪器实验和理论分析研究,通过监测水泵机组振动情况诊断故障。盛鹏^[41]研制了水轮机空蚀在线监测与诊断系统。许明^[42]研制了大型泵机组状态监测及工况调控系统。

1.1.4.3 泵机组配合安装质量控制

泵站安装规范^[43]规定了我国大中型泵站的安装质量技术要求。仇宝云^[44]分析了影响大中型立式泵机组垂直同心的因素,特别是地基不均匀沉陷和上下游水位差变化引起的站房倾斜^[45]对安装质量的影响,提出了机组安装应采取的对策和计算处理方法。

仇宝云^[46]、于志忠^[47]分别推导证明了机组轴线净摆度的近似正弦变化规律,分析了不规则摆度产生的原因,给出了规则摆度的计算处理方法,指出按八方位确定立式泵机组轴线最大摆度方位的传统方法存在较大误差,致使轴线摆度经常不能一次处理成功,并提出了轴线最大摆度及其准确方位的确定方法。

格梁科^[48]和汤方平^[49]试验证明轴流泵叶片间隙过大或不均会降低水泵效率。仇宝云^[50]分析了影响叶片间隙的因素,给出了叶片间隙全面系统的控制、测量及调整方法。电机定转子磁场中心高差和叶片与外壳中心高差影响机组运行。仇宝云^[51~52]还分析了影响这两个高差的因素,提出了高差安装确定控制方法。

电机定转子空气间隙不均会产生不平衡磁拉力,增大机组导轴承荷载。转子磁极不圆是影响大型水泵配套电机气隙均匀的主要因素之一。仇宝云分析比较了现有磁极厚度测量架和旋转测圆架两种测圆方法,指出其存在的问题,对旋转架测圆法加以改进,提出一种安装过程中在定子内直接测量转子不圆度的方法^[53];分析了影响电机空气间隙的因素,提出了提高立式泵机组电机空气间隙质量的方法^[54];仇宝云^[55]论述了大型立式泵机组的8大安装配合要素及其对机组运行的影响,分析了各要素之间的关系,提出了安装要素质量控制的关键技术。

1.1.4.4 水泵导轴承与电机推力轴承

水泵导轴承与电机推力轴承故障发生率高,是大型水泵机组最为关键的易磨易损部件,因而是水泵机组运行寿命、大修周期和可靠性的主要控制性因素。

除弯管式水泵外,大型立式水泵一般只设一只导轴承,导轴承位于导叶体轮毂内,有巴氏合金轴承和非金属轴承两大类。杨洪群^[56]针对国内大中型泵站卧式机组导轴承运行中存在的问题,结合南京市秦淮新河泵站卧式机组的技术改造,就水泵导轴承部件的选择进行了综合分析研究。杨树雄^[57]介绍了大型卧式轴流泵导轴承的使用现状和水润滑非金属轴承、油润滑金属轴承等各类轴承的特点以及选用方法。吴仁荣^[58]对水润滑轴承主要结构要素的设计计算方法进行了讨论,指出采用水润滑轴承已经成为一种发展方向,因为水润滑轴承具有许多滚动轴承无法胜任和油润滑滑动轴承难以比拟的优点,但水润滑轴承无论是在结构设计、材料选用、使用范围还是在润滑液量计算方面都与油润滑滑动轴承有不同之处。王海宝^[59]列举了水润滑轴承的特点,介绍了水润滑轴承所用的金属材料、塑料、陶瓷及其他材料的特点,以及水中滑动性能和在各种速度及负荷匹配汇总的应用情况。王春林^[60]通过对填充聚四氟乙烯导轴承的研究,得出了轴径与导轴承壁厚、运转间隙、最小冷却水量之间的关系曲线。黄毅^[61]介绍了国内大型斜轴伸水泵导轴承的结构型式,主要有油润滑和水润滑两种,油润滑轴承材料主要有巴氏合金和弹性金属塑料,水润滑轴承材料主要有 P23 酚醛塑料和 F102 复合材料,具体应用中要慎重考虑,要对轴承材料进行强度复核,严格掌握加工技术。针对国内大中型泵站卧(斜)式水泵水导轴承运行中存在的油润滑金属轴承因密封漏水导致轴承损坏,非金属轴承因材料配方、承载力及抗冲击等性能不满足要求导致损坏的现象,杨洪群^[62]对水泵导轴承的结构型式、材料性能的优缺点和适用条件进行了分析研究。针对泵抽含沙量大的水体时橡胶轴承磨损严重的问题,吴炳洪^[63]设计了一种上下轴承用套管相连的泵以阻止沙粒进入而对轴承磨损。彭晋民^[64]分析了水润滑塑料合金轴承在动压条件下的弹性变形,推导出了支承间隙方程式,并通过傅立叶级数对压强函数进行展开,分析弹性变形和压强的关系,最终得出了动压条件下压强分布函数和弹性变形函数。

立式水轮发电机的导轴承受转动部件的径向力。测量出导轴承承受的径向力不仅可以了解其受力状况,还可以知道机组的工作状况,用以分析机组工作不良的原因,进而找出消除的方法。黄益生^[65]介绍了径向力测试的电测法,并运用此方法进行动平衡取得较为满意的结果。古墨尔^[66]分析了水力机组轴承设计的基本原理、常用于轴承外形结构的特殊设计数据。薛永宽^[67]全面计算了平面扇形瓦推力轴承的流体动压润滑性能,分析了压力中心、承载能力和功耗等性能参数与瓦倾斜参数和温升参数的关系。由计算结果可知,压力中心曲线存在着单值区、双值区和无值区。对于固定瓦和可倾瓦轴承,都可以选择最佳设计参数,使承载力最大。徐海波^[68]利用能量极小原理,采用三维分析方法,综合考虑了瓦块力变形、热变形及油膜离心力等因素对大型水轮发电机组推力轴承性能的影响,结果表明,油膜离心力和瓦块热变形对轴承性能有较大影响。仇宝云分析了大型泵站立式机组电机推力轴承经常发生烧瓦事故的原因^[69]及泵机组制造、安装质量对推力瓦受力大小和分布及润滑情况的影响,提出了提高安装质量、改善推力瓦受力的途径和方法,以减小烧瓦的可能性^[70]。黄季艳^[71]通过调查泵机组轴承故障情况,分析泵站辅助设备油系统和水系统对主机组轴承的影响,提出了提高轴承可靠性和运行寿命的对策和措施。

庄志义^[72]对弹性金属塑料瓦的机理作了简要说明,介绍了弹性金属塑料瓦的设计特点及制造工艺。王初铭^[73]说明了推力轴承弹性金属塑料瓦的机理,列举了塑料瓦的优点,