



贯流式水轮发电机组 及其选择方法

田树棠 编著

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

近年来,我国水电建设领域里一支异军突起的项目——低水头径流式中型水电站,正在蒸蒸日上、蓬勃发展。而卧式布置的贯流式水轮发电机组具有显著的技术经济优势。与常规的立式轴流机组相比,约可节省电站建设费用10%~20%,而且运行稳定、空蚀轻微,每年尚可多发电量4%左右,具有很强的竞争能力,从而促进了低水头径流式中型水电站的发展速度。目前国内水轮机制造厂,尤其是几家中外合资企业,已基本具备设计、制造大型灯泡贯流式水轮发电机组的生产能力,可适应低水头径流式水电站发展的需要。当然也还有不少实际问题亟待解决。首先,对国内外灯泡贯流式水轮发电机组的技术水平和发展趋势缺乏准确的认识。其次,对于低水头径流式水电站和灯泡贯流式水轮发电机组还缺乏完整的设计方法,目前仍然是按照调节式水电站的加权平均概念去选择电站与机组参数。事实上,对于径流式水电站应以概率概念确定电站与机组参数。再者,对于贯流式水轮发电机的运行性能、采购要求等一系列问题也缺少系统的分析评价方法。总之,对其缺乏足够的理论分析和设计方法。当然,自70年代末白坨、马迹塘等水电站的灯泡贯流式水轮发电机组建设以来,有关设计制造、建设管理部门也相继总结了不少有价值的资料,如珠江水利委员会情报室所编的《灯泡贯流式水轮发电机组专辑》等。另外,在有关科技杂志与论文集集中也刊登了不少有关学术论文与科技信息,一些制造厂尤其是几家合资企业也介绍了一些有益资料。

由于工作关系,作者多年来做了黄河上游6座大中型低水头径流式水电站的设计前期工作,而这些电站均可采用大型灯泡贯流式水轮发电机组,单机容量约在40MW左右,这在前几年对国内厂家而言是有一定制造难度的。为此,曾陪同有关业主赴奥地利考察多瑙河的梯级开发情况和灯泡贯流式水轮发电机组的有关技术。在设计工作中收集了一些有关技术资料,经过对其分析总结之后,发现不少与常规轴流式机组不同之处,尤其是在机组参数的选择上有较大的差异,深感有必要将这些总结出来,供有关同行们参考。于是,作者不揣高深在借鉴白坨、马迹塘等水电站以及其它灯泡贯流式水轮发电机组的技术总结和经验教训的基础上,结合自己撰写的若干篇文章中的论点,编写了本书,可谓集中了同行们的经验与智慧。

为此，应当感谢众多的同行们，尤其要感谢湖南、广东、广西等地水电设计部门的同行们。各制造厂与合资公司为本书提供了不少的技术资料，书中部分章节曾请天津阿尔斯通水电设备公司梁启天先生审阅并提出宝贵意见，在此一并致谢。本书承天津电气传动设计研究所何国任教授级高工审稿，并提出宝贵意见，也在此表示感谢。

同时，亦要感谢作者工作单位——西北勘测设计研究院机电处的大力支持。

作者虽然试图从理论上加以系统的阐述并注意提高本书的实用性，但限于水平和时间，纰漏错谬在所难免，诚多惶恐。自知学养未逮，仅举其端倪就正大雅而已，更期抛砖引玉。

本书可供水电设计同行们参考使用，亦可供大专院校学生阅读。

编著者

1999年11月

前 言

第一章 绪论	1
第一节 贯流式水轮机的定义及简史.....	1
第二节 贯流式水轮机的分类与发展.....	1
第二章 灯泡贯流式水轮发电机组	7
第一节 灯泡贯流式水轮发电机组发展概况.....	7
第二节 灯泡贯流式水轮发电机组的技术优势	16
第三节 灯泡机组比转速的选择方法	17
第四节 大型灯泡机组统计方程	19
第五节 灯泡机组运行性能分析预测	22
第三章 灯泡贯流式水轮机的选择方法	37
第一节 低水头径流式水电站的特点	37
第二节 灯泡贯流式水轮机的选择原则与方法	39
第三节 灯泡贯流式水轮机参数选择实例	42
第四章 灯泡贯流式水轮发电机组制造难度分析	65
第一节 灯泡贯流式水轮机制造难度分析	65
第二节 灯泡贯流式水轮发电机技术分析	89
第三节 灯泡贯流式水轮发电机关键技术	93
第五章 全贯流式和半贯流式机组	101
第一节 全贯流式机组.....	101
第二节 竖井贯流式机组.....	105
第三节 轴伸贯流式机组.....	110
第四节 标准化设计及比较.....	125
第六章 贯流式水轮发电机组的发展与采购	128
第一节 贯流式水轮发电机组的广阔前景.....	128
第二节 贯流式水轮发电机组的采购途径.....	129
第七章 贯流式机组辅助设备与厂房布置	144
第一节 贯流式机组辅助设备选择特点.....	144
第二节 贯流式机组的厂房布置特点.....	156

附录 A 贯流式水轮机转轮综合特性曲线..... 169

附录 B 国内外有关贯流机组资料 179

附录 C 国外主要灯泡机组生产厂家 188

附录 D 灯泡机组安装说明 215

附录 E 灯泡机组安装进度表 221

参考文献..... 224

第一章

绪论

第一节 贯流式水轮机的定义及简史

水轮机是利用水（液体）能并将其转换为机械能的机器设备。

贯流式水轮机的工作轮与轴流式水轮机的相同，可分为转桨式和定桨式，它没有蜗壳而代之以直轴形引水室，其尾水管则是直锥形的。因这种水轮机一般均为卧式，引水管、工作轮、尾水管均位于同一轴线上，水流平直贯通，故称为贯流式水轮机。这种机型适用于低水头电站；亦可设计成可逆式水轮机，以用于潮汐电站。

水轮机作为一种将水能转换为机械能的机器，有着悠久的历史。远在公元前几世纪，在中国、印度、希腊等地，人们就已经懂得利用简单的水力原动机来带动水磨、水碾及其它机械，但直到 1824 年，才第一次出现水轮机（即水力透平，系来自拉丁字 turbo，陀螺之意）这个名词，以后又陆续出现各种其它类型水轮机。贯流式水轮机是这个家族中最年轻的成员，直到 1930 年才由德国人库尼(Kuhne)获得贯流式水轮机的专利；而灯泡贯流式水轮机是由瑞士爱舍维斯公司(Escher Wyss, 简称 EW)于 1933 年才正式获得专利的。由于灯泡贯流式水轮发电机组具有(以下简称灯泡机组)显著的技术、经济优势，因而获得了迅猛的发展。

按 GB/T 2900·45—1969《电工术语 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机》中的定义：贯流式水轮机，即过流通道呈直线（或 S 形）布置的轴流式水轮机；灯泡贯流式水轮机，即发电机置于流道中灯泡体内的贯流式水轮机。

第二节 贯流式水轮机的分类与发展

从世界水电发展的趋势可以看出，低水头水电站建设的重要性正在日益增大。但是，低水头电站的发电设备特别是水轮机的主机部件尺寸日益加大，增加了设备的制造难度。近年来，国外许多制造厂家都特别加强了对低水头和甚低水头机组的开发与优化，对低水头电站建设的可行性提供了有力的支持。

随着水电建设的发展，卧式布置的贯流式水轮机在低水头水电站中变得更加重要和具有竞争力。在 25m 水头段以下，贯流式水轮机与立式轴流式水轮机相比，具有一系列优点，尤其是水电站土建工程投资少，以及有较高的过水能力、较高的运行效率和良好的运行性能。

一、贯流式水轮机的分类

贯流式水轮机，根据其结构特点和布置形式，可分为全贯流式、半贯流式（又分为竖

井式、轴伸式和灯泡式)两种,其适用范围各不相同,参见表1-1。表1-1所列的贯流式

表 1-1 贯流式水轮机的分类及其代表产品

机 型 及 代 号		运行水头 H (m)	转轮直径 D_1 (m)	代 表 产 品
机 型	代 号			
灯泡式	GZ-WP-	6~25	2.8~9.0	(只见) $N=65.8\text{MW}$ 、 $D_1=6.7\text{m}$ 、 $H=20.7\text{m}$
轴伸式	GZ-WZ-	6~30	0.6~9.0	(奥扎克) $N=31.5\text{MW}$ 、 $D_1=8.7\text{m}$ 、 $H=13\text{m}$
竖井式	GZ-WS-	2~9	1.0~9.0	(墨累) $N=24.8\text{MW}$ 、 $D_1=8.2\text{m}$ 、 $H=4.5\text{m}$
全贯流式	GZ-WQ-	2~25	<	(安娜波利斯) $N=20\text{MW}$ 、 $D_1=7.6\text{m}$ 、 $H=7.1\text{m}$

注 表中括号内为电站名。

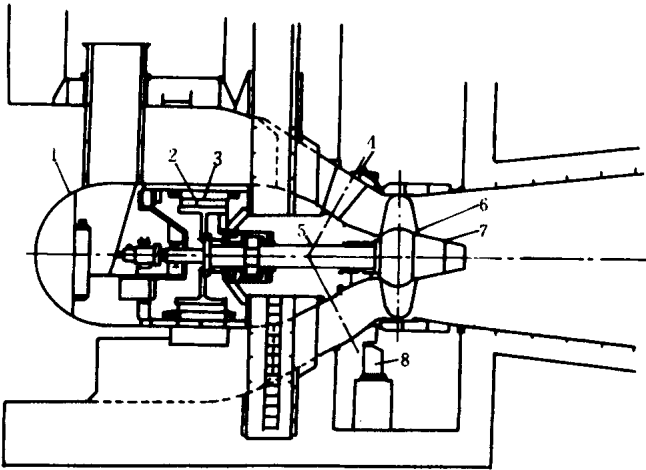


图 1-1 灯泡贯流式水轮发电机组

1—灯泡头；2—发电机转子；3—发电机定子；4—导叶；
5—主轴；6—转轮叶片；7—转轮体；8—接力器

水轮机都有活动导叶和活动桨叶（即 GZ）。在装有多台机组而水头和流量相对不变的情况下，采用固定导叶调节桨叶（即 GT）或固定桨叶调节导叶（即 GD）的单调节结构型式都可简化机组结构，节省机组费用。对于小型机组甚至可以取消导叶，而由进口蝴蝶阀控制流量。由于贯流式水轮机的流道和机组布置形式适合作可逆式机组，甚至双向发电与抽水，所以可用于抽水蓄能与潮汐电站。

灯泡贯流式机组是当前广泛应用于大、中型机组的一种机型。其过水流道是轴向的或略微倾斜的。灯泡体位于水轮机转轮上游，导水机构是锥形。发电机转子直接耦合在水轮机轴上，水轮机轴由两个导轴承支持。参见图 1-1。灯泡贯流式机组以较低的转速运行，大型机组的转速大约是 70~125r/min。灯泡贯流式机组唯一的限制是部件制造和运输条件的限制。已完成详图设计的灯泡贯流式机组的最大出力为 100MW，转轮直径是 9m。而目前已投产的大型灯泡贯流式机组见表 1-2。

表 1-2 大型灯泡贯流式机组技术参数

电 站	P_r (MW)	H_r (m)	Q_r (m^3/s)	Q_{11} (m^3/s)	n_r (r/min)	n_{11} (r/min)	n_s (m-kW 制)	$k = n_s \sqrt{H_r}$	D_1 (m)	厂 家	投产 年代
(日本)只见	65.8	18.4	375	1.95	100	156.2	673	2887	6.7	日立	1989
(美国)石岛	54.0	12.1	481	2.53	85.7	182.3	882	3068	7.4	NP	1978
(前苏联)萨拉托夫	47.3	10.5	528	2.90	75.0	173.6	863	2796	7.5	AM3	1968
(法国)肖塔涅	46.6	15.0	350	2.21	107.1	177.0	783	3033	6.4	NP	1980

续表 1-2

电 站	P_r (MW)	H_r (m)	Q_r (m ³ /s)	Q_{11} (m ³ /s)	n_r (r/min)	n_{11} (r/min)	n_s (m-kW 制)	k $= n_s \sqrt{H_r}$	D_1 (m)	厂家	投产 年代
(法国)贝来	46.7	15.05	350	2.20	107.1	177.0	781	3030	6.4	NP	1982
(南斯拉夫)萨柯维斯	42.2	18.5	250	1.99	125	156.9	669	2879	5.4	NP	1977
(法国)鲁西荣	42.0	12.25	400	2.93	93.75	167.4	838	2934	6.25	NP	1977
(日本)新乡 II	40.6	19.25	200	1.82	136.4	155.4	682	2991	5.0	富士	1978
(葡萄牙)克来斯吐买	40.2	11.25	423	2.73	83.3	168.9	811	2720	6.8	NP	1985
(法国)皮阿日	40.0	12.5	400	2.90	93.75	165.8	798	2820	6.25	NP	1977
(前苏联)叶尼肯特斯克	38.2	16.0	262	2.17	115.4	158.7	705	2820	5.5	XT3	1985
(奥地利)阿登沃尔特	41.2	13.6	300	2.26	103.4	168.2	804	2965	6.0	NO. V	1976
(法国)博凯尔	35.0	10.5	415	3.28	93.75	179.0	907	2967	6.25	NP	1970
(加拿大)拉芝尼	35.0	11.0	400	2.53	93.75	195.0	876	2904	6.9		
(奥地利)克来芬斯坦	34.7	10.9	350	2.53	85.7	171.9	825	2698	6.5	EL	1981
(日本)赤尾	34.0	17.4	220	2.03	128.6	157.2	667	2783	5.1	富士	1978
(挪威)阿克希切斯	33.5	11.0	380	2.93	93.8	177.0	857	2842	6.25	KB	
(法国)索费奈尔	33.0	9.4	400	2.74	93.75	210.0	1035	3173	6.9	NP—A	1973
(法国)卡代罗斯(ZZ)	30.0	8.3	400	3.55	93.75	203.4	1153	3322	6.25	NP—A	1975
(法国)卡代罗斯(ZD)	31.5	8.3	400	2.92	93.75	224.5	1181	3403	6.9	NP—A	1975
(瑞典)托罗恩	31.6	19.0	165	1.87	150	154.9	672	2929	4.5	KMW	1976
(法国)阿维尼翁	30.0	9.0	400	3.41	93.75	195.3	1042	3126	6.25	NP—A	1973
(法国)拉瓦纳尔旺	30.0	9.7	405	3.33	93.75	188.0	949	2956	6.25	NP—A	1973
(法国)圣瓦利埃	30.0	9.8	415	3.39	93.75	187.2	937	2932	6.25	NP—A	1972
(法国)格尔万斯	30.0	9.7	405	3.33	93.75	188.0	949	2956	6.25	NP—A	1973
(匈牙利)纳吉马罗	37.56	9.77	520	2.96	65.2	156.4	732	2288	7.5	EW	1992
(葡萄牙)贝尔佛	35.3	14.2	2675	1.97	100	159.2	682	2570	6.0	EW	1980
(南斯拉夫、罗马尼亚)铁门 III	28.0	7.4	425	2.78	62.5	172.3	857	2331	7.5	AM3	1981
(加拿大)琴佩克	28.0	7.2	429	2.84	62.0	173.3	880	2360	7.5	AM3	1975
(瑞典)奥塞里	28.7	9.2	300	2.86	93.75	188.5	990	3007	6.1	KMW	1974
(法国)伊弗海姆	27.0	11.7	267.5	2.62	1000	191.0	1025	3109	5.8	V—EW	1977
(美国)特沃克斯	26.8	12.8	230	2.25	112.5	168.2	761	2722	5.35	富士	1986
(瑞典) Mattors	24.9	9.45	250	2.59	93.8	170.9	893	2745	5.6	KMW	1980
(法国)戈尔非奇	23.0	15.5	180	1.7	125	161.9	616	2427	5.1	NP—A	1973
(美国)拉申	24.6	6.3	443.5	2.98	62.1	190.5	976	2449	7.7	EW	1981
(瑞典)加斯德	24.3	15.0	180	2.30	136.4	158.0	720	2789	4.5	NO	1973
(法国)甘布斯海姆	24.05	10.35	270	2.68	100.0	174.0	835	2686	5.6	NP—A	1974
(法国)施德拉斯堡	24.5	10.7	234	2.2	100.0	171.0	809	2646	5.6	NP—A	1970
(美国)万斯布尔格	24.0	8.4	360	3.18	93.8	202.0	1016	2945	6.25		

续表 1-2

电 站	P_r (MW)	H_r (m)	Q_r (m ³ /s)	Q_{11} (m ³ /s)	n_r (r/min)	n_{11} (r/min)	n_s (m-kW制)	k $= n_s \sqrt{H_e}$	D_1 (m)	厂家	投产 年代
(日本)山乡Ⅱ	23.7	15.38	170	1.92	125	151.4	632	2479	4.75	富士	1990
(中国)马回	23.62	11.4	225	2.37	115.4	181.1	846	2856	5.3	AN、EL	1991
(法国)格斯特海姆	23.0	11.45	234	2.21	100.0	165.0	720	2436	5.6	NP	1966
(奥地利)阿布温登	22.7	7.96	284	3.10	93.8	189.5	1066	2982	5.7	AN、EL V、Va	1979
(瑞典)帕基	21.1	11.0	168	2.11	115.4	170.5	839	2783	4.9	KMW	1967
(奥地利)奥斯腾海姆	20.7	9.2	250	2.63	100.6	184.5	898	2724	5.6	EL	1973
(法国)贝尼德	20.42	7.8	333	3.20	83.3	181.9	903	2524	6.1	NP	1966
(中国)南津渡	20.6	14.5	156	2.34	150	164.5	750	2855	4.18	EL	1991
(美国)新马丁斯维尔	20.0	6.4	396	2.94	77.4	223.3	1075	2720	7.3	富士	1988
(瑞典)留斯尼福斯	19.8	6.7	300	2.83	93.8	185.4	979	2534	6.4	KMW	1974
(瑞典)洛温	19.8	13.8	160	2.13	128.6	155.2	722	2682	4.5	NO	1973
(瑞典)利拉伊维特	18.2	6.5	280	2.95	75.0	179.4	975	2486	6.1	KMW	1977
(中国)马迹塘	18.05	6.55	312	3.07	75.0	184.6	975	2495	6.3	EL	1983
(印度)夏梅图尔	15.6	6.5	271	2.72	75.0	183.9	903	2301	6.25	富士	1988
(中国)渭沱	15.5	8.5	200	2.44	93.75	170.5	804	2341	5.3	EL	1992
(中国)安居	15.5	8.0	222.8	2.60	88.2	171.5	815	2305	5.5	重庆厂	1991

注 1. 表中 P_r 、 H_r 、 Q_r 、 Q_{11} 、 n_r 、 n_{11} 、 n_s 、 k 与 D_1 分别表示灯泡贯流式机组的出力、额定水头、额定流量、单位流量、额定转速、单位转速、比转速、比速系数与转轮直径。

2. 表中各制造厂厂名的缩写分别代表：日立为日本国日立公司；富士为日本国富士电机株式会社；NP和A为法国奈尔皮克公司和阿尔斯通公司；NO和KMW分别为瑞典诺哈佛和卡尔斯达公司；V为德国伏依特公司；AN、EL和Va分别为奥地利安得列斯、伊林和奥钢联公司；AM3为前苏联列宁格勒金属工厂。

竖井式的过水流动和主机部件与灯泡式的几乎相同。与直接带动发电机的灯泡式水轮机的基本区别是：竖井式在水轮机 and 高速发电机之间，增设了一个增速器，灯泡结构被支撑在基础框架上的钢竖井所代替，基础框架支承水轮机主机部分，并留有发电机和增速器的位置，参见图 1-2。

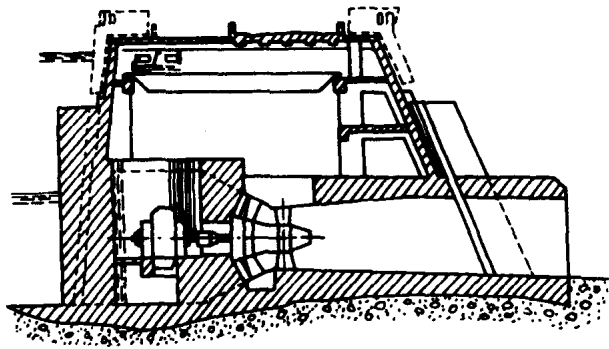


图 1-2 竖井贯流式水轮发电机组

这种设计带来一定的经济效益，特别是对水头在 2~9m 的低水头电站更为显著。其规模同样受部件尺寸限制，此外也被增速器的容量所限制，现在达到的容量是 25MW。

轴伸贯流式水轮发电机组的特点是，它具有一个水平或略微倾斜的轴和一个位于流道之外的发电机，小灯泡体内只需容纳轴

承，增速器布置在水轮机和发电机的中间，尾水管流道有两个弯呈 S 形。因此，其效率没有竖井式和灯泡式的高（参见图 1-3）。目前，其容量最大可达 31.5MW。

全贯流式机组则把发电机转子装在水轮机转轮轮缘上，发电机定子固定在流道外面周围的支承上（参见图 1-4）。EW 公司于 1984 年研制了单机容量为 20MW 的全贯流式机组，安装在安纳波利斯潮汐电站，这是目前世界上单机容量最大的全贯流式机组。

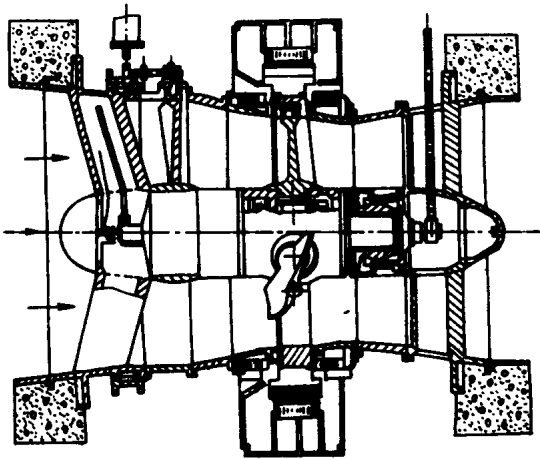


图 1-4 轮缘式（或全贯流式）水轮发电机组

全贯流式机组转动惯量大，能保证机组的稳定运行，避免频率波动，对水头变化较为频繁的潮汐电站更为有利。同时其流道和机组布置形式适合于可逆式机组，还可用于抽水蓄能，将径流式梯级电站的上下游水库作为抽水蓄能电站的上下库，利用原有水工建筑和机电设备就可将普通电站建成既能抽水蓄能又能发电的混合式水电站，提高径流电站在电力系统中的补偿作用；也可将贯流式机组用于排灌站，收到排水发电的双重效益。

二、贯流式水轮机发展概况

从表 1-1 可以看出，当前国外贯流式水轮机的研制水平已有了长足的

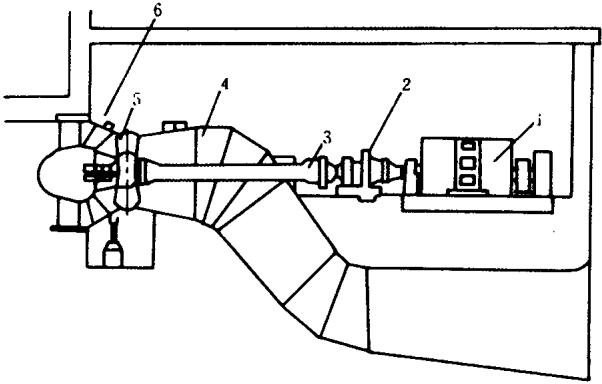


图 1-3 轴伸式机组断面图
1—发电机；2—增速器；3—桨叶接力器；
4—尾水管；5—转轮；6—活动导叶

江发电设备总厂合作生产的广西百龙滩水电站 $D_1=6.4\text{m}$ 、 $P=32\text{MW}$ 大型灯泡机组，亦在近年陆续投运。

虽然我国哈尔滨电机厂和东方电机厂的贯流式机组生产起步较晚，但采取了与国外厂商技术合作的途径，使得其贯流式机组开发速度得到迅速提高。例如，哈尔滨电机厂利用其与日本日立公司之间的良好技术合作关系，采取由日立公司咨询、自己独立设计制造的办法，在灯泡机组制造起步时就生产目前国内最大的江口机组，并在生产过程中解决了一系列的关键技术问题。江口电站 20MW 灯泡机组已于 1998 年底投产。东方电机厂除利用自己的技术实力已生产 $D_1=3.3\text{m}$ 、 $P=6.0\text{MW}$ 的流炭坝电站灯泡机组外，还通过国际合作途径正在设计制造四川南部县红岩子水电站 $D_1=6.4\text{m}$ 、 $P=30\text{MW}$ 的灯泡机组，预计 2000 年投产。

西方各国及前苏联对贯流机组，尤其是对大型灯泡机组进行了大量的试验研究工作。例如，对转轮性能、机组结构总体布置方式、发电机的冷却系统以及机组的强度、刚度、振动等进行了试验研究；在设计方法、制造工艺、安装及运行等方面都具有成熟的经验，并已进入实用阶段。70 年代以来，大型灯泡机组已成为一种技术成熟的机型，在国外获得广泛的使用。

法国是研制灯泡机组最早的国家之一，奈尔皮克 (Neyrpic) 公司有丰富的设计制造经验，1977 年美国石岛水电站投运的 8 台 54MW 灯泡机组 ($D_1=7.4\text{m}$) 为其代表产品。奥地利也是研制灯泡机组较早、生产灯泡机组较多的国家之一，伊林公司销售的灯泡式水轮发电机占世界总量的 60%，另有三家水轮机厂与之配套生产贯流式水轮机。德国的伏依特 (含奥地利伏依特) 公司与西门子公司亦在灯泡机组研制方面卓有成效。瑞士苏尔寿公司 (含奥地利安得列斯公司) 在灯泡贯流式水轮机研制方面，也有丰富的经验与业绩。美国则在轴伸贯流式机组方面有较多的业绩。日本制造灯泡机组起步较晚，但发展较快。富士公司生产了 30 多台大型灯泡机组，日立公司为只见电站生产了世界上目前最大容量的灯泡机组 (65.8MW)。前苏联也是发展灯泡机组较快的国家，1972 年就为萨拉托夫电站生产了单机容量 47.3MW、 $D_1=7.5\text{m}$ 的灯泡机组。挪威克瓦纳集团设计制造过最大容量 45MW、最大转轮直径达 8.2m 的灯泡机组，尤以带增速传动的灯泡机组著称。

第二章

灯泡贯流式水轮发电机组

第一节 灯泡贯流式水轮发电机组发展概况

一、灯泡贯流式水轮发电机组发展简史

1936年,世界上第一台灯泡贯流式水轮发电机组由瑞士爱舍维斯(Escher Wyss)公司制造,安装在波兰的诺斯汀(Rostin)电站,如图2-1所示。其主要参数为:容量 $P=195\text{kW}$,水头 $H=3.7\text{m}$,转轮直径 $D_1=1.95\text{m}$ 。

半个多世纪以来,灯泡机组的研制水平日趋完善,加工工艺亦在不断提高,制造规模有了较大的发展。尤其是1966年投产的法国皮埃尔贝尔尼特电站机组,可以作为灯泡机组发展过程中的一个里程碑,容量首次达到 20MW , $D_1=6.25\text{m}$, $H=8.0\text{m}$ 。

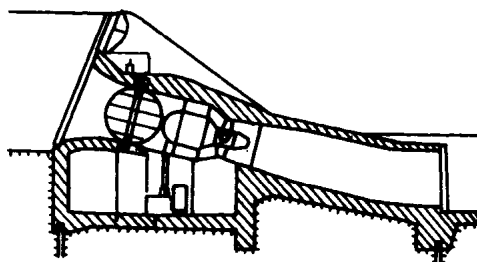


图2-1 世界上第一台灯泡式水轮机

70年代由于当时石油涨价而出现的世界性能源危机,加速了低水头电站的开发,大型灯泡机组相继问世,标志着灯泡机组发展到了一个新的阶段,参见表1-2和图2-2。

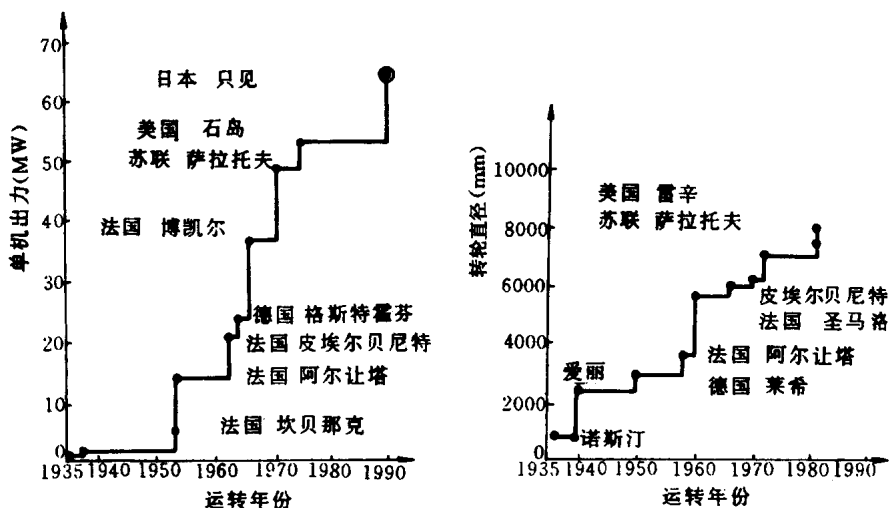


图2-2 单机出力及转轮直径发展趋势

二、灯泡机组应用概述

(一) 奥地利多瑙河梯级开发

奥地利位于欧洲中部，是一个能源构成以水电为主的国家。奥地利的大型灯泡机组设计制造有较高水平与规模。

多瑙河全长 2850km，源出德国黑林山，流经奥地利、斯洛伐克、匈牙利、南斯拉夫、保加利亚、罗马尼亚和俄罗斯等国，最后注入黑海，是欧洲第二大河，也是联系欧洲的纽带。

多瑙河在奥地利境内长 350km，总落差 150m；在首都维也纳河段的平均流量则为 $1900\text{m}^3/\text{s}$ ，最大流量 $10500\text{m}^3/\text{s}$ 。1947 年成立了多瑙河水电公司，原规划共建 12 座水电站（近年又作了规划调整），按规划陆续开发，平均 3 年建成 1 座水电站。

由于多瑙河在奥地利境内大部分是宽阔平坦的河谷，沿途人口稠密、经济发达、文物荟萃，不宜修建高坝大库。原规划的 12 座水电站，总装机容量为 2570MW，年发电量 154.78 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，都是 8~16m 的低水头径流式电站。1970 年以前修建的 4 座水电站安装立式轴流机组，而此后则改为安装灯泡机组，从而显著地减小了厂房尺寸，降低了造价，缩短了工期。同时，装设灯泡机组的各个电站的枢纽布置大致相同，装置 9 台灯泡机组的厂房在一岸，双线船闸在另一岸，中间是泄水建筑物。整个工程的厂房、船闸和泄水建筑物都布置在一个基坑内，避免了洪水危险和施工期对航运的干扰。其各电站参数参见表 2-1 和表 2-2。

随着灯泡机组制造水平逐渐提高，多瑙河梯级电站灯泡机组单机容量与转轮直径逐步增大，机组台数也从 9 台减为 6 台，以进一步节省建设投资。

（二）法国罗纳河开发经验

法国罗纳河梯级电站中，除一座 70m 高的热尼亚西电站外，罗纳河开发计划由一系列低水头电站组成。累计 21 个电站总落差 330m，总装机容量 3075MW，年发电量 160.00 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。其中轴流转桨式机组系 1966 年以前投产的，之后采用灯泡机组（参见表 2-3）。罗纳河的水电开发是近 40 年来低水头水电站设备技术发展的一个特例。尤其是国立罗纳河公司在设计和安装适合平原河流使用、过流量大的大型灯泡机组方面，起了决定性作用。该工艺的经济合理性自 1966 年被确定以来从未遭到反对。罗纳河的综合开发（包括建筑物、设备管理运用及环保等方面）确是一个成功的范例，是值得我们学习和借鉴的。

（三）其它应用概况

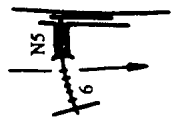
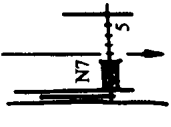
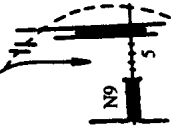
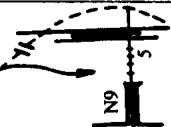
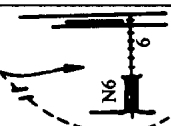
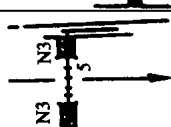
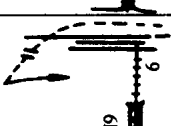
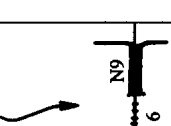
还有不少河流在实施低水头梯级开发计划时，大量采用灯泡机组，以节省电站建设投资。例如，德国的莱茵河—美茵河上，在修建通航运河的同时，也修建了一系列装有灯泡机组的径流式电站。

在我国，特别是珠江水系，也在有计划地进行低水头电站开发。国内已建、在建的灯泡机组参数见表 2-4。

黄河上游龙羊峡至青铜峡河段，经重新规划布局后，共有 13 座低水头电站尚待开发，各电站参数参见表 2-5。这些电站的水头均在 25m 以内，按规划将设计安装 60 多台大型灯泡机组（单机容量多在 30~40MW 之间），总装机容量超过 2230MW，其规模堪与奥地利多瑙河、法国罗纳河梯级开发程度比美。机组参数见表 2-6。

表 2-1

多瑙河梯级水电站枢纽概况

电 站 名 称	约翰施泰因	阿沙赫	奥蒂斯海姆	阿布温登 阿斯腾	瓦尔赛 米特尔基	伊布斯 佩森博伊格	梅尔克	阿尔腾沃尔特	格兰芬斯坦	海恩堡 (已取消)	
业 主	奥德联营	多瑙河 电力公司	多瑙河 电力公司	多瑙河 电力公司	多瑙河 电力公司	多瑙河 电力公司	多瑙河 电力公司	多瑙河 电力公司	多瑙河 电力公司	多瑙河 电力公司	
距出海口距离 (km)	2203.3	2162.7	2146.7	2119.5	2093.6	2060.4	2038.0	1979.8	1919.2	1883.1	
库水位 (m)	290.3	280.0	264.0	251.0	240.0	226.20	214.0	193.5	177.0	152.0	
平均流量 (m³/s)	1430	1450	1450	1600	1730	1750	1807	1830	1882	1915	
最大流量 (m³/s)	8900	8900	8900	9500	11100	11100	11170	11170	10750	10300	
额定流量 (m³/s)	1750	2000	2250	2475	2600	2100	2700	2750	3150	3150	
水头 (m)	10.20	15.30	10.70	9.30	10.90	11.0	8.4	14.80	12.6	15.17	
容量 (MW)	(132) 66	286	179	168	210	200	187	335	293	360	
年发电能 (亿 kW·h)	(8.50) 4.25	16.48	11.43	10.28	13.20	12.82	11.80	19.50	17.20	20.75	
布置图											
	孔数×宽度 (m)	6×24	5×24	5×24	5×24	6×24	5×30	6×24	6×24	6×24	6×24
	闸墩宽/高 (m/m)	(5~6) /31	7.10/41	7.50/37	6.0/37	7.50/37	6.0/34	6.0/31	7.0/37	6.0/31	7.0/37
	最大洪水流量(×100m³/s)	8900	8900	5940	8450	8600	11100	11170	9785	8650	8850
闸门	双扉平板	双扉平板	双扉平板	弧门舌瓣	双扉平板	双扉平板	弧门舌瓣	弧门舌瓣	弧门舌瓣	弧门舌瓣	
最大高度 (m)	52	53	39	40	42	42	39	46	44	49	
水轮机数目和型式	5, 卡普兰 立式	4, 卡普兰 立式	9, 灯泡式 卧式	9, 灯泡式 卧式	6, 卡普兰 立式	6, 卡普兰 立式	9, 灯泡式 卧式	9, 灯泡式 卧式	9, 灯泡式 卧式	9, 灯泡式 卧式	
回水长度 (km)	27	40	16	27	26	33	22	32	31	44	
溢流洪水流量 (m³/s)	—	—	2960	1050	2500	—	—	1385	2100	1550	

多瑙河梯级水电站参数

表 2-2

梯级 顺序	电 站 名 称	水头 (m)	流量 (m ³ /s)	总出力 (MW)	台 数	转 速 (r/min)	转轮直径 (m) /型号	水轮机重量 (t)	发 电 机						投产 日期 (年)	
									出力 (MVA/MW)	cosφ	电压 (kV)	年发电量 (亿 kW·h)	GD ² (t·m ²)	定子重量/ 转子重量 (t)		总重量 (t)
1	约翰施泰因	10.2		130	5		/K					8.50				
2	阿沙赫	15.0	4×510	286	4	68.2/185	8.4/K	1300	85/66	0.8	10.5	16.45	36900	217/378	628	1964
3	阿布温登阿斯腾	7.9	9×275	168	9	93.75/276	5.7/B	450	20/19	0.9	8.0	10.28	1330	47/625	139	1979
4	奥腾斯海姆	9.1	9×250	179	9	100/277	5.6/B	370	21/20	0.9	8.0	11.43	1320	49.3/59.7	139	1974
5	瓦尔赛米特尔基	9.1	6×450	210	6	65.2/188	7.8/K	1100	42.5/35	0.8	8.0	13.20	18000	99/214	342	1968
6	伊布斯佩森博伊格	10.6	3×360	200	6	68.2/186	7.4/K	910	45/33	0.8	10.3	12.82	16860	140/230	408	1959
7	梅尔克	8.2	9×300	187	9	85.7/239	6.3/8	610	24/21	0.9	9.0	11.80	1920	61.7/77.9	193	1982
8	鲁尔斯道夫	11.0		150	6			4				8.00				设计中
9	阿尔腾沃尔特	14.0	9×300	342	9	103.4/280	6/B	520	45/40	0.9	7.75	20.40	2900	92/144	306	1976
10	格兰芬斯坦	10.9	9×350	293	9	93.75/256	6.5/B	770	38/34	0.9	8.0	17.20	4924	87.2/143	310	1985
11	福鲁顿瑞	6.8	6×300	180	6	65.2	7.5/B		32/30	0.98	10.5					1997
12	海恩堡 (已取消)			360								20.75				

表 2-3 法国罗纳河梯级工程主要技术参数

项 目	投 产 年 份	水 轮 机 型 式	正 常 蓄 水 位 (m)	单 机 流 量 (m ³ /s)	利 用 水 头 (m)	机 组 台 数 (台)	转 轮 直 径 (m)	单 机 出 力 (MW)	机 组 转 速 (r/min)	年 发 电 量 (亿 kW·h)	电 站 尺 寸			工 程 量	
											长 (m)	宽 (m)	高 (m)	出 石 方 (亿 m ³)	混 凝 土 (万 m ³)
热尼亚 - 塞塞尔	1948/1951	HL	330.7/260.5		74.36	6/2		65~70		17.00/1.65				15	88.0
肖塔	1980	GZ	252	350	15.00	2	6.4	45	93.8	4.35	74	40	40	85	10.0
贝来	1982	GZ	235	350	15.05	2	6.4	45	93.8	4.00	74	40	40	100	10.0
科尔东	1984	GZ	217		11.40	2		37.5		3.60				80	8.0
布雷纳兹	1986	GZ	202.5		7.60	2		20.0		2.50				40	7.0
洛瓦耶特		GZ	193.0		8.00	2		23.5		2.80				90	16.0
居塞	1899		182.4		12.20	16		6.69		4.25					
圣克来		GZ				5								80	
贝尼特	1966	ZZ	161.8	345	8.00	4	6.1	20.0	83.3	5.40	89			220	35
沃格里斯	1980	GZ GD	150.2	350	7.20	2 2	6.25 6.90	19.0	75	3.35	84	67	50	94	30
鲁西荣	1977	GZ	143.5	400	12.25	4	6.25	40.0	93.8	8.80				290	44
圣瓦利埃	1972	GZ	128.2	415	9.85	4	6.25	30.0	93.8	7.00				180	42
瓦朗斯	1968	GZ	116.4	383	10.10	6	7.00	30.0		10.80				260	57.7
博夏斯代尔	1964	ZZ	104.4	400	11.40	6	7.00	32.0		12.00				150	36.0
罗日纳尔	1961	ZZ	90.8	383	10.10	6	7.00	32.0		12.00				200	42.0
蒙得利马	1958	ZZ	77.0	366	16.06	6	6.60	45.0		17.25				300	53.7
蒙德拉贡	1953	ZZ	58.5	316	20.70	6	6.10	330	107.1	19.90				525	72.0
卡德 卡德鲁斯	1975	GZ GD	35.5	400	8.30	2 4	6.25 6.90	30.0 31.5	93.8		(露天式)			300	47.0
索弗塞尔	1973	GZ	26.0	40.0	9.00	2	69.0	33.0	93.8		52.2	42.15	37		
阿维尼翁	1973	GZ	26.0	400	9.00	2	6.25	30.0	93.8	9.35	80	65	42	350	43.0
博凯尔	1970	GZ	16.0	415	10.50	6	6.25	35.0	93.8	12.55				520	52.3

表 2-4

国内已建和在建大、中型灯泡机组参数

电站名称	省(区)	P_r (MW)	台数	H_{max} (m)	H_r (m)	D_1 (m)	n_r (r/min)	Q_r (m ³ /s)	n_s (m·kW)	厂 家	投产 时间
马迹塘	湖南	18.0	3	8.55	6.55	6.3	75	312	975	EL V	1983
南津液	湖南	20.0	3	17.80	14.50	4.18	150	156	750	EL V	1991
马 回	四川	23.0	2	13.00	11.4	5.3	115.4	225	846	EL Aa	1991
渭 沱	四川	15.0	2	11.00	8.5	5.3	93.8	200	804	EL Aa	1992
京 南	广西	34.5	2	14.50	11.0	6.3	88.2	351	828	EL V	1997
百龙滩	广西	32.7	16.40	9.7		6.4	93.75	375.5	990	富士 富春江	1996
高 滩	湖南	19.0	3	12.50	8.5	5.3	100	260	965	WEW 沙城	1997
白 垢	广东	10.0	2	10.00	6.2	5.5	78.9	205	825	天津	1984
都 平	广东	15.0	2	11.00	7.4	5.5	88.2	231	899	天津	1992
安 居	四川	15.0	2	9.85	8.0	5.5	88.2	223	815	重庆	1981
马骊滩	广西	15.5	3	11.50	7.5	5.5	90.9	239	935	富春江	1991
石面坦	湖南	9.6	3	9.96	7.94	4.1	125	136	933	富春江	1992
界 牌	江西	10.0	2	7.00	5.20	5.5	78.9	226	1020	天津	1996
永 兴	湖南	12.5	2	9.93	6.70	5.5	88.2	218	931	重庆	1994
慈 利	湖南	10.0	2	7.50	5.5	5.5	78.9	224	982	天津	1995
白石窑	广东	18.0	4	10.64	7.8	5.8	88.2	263	922	天津	1998
孟州坝	广东	11.4	4	10.50	6.0	5.8	83.3		1086	天津	1997
王甫洲	湖北	27.0	4	12.00	7.52	7.2	71.4	412	1010	EL Aa	在建
谟 武	福建	15.5	2		7.63	5.5	88.2	256	865	天津	1995
江 口	广东	22.0	2	12.1	7.3	6.4	78.95	316.74	949	日立 哈尔滨	1998
下 池	河北	5.0	2	10.40	5.80	3.8	115.4	101	977	富春江	1994
荣 桓	湖南	2.5	4	5.5	4.3	3.3	125.0	684	1033	天津	1992
高 砂	福建	12.5	4	11.5	10.0	4.2	125.0	141.5	714	重庆	1996
流炭坝	四川	6.0	2	9.65	6.7	3.8	125.0	103.6	917	东方	1993
玉 溪	浙江	20.0	2		10.5	5.0	107.1	212.7	811	EL V	1997
大 浦	广西	30.0	3	15.6	10.8	6.0	93.75	311	839	EL VA	在建
凌津滩	湖南	30.0	8	13.2	8.5	6.9	78.94	401	957	日立 哈尔滨	1998
近尾洲	湖南	21.0	3		6.8	6.3	83.3		1113	EL VA	在建
潇 湘	湖南	13.4	4	7.35	6.0	5.8	83.3		1027	阿尔斯通	在建
沙 县	福建	16.0	3		8.8	4.9	100.0		847	阿尔斯通	在建
大源渡	湖南	30.0	4		7.2	7.5	65.2	471	970	EL VA	1998
贵 港	广西	30.0	4	13.3	8.5	6.9	78.94	405	956	KB	1999
飞来峡	广东	35.5	4	15.0	9.3	7.0	78.94		919	EL VA	1999
班 竹	福建	15.0	2	10.0	7.4	5.5	88.2	409	899	KB(杭)	1997
洪 江	湖南	45.0	5	27.3	20.0	5.2	125.0		633	待定	在建
贡 川	福建	21.5	2		9.5	5.5	100.0		893	阿尔斯通	在建
红岩子	四川	30.0	3	13.3	8.5	6.9	75	355	876	东方、AN	在建
尼 那	青海	40.0	4	18.0	14.5	6.0	107.1	316	802	待定	在建