

混流、定浆式转轮特性参数的计算机处理

张蓉生

(宜宾地区水电设计院, 宜宾, 644000)

摘要 本文根据混流、定浆式转轮特性参数的特点建立了一种能将高维特性参数用一个具有二阶连续导数且保形的函数给予表达的方法, 它的精度高, 且能方便生成满足各种用途的特性曲线。

关键词 转轮特性 计算机处理 特性曲线生成

1 前言

新设计的水轮机转轮必须通过模型试验确定其真实性能, 并绘制以单位流量和单位转速为参变量的综合特性曲线图。以往综合特性曲线是用手绘绘制的, 等效率曲线的两端弧线 \widehat{A} 、 \widehat{B} (图1)不唯一, 因人而异。随着计算机的应用, 相继出现了计算机对水轮机特性数据进行自动整理的有关报道^[1~3]。由所见报道可见:

1. 由于方法局限, 为适应工程的各种需要将水轮机特性曲线以不同的方式进行离散化和处理以及采用若干条曲线或若干曲面的分别采集和存贮^[1,2];

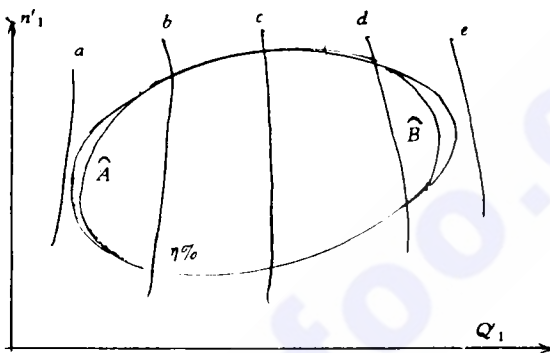


图1

2. 在采用数学方法处理数据时, 一般要求数据呈乘积型形式^[5]。而大多以单位流量和单位转速分划综合特性曲线图进行离散处理, 对位于综合特性曲线最低等效率曲线圈

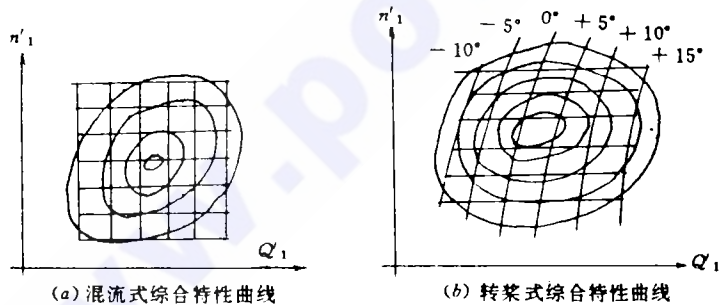


图2

内的网格节点数据以人工插值获得, 其准确性低且繁琐, 而位于最低等效率曲线圈外的网格节点数据则很难准确获得(图2)。虽然

有的文献^[3,7]提出采用外推法或其他方法近似获取, 但可靠性差且仍繁琐。

另外, 计算机处理采用基于传统的人工

绘制方法,等效率曲线圈两端的不确定性和随意性仍存在。

综上所述可见:以往水轮机性能数据或综合特性曲线的计算机处理不尽人意,有必要对此给予研究以寻求合理的方法。

2 转轮特性数据处理

2.1 能量特性曲面的建立

转轮的能量试验是在不同导叶开度下进行的,其开度通常取6~10个。保持水头不变,在每一选定的开度下,改变制动负荷,取8~12个工况点,测得相应的参数。通过误差理论对测量参数进行数据处理后,即可得给定开度下一系列工况点的单位流量 Q'_1 、单位转速 n'_1 和效率 η (这里的 Q'_1 、 n'_1 和 η 均指模型参数)。此时工况能量参数分布于导叶开度和制动负荷所构作的乘积型网格上(图3)。若以最小开度和最小制动负荷作为计数的起始点,则网格上转轮特性型值为: $\bar{r}_{ij} = (Q'_{1ij}, n'_{1ij}, \eta_{ij})^T; i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n$ (i 为开度序号; j 为制动负荷序号)。那么,

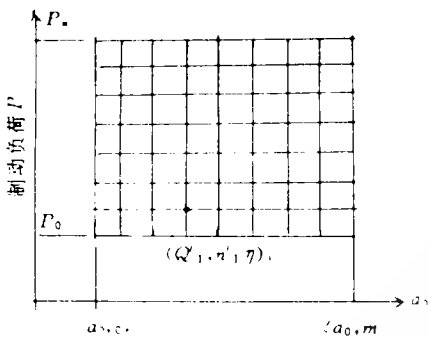


图3

水轮机能量特性参数可以用序号参变量三次B-Spline磨光曲面给予表达,即^[4]:

$$\bar{R}(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \bar{r}_{ij} \Omega_3(u-i) \Omega_3(v-j), \quad u \in [0, m]; v \in [0, n] \quad (1)$$

式中 \bar{R} 为特性参数矢量, $\bar{R} = (Q'_1, n'_1, \eta)^T$; v 为制动负荷序号参变量; u 为开度序号参变

量。

$$u = \begin{cases} \frac{a_0 - a_{0,0}}{\Delta a_0}, & \text{试验开度为等间隔} \\ \frac{a_0 - a_{0,p}}{a_{0,p+1} - a_{0,p}} + p, & a_{0,p} \leq a_0 < a_{0,p+1}, \text{试验开度为非等间隔} \end{cases}$$

(a_0 为任意开度; $a_{0,0}$ 为起始开度; Δa_0 为开度等间隔值)。

$\Omega_3(x)$ 为三次B-Spline基函数

$$\Omega_3(x) = \begin{cases} 0, & |x| \geq 2 \\ \frac{1}{2} |x|^3 - x^2 + \frac{2}{3}, & |x| \leq 1 \\ -\frac{1}{6} |x|^3 + x^2 - 2|x| + \frac{4}{3}, & 1 < |x| < 2 \end{cases}$$

式(1)即为水轮机能量特性参数曲面,其节点处的值为^[4]:

$$\bar{R}(p, q) = (1 + \frac{1}{6} \Delta p^2) (1 + \frac{1}{6} \Delta q^2) \bar{r}_{p,q} \quad (2)$$

($p = 1, 2, \dots, m; q = 1, 2, \dots, n$)

$$\begin{aligned} \Delta_p^2 \bar{r}_{p,q} &= \bar{r}_{p+1,q} - 2\bar{r}_{p,q} + 2\bar{r}_{p-1,q} \\ \Delta_q^2 \bar{r}_{p,q} &= \bar{r}_{p,q+1} - 2\bar{r}_{p,q} + 2\bar{r}_{p,q-1} \end{aligned}$$

为使特性曲面(式(1))在周界网点处的值与原型值一致,须将周界上的型值向外延拓,即

$$\left. \begin{aligned} \bar{r}_{-1,j} &= 2\bar{r}_{0,j} - \bar{r}_{1,j} & \bar{r}_{m+1,j} &= 2\bar{r}_{m,j} - \bar{r}_{m-1,j} \\ \bar{r}_{i,-1} &= 2\bar{r}_{i,0} - \bar{r}_{i,1} & \bar{r}_{i,n+1} &= 2\bar{r}_{i,n} - \bar{r}_{i,n-1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

($i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n$)

此时能量特性曲面表达式应为:

$$\bar{R}(u, v) = \sum_{i=-1}^{m+1} \sum_{j=-1}^{n+1} \bar{r}_{ij} \Omega_3(u-i) \Omega_3(v-j), \quad u \in [0, m]; v \in [0, n] \quad (4)$$

从上可见,由于把开度作为特性曲面函数的参变量,不仅符合于试验数据的分布,而且使四维特性参数(a_0, Q'_1, n'_1, η)表达成双参数量(u, v)曲面。这是一般最小二乘法难于实现的。另外,式(4)表达的特性曲面具有保凸性和二阶连续导数的光滑性,它比以曲线为基础对特性参数进行处理所获得的曲面光滑,因为以曲线处理所获得的曲面不会有曲线等同的光滑性^[4],而工程上所用曲线大多不超过二阶连续导数。再者,特性曲

面表达式(4)具有光滑的各向剖面,致使采用式(4)所形成的特性曲线仍具有二阶连续导数的光顺性。这些也是以曲线为基础所获得的曲面难以办到的。

式(4)一般不通过非周界型值点,为提高逼近性可进行盈亏修正,即

$$\left. \begin{aligned} \bar{r}_0^{(k-1)} &= \bar{r}^{(k-1)}(i, j) - \bar{r}_0^{(0)} \\ \bar{r}_0^{(k)} &= \bar{r}_0^{(k-1)} - \bar{r}_0^{(k-1)}, i=0, 1, \dots, m; j=0, 1, \dots, n \end{aligned} \right\} (5)$$

式中 $\bar{r}_0^{(0)}$ 为 0 次盈亏型值,即原型值; $\bar{r}^{(k-1)}(i, j)$ 是对第 $k-1$ 次盈亏型值 $\bar{r}_0^{(k-1)}$ 的磨光函数在节点处的值。

以上盈亏修正可达到任意给定的精度。

2.2 主综合特性曲线的生成

为对比转轮的水力性能和水轮机产品的设计须绘出转轮的综合特性的曲线图。由能量特性表达式(4)可方便地构出:

2.2.1 效率曲线 在给定效率下给出一系列开度参变量值 u , 由式(4)的 η 分量式:

$$\eta = \sum_{i=-1}^{m+1} \sum_{j=-1}^{n+1} \eta_{ij} \Omega_3(u-i) \Omega_3(v-j)$$

通过数值求解可得对应的 v 值,然后把其代

$$x = \frac{\sum_{i=p-1}^{p+1} \left\{ \prod_{\substack{j=p-1 \\ j \neq i}}^{p+1} \frac{1}{x_i - x_j} \right\} y_i}{\sum_{i=p-1}^{p+1} \left\{ \prod_{\substack{j=p-1 \\ j \neq i}}^{p+1} \frac{1}{x_i - x_j} \right\} \left[\sum_{\substack{k=p-1 \\ k \neq i}}^{p+1} x_k \right] y_i} \quad (6)$$

把它代入邻近 P 点的抛物线插值公式,即得 $N'_{1\max}$ 。根据限制功率 $N'_{1x} = (1-c)N'_{1\max}$ (c 为功率储备系数,一般 $c = 5\%$ ⁽⁸⁾),从

入式(4)的 Q'_1 和 n'_1 分量式〔类同上式,即以相应的 Q'_1, Q'_{1ij} 和 (n'_1, n'_{1ij}) 替代上式的 η 和 η_{ij} 〕,即得给定效率下的一系列 Q'_1 和 n'_1 ,光滑连接即为所求。

2.2.2 开度曲线 如果综合特性曲线图上须给出包括试验开度曲线在内的非试验开度曲线,则在给定开度下可求得对应的 u 值,然后给出一系列 v ,由表达式(4)即可得对应的一系列 Q'_1 和 n'_1 ,光滑连接之。

2.2.3 功率限制线 对给定的 n'_1 下由式(4)可求得各试验开度对应的性能参数 $\{Q'_{1i}, \eta_i, N'_{1i}\}_{i=0}^m$ (N'_1 为单位功率)。选出效率最大的相应试验开度序号参变量 u_* 。基于插值法取若干计算开度序号参变量 $u_k = u_* + \frac{m-u_*}{N}k, k=0, 1, \dots, N$ 由式(4)可求得对应的 Q'_{1k}, η_k 和 N'_{1k} 。从 $\{N'_{1k}\}_{k=0}^N$ 可寻找出节点序号 P 使 $N'_{1p} = \max_{0 \leq k \leq N} \{N'_{1k}\}$ 。从 x, y 分别表示 Q'_1 和 N'_1 ,根据邻近节点 P 的抛物线插值公式求导并令等于零,可得 $N'_{1\max}$ 所对应的 Q'_1 ,即

$\{N'_{1k}\}_{k=0}^N$ 中可寻得使 $N'_{1w} \leq N'_{1x} < N'_{1w+1}$ 的序号 w ,以 N'_{1x} 代入邻近 w 点的抛物线插值式可得对应的 N'_{1x} 下的单位流量 Q'_{1x} ,即

$$Q'_{1x} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=t-1}^{t+1} \left\{ \prod_{\substack{j=t-1 \\ j \neq i}}^{t+1} \frac{1}{x_i - x_j} \right\} y_i \\ B &= \sum_{i=t-1}^{t+1} \left\{ \prod_{\substack{j=t-1 \\ j \neq i}}^{t+1} \frac{1}{x_i - x_j} \right\} \left[\sum_{\substack{k=t-1 \\ k \neq i}}^{t+1} x_k \right] y_i \\ C &= \sum_{i=t-1}^{t+1} \left\{ \prod_{\substack{j=t-1 \\ j \neq i}}^{t+1} \frac{1}{x_i - x_j} \right\} \left[\prod_{\substack{k=t-1 \\ k \neq i}}^{t+1} x_k \right] y_i \end{aligned}$$

$$t = \begin{cases} 1, w = 0 \\ w, w > 0 \end{cases}$$

取 $Q'_{1w} \leq Q'_{1x} \leq Q'_{1w+1}$ 的 Q'_{1x} 即为所求。

2.3 空化曲面方程

转轮在做完能量试验后进行空化试验,其试验工况点一般在主综合特性曲线上按一定间隔选若干整数单位转速与各试验开度曲线的交点作为空化试验工况。可见空化系数 σ 分布于 n'_1 和 a_0 所组成的网格上,网格型值为: $\bar{S}_{ij} = (Q'_{1ij}, \sigma_{ij})^T, (i = 0, 1, \dots, m_1; j = 0, 1, \dots, n_1)$ 。以 n'_1 和 a_0 的序号作为参变量可得空化汽蚀系数方程。

$$\bar{S}(u, W) = \sum_{i=-1j=-1}^{m_1+1, n_1+1} \bar{S}_{ij} \Omega_3(u-i) \Omega_3(w-j), u \in [0, m_1]; w \in [0, n_1] \quad (8)$$

其中 w 为单位转速序号参变量。

$$w = \begin{cases} \frac{n'_1 - n'_{10}}{\Delta n'_1}, \text{各工况单位转速等间隔} \\ \frac{n'_1 - n'_{1q}}{n'_{1q+1} - n'_{1q}} + q, n'_{1q} \leq n'_1 < n'_{1q+1}, \end{cases}$$

各工况单位转速非等间隔 (n'_{10} 为起始序号单位转速; $\Delta n'_1$ 单位转速等间隔值);

u 为开度序号参变量,表达式类同式(1)。

对于型值 \bar{S}_{ij} 在周界上的延拓值 $\bar{S}_{-1,j}, \bar{S}_{m_1+1,j}; \bar{S}_{i,-1}, \bar{S}_{i,n_1+1}$ 类同式(3)。

2.4 综合特性曲线图上的等空化曲线

在给定的空化系数下给出一系列 n'_1 及 w 值,由方程(8)的 σ 分量式可求得对应的一系列 u 值,然后把已获得的 u, w 代入方程(8)的 Q'_1 分量式即得对应的各 Q'_1 值。把各 $\{Q'_1, n'_1\}$

$$\begin{cases} Q'_1 = \sum_{i=-1j=-1}^{m_1+1, n_1+1} Q'_{1ij} \Omega_3(u-i) \Omega_3(v-j) \\ n'_1 = \sum_{i=-1j=-1}^{m_1+1, n_1+1} n'_{1ij} \Omega_3(u-i) \Omega_3(v-j), u \in [0, m]; v \in [0, n] \end{cases}$$

4 运行特性曲线的生成

水电站水轮机选型和运行均涉及到水轮机运行特性曲线。由矢量特性方程(4)可方便

点于主综合特性曲线图上光滑连接,即为给定 σ 下的等空化曲线。

3 综合特性曲线的计算机处理

以上所述为模型试验后的特性参数处理以及综合特性曲线生成。对于已有的水力模型转轮为适应工程上各种电算需要,须将水轮机水力模型转轮特性进行贮存和处理。

从模型转轮的综合特性曲线图上可采集到各等开度曲线与效率曲线交点处的 n'_1, Q'_1 和 η (n'_1, Q'_1 和 η 均为模型参数)。以交点最多的等开度曲线的交点数目 n 作为各开度曲线应提供的节点型值数目,对于未达到这个数目的各开度曲线,首先采用拟合曲线对开度曲线进行拟合,此时即可方便地获得须补齐 n 个节点的其他节点型值。考虑到等开度曲线的形态各异且无规律,故选适应性高、光滑性适中,且保凸的半节点型插值二次 B-Spline 曲线^[6]进行拟合,详见[6]。

由以上可获得各开度曲线的节点型值 $\{Q'_{1j}, n'_{1j}, \eta_j\}_{j=0}^n$ 。由此,可用式(4)表达水轮机转轮特性曲面方程,此时的 v 是开度曲线的节点序号参变量。

通过特性曲面表达(4)可以获得综合特性曲线图未示出的开度曲线和效率曲线。另外,对于给定两特性参数可由式(4)获得其他特性参数。譬如,给定 Q'_1 和 n'_1 可由如下联解获得 $u(a_0)$ 和 v ,然后代入式(4)的效率分量式即得对应的 η 。

地生成运行特性曲线。即在给定的模型效率通过修正得对应的原型效率,以一系列水头及对应修正后的模型单位转速,由式(4)的 n'_1 和 η 表达式联解可得各水头相应的模型参变量 u, v 值,然后代入式(4)的 Q'_1 分量式得

附表 HL-260 模型转轮特性表 (在综合特性曲线图上采集得)

	$a_0 = 19.6\text{mm}$			$a_0 = 23.1\text{mm}$			$a_0 = 27.5\text{mm}$			$a_0 = 31.9\text{mm}$			$a_0 = 36.6\text{mm}$			$a_0 = 41.6\text{mm}$			$a_0 = 46.4\text{mm}$		
	Q_1	n_1	η	Q_1	n_1	η	Q_1	n_1	η	Q_1	n_1	η	Q_1	n_1	η	Q_1	n_1	η	Q_1	n_1	η
0	650	96	0.6	760	101	0.6	890	104.4	0.6	1020	106	0.6	1160	107	0.6	1300	106	0.6	1390	100	0.6
1	660	92	0.65	768	99	0.65	900	102	0.65	1030	103.5	0.65	1178	103	0.65	1310	100.7	0.65	1400	93	0.65
2	670	90	0.7	778	96	0.7	910	99	0.7	1045	100	0.7	1195	99.5	0.7	1315	94	0.7	1420	85.5	0.7
3	674	88	0.72	780	94.4	0.72	920	97.3	0.72	1055	98	0.72	1200	98	0.72	1320	91	0.72	1430	82	0.72
4	680	87	0.74	785	93.5	0.74	923	95.7	0.74	1060	96	0.74	1208	95.5	0.74	1322	88	0.74	1440	78	0.74
5	684	85	0.76	790	91.6	0.76	930	93.8	0.76	1065	94.4	0.76	1210	93.4	0.76	1330	84	0.76	1490	64	0.74
6	690	83	0.78	800	89.5	0.78	935	92	0.78	1075	92.5	0.78	1210	90	0.78	1345	79	0.78			
7	695	80.5	0.8	805	87.3	0.8	940	89.6	0.8	1080	90	0.8	1218	86	0.8	1380	64	0.78			
8	700	78	0.81	810	86	0.81	948	88	0.81	1085	88.5	0.81	1220	83	0.81						
9	714	71	0.81	816	84	0.82	953	86	0.82	1090	87	0.82	1230	79	0.82						
10	720	68	0.8	825	80.1	0.83	960	84	0.83	1093	84	0.83	1260	67.8	0.82						
11				838	75	0.84	967	82	0.84	1095	80.5	0.84	1255	64	0.81						
12				850	70	0.84	980	78	0.85	1125	67.6	0.84	1270	62	0.8						
13				855	66.5	0.83	990	69.5	0.85	1127	64.6	0.83									
14				860	65	0.82	994	66.5	0.84	1130	62.5	0.82									
15				860	64	0.81	1000	64	0.83	1128	61	0.81									
16				860	62	0.8	1000	62.2	0.82	1127	59.5	0.8									
17							1000	61	0.81												
18							1000	59.5	0.8												

备注: 单位: $Q_1 - \text{m}^3/\text{s}$; $n_1 - \text{r}/\text{min}$

对应的 Q_1 , 修正和计算可得原型在相应水头下的 Q_1 和功率。此时, 运行特性曲线的等效率曲线即描绘出。对于其余曲线如功率限制线等可方便地构出, 这里不再赘述。

5 程序框图

程序框图见图 4。

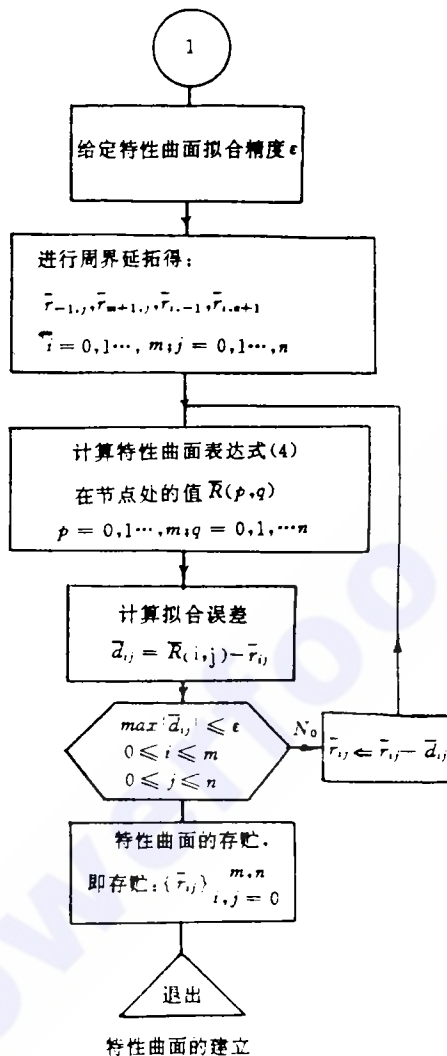
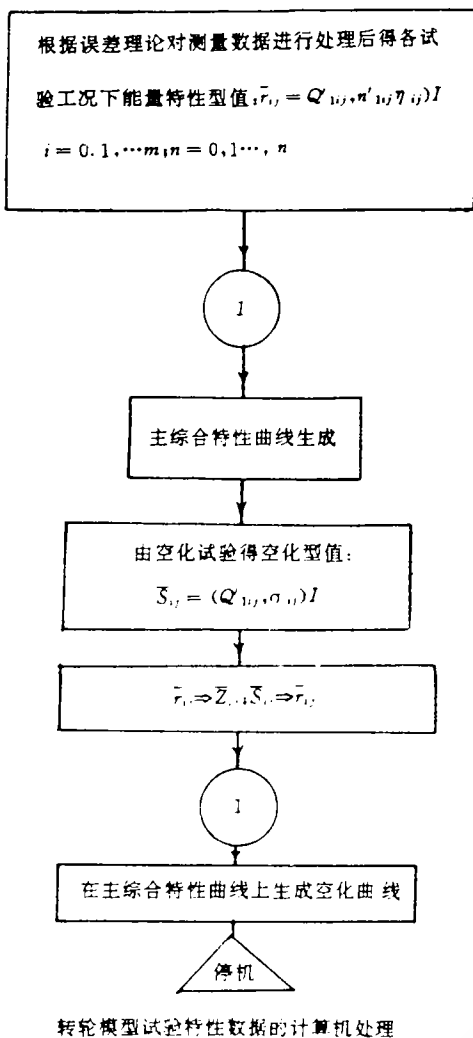


图 4

6 算 例

为对比本文方法的可靠性将 HL260 模型转轮综合特性曲线图按本文的方法进行处理。由该综合特性曲线图可得各开度曲线与效率曲线交点的型值参数 $\{Q_1', n_1', \eta\}$, 如附表。考虑到开度 $a_0 = 41.6\text{mm}$ 曲线和 $a_0 =$

46.4mm 的节点型值数目较少, 为提高精度在该两开度间增设计算开度 $a_0 = 44\text{mm}$, 且由计算机自动生成该开度曲线与效率曲线的各节点型值。由本文方法通过计算机处理得矢量特性方程, 见图 6。再由此生成综合特性曲线图, 它与原综合特性曲线图的吻合性极高(图 5)。这是其他方法在这样少的数据点(91 个)情况下难以达到的精度。另外, 本文

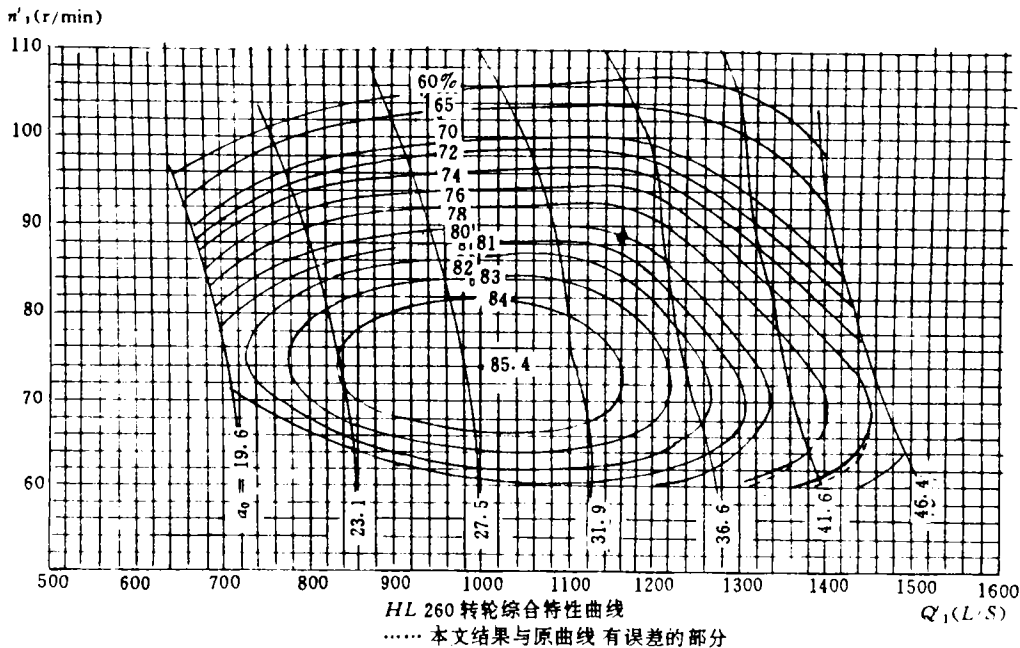


图 5

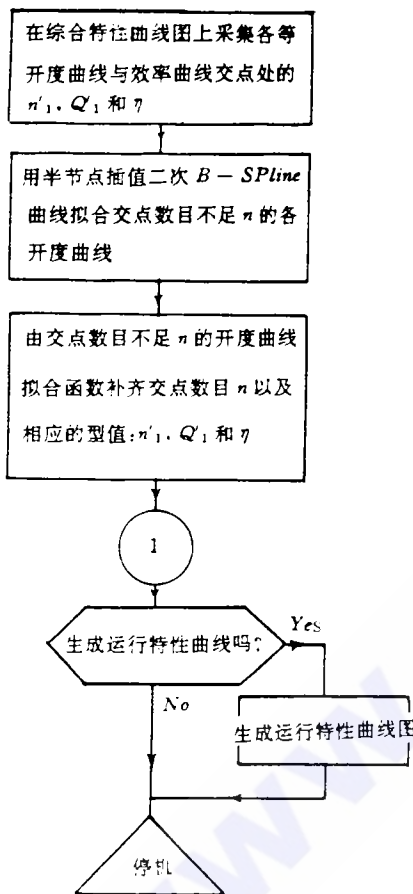
方法仅一个特性曲面方程就将水轮机全部能量特性给予了表达,大为减化了综合特性曲线图处理的工作量,有利于工程应用。

7 结 语

本文的方法就水轮机特性数据的处理来说具有较高的适应性和准确性,能方便地把高维特性参数简便地用一个具有二阶连续导数的矢量函数给予表达,其拟合精度不管是整体,还是局部均极高。另外,由此构成的矢量函数可方便地生成满足各种用途的特性曲线,并且具有曲面等同的二阶连续导数。

参 考 文 献

- 1 陈德新. 水轮机特性曲线处理程序包的设计. 水电设备, 1987; (2): 24~30
 - 2 赵林明. 水轮机特性曲线的一种计算机存贮方法. 水力机构技术, 1987; (5): 31~35
 - 3 晏敏等. 计算机辅助水轮机特性数据处理. 水电设备, 1987(2): 43~49
 - 4 李岳生等. 样条函数方法. 北京: 科学出版社, 1979: 181~190
- (下转第 81 页)



对已有转轮综合特性曲线图的计算机处理
图 6 综合特性曲线图计算机处理

局 EPA 合作的环保科研项目。

又如,为保护臭氧层,在加拿大蒙特利尔举行的国际会议指出:CO₂ 是产生温室效应的气体,提出了制定限制排放 CO₂ 的国际会议。

总之,加拿大政府清楚地认识到:没有国际上对环境的综合治理;不和美国携手共同解决环境问题,加拿大的环境保护便不能从根本上得到解决。

3 结束语

由于在环境保护中采取了如上有力的措施,使加拿大的环保卓有成效。出色的环境保护工作带来的是环境更优美,山河更秀丽,投

资环境更好,吸引更多的人到加拿大旅游观光,吸引更多的移民到加拿大定居。近十多年来世界各地到加拿大定居的移民突破 20 万,以亚洲移民最多,移民中多数办企业和经商。移民的大量涌入,带给加拿大的是巨额投资,带给的是工商业更加繁荣,带给的是经济更加蓬勃发展。

与此同时,随着工商业和经济的繁荣,一方面对环境保护提出了更高的要求,另一方面也为环保提供了强有力的经济保证和支持。于是构成了一个良性循环。促使加拿大的环境保护和经济发展齐头并进,比翼齐飞。人均国民经济年产值,在西方七个经济大国中位居第二。

(全文完)

(收稿日期:19940527)

(上接第 73 页)

5 冯康. 数值计算方法. 北京:国防工业出版社,1978

6 张永曙等. 计算机辅助几何设计的数学方法. 西安:西北工业大学出版社,1986:45~59

7 Sihamaker, L. L. . Two-Stage spline methods for fitting

Theory A. Dold and B. Eckmann eds,1976

8 天津电气传动设计研究所. 水轮机设计与计算,北京:科学出版社,1971:34~42

(收稿日期:19930918)

Computer Process of Parameters of Behaviours for Francis Runner and Fixed Blade Propeller Runner

Zhang Rongsheng

(Yibin Hydroelectric Design Institute)

Abstract According to the features of parameters of behaviours for Francis runner and fixed blade propeller runner, mutli dimensioned characteristic parameter can be represented by a conforming shape function with second order continuous derivative. This method has high degree of accuracy and characteritic curves which meet diffirent needs are generated easily.

Key Words runner behaviour ,computer precess ,characteristic curve generation.