

# 二滩电站水轮发电机转子的焊接与组装

周关炳, 覃春柏

(中国水利水电第九工程局, 贵州 贵阳 550008)

**摘要:** 叙述了二滩电站从加拿大进口的 550 MW 水轮发电机转子的结构和现场组装工艺。其主要特点是: 转子中心体采用圆盘式支架, 磁轭迭片呈螺旋形, 磁极采用单个阻尼线圈, 中心体用监控变形的方法在自由状态下焊接, 用大功率电加热管加热磁轭获得预紧量, 用多种组合键使中心体和磁轭连成坚固的整体等, 这些新结构和新工艺值得研究和借鉴。

**关键词:** 二滩水电站; 发电机转子; 圆盘式支架; 螺旋形迭片; 组合键

中图分类号: TV 734.1.TG40

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2000)增-0051-04

## 1 概述

二滩水电站的水轮发电机组, 系加拿大 GE 公司制造并供货, 其主要技术参数如下:

型式	三相、竖轴、半伞工
额定/最大容量	612/642 MVA
额定/飞逸转速	142 857/280 r/min
功率因数	0.9(滞后)
额定电压	18 kV
GD <sup>2</sup>	不小于 98 640 t·m <sup>2</sup>
转子重量	960 t
转子直径	11 745 mm
转子总高度	3 750 mm
旋转方向	俯视顺时针

转子是水轮发电机三大部件之一, 其制造安装质量将直接影响机组的出力、效率、安全、寿命和经济效益。目前, 二滩电站的 6 号机组已安装投产, 5 号机的转子也已焊接组装完成。以下简要介绍转子的结构和现场组装工艺, 着重论述新结构和新工艺。

## 2 发电机转子结构特点

### 2.1 无轴圆盘式中心体支架

与上端轴、水轮机轴相连接的圆盘式转子支架, 材质 A STM · A 36a, 相当于 GB 700-88 Q 235A. B。由精加工锥形中心体和 4 × 90° 扇形体在现场组焊成整体。扇形体由上、下圆盘, 径向腹板, 上、下挡风板, 14 条固体轮臂筋键, 制动环等组成。中心体由上下法兰, 锥形体和主筋构成。中心体与扇形体腹板的双面采用扁钢搭接角焊而成, 总重 108 t, 见图 1。

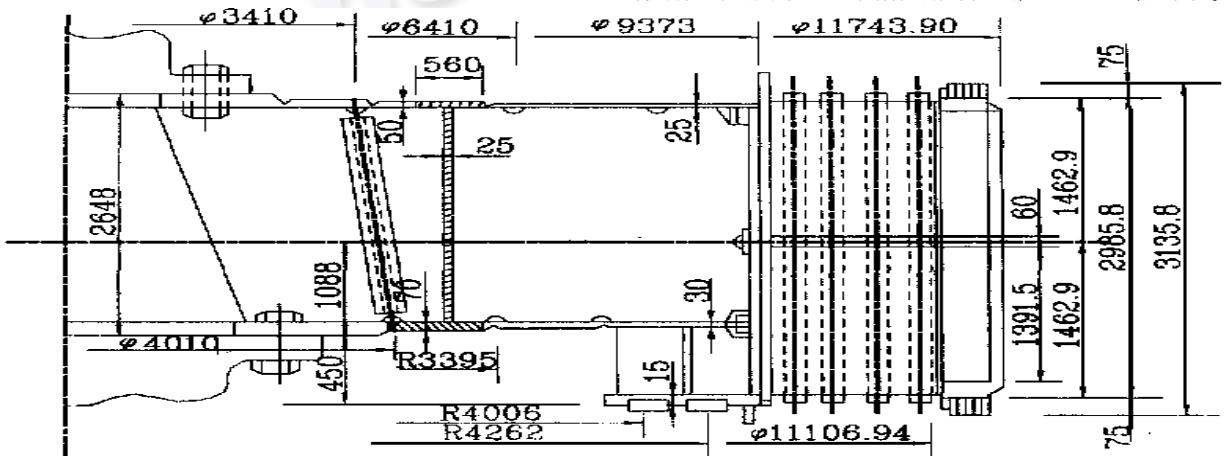


图 1 圆盘式结构支架结构示意图

### 2.2 螺旋形磁轭结构

磁轭由高强度纯氧化处理的冷轧薄硅钢板, 牌号 N KHA 690(730), 在现场迭装而成, 并热套于圆盘式支架上, 用组合键调整固定之, 特点如下:

(1) 与常规的整体磁轭不同, 采用两段分开的磁轭结构, 即是在磁轭高度方向的中部, 以 60 mm 厚的间隔垫块, 将其分隔成两段。

(2) 没有专用的通风槽硅片。

(3) 配有 4 种不同规格的磁轭穿心压紧螺杆。

(4) 没有磁轭上下压板。

(5) 磁轭冲片设有供热打键用的 84 只加热孔。

(6) 磁轭下段的第 1~ 10 层冲片为水平层堆迭, 自第 11 层开始, 中间迭入填隙片, 使冲片呈右螺旋线(俯视顺时针)型迭片, 逐步上升至磁轭下段的顶端。点焊间隔垫块, 再行往上堆迭, 即沿着下段已形成的螺旋层, 逐一进行。

常规的水平层堆迭磁轭冲片, 仅借助于拉紧螺杆压紧, 而螺旋形迭片, 可借助于旋转力矩, 增大磁轭冲片间的压紧

收稿日期: 1998-09-03

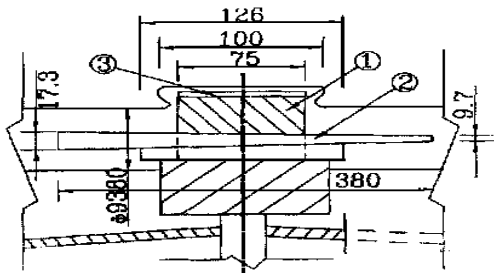
力,增强磁轭的整体性,使其结构更为稳定和可靠,并可提高通风和散热效率。

### 2.3 支架与磁轭之间的多种组合键连接

为使支架和磁轭之间紧密连接,形成整体,采用了多种组合键,种类如下:

(1) 轮臂磁轭键,计 14 对,长度 3 185.9 mm,附有长 3 100 mm 的垫片,斜度 1:0.005,调节量 1.364 5 mm,自轮臂顶端至底端全长连接。

(2) 轮臂磁轭横向键,计 84 对,长度 380 mm,斜度 1:0.02,调节量  $\pm 3$  mm。分段布置于轮臂。每对轮臂磁轭键匹配 6 对横向键,共同组成磁轭热胀键,见图 2。



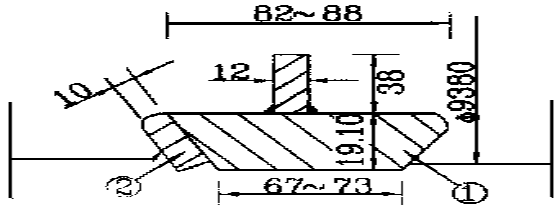
注: 磁轭键; 磁轭横向键; 垫片。

图 2 磁轭键和磁轭横向键结构示意图

(3) 环环周向上定位键,即上驱动键,计 14 组,呈燕尾型,每组由 5 种零件组成,长 205(305) mm,斜度 1:0.01,用于支架上圆盘并与磁轭连接。

(4) 环环周向下定位键,即下驱动键,计 28 组,呈燕尾型,每组由 5 种零件组成,长 405(460) mm,斜度 1:0.01,用于支架下圆盘并与磁轭连接。

(5) 环环周向副定位键,即副驱动键,计 28 组,呈燕尾型,每组由 3 种零件组成,其中两种焊成一体,装配在磁轭中部,将上下两段磁轭连接成整体,见图 3。



注: 主扭矩块; 导向键。

图 3 副驱动键结构示意图

轮臂磁轭键主要承受径向力,并可以调整磁轭的圆度和垂直度。除冷打键外,主要依靠热打键将磁轭热箍于圆盘式支架上。由于此键的有效长度长达 3 m 多,如果仅靠键槽的加工精度,其厚度方向两侧径向的平行度难以保证键沿长度方向受力的均匀性。为此,采用了磁轭横向键,调节量为  $\pm 3$  mm,与其联合作用,能有效地改善其受力的均匀性。

14 只固定的轮臂主筋键槽,由于(1)种键的弦距调节量为  $\pm 2$  mm,可补偿焊接变形引起的误差。(3)、(4)两种键,用于传递双向扭矩。除主扭矩块外,还设有两个小的导向键,使主键扭矩块具有浮动性能,便于安装调整,并提高键组与键槽之间接触的紧密性。第(5)种键结构较前二种简单些,只有一根导向键,长 610 mm,斜度 1:0.01,主键同样呈燕尾型,

尺寸为 560 mm  $\times$  19 mm (长  $\times$  厚)。同样具有些浮动功能,具有传递扭矩的功能。

### 2.4 无整体阻尼环结构

各磁极自成单独阻尼线圈,磁极间互不相连,避免了因阻尼电流过大而烧断阻尼环。

### 3 转子组装工艺特点

(1) 轮毂与中心体组装,焊前没有留出预变形的预留量,在自由状态下施焊中心体与支架,并及时跟踪、监测和控制焊接变形,及时调整焊接工艺和规范。

(2) 磁轭冲片由数控激光切割成型,制造精度高,无毛刺。安装后不需要磨削磁轭外圆表面,也不需要进行磁极圆度处理;无需测量和计算迭压系数,只需控制堆迭层数及标准拧紧力矩下的磁轭设计高度值;无需在现场加工和配置各种连接键;不需称重和配重;全部用永久穿心压紧螺杆进行迭片,分段压紧(400~500 mm);用 84 根管状电阻加热装置( $\Phi 16$  mm  $\times$  3 050 mm)加热。

(3) 设专用的磁极吊运翻转工具,对号对称地进行挂装;磁极无需进行脱裤检验。

### 4 圆盘式支架中心体的焊接

#### 4.1 焊接程序

焊接程序如下:上下圆盘外侧 25.30 mm 厚的辐板  
上下圆盘内侧 50.70 mm 的辐板 闸板座 85 mm 辐板  
闸板主筋 25 mm 腹板 上圆盘腹板与轮毂之环缝 轮臂与  
轮毂间腹板的双面角缝 下圆盘与轮毂的环缝 下圆盘与  
轮毂的角缝 上下挡板。

“E”型焊接结构宜先焊主筋腹板,以使截面模量为常数。

#### 4.2 焊接规范

焊接轮毂支架,按表 1 所列 GE 的标准和要求执行。

表 1 GE 焊接变形公差规范表

序号	项 目	测点位置	公差 /mm
1	闸板至轮毂下法兰面高差	闸板,下法兰面	450 $\pm$ 0/6
2	中心体水平度	下法兰面	0.05
3	闸板水平度	4 条接缝处	0.05/300
4	闸板上挠或下垂	沿环向上任一点	0.25/1 000

GE 标准没有规定的,如挂钩与闸板的径向和环向的水平度,接缝处错牙和高差,轮臂键槽的圆度和垂直度,弦距,径向变形等,均按国标“GB 8566-88”执行。

#### 4.3 焊接工艺要点

(1) 根据监测变形方位和变形量的大小,随时调整焊接程序工艺和规范,以有效地控制变形。

(2) 采用分段、退步、对称多层多道、窄道堆焊的施焊工艺,以逐渐缩小坡口宽度,控制焊道的宽度和深度,用于控制线能量。

(3) 除底层和盖面层外,对焊道用风镐锤击消应和砂磨清理。

(4) 控制预热温度(110),层间温度(150)及温度梯度。

#### 4.4 焊接变形情况

由于采用了上述焊接工艺,使焊接变形完全控制在规范

之内,达到了预期的效果,示例如下。

(2) 轮臂键槽径向焊接变形控制,见图 5。

(1) 闸板至轮毂下法兰面高差焊接变形控制,见图 4。

5 螺旋形磁轭迭片

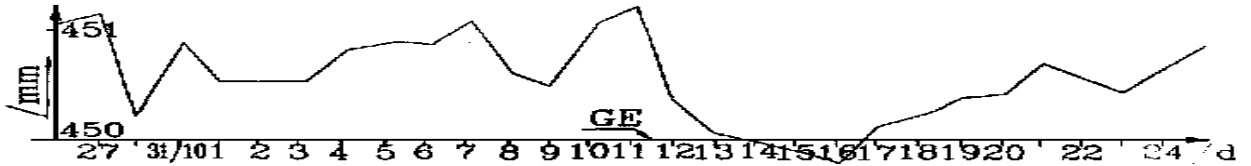


图 4 闸板至轮毂下法兰面距离焊接变形过程曲线图

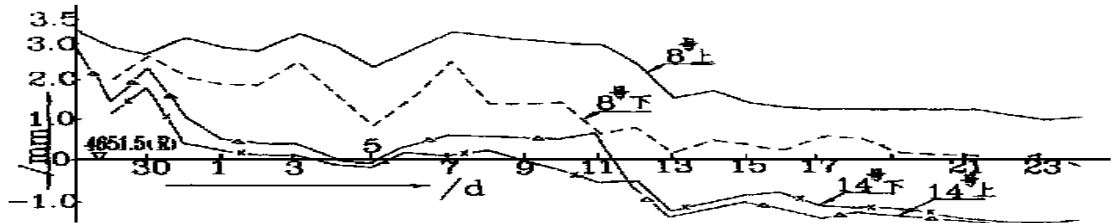


图 5 轮臂键槽径向焊接变形过程曲线图

转子磁轭下段计 245 层,上段 246 层,总计 491 层,4 915 张冲片,磁轭高度 2 985 9mm,净重约 507.72 t,通风面积为 12 7m<sup>2</sup>。如果把磁轭视作一根直径 11 106 94mm 的短粗螺杆的话,那么,自第 11 层开始向上迭片形成的 4 段螺旋线,即是该螺杆的 4 头螺纹,螺旋角为 0 040~ 0 043,螺纹线距为 6mm,螺距 4×6= 24mm,螺线长度 2 886mm。

增高,便形成螺旋的起始段,此段约占磁轭的 90°。填隙片的安置以磁极序号为基础,即 42 号~ 8 号、10 号~ 19 号、21 号~ 29 号和 31 号~ 40 号,相应于 I、II、III、IV 四个磁极区域段,每一个区域段以相同的方式安置,便构成了 4 头螺纹的螺旋线起始段。6 号转子磁轭的第二段螺旋线起始段的形成示例见表 2。

借助于填隙片,冲片沿着磁轭的圆周方向连续堆迭逐步

从起始段往后,全部采用标准冲片堆迭,片重 103 3 kg,

表 2 II 号螺旋线起始段的形成数据表

序号	项目	磁极号									螺旋角度	
		10	11	12	13	14	15	16	17	18		19
1	填隙片号	26	27	26, 27	28	27, 27, 25	26, 27, 27	27, 27, 27	26, 27, 28	27, 27, 28	28, 28, 26	—
2	设计厚度	0.76	1.52	2.28	2.66	3.42	3.80	4.56	4.94	5.7	6.08	0.0413°
3	实际厚度	0.75	1.52	2.28	2.65	3.57	3.85	4.64	4.88	5.12	5.92	0.0402°
4	起始段示意图	0.75	1.52	2.28	2.65	3.57	3.85	4.64	4.88	5.12	5.92	包角 94.2857°

面积 2 2m<sup>2</sup>,见图 6。

自第 1~ 10 层,每层由 10 5 张冲片成圆,包角 30 318 4°;15 159 20°;冲片间包角为 3 786 98°;片间有效弦距为 333mm,高 6mm,形成自然通风槽,每层通风面积为 0 022m<sup>2</sup>。冲片层间错开 1/4 片堆迭(相当于一个磁极距),从而避免了层间接缝,增强了磁轭的整体性和导磁的均匀性。内外高差大于 3mm 时,用补偿片调整。

因磁轭分上、下两段,相应地穿心压紧螺杆也分为上、下两段。每一个磁极区域段上端有 8 只 Φ45 10 的螺孔,每段计有 4 种不同规格的 336 根螺杆,配装有各自上下压紧厚、薄两种螺帽。螺杆为双头螺纹,规格为 M 42×4,设计拧紧力矩为 1 700N·m,压紧力为 1.8MPa,紧固后点焊固定。

## 6 磁轭的键连接

### 6.1 冷打键

将磁轭键,即(1)、(2)种键全部插紧就位,并借助 6 组横向键(2)平衡均匀地打紧,使磁轭大键紧贴住磁轭。然后,根据量测上、下段磁轭半径、圆度、垂直度和平直度的记录,分析出横向键的径向调节量,作出标记,以进行控制调整。表 3、4 与图 7,即是 6 号发电机转子磁轭垂直度和部分横向键调节量的实测记录。

### 6.2 磁轭加热与热打键

采用 84 根 Φ16×3 050mm 单根功率为 7.5kW 的管状

从起始段往后,全部采用标准冲片堆迭,片重 103 3 kg,

表 3 磁轭垂直度实测记录表

磁极键号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
垂直度偏差	0.75	0.98	0.66	0.47	0.31	0.58	0.50	0.79	0.51	0.24	-0.70	-1.32	-0.85	0.15

表 4 部分横向键调整控制量表

磁极键号	横向键调节量 /mm					
	A	B	C	D	E	F
1	5.6	10.8	-1.601	21.4	26.7	31.9
2	-16.9	-9.4	-1.8	5.8	13.4	20.9
3	-31.4	-27.1	-22.7	-18.3	-13.9	-9.6
4	-31.9	-29.6	-27.2	-24.8	-22.4	-20.1

注:表 4 中,负值为横向键往里打进去,反之往外推出。

电阻加热棒,插装于磁轭加热孔内,通电直接加热,总容量为 630kW。转子覆盖石棉被保温。这种方法热容量大,热利用系数高,加热均匀,效果良好,仅 9.5h 即可获得 64 的温差,单面膨胀量达 3.4mm,达到设计要求。与铜损、铁损法比较,大大地减少了无功损失。

在额定转速下,本转子磁极外圆周的旋转线速度为 87.83m/s,单个磁极承受离心力 820 余 t,切向力 13 余 t,为补偿强大的离心力导致磁轭的径向变形,必须有一定的机械预压紧量,为此,除冷状态下打紧磁轭键外,还必须采用热打键的工艺。二滩电站的发电机转子,其压缩量工艺不同于传统工艺,它是采用磁轭直接电加热法取得 3.4mm 的膨胀量之后,装上一根长 3 余 m,75mm×2.9mm(宽×厚)的特制垫片,而取得应有的压紧量。在加热的同时,按加热前所作的

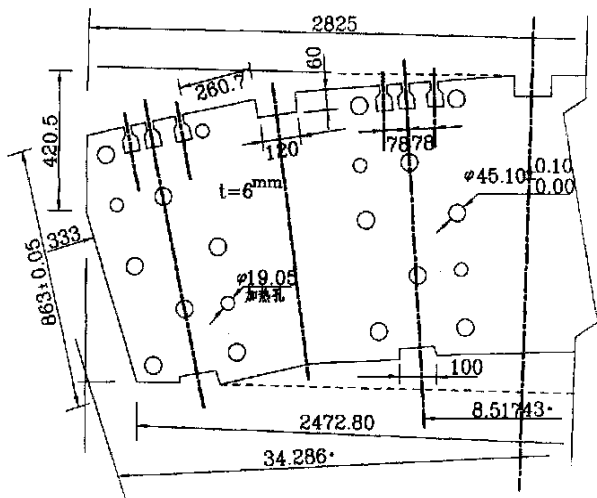


图6 磁轭冲片简图

标记, 调整各组横向键, 待磁轭冷却至常温, 即可获得满意的磁轭圆度、垂直度和平直度。这就省去了磨圆、铣键槽等传统工艺, 减少了工作量, 缩短了直线工期, 这种结构及其安装工艺值得借鉴。

## 7 结语

由加拿大 GE 公司供货的二滩水电站发电机转子, 其技术性能、结构及安装工艺都颇具特点。如在自由状态下进行焊接, 用监控焊接变形的办法保证组焊质量; 借助于填隙片,

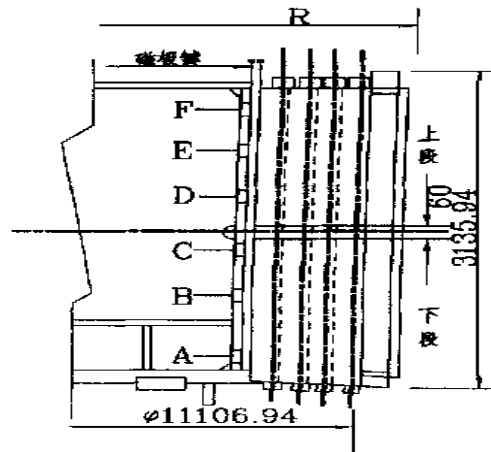


图7 横向键布置示意图

形成螺旋堆迭的磁轭冲片; 采用管状电阻加热棒加热磁轭, 取得膨胀量后, 加装特制垫片形成预紧量; 采用多种组合键进行调整控制, 使磁轭紧箍热套于圆盘式支架上。所有这些新技术、新结构和新工艺, 值得我国的制造和安装部门学习和借鉴, 以促进我国水电建设事业的发展。

### 作者简介:

周炳炳(1941年-), 男, 上海人, 中国水利水电第九工程局安装处主任工程师, 教授级高工, 从事水电站机电安装及监理工作;  
覃春柏(1939年-), 男, 壮族, 广西柳州人, 中国水利水电第九工程局安装处科长, 高级工程师, 从事水电站机电安装及监理工作。

(上接第33页)

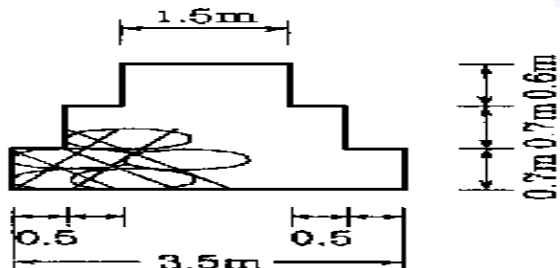


图6 设计丁坝的横断面图

下, 不透水丁坝在坝头的冲刷大于透水丁坝的冲刷;

(2) 上挑和正挑丁坝的冲刷作用较下挑丁坝强烈;

(3) 冲刷坑最深点在坝头附近略偏上游, 且丁坝冲刷主要在坝头和坝的上游侧及下游坝头河心侧, 边壁对上游的回流影响比对下游的影响大。这是由于实验水槽与实际河床存在如下的主要区别所致: 一是通常实际河流横断面为“U”形, 而实验水槽为“”形; 二是实际河床的河岸和河底都是有冲刷的, 而实验水槽没有冲刷; 三是实际河流中的丁坝有可能淹没或非淹没运行, 而实验室实验大都是在一种运行条件下进行的。

因此, 建议在实际丁坝工程设计中应考虑如下改进: 将实际“U”形河床断面简化为理想的“”形河槽断面, 简化时丁坝设计高程的水面宽定为理想河槽宽  $B$ , 设计高程至河底的最大水深定为理想河槽水深, 并设边壁及河底的切应力  $\tau = 0$ 。这样, 计算

出的过水断面面积就比实际过水断面面积大。于是, 当流速取常数时, 理想河槽设计流量就比实际河槽设计流量大, 计算出的水流对丁坝的作用力也就偏大, 因而使设计偏于安全。同时能够大大缩短实验室成果的应用周期。对于实际河床的冲刷, 可以根据设计丁坝时计算出的束水断面的流速进行判断。运行中非淹没丁坝变为淹没丁坝后, 丁坝束水作用降低, 下游回流消失, 丁坝成为一个溢流堰, 丁坝后形成跌水, 产生横轴螺旋流, 冲刷保护区河床, 所以, 从护岸角度来讲, 对于可能淹没运行的丁坝, 宜采用丁坝群布设。

### 参考文献:

- [1] 龚国仁 丁坝回流及其相似律的研究[J]. 水利水运科技情报, 1978, (2).
- [2] 程年生, 李昌华 有边坡丁坝回流实验研究[J]. 水利水运科学研究, 1992, (4).
- [3] [苏]B. B 切格恰达著, 续庆琪译 内河航道整治建筑物的设计及管理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988
- [4] 黄兴 蜿蜒形河道石笼、水丁坝坝体横断面设计探讨[J]. 东北水利水电, 1997, (12).
- [5] 长江科学院 国外丁坝研究综述[J]. 人民长江, 1979, (3).
- [6] 武汉水利电力学院 计算水力学[M]. 北京: 人民出版社, 1979

### 作者简介:

班久(1965年-), 男, 西藏日喀则人, 西藏日喀则地区水利队高工, 从事水电工程科研与管理工  
梁川(1957年-), 男, 重庆荣昌人, 四川大学水电学院教授, 博士生导师, 从事水电工程教学与科研工作