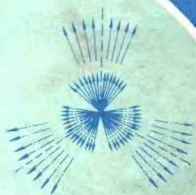


# 中小型 水轮发电机 综合分析

宜昌大学 邓长城 编著



机械工业出版社

本书共分五章，较全面地介绍了中小型(含微型)水轮发电机的初步设计、电磁方案、绕组与绝缘、励磁系统和运行等五方面的内容，并将上述内容进行综合分析，即从设计、工艺、试验与运行四个方面进行全面分析。书中并有我国中小型水轮发电机与国外相应资料的对比分析。

本书可供中小型水轮发电机的研究、设计、工艺制造及运行人员参考，也可作为大专院校学生电机设计课程的参考书。

## 中小型水轮发电机综合分析

宜昌大学 邓长城 编著

责任编辑：牛新国

封面设计：田淑文

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

北京市顺义县曙光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张9.25·字数200千字

1989年9月北京第一版·1989年9月北京第一次印刷

印数00,001—1,800 ·定价：7.70元

ISBN 7-111-01416-2/TM·178

## 前 言

近年来,中小型水电站遍布全国。中小型水轮发电机与大型或巨型水轮发电机相比,有共性也有个性。为了适应农村电气化进程的需要,出版一本专门论述中小型水轮发电机的书很有必要。本书对中小型(含微型)水轮发电机的基本原理进行综合分析,让读者有一个全面观点。既要追求设计的先进性,又要考虑制造工艺的可能性和合理性;同时要保证电站运行的可靠性和获得较高的经济效益。在重点分析电磁设计与结构的内在联系的基础上,同时说明了工艺、试验和运行的外延相关因素。全书强调理论联系实际,大部分章节均附有实例和一些国内、外统计数据作为参考。此外力求做到定性与定量分析相结合,概念清楚,简明扼要。

国家机械工业委员会机械科学技术情报研究所邓昆甫高级工程师对本书的出版给予积极支持和关心,天津电气传动设计研究所许乃波高级工程师和南京水电部自动化研究所陈贤明工程师对《编写提纲》提出了中肯的修改意见,哈尔滨电工学院汤蕴璆教授对书稿进行了审阅,提出了许多极宝贵意见,国家机械工业委员会机械科学技术情报研究所王达高级工程师对修改稿再一次进行了审阅。宜昌市城建局陈燕同志为本书绘制了插图。在编著此书过程中,还得到宜昌市电机总厂、宜昌市科协和宜昌大学的支持与帮助,谨向他们表示深切的感谢!

由于编著者水平所限,书中难免有疏漏或不妥之处,欢迎读者批评指正!

邓长城  
于宜昌大学  
1986,12月

# 目 录

## 前 言

第一章 初步设计	1
一、概述	1
1. 结构型式	2
2. 额定容量	8
3. 额定电压	10
4. 额定功率因数	12
5. 额定转速及飞逸转速倍数	12
6. 飞轮力矩	16
7. 短路比	18
8. 直轴同步电抗 $x_d$ 和瞬变电抗 $x'_d$	21
9. 阻尼绕组	22
10. 励磁系统	23
11. 水轮机的水推力和转子重	24
12. 其他要求	24
二、对高水头机组设计的综合分析	28
1. 概述	28
2. 水轮机调节保证计算参数与发电机 电磁参数的关系	28
第二章 电磁计算、机械结构计算与热计算 的综合分析	33
一、概述	33
二、电磁负荷的选择	33

1. 电磁负荷与电机常数和主要尺寸的关系	33
2. 电磁负荷与发电机损耗、温升的关系	43
3. 电磁负荷与励磁数据的关系	45
4. 电磁负荷对三相冲击短路电流和机座设计的影响	47
5. 电磁负荷对电磁参数的影响	48
6. 选择电磁负荷举例	48
三、中小型水轮发电机主要尺寸的选取	56
1. 概述	56
2. 主要尺寸计算举例	60
四、中小型水轮发电机气隙长度的选取	68
1. 概述	68
2. 气隙偏离平均值所产生的危害	68
3. 微型和中小型水轮发电机气隙数据的选取	74
五、磁路计算	76
1. 概述	76
2. 总槽数和每极每相槽数的选择	76
3. 通用性	91
六、磁极冲片尺寸的选择	94
1. 极弧系数 $\alpha_p$	95
2. 极身高度 $h_m$	95
3. 极身宽度 $b_m$	96
4. 综合分析	97
七、磁路计算和饱和程度的分析	97
1. 概述	97
2. 空载特性曲线的计算	98
3. 额定负载励磁磁势的计算	101
4. 短路比 $K_C$ 的计算	110

5. 负载励磁磁势与空载励磁磁势之比和 短路比的相互关系 .....	110
6. 改善空载电压波形的若干措施 .....	113
八、水轮发电机损耗、效率、发热与温升 .....	118
1. 概述 .....	113
2. 发电机各部分损耗的分析 .....	119
3. 温升限度 .....	128
4. 温升估算 .....	131
九、微型、中小型水轮发电机结构分析 .....	137
1. 概述 .....	137
2. 磁极铁心结构的分析 .....	139
3. 定子铁心结构的分析 .....	143
4. 磁极结构型式和固定方式 .....	152
十、对小型立式水轮发电机设计改进的举例 .....	165
第三章 中小型水轮发电机的绕组与绝缘 .....	171
一、概述 .....	171
二、分数槽绕组 .....	174
三、分数槽绕组接线 .....	180
1. 分数槽叠绕组 .....	180
2. 分数槽双层波绕组 .....	181
四、中小型水轮发电机阻尼绕组的设计 .....	189
五、发电机绕组绝缘 .....	198
1. 概述 .....	193
2. 定子线圈的防晕结构 .....	200
3. 定子线圈的电腐蚀及其防止措施 .....	201
4. 定子绕组和励磁绕组的试验 .....	202
5. 高压线圈的匝间绝缘试验 .....	206
6. 绕组绝缘交流介电强度试验 .....	208

## 第四章 微型及中小型水轮发电机的

励磁方式	211
一、概述	211
二、用直流励磁机励磁	211
三、双绕组电抗分流式自励恒压励磁	212
1. 分流装置剩磁电压的计算	214
2. 空载电压的建立	217
3. 励磁回路的计算	221
4. 晶闸管励磁调节器的原理	226
四、电抗移相式相位复式励磁	229
五、三次谐波励磁	231
1. 概述	231
2. 谐波励磁发电机并车后的负载分配和转移	233
3. 并联运行中对振荡的分析	234
4. 谐波励磁发电机晶闸管自动励磁调节器的特点	234
5. 晶闸管分流工作原理	236
6. 晶闸管自动励磁调节器的工作原理	236
六、无刷励磁	241
1. 概述	241
2. 交流励磁机	242
3. 旋转整流器	244
4. 永磁发电机	245
七、静止晶闸管励磁	245
第五章 微型及中小型水轮发电机的特殊运行方式 和温升试验	247
一、概述	247
1. 电压变化时的运行情况	247
2. 频率变化时的运行情况	248

3. 功率因数变化时的运行 .....	249
4. 调相运行 .....	252
5. 进相运行 .....	252
6. 不对称运行的分析 .....	252
二、水轮发电机的温升试验 .....	254
1. 概述 .....	254
2. 发电机发热的基本温升曲线 .....	254
3. 温升试验方法和绘制运行限额图 .....	262
参考文献 .....	268
附录 中小型水轮发电机主要产品简介 .....	273



# 第一章 初步设计

## 一、概 述

利用河流中水的落差（水头）和流量来发电，称为水力发电。水轮发电机组是水电站中完成由水能转换为电能这一生产过程的主体。水轮发电机发出的电能经过升压，由输电线路送往各地，再经配电装置分配后，供各用电部门使用。遍布于广大农村水电站中的中小型水轮发电机，直接影响到农村排灌、广播、电视、照明和农业机械化电气化事业的发展。因此研究中小型水轮发电机（含微型发电机）的设计、制造、试验和运行并进行综合分析，是十分必要的。本书正是为了适应这一要求而编写的。

究竟多大装机容量算作小水电，多大容量算作微型和小型水轮发电机，多大容量算作中型水轮发电机，目前世界各国尚无统一的定义和标准，我国也没有统一的明文规定或标准。本书参照文献〔1〕和〔2〕暂作如下规定：

（1）将额定容量为100kW以下的称为微型水轮发电机；

（2）将额定容量大于100到500kW的称为小型水轮发电机；

（3）将额定容量大于500到10000kW的称为中型水轮发电机。

总之，本书论及的容量范围为12~10000kW。

现将中小型水轮发电机（含微型发电机）初步设计中的一些技术数据分别阐述如下。

1. 结构型式 中小型及微型水轮发电机的结构型式有卧式和立式两种，它主要取决于水轮机的型式。100kW以下的立式和卧式水轮发电机如图1-1和图1-2所示，一般与水轮机间接连接。

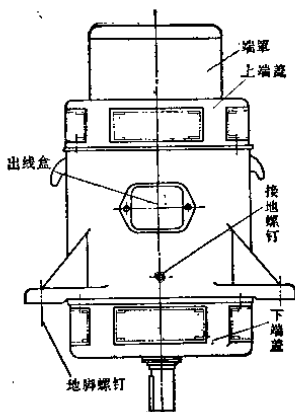


图1-1 微型立式水轮发电机外形图

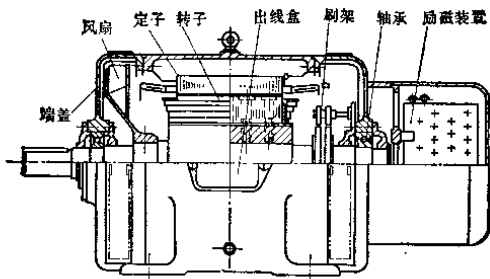


图1-2 微型卧式水轮发电机总装图

500kW以下小型立式和卧式水轮发电机如图1-3和图1-4所示，多与水轮机直接连接。

10000kW以下中型立式和卧式水轮发电机如图1-5和图1-6所示。中型立式水轮发电机中较多采用悬垂式结构。对于这种结构，发电机转子位于推力轴承下部，如图1-5。

对于低水头大流量的自然条件，有时采用贯流式水轮发电机。这里又有半贯流式和全贯流式两种，见图1-7和图1-8。全贯流式水轮发电机具有较大的飞轮力矩，运行稳定，结构紧凑，但较复杂，又由于受到密封技术和材料的限制，目前很少采用。图1-7表示一台额定功率 $S_N = 1375\text{kVA}$ ，额定转速 $n_n = 1000\text{r/min}$ 的半贯流式（灯泡式）水轮发电机，水轮机的参数为水头6.07m，流量 $24\text{m}^3/\text{s}$ ，转速 $165\text{r/min}$ 。类似这种机组，我国已有成熟的制造和运行经验。

卧式水轮发电机通常采用两个或三个轴承，主要是要求临界转速高于或等于机组飞逸转速的1.2倍，此外还需要从安装维护、轴承负荷、机械振动等多方面进行分析比较，才能

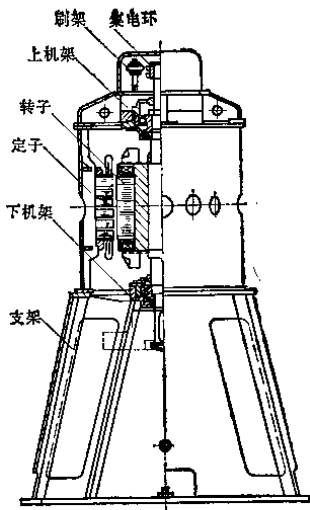


图1-3 小型立式水轮发电机总装图

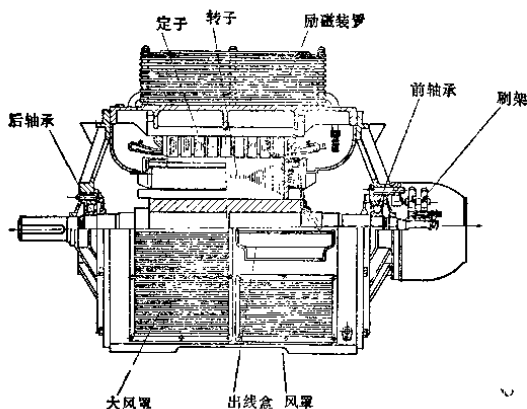


图1-4 小型卧式水轮发电机总装图

最后确定。图1-9和图1-10分别表示三支点结构和二支点结构的卧式水轮发电机组。

两轴承（两支点）结构的轴向长度较短，结构紧凑，且水轮机与发电机采用同一根轴，安装调整方便，应优先考虑采用。但若临界转速不能满足或轴承负荷较大时，则应采用三轴承（三支点）结构。当临界转速低于1.2倍飞逸转速时，一方面要增加转轴的刚度，另一方面需要考虑改变导轴承的布置或增加导轴承的数目。对于中型悬垂式水轮发电机组，有时采用三个导轴承或者两个导轴承（取消下机架），这主要要由临界转速计算后才能决定。

中小型水轮发电机结构型式的选择，主要由电站主厂房的高度、吊车容量、机组本身技术经济指标和运行稳定性、

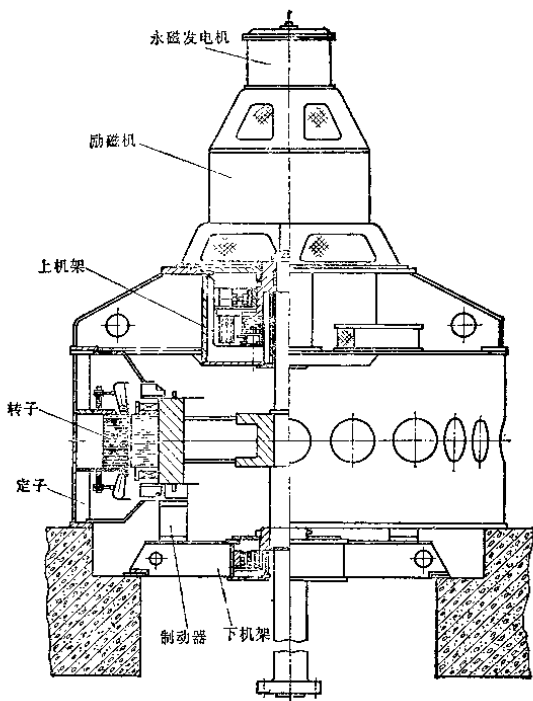


图1-5 中型立式水轮发电机总装图

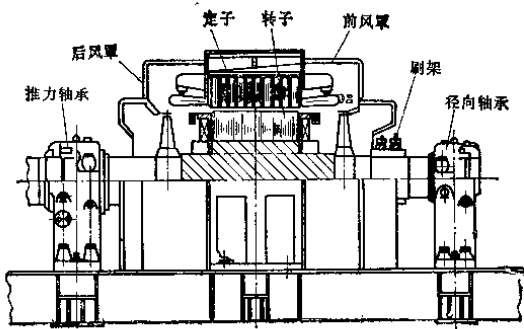


图1-6 中型卧式水轮发电机总装图

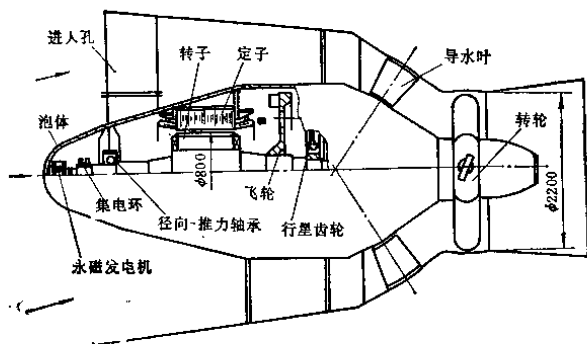


图1-7 半贯流式(灯泡式)水轮发电机总装图

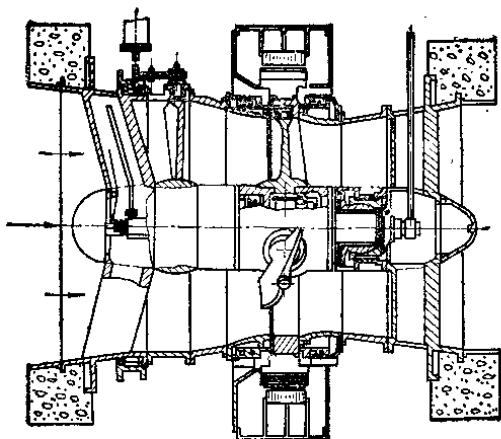


图1-8 全贯流式(轮缘式)水轮发电机组

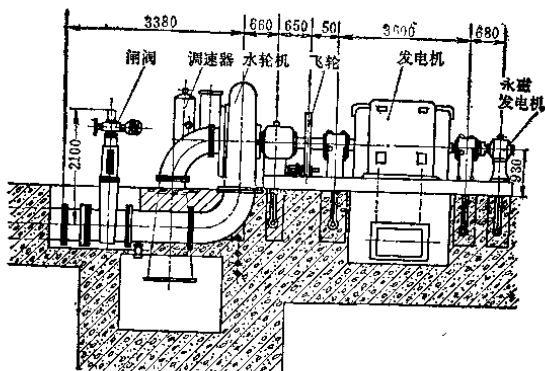


图1-9 卧式水轮发电机组三支点结构(3200kW)

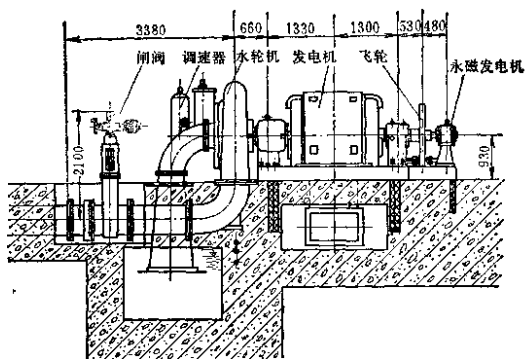


图1-10 卧式水轮发电机组两支点结构(8200kW)

维护等因素综合来决定。

2. 额定容量 正确地选择电站装机容量是充分地利用水能的重要一环。电站装机容量是指一座水电站全部机组额定容量之和。额定容量可以用 $S_N$  (kVA) 或 $P_N$  (kW) 表示。至于单机额定容量的大小以及装备几套机组，则需考虑以下因素：

(1) 发电机的单机额定容量 $P_N$ 由水轮机决定，首先要考虑水轮机的选择。同样的水头和流量可以选择不同的水轮机型号。在某些水头段，常常有两种型式的水轮机可供选用，此时需要对两种水轮机特性进行技术经济比较后才能选定。

(2) 要考虑水能的有效利用。河川的流量不是四季不变的，往往是冬季枯水期流量很小。有些电站要考虑灌溉与发电的综合利用，或以灌溉为主兼顾发电，这些因素都会影



响到发电机额定容量的选择。

(3) 要考虑电力系统调度和运行的要求,以及电站本身调度和运行管理的合理性。

(4) 要考虑电站布置的合理性。

(5) 要考虑机组制造的合理性和经济性。

这些因素常常相互制约,不能同时满足,这就需要进行方案比较、分析。举例说明:某电站水头 $H=105\text{m}$ ,流量 $Q=7.2\text{m}^3/\text{s}$ 。根据水轮机初步设计确定,电站装机容量为 $6000\text{kW}$ ;单机容量可能有两种方案,如表1-1所示。

表1-1 方案比较

方 案	结构型式	转速 (r/min)	台数×单机容量 (kW)
I	卧式	1000	3×2000
II	卧式	1000	2×2500+1×1000

粗略地衡量一下I、II方案,方案II需要两种规格的水轮机和发电机,从机组制造的经济性和从电站维修方便的角度考虑,显然不如方案I,但从电力系统调度的灵活性和电站本身调度的合理性来考虑,方案II较方案I为优。该方案在丰水季节可将2台2500kW和1台1000kW满负荷运行,或者2台2500kW满负荷运行;春季或秋季,可让一大一小满负荷运行;冬季枯水季节,可让一台1000kW发电。这样可使水轮机经常在满负荷下运行,对水轮机的运行是有利的。这样大小容量搭配对电站本身调度是合理、方便的,对水能的利用亦是有利的。

农村微型、中小型水轮发电机为三相凸极同步发电机。