

# 水电机组现场效率监测装置

## Locale Instrument of Efficiency Monitoring of Hydropower Generating-unit

王孝良

孙宇

(大连理工大学自动化系, 大连 辽宁 116024)

Wang Xiao Liang, Sun Yu

(Department of Automation, Dalian University of Technology, Dalian, Liao Ning, 116024, China)

**摘要:** 本文主要介绍针对水电机组效率问题而设计的水电机组现场效率监测装置。介绍了采用蜗壳差压法测流继而计算水轮机效率的原理,用 80C196KB 单片机及其它辅助芯片实现测量装置的硬件和软件的设计方案以及装置的主要功能特点。

**关键词:** 水电机组; 效率监测; 蜗壳差压; 单片机

**Abstract:** This paper mainly introduces an efficiency monitoring instrument of hydropower generating-unit which can resolve the problem of hydropower generating-unit efficiency. It includes of how to use the way of helicoids pressure difference to measure the flux of water turbine generator and using an 80C196KB singlechip processor and other peripheral assistant microchip to accomplish the design of hardware and software.

**Keywords:** hydropower generating-unit; efficiency monitoring; helicoids pressure difference; singlechip processor.

## 1 概述

水轮发电机组效率特性是机组的基本动力特性,是评价机组优劣的主要指标之一。水电站厂内经济运行的实施就是建立在机组的效率特性之上的。因此应对水轮发电机组的效率及水流量进行在线监测,以此来指导水电站厂的经济运行。本装置就是根据这一需要开发研制的。装置由功率变送器、差压变送器、压力变送器等传感器和微机数据采集与处理系统组成,可对水轮机过机流量、发电机输出功率及水轮机工作水头等主要参数进行实时在线测量,从而求出水轮机组的机组效率,并自动绘制曲线和显示记录。测量参数可远程传输到上位计算机,实现集中监控。

## 2 基本测量原理

### 2.1 水轮机效率计算原理

按照物理学的概念,一个机械设备的效率是有用功(功率)与总功(功率)之比,或者描述为输出功率与输入功率的比值。对于水轮机而言,即有:

测得水电机组效率  $\eta_u$  后,通过水轮发电机的效率特性曲线将换算得到水轮机效率

$\eta_T$ 。即

$$\eta_T = \eta_u / \eta_g \quad (2-1-1)$$

式中  $\eta_g$  — 发电机效率。

根据水力学原理，水轮发电机组的总效率为

$$\eta = \frac{N_g \times 10^4}{9.81QH} \quad (2-1-2)$$

而总效率  $\eta = \eta_T / \eta_g$

以上两个公式中： $\eta$  — 水轮发电机组总效率，%；

$\eta_T$  — 水轮机效率，%；

$\eta_g$  — 发电机效率，%；

$N_g$  — 发电机有功功率，MW；

$Q$  — 水轮机流量， $m^3/s$

$H$  — 水轮机工作水头，m；

则水轮机效率计算公式为：

$$\eta_T = \frac{N_g \times 10^4}{9.81QH\eta_g} \quad (2-1-3)$$

由上式可知要想测得水轮机的效率，则必须同时测得机组的 4 个运行参量：发电机有功功率  $N_g$ ，水轮机流量  $Q$ ，水轮机工作水头  $H$ ，发电机效率  $\eta_g$ 。

## 2.2 流量的测量

水电机组流量的测量有流速仪法、超声波法、蜗壳差压法、水锤法等。其中超声波法和蜗壳差压法是应用比较多的测流方法。

超声波法是继流速仪法之后的测流速方法的后起之秀，其精度可以达到什么程度，目前未有统一的说法。它要求所测的钢管内水流速分布均匀，这点在现实上难以做到。因为从空载流量到额定流量，所有水电站水轮机进口阀之前的流态为紊流（雷诺数从几十万到几百万），其断面的流速分布呈无规则的曲面状。故此，超声波所测的流速与实际的断面平均流速便有差别。这种方法的优点是：测试工作量少，操作简便，易于实现测量自动化，无须放空尾水。缺点是现场条件要求高（即安装仪器处的压力钢管平直且很小的水力干扰），仪器昂贵。

蜗壳差压法则显示出测量方便、经济实用、工作量更小、随时监测的优点，很受水电厂的欢迎。它能准确地反应效率曲线的形状，通过不同时期的效率曲线比较，也能准确地判断在同一水轮机不同时间的效率变化情况。它的不足之处是在它最初安装完毕时不能立即测出水机的流量，还必须由别种测流方法（而且精度要很高）来率定其流量系数；另一方面，即使率定后投入运行，其所测效率的精度也偏低。它的优点只在于相对比较。

由于水电机组效率监测仪的主要目的是在线监测机组的效率，从而得知机组的运行情况，其主要目的也是在于比较，所以在此，选择经济实用的蜗壳差压法来测流量。下面详细介绍一下蜗壳差压法的测流原理。

具有一定流速的水流流经蜗壳时，由于蜗壳中心线弯曲，水流在弯曲流道上产生离心力，使得蜗壳内、外缘两点产生压力差。这压力差的大小与水流流速有关。对于截面积已成定值的蜗壳某截面来说，平均流速大小正比于流经该横截面的流量，因此蜗壳内、外缘的压力差（差压值）就可以测定流过水轮机的流量相对值。若通过现场率定，用精确的方法测定流量同时测定差压值，建立起通过水轮机流量与蜗壳差压的关系曲线，则经过率定的蜗壳差压就能反映流量的绝对值。

如图所示，在蜗壳某一横断面上取两点，外缘测点为“1”点，它离水轮机旋转中心轴线的距离为  $R_1$ ，水流速度为  $v_1$ ，与圆周切线夹角为  $\alpha_1$ ；内缘测点为“2”点，它离水轮机旋转中心轴线的距离为  $R_2$ ，水流速度为  $v_2$ ，与圆周夹角为  $\alpha_2$ 。

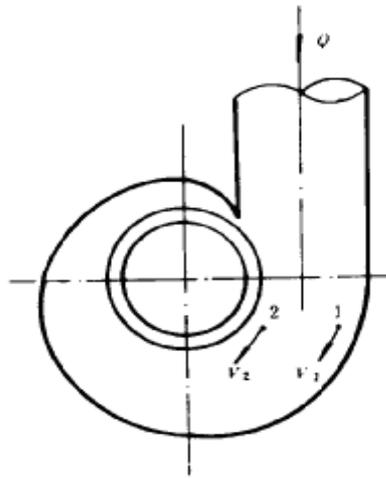


图 2.1 蜗壳差压法测流量示意图

设蜗壳中水流没有损失，则水流在蜗壳中的流动应符合等速度矩规律，即

$$v_1 \cos \alpha_1 R_1 = v_2 \cos \alpha_2 R_2 = \text{const} \quad (2-2-1)$$

再假定  $\alpha_1 = \alpha_2$ ，则可得

$$v_1 R_1 = v_2 R_2 = \text{const} \quad (2-2-2)$$

根据伯努里方程，当横断面通过流量  $Q$  时两点之间产生的差压值（米水柱）为

$$h = p_1/r - p_2/r = v_2^2/2g - v_1^2/2g \quad (2-2-3)$$

当横断面通过流量  $Q'$  时，两点之间产生的差压值（米水柱）为

$$h' = p_1'/r - p_2'/r = v_2'^2/2g - v_1'^2/2g \quad (2-2-4)$$

根据水流相似条件有

$$\frac{Q'}{Q} = K \quad (2-2-5)$$

由此可以得到  $v_1' = Kv_1$      $v_2' = Kv_2$      $Q' = KQ$     (2-2-6)

将  $v_1'$ 、 $v_2'$  代入 (2-2-4)

$$h' = K^2 \frac{v_2'^2 - v_1'^2}{2g} = K^2 h \quad (2-2-7)$$

所以  $K = \sqrt{\frac{h'}{h}} = \frac{Q'}{Q}$     (2-2-8)

即  $\frac{Q}{\sqrt{h}} = \frac{Q'}{\sqrt{h'}} = K$  或  $Q = K\sqrt{h}$     (2-2-9)

从式 (2-2-9) 中可以得到流量与蜗壳差压的算术平方跟成正比例关系。

对于不同的机组蜗壳或同一蜗壳不同测压孔而言, K 值将永远是个既定的常数。要预先知道 K 值的精确值不能通过计算方法, 只能通过水力机组原型效率试验时其他精确的测流方法实测流量来确定, 即水电机组效率试验中率定蜗壳差压流量计流量系数。(本系统采用超声波流量计测流来率定蜗壳差压系数 K)

### 2.3 水头的测量

水头的测量方法与所选用的测流方法无关, 即在效率试验中可以独立考虑水头的测量方法, 而不受测流方法的限制。水电机组效率试验中需要测量电站水头、机组段水头和水轮机工作水头。在水电机组效率试验中, 电站水头、机组段水头、水轮机工作水头均是通过间接测量后计算得出的。电站水头是通过测取上、下游水位值后相减而得到的。机组段水头和水轮机工作水头都是根据伯努里方程由势头、压头、速头的相应值计算而得到的。具体水轮机工作水头是测取水轮机进口断面总能头与尾水管出口断面总能头后相减而得。对水轮机进口断面压头和势头测量时, 应测取水轮机进口压力表或压力传感器得中心高程和压力值并换算到以“Pa”为单位得压头。而所有速头的测量均以该断面的流量除以面积求得平均流速值后再与相应的速度分布系数计算而得。下面仅对水轮机的工作水头的计算加以详细介绍。

水轮机的工作水头定义为水轮机的进口断面与尾水管出口断面的总能头之差。用公式表示为:

$$H = \left( Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left( Z_2 + \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) \quad (2-3-1)$$

式中:  $H$  — 水轮机的工作水头 (m 水柱);

$Z_1$  — 蜗壳进口压力传感器的安装高程 (m);

$Z_2$  — 尾水管出口压力传感器的安装高程 (m);

$p_1/\gamma$ —蜗壳进口压力传感器压力值 (m 水柱);

$p_2/\gamma$ —尾水管出口压力传感器压力值 (m 水柱);

$V_1$ —蜗壳进口断面水流的平均流速 (m/s);

$V_2$ —尾水管出口断面水流的平均流速 (m/s);

$\alpha_1$ —蜗壳进口断面流速分布不均匀系数 ( $\alpha_1 \approx 1.0$ );

$\alpha_2$ —尾水管出口断面流速分布不均匀系数 ( $\alpha_2 \approx 1.0$ );

$g$ —当地的重力加速度值 ( $\text{m/s}^2$ )

水轮机的进口速度头按照超声波或蜗壳差压测得的流量  $Q$  和已知的测流截面面积  $F = \frac{1}{4} \pi D^2$ ,  $V=Q/F$ , 从而就可得到速头。出口速头值占水头的比例很小, 可忽略不计, 因此水轮机工作水头  $H$  为:

$$H = \left( Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left( Z_2 + \frac{p_2}{\gamma_2} \right) \quad (2-3-2)$$

#### 2.4 发电机输出功率测量

发电机输出功率, 采用三相功率变送器自动测量, 其表示的有功功率为

$$N_G = K_i K_v C_n N_w \quad (2-4)$$

式中  $C_n$ ——有功功率变送器常数;

$N_w$ ——有功功率变送器读数值;

$K_i, K_v$ ——电流互感器和电压互感器的变比.

### 3 监测装置的硬件设计

如图 3.1 所示, 本系统的核心单元为 Intel 公司出品的 16 位单片机 80C196KB。80C196KB 单片机是整个硬件结构的主处理器, 由它来完成对数据的采集、存储和运算处理, 并且可以和外部计算机通信。由于 80C196KB 肩负着数据实时采集、处理运算任务, 所以负担相对较重, 为了提高整个系统的速度和效率, 应用一片 8 位的单片机 78E52 作为系统的从处理器, 用它来完成键盘的控制和液晶显示的驱动和控制。

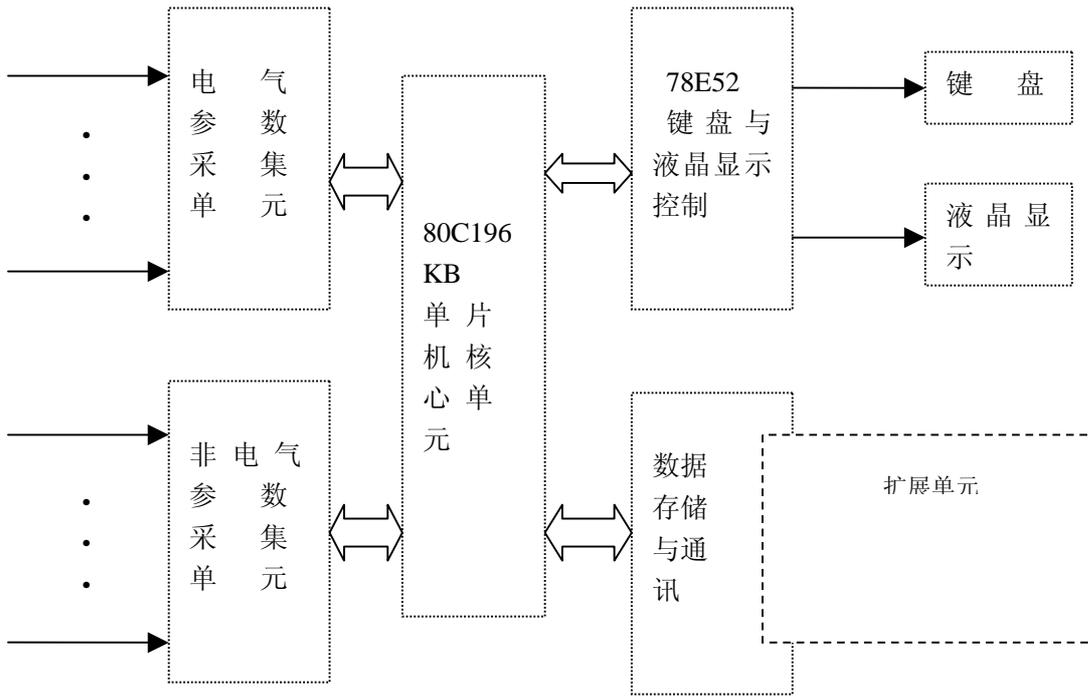


图 3.1 系统基本结构组

### 3.1 数据采集部分

数据采集部分的设计是本效率监测系统的重要部分，在这里作详细阐述。

本系统在应用的时候需要采集的水电参数有：发电机的三相电压和电流信号、蜗壳差压信号、蜗壳进口压力信号、尾水管出口压力信号。这些信号中有电量信号也由非电量信号，其中发电机三相电压和电流信号是电量信号，其余的是非电量信号。整个系统的数据采集部分的结构如图 3.2.2 所示。

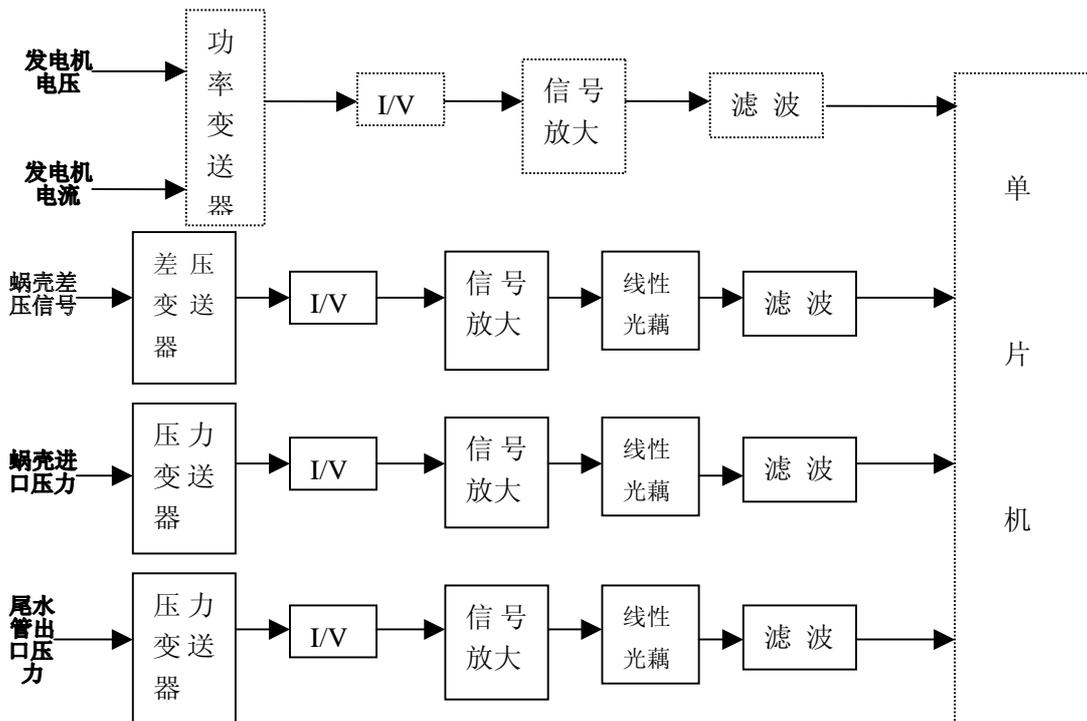


图 3.2 数据采集结构图

图中发电机三相电压和电流通过功率变送器输出 4~20mA 信号,再经过电流/电压转换,使信号变成 0~5V 的直流电压信号再经过信号放大和滤波输入到单片机内。而蜗壳差压等非电量模拟信号通过相应的变送器得到 4~20mA 的标准信号,然后也是通过电流/电压转换经过放大和滤波采集到单片机内。需要说明的是,80C196KB 单片机内部带有一个 10 位的模/数转换单元 ADC,所以经过信号放大和滤波的采集信号直接输入到单片机,单片机内部进行信号采样和模/数转换。

### 3.2 键盘和液晶显示部分

键盘和液晶显示器的控制和驱动是由 51 系列单片机 78E52 来完成的,其电路设计如图 4.4 所示。本系统在人机界面键盘的设计上设计了 4 个功能键:

- 1、启动键—按下后显示开机界面;
- 2、确认键—按下命令键—后须按下此键加以确认系统才执行相应的命令;
- 3、效率监测键—按下后系统采集数据、处理,最后显示效率曲线;
- 4、复位键—当系统出错的时候,按下此键系统复位,从新启动。

显示部分采用 128×64 大屏幕液晶模块 EDM12864-ALC,可以显示图形和汉字,背光可选而且 LCD 具有防紫外线功能,显示效果良好。

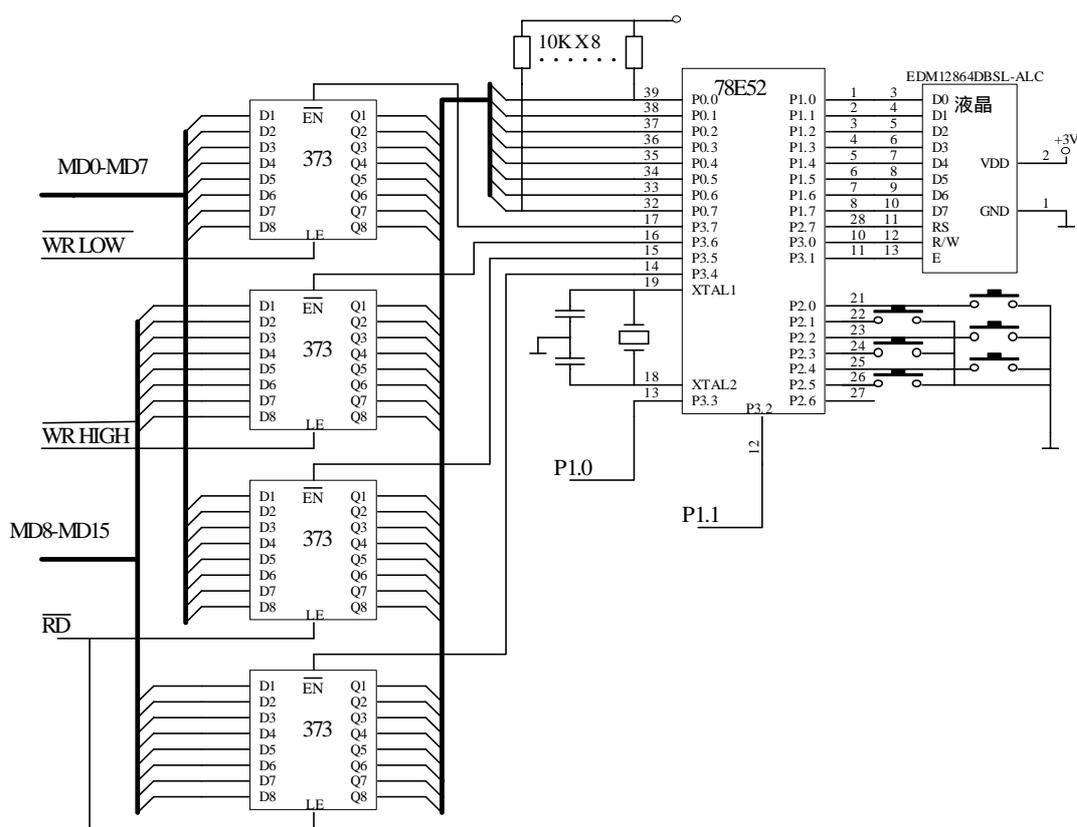


图 3.3 键盘和液晶显示电路

引脚说明:图 3.3 中 MD0~MD15 是主处理芯片 80C196KB 的 P3 和 P4 口提供的地址和数据复用引脚 AD0~AD15 通过 373 锁存后的信号;P1.0 是 80C196KB 接收 78E52 的向主处理芯片发送中断请求信号的引脚,如果 78E52 发送了准备好(Ready)信号,那么表明可以现在传送数据进行显示或接收键盘数据,此后 80C196KB 单片机就通过

引脚 P1.1 发送中断信号给 78E52，命令 78E52 开始工作。

### 3.3 扩展通信电路接口

本系统当前的设计目标是一个现场监测试验仪，但其具有可扩展性，通过设计了与 RS-485 总线的串行通信接口，可在将来完成系统扩展，与上位计算机共同构成分布式水电监测控制系统。扩展接口电路设计如图 3.4 所示。

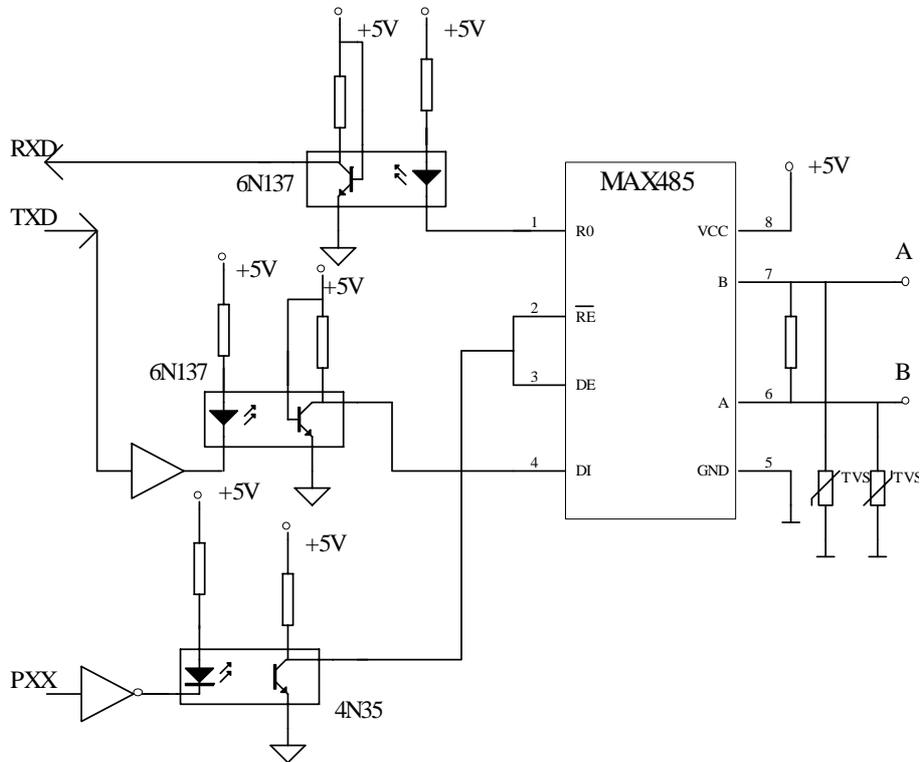


图 3.4

## 4 监测装置软件设计

系统软件总体结构如图 4.1 所示。

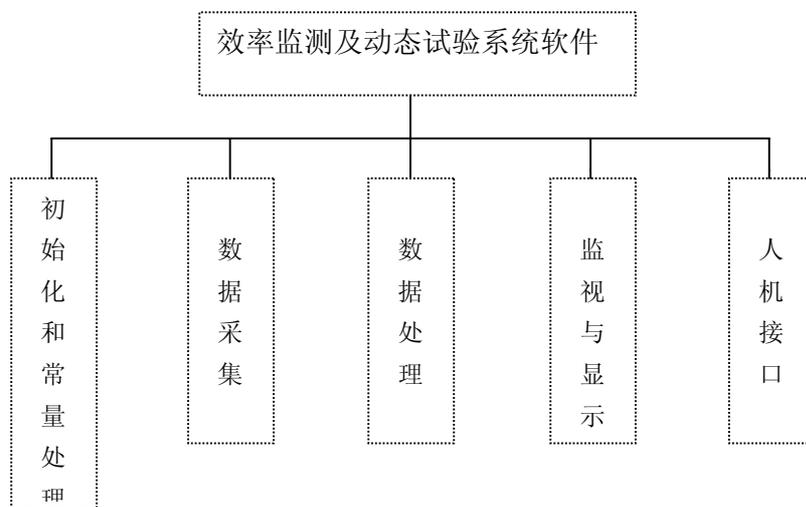


图 4.1 系统软件总体结构

本系统软件由初始化和常量处理、数据采集、数据处理、监视与显示、人机接口等五个模块组成。初始化和常量处理模块完成系统的常量处理和系统程序启动时各项信息的初始化工作，如电厂名称、机组编号、通道编号和含义等；数据采集模块成数据采集的控制和执行工作，含数据采集、保存；数据处理模块完成实测物理量到间接计算量的计算；监视和显示模块完成相关计算结果参数的显示，包括曲线和数字；人机接口模块完成调度和现场工作人员对系统的控制。

系统主程序框图如图 4.2 所示。

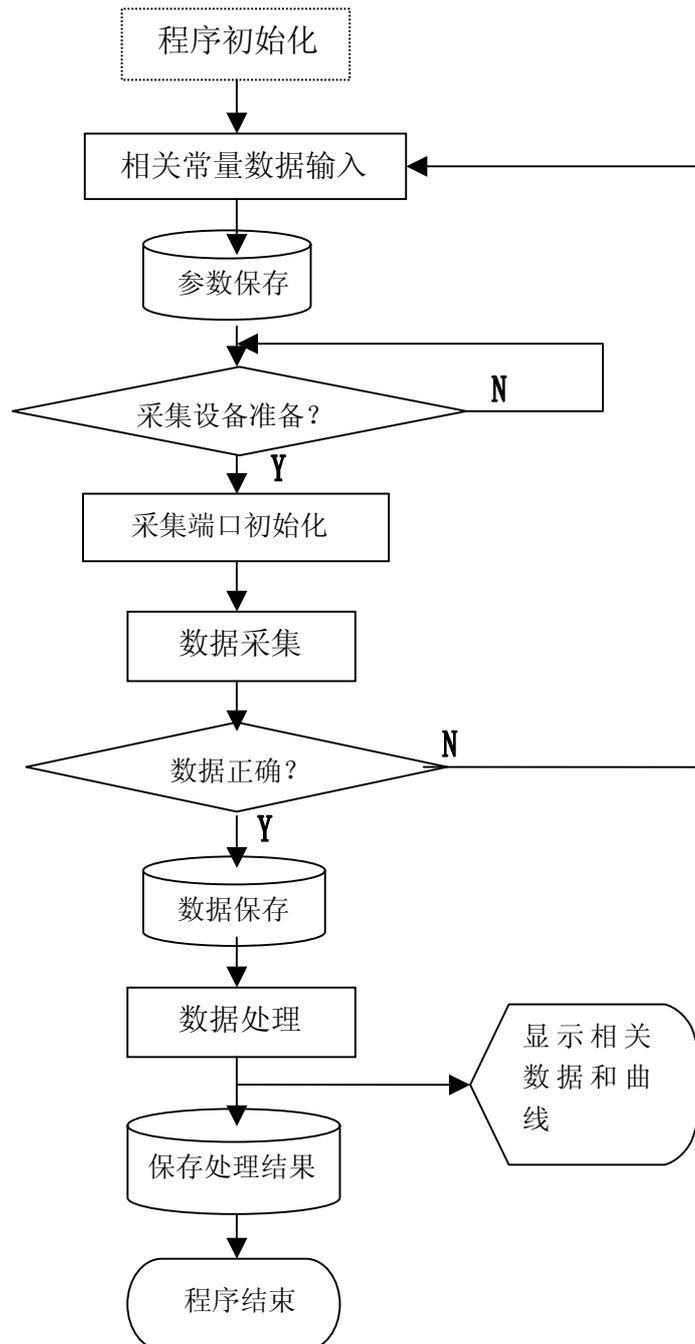


图 3.2.3 主程序流程图

几点说明：

- (1) 效率监测软件的编制是利用汇编语言开发的，各模块功能的实现由相应的模块子程序完成，主程序可以在需要子程序参与的时候对其进行调用。
- (2) 根据效率试验的工作特点，软件主要分为三大功能：试验相关参数的输入功能；试验数据采集功能；试验数据处理和计算结果的输出（包括图形、数字显示）。
- (3) 数据采集过程是监测分析的关键部分，它完成数据的传送和暂存功能。
- (4) 试验数据处理包括水头的计算；蜗壳差压流量的计算；发电机有功功率的计算；效率曲线的绘制。

## 5 问题总结与展望

在微机技术迅猛发展的今天，用微机实现水电机组效率的在线监测，无疑是水电机组效率监测的发展方向。近年来，我国水力机组现场监测技术也已经提高到了一个新水平，测试系统也逐步转化为半自动测试系统或全自动测试系统。根据电力部《水力发电厂计算机监控系统设计规定》凡新建的大型水电站，应采用计算机监控系统。而我国当前除了一些新建的大型电站自动化程度较高，大部分电站还在建立在线监测及分析系统。随着水电事业在我国电力系统中所占比重日益增大，水力机组效率监测系统的发展前景将十分广阔。

### 参考文献

- 1 刘大恺. 水轮机. 北京：中国水利水电出版社, 1997.10
- 2 刘君华. 现代检测技术与测试系统设计. 西安：西安交通大学出版社, 2000.12
- 3 李朝青. 单片机原理及接口技术. 北京：北京航空航天大学出版社, 1999.3
- 4 郑清顺. 水机效率试验与经济效益. 云南水力发电, 1997, 2