

# 中小型水电站水轮机选型设计软件包的开发研究

彭贵川

(中国水利水电第十工程局, 四川都江堰, 611830)

**摘要** 水轮机选型设计是水电站设计的一个重要方面, 以往都是靠人工计算, 速度较慢, 不能很好地满足水电站设计的要求。本文在中小型水轮机选型设计软件的设计方面做了一些研究, 并且据此开发出了水轮机选型软件包, 大大加快了水轮机选型设计的速度和精度, 使电站设计人员能用更多的时间用于技术经济比较。

**关键词** 水轮机 选型设计 软件包

## 1 系统的配置

### 1.1 硬件

#### 一般配置

处理器: Pentium 100MHz, 或以上

内存: 16MB, 最好 32MB

硬盘: 1.2GB

### 1.2 软件

只需 Windows 95 或以上版本的操作系统即可。

## 2 系统的主要功能和结构

系统主要由两大部分构成, 一为水轮机转轮系列型谱数据库的管理, 二为水轮机的选型设计。其中关键技术在于转轮综合特性曲线的管理功能, 该管理功能实现了综合特性曲线的计算机处理技术, 如: 曲线的输入、编辑、绘制, 并且能准确地用插值法计算出各工况点的效率值, 这样就为真机的运转特性曲线的绘制提供了技术支持。水轮机的选型设计则能根据用户输入的水头等基本数据自动计算出真机

的转轮直径、转速等参数, 并且绘制真机的工作范围, 然后利用综合特性曲线管理功能中的效率插值技术计算并绘制真机的运转综合特性曲线。系统主要模块的构成和关系可由图 1 表示。

### 2.1 水轮机转轮系列型谱数据库的管理

本系统又可分为两大部分: 一、基本数据(如工况参数、转轮参数、流道参数等)的管理; 二、综合特性曲线管理。这是由于综合特性曲线本身的复杂性所决定的, 同时, 在软件中将它的处理与基本数据的处理分开也是相当有利的, 因为这样可以减少内存开销和加快运行速度, 便于软件的编制, 提高软件的性能。

#### 2.1.1 基本数据管理

这是一个简单而典型的关系数据库, 它将模型转轮的工况参数、流道参数、转轮参数等数据按转轮型号为顺序全部保存在一个数据库文件中, 可以将该数据库称作基本数据库。而综合特性曲线数据则保存在另外的文件中, 按照一个转轮一个文件的方式保存, 基本数据库只保存该文件的文件名称。这样就可必要时才将综合特性曲线调入内存, 起到减少内存的使用和加快软件运行速度的作用。

在基本数据库的管理模块中实现了如下功能:

- (1) 浏览; (2) 修改; (3) 添加; (4) 删除。

在每个转轮数据中保存了如下参数:

#### (1) 工况参数

a 最优工况参数: 单位流量, 单位转速, 效率, 气蚀系数, 比转速;

b 限制工况参数: 单位转速, 效率, 气蚀系数, 比转速;

#### (2) 基本参数

a 使用水头范围: 最大水头, 最小水头;

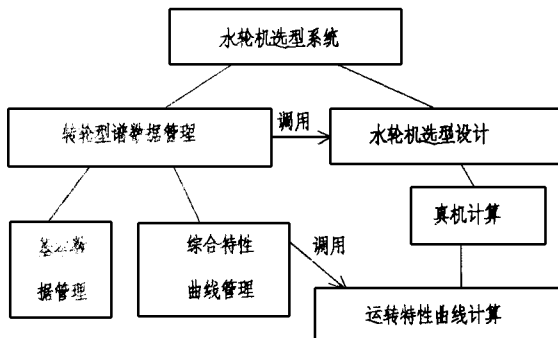


图 1 系统主要模块关系图

b 一般参数: 模机直径, 水推力系数, 单位飞逸转速;

c 实验水头: 能量水头, 气蚀水头;

(3) 流道参数

a 蜗壳尺寸: 包角, 流速系数;

b 尾水管尺寸: 长度系数, 高度系数;

c 导叶参数: 导叶个数, 导叶高度;

d 转轮室参数: 转轮叶片数, 轮毂直径。

## 2.1.2 综合特性曲线的管理

综合特性曲线的管理是本软件的关键技术, 它实现了综合特性曲线的计算机处理, 包括对曲线的添加、修改、删除以及绘制等功能, 并且还实现了对每一工况点的效率插值计算, 据此软件可很容易的计算出真机的工作范围和运转特性曲线, 从而完成水轮机的选型计算。

水轮机的综合特性曲线一般说来是一个封闭的曲线, 对于少数未封闭的曲线软件采用添加一些无效线条的方式将其闭合来处理, 当然这些无效线是不参加效率的插值计算的, 如此则所有的特性曲线就都是封闭的曲线了。在软件中这些特性曲线是通过离散的方法将其分成单个单个的曲线点来处理的, 每一个曲线点代表一个工况点, 通过线性插值就可计算出该特性曲线所有工况点。对于曲线之间工况点的计算则需要另外的插值方法来计算才得到, 这个方法在本文后面有专门描述。

综合特性曲线的离散由人工实现。在输入特性曲线时, 由人工将每一根曲线离散成许多点, 再将这些点的坐标(单位流量、单位转速)和该点的效率值输入计算机即可。另外也可采用半自动化的方法, 就是使用数字化仪, 由人工将曲线通过 AutoCAD 的数字化仪功能一点一点的点到 AutoCAD 软件中, 再由专门的程序将数据转换成文本数据文件, 最后由本软件将该文件读入即可。本软件包提供将 AutoCAD 中的数据转换成文本文件的专门程序。笔者也是用这个方法输入综合特性曲线的。

## 2.2 水轮机的选型计算

水轮机的选型设计就是根据电站的一些基本参数(如水头、装机容量等), 从现行的水轮机模型转轮中选出若干种方案, 再从这些方案中进行技术经济比较, 从而选出一个最适合本电站的真机方案来。本软件包的选型计算实现了从现行的水轮机模型转轮中选出若干种方案的功能, 而技术经济比较则暂时还只能由人工来完成。

本软件在选型计算时共需要如下 10 个基本参数: (1) 最大水头; (2) 最小水头; (3) 加权平均水头;

(4) 设计水头; (5) 电站尾水高程; (6) 装机容量; (7) 发电机效率; (8) 最少装机台数; (9) 最多装机台数; (10) 气蚀安全系数。软件根据最大水头和最小水头选出适用的模型转轮后, 即按模型转轮的工况参数算出真机的标称直径和同步转速, 并自动实现转轮直径的标准化, 这样, 一个真机转轮就确定了下来。然后就可算出该水轮机的其它参数和运转特性曲线, 软件还附带将与该水轮机配套的发电机的一些必要参数也一并计算出来。这样, 用户就可从这众多的真机方案中, 通过技术经济比较而选出一个最适合本电站的真机来, 不致漏掉优秀的方案。

按照前文所述的计算机配置, 本软件算完一次选型计算只需 2~3 min 时间, 大大加快了选型设计速度, 也为提高水电站设计的质量打下了基础。

## 3 软件设计的基本思想

本软件是按照现代最流行的软件设计方法——面向对象的软件设计方法来编写的, 软件中的所有数据都是以对象为单位来进行组织和处理的。软件使用的编程语言是 Delphi 3。软件采用标准的 Windows 95 界面, 从而使软件的操作变得十分简单、清晰、易学。

### 3.1 数据处理模型和方法

软件中处理的数据主要是真机和模机两大类数据, 其中模机数据可分为基本数据和综合特性曲线数据; 真机数据可分为三部分数据: 一般数据、等高度运转特性曲线和等效率运转特性曲线数据。因此, 软件中的数据主要分成五个对象: 模机对象、综合特性曲线对象、真机对象、等高度运转特性曲线对象和等效率运转特性曲线对象。它们的关系可用图 2 表示:

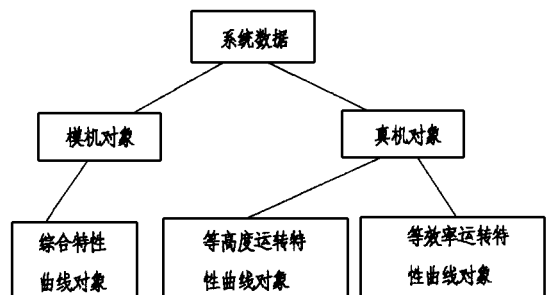


图 2 软件包的数据模型

从图中可看出, 模机对象包含了综合特性曲线对象, 真机对象包含了等高度运转特性曲线对象和等效率运转特性曲线对象。实际上, 在程序中模机对象和真机对象仅仅拥有各自所属特性曲线对象的一个指针而已。

由于模机对象和真机对象的相似性,以及各特性曲线对象的相似性,下面将它们分成两大类分别给予详细论述,另外还将简要论述一下真机的运转特性曲线的绘制过程。

### 3.1.1 模机对象和真机对象

这两个对象都较为简单,都只有一些基本数据和基本方法。

模机对象的数据在 2.1.1 基本数据管理中有详细描述,此处不再赘述。

真机对象包含了一个水轮机完整的数据,如转轮标称直径,同步转速,设计工况,重量等等数据,另外还包含了与之配套的发电机数据,供用户经济技术比较时用。

### 3.1.2 特性曲线对象

由于要将特性曲线离散化和便于软件处理,程序中将特性曲线分成了三个层次的对象。最下面一层是单个工况点对象,它仅包含了两个数据:单位流量和单位转速。其次一层是单根特性曲线对象,它是通过将许多工况点连成一个闭合曲线而得到的,特性曲线对象另外增加了一个关键数据——该曲线的效率值。最上一层就是特性曲线对象本身,它是将许多单根曲线对象连成一环状链表而得到的,它另外还包含了最优工况点的数据。该层次结构与特性曲线的对应关系可用图 3 表示:

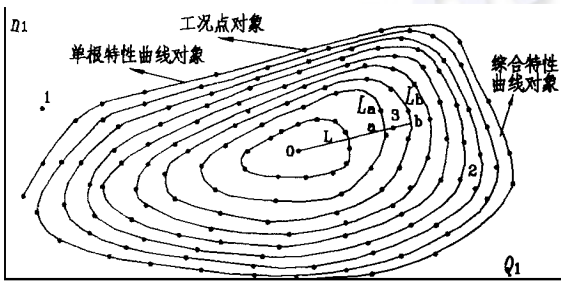


图 3 综合特性曲线对象图

各工况点的效率插值是本软件的关键技术,下面给予详细介绍。

工况点按其综合特性曲线图上位置可分为三类:一类是在综合特性曲线图形之外,如图 2 中点 1;二类是正好在单根特性曲线上,如图 3 中点 2;三类是在特性曲线内部但不在曲线上,如图 3 中点 3。第一类点本软件不进行插值计算,认为该点为无意义的点。第二类点的计算比较简单,它就等于该点所在曲线的效率值。但程序中为了统一计算,将第二和第三类点合并成同一类点,使用第三类点的插值方法进行计算,当然第二类点的计算结果没有改变。

第三类点(图 3 中的点 3)的插值计算可以是等值线的插值,是一个二维的插值计算。在计算机计算

过程中,首先需找到点 3 处于哪两根等效率曲线之间,计算机是通过判断点 3 在哪一根曲线之外来查找的,若判断出点 3 在所有特性曲线之外,则点 3 实际上是 1 类型点,即图上的点 1。现假定已经判断出点 3 在等效率曲线  $L_a, L_b$  之间,判断出在哪两根等效率曲线之后,再求点 3 与最优工况点  $O$  的连线  $L$ ,同时求出直线  $L$  与等效率曲线  $L_a, L_b$  之间的交点  $a, b$ ,设等效率曲线  $L_a, L_b$  的效率值为  $\eta_a, \eta_b$ ,则交点  $a, b$  的效率值也为  $\eta_a, \eta_b$ 。对点 3 的效率值采用线性插值法计算,设点 3 到交点  $a, b$  的距离为  $D_a, D_b$ ,则点 3 的效率值可通过如下公式计算得到:

$$\eta_3 = \eta_a + (\eta_b - \eta_a) \div (D_a + D_b) \times D_b$$

通过公式计算得到效率值的精度能够满足实际计算要求,完全不用进行复杂的梯度计算,对类型 2 的点的插值计算结果就是该等效率曲线效率值。

### 3.1.3 真机运转特性曲线的计算

运转特性曲线的计算程序与手工计算过程相似:都是先计算等水头运转特性曲线,再从等水头运转特性曲线转换得到等效率运转特性曲线。

首先,将最小水头至最大水头之间的水头值 12 等分,再加上额定水头共获得 13 个水头值,作这 13 个水头的等单位转速线(见图 4 上的  $LH$  线)。将此等单位转速线与综合特性曲线的重合部分 20 等分,获得 21 个工况点。各工况点的效率值用上面所述的方法即可计算出来,假设工况点  $a(Q_a, \eta_a)$  的效率值为  $\eta_a$ ,则工况点  $a$  的出力可用下式计算:

$$N = 9.80665 \times (\eta_a + \Delta\eta) \times (Q_a + \Delta Q) \times D_1^2 \times H^{1.5}$$

式中:  $N$  ——出力;

$\Delta\eta$  ——效率修正值;

$\Delta Q$  ——单位流量修正值;

$D_1$  ——真机转轮的标称直径;

$H$  ——工况点  $a$  所在等水头线的水头值。

计算出这 21 个工况点的出力后,以各点的出力为横坐标,效率为纵坐标作为一个新点,再将各新点连接成一条曲线即可获得一根等水头运转特性曲线。如此将所有的等水头特性曲线计算出来后就得到

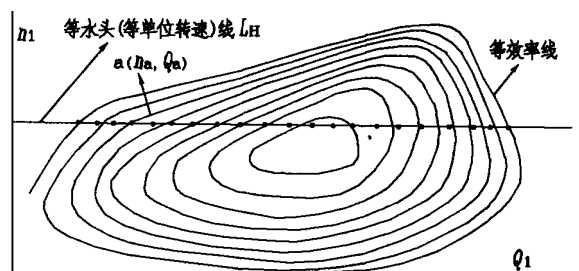


图 4 等水头特性曲线计算图

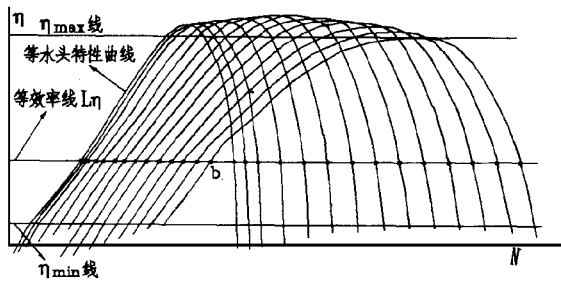


图5 等效率特性曲线计算图

等水头运转特性曲线了,见图5。

在等水头运转特性曲线上,软件自动寻找最高效率值和最低效率值,并稍作一点调整后得到最高等效率线和最低等效率线,如图5中的 $\eta_{max}$ 和 $\eta_{min}$ 线。从 $\eta_{min}$ 到 $\eta_{max}$ 之间每隔一个百分点就作一根等效率线 $L\eta$ (见图5中的 $L\eta$ 线),求出线 $L\eta$ 与各等水头线的交点。设 $b$ 是其中的一个交点, $b$ 点的效率、出力、水头分别为: $\eta_b, N_b, H_b$ ,以 $N_b$ 为横坐标, $H_b$ 为纵坐标即可得到等效率运转特性曲线的一个工况点。将所有交点坐标求出来后,再连成一根曲线即得一根等效率曲线。所有的等效率曲线求出后就得到了真机的等效率运转特性曲线,见图6。

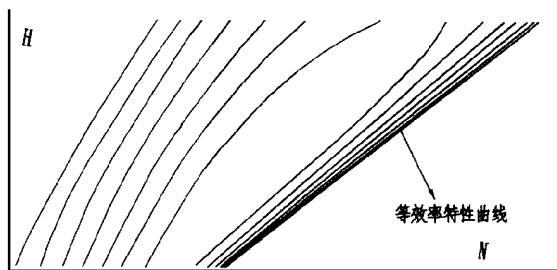


图6 真机运转特性曲线图

### 3.2 数据的安全保护措施

软件中最重要的数据莫过于水轮机型谱数据了,软件在每次打开该数据库文件时都将其作了一个备份,防止被用户意外删除。并且在用户删除每一个模型转轮时都要求用户作一次确认,防止用户意外删除。软件中的所有数据文件都保存在一个单独的子目录中,用户可以将该子目录中的全部数据作一备份,这样可以在必要时恢复数据。

## 4 计算实例

在水电十局设计院的铜钟水电站设计项目中已用本软件进行计算,计算结果如下:

电站名称:铜钟水电站

选型基本数据:

最高水头:47.52 m

最低水头:35.53 m

设计水头:36.00 m

加权平均水头:37.71 m

电站高程:1428.20 m

总装机容量:51000.00 kW

发电机效率:0.9550

最小引用流量:180.00 m<sup>3</sup>/s

最大装机台数:3台

最小装机台数:3台

HL260/D75-H-275

装机台数:3台

额定转速:187.5 r/min

单位转速:85.94 r/min

最小单位转速:74.80 r/min

最大单位转速:86.50 r/min

设计流量:54.60 m<sup>3</sup>/s

单位流量:1.2034 m<sup>3</sup>/s

最小单位流量:0.8236 m<sup>3</sup>/s

最大单位流量:1.2410 m<sup>3</sup>/s

输出功率:17799.0 kW

效率:0.9233

飞逸转速:378.0 r/min

效率修正值:0.0128

气蚀系数:0.2001

允许吸出高度:-0.620 m

安装高程:1427.580 m

水轮机总重量:127.75 t

轴向水推力:0.00 t

转轮重量:15.49 t

加权水头下效率:0.9335

发电机的有关参数:

发电机结构型式:伞式

发电机冷却方式:空冷

磁极对数:16对

定子铁心长度:65.94 m

定子内径:489.02 cm

定子外径:546.63 cm

发电机总重量:181.64 t

转子重量:90.82 t

飞轮力矩:886.69 t·m

模机的有关参数:

实验水头:3.00 m

模机直径:35.00 cm

最优工况参数:

单位转速:79.00 r/min

(下转第92页)

1、盘活存量资产,优化资本运营,建立大渡河水电滚动开发机制。

建议组建以龚嘴、铜街子水电站为基础的大渡河水电开发有限责任公司,按现代企业制度运作。其资本金可通过盘活龚嘴、铜街子存量资产和中央、外资或地方优势企业参股等方式筹措。龚嘴电站装机70万 kW 是由国家拨款建成的,目前已无债务负担;铜街子电站装机60万 kW,总投资约34亿元。建议按国家有关政策将这两个电站通过资产评估,由省电力公司以产权作股投入大渡河水电开发有限责任公司,成为公司滚动发展一大资本来源。也可通过出售两电站部分产权获得货币资本。

2、统一认识,加快开发瀑布沟水电站。

抓住当前有利时机,加快瀑布沟水电站立项工作,争取在2001~2003年间开工建设。

3、在开展瀑布沟电站开发的同时,抓紧开展独松、大岗

山、长河坝等梯级的勘测设计工作,为大渡河梯级滚动开发做好准备,并开展丹巴—泸定、瀑布沟—龚嘴河段规划的补充工作,以便适时安排建设。

建议在开发瀑布沟水电站的同时,开展上述3个电站的预可研、可研阶段的勘测设计工作,为大渡河梯级滚动开发做好准备,以便适时安排建设。

考察团认为,水电开发是四川资源优化发展战略的重点。滚动开发大渡河梯级水电站,尽快开发瀑布沟水电站,是四川省电力工业结构调整的需要,也是四川省国民经济持续发展的需要。相信在党中央、国务院改革开放政策指引下,在四川省委、省政府领导下,大渡河流域梯级滚动开发的目标一定能逐步实现。

四川省电力工业局 樊天龙 张玉惠  
国家电力公司成勘院 周明德

(上接第77页)

## 4 结 语

二滩水电站地下厂房顶拱采用的这种自承重力式吊项结构形式,与原设计采用预制肋拱加平顶天棚的吊项结构相比,整个吊项结构具有重量轻、新颖以及外观具有很强的建筑吸引力等特点。据承包商提供的费用分析表明,修改后的方案与原方案相比,费

用有一定程度的节省(主要是省去了平顶天棚装饰部分的费用)。该方案的批准采用,不仅保证了工程质量和进度要求,而且还使业主获得了一个先进、安全的厂房吊项结构,值得国内同类工程参考。

本文承蒙二滩水电工程公司总工程师、教授级高工黄新生的指导,在此表示衷心的感谢!

作者简介

鲁智敏 男 二滩工程公司 工程师

(收稿日期:1997-07-15)

(上接第63页)

单位流量: 1.091 0 m<sup>3</sup>/s

气蚀系数: 0.133 0

效率: 0.925 0

限制工况参数:

单位流量: 1.232 0 m<sup>3</sup>/s

气蚀系数: 0.152 0

效率: 0.902 0

以上结果完全由软件计算并输出。

## 5 结 语

软件现已在水电十局设计院的铜钟水电站设计

项目中使用。从软件计算结果看,软件完全能够满足实际使用要求,并达到了软件设计的预定目标:加快了水轮机选型计算的速度,提高了计算的精度。

当然,软件也存在一些不足之处。如软件还不能处理气蚀曲线,不能精确计算气蚀系数,不能绘制等吸出高度曲线。软件在综合特性曲线的编辑界面上还不够简单、直观,也未能提供一个简单的输入方法。笔者正在研究和修改这些不足之处,在软件的以后版本中会很好的解决这些问题。

作者简介

彭贵川 男 中国水利水电第十工程局勘测设计院 工程师

(收稿日期:1998-06-18)