

# 水轮机模型特性图计算机辅助数据采集及模拟与运转特性曲线的生成

张蓉生 刘志鹏 屈波

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

摘要：水电站水轮机的选用及该系列产品设计依赖于模型综合特性曲线。这些曲线大多以图形为载体由供货方提供，在水电站的优化设计中需要对图中的各种特性以数学方法给以表达以便设计的自动化。以往这类工作均是人工读取再录入计算机，不仅工作量大，繁琐而且采集误差也大，难以满足现代设计要求。据此给出了通过计算机鼠标的点击自动地获得图中特性参数及高精度的曲线模拟方法和按绘图走笔顺序排列纪录的方法。它满足为适应个性化需求不断地提供新的模型转轮特性曲线所需要的快速处理。另外，提出的方法还适应于其他各类图的数据采集。

关键词：特性曲线 计算机辅助采集 数值模拟 运转特性曲线

中图分类号：TK73

## 0 前言

CFD 已广泛地应用于水轮机内部流动模拟中，但是复杂的水轮机内部流动，目前仍还不能很好用数学分析方法给与准确地描述。因此，水轮机能量特性的最终确定仍依赖于模型试验<sup>[1]</sup>。它是作为水轮机选型和产品设计的依据。

水轮机模型综合特性曲线大都是以图形作为载体给以提供的，对于该系列的各原型水轮机特性曲线均是以它进行换算的。对此，首先需要采集模型特性曲线图上的数据，然后进行数值模拟，再进行相应的处理，最终得出原型水轮机的特性曲线。目前，水轮机模型特性曲线图上的数据采集几乎都是人工从图上读取数据，然后录入计算机<sup>[2-3]</sup>。这不仅工作量大而且误差也大。又特性曲线的数值模拟多采用常规的最小二乘法<sup>[2-4]</sup>，这使得对封闭的特性曲线须采用两段分别模拟，颇感繁琐。随着现代制造业的进步，产品从设计到制造的时间大为缩短。制造商为了满足个性化的需求给出大量可供选择的优秀模型转轮特性曲线图供用户选用，待用户选定好机组后才实施产品的设计及制造，特别是在目前大量新开发的水轮机转轮更是如此。品种不断地更新和增多，能满足各种水电站的要求，但新的模型转轮特性曲线的处理随之增多。因此，研究利用计算机高效，快速的对以图形作为载体的特性曲线进行计算机辅助数据采集及模拟方法具有重要的意义。

## 1 特性图计算机辅助数据采集

为了利用计算机辅助采集水轮机模型综合特性曲线图上的数据，需将图形扫描并以图形文件格式给以保存，随即用程序将扫描所得图形文件装入计算机。此时图形坐标与特性参数坐标不一致，必须给出两坐标系间的对应关系，这是计算机辅助数据采集的重要环节之一。

考虑到由扫描所得特性曲线图会出现图中特性坐标系与扫描仪的坐标系不平行的情形(图 1 单位流量线逆时针偏转  $\alpha$  角)，分别在水轮机模型综合特性曲线图上的单位流量线  $q_V = \text{const}$  和单位转速线  $n_u = \text{const}$  上选取任意两点  $A, B$  或  $C, D$ ，由开发的软件可自动地获得这些点的图形坐标值  $(x_A, y_A)$ ， $(x_B, y_B)$  和  $(x_C, y_C)$ ， $(x_D, y_D)$  并给出对应的特性坐标值  $q_{V,A}$ ， $q_{V,B}$  和  $n_{u,C}$ ， $n_{u,D}$ (图 1)。则线段  $\overline{AB}$  在图形坐标和特性参数坐标下的长度之比既是图形坐标与单位流量坐标的对应关系。而线段  $\overline{CD}$  在两坐标

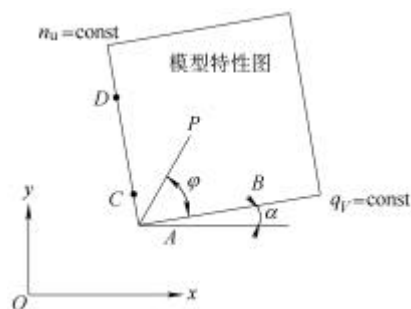


图 1 图坐标与特性坐标的关系

系下长度之比就是图形坐标与单位转速坐标的对应关系。因此，已知图中任意点的图形坐标即可获得该点的特性参数，由分析可得如下换算。

$$\begin{cases} q_{V,P} = q_{V,*} + (q_{V,B} - q_{V,A}) \sqrt{\frac{(y_p - y_*)^2 + (x_p - x_*)^2}{(y_B - y_A)^2 + (x_B - x_A)^2}} \sin j \\ n_{u,P} = n_{u,*} + (n_{u,D} - n_{u,C}) \sqrt{\frac{(y_p - y_*)^2 + (x_p - x_*)^2}{(y_D - y_C)^2 + (x_D - x_C)^2}} \cos j \end{cases} \quad (1)$$

$$j = \arctan\left(\frac{y_p - y_*}{x_p - x_*}\right) - a \quad (2)$$

式中  $q_{V,P}, n_{u,P}$ —— $P$  点的单位流量和单位转速  
 $A, B, C, D$ ——对应点坐标值  
 $*$ ——直线  $AB$  与  $CD$  的交点坐标  
 $a$ ——角为单位流量线与  $x$  坐标的逆时针偏转角

所开发的软件将水轮机模型综合特性曲线图载入当前窗体，用鼠标在图中特性曲线上通过点击自动获得若干个点的图形坐标，再通过式(1)的换算即得各点的特性参数值，便实现了对以图为载体特性曲线的数据自动采集。

## 2 特性曲线的模拟

为了水轮机选型，对采集到的特性曲线数据需数值模拟给与描述。常规的方法(最小二乘法等)大多对单调曲线足以描述，但对封闭的曲线则无能为力，为此多采用分段模拟，颇感不便。另外，用它来模拟水轮机工作特性曲线时往往曲线的拱高较大即出现效率大于最优效率的错误。再者，曲线模拟的正确性不仅取决于过型值点的逼近性而且还取决于所取节点的疏密程度。为此采用 3 次序号参变量样条磨光法，它不仅具有非常高的逼近性而且具有保凸，保尖性<sup>[5]</sup>以及适应大间距型值节点。它的矢量方程式为

$$R_3(h) = \sum_{i=1}^{n+1} r_i W_3(?-i) \quad 0 \leq ? \leq n \quad (3)$$

式中  $R_3$ ——被模拟曲线矢量，如等效率曲线  $R_3 = (q_v, n_u)^T$   
 $r_i$ ——模拟曲线的控制点即  $r_i = (q_{v,i}, n_{u,i})^T$   
 $?$ ——序号参变量  
 $i$ ——数据节点  
 $n$ ——节点数  
 $O_3$ ——3 次样条基函数，即

$$W_3(x) = \sum_{j=0}^4 \frac{(-1)^j \binom{4}{j} (x+2-j)_+^3}{3!} \quad (4)$$

为了保证模拟曲线通过开式的被模拟曲线的两端点或经过封闭的被模拟曲线，需将边界节点进行延拓，即

$$\begin{cases} r_{-1} = 2r_0 - r_1 & r_{n+1} = 2r_n - r_{n-1} & \text{开式曲线} \\ r_{-1} = r_n & r_{n+1} = r_0 & \text{闭式曲线} \end{cases} \quad (5)$$

又为逼近节点，需对样条方程进行盈亏修正处理，即首先将节点数据标示为 0 次盈亏修正的控制点  $r_i^0$ ，然后带入方程式(3)，可得节点处的样条函数值，即

$$R_3(i) = \frac{1}{6} r_{i-1}^k + \frac{2}{3} r_i^k + \frac{1}{6} r_{i+1}^k \quad i = -1, 0, 1, \dots, n+1 \quad (6)$$

式中  $k$ ——盈亏修正次数

则盈亏修正处理为

$$\begin{cases} d_i^k = R_3^k(i) - r_i^0 \\ r_i^{k+1} = R_3^k(i) - d_i^k \quad k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (7)$$

当  $|d_i^k| \leq E_s$  (给定的误差限) 时盈亏修正停止。

采样中为了检查模拟的准确性，在所开发的软件中设置了在被采集特性曲线上绘出经模拟后的曲线(图 2)，通过两者间有无差异的直接对比由鼠标的单击确定模拟的准确性是否满意。当不满意时重新选取节点及节点数至满足为至。这可保证节点选取的合理性。另外，为减少达到准确拟合的反复采集次数，一般节点间距采用近似等距，而在变化剧烈的曲线段间距可稠密些，反之稀疏些。

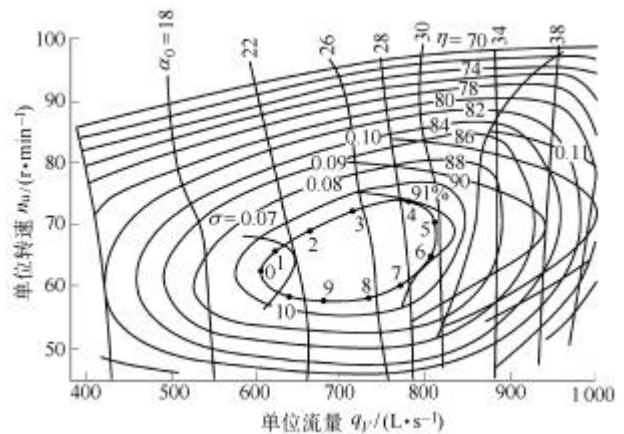


图 2 模拟准确性检查

## 3 特性曲线图中任意工况点特性参数的确定

由以上方法即可模拟出特性图中各条等值曲线(等效率线，等开度线和等汽蚀线等)，则图 2 中任

意点的特性参数可通过模拟单位流量线或者单位转速线所交各等值曲线交点的变化关系后即可确定。而对于位于图示最大等效率曲线内的工况点效率按上述方法会出现大于最优工况点效率或是在最优工况点处的效率并非是最优效率等错误情形。当然可采用以最优工况点为中心与各等值曲线的节点构成极坐标值而进行相应的处理,但极为繁琐,效果也欠佳。因此对位于图示最大等效率曲线内的工况点采用如下方法获取它的效率值。

连接最优工况点  $U$  和计算点  $P$  的直线交图示最大等效率曲线上相邻节点的直线于  $K$  点,以该点引水平线交该等效率曲线于 1 点,再以该点引垂线交  $UP$  直线于 2 点,再以 2 点引水平线交该等效率曲线于 3 点,接着过 3 点引垂线交  $UP$  直线于 4 点。4 点即为  $UP$  直线交最大等效率曲线的近似交点,将 4 点作为新的  $K$  点继续上述求解,即可获得较准确的交点  $C$  (图 3)。为便于理解,图 3 被夸张放大。实际求解中仅一次近似就可达到足够的精度。将图示最大等效率曲线至最优工况点间的效率近似看作为线性分布,此时  $P$  点的效率值为

$$h_p = \frac{\overline{PC}}{\overline{UC}} (\eta_0 - \eta_c) + \eta_c \quad (7)$$

式中  $\overline{PC}, \overline{UC}$  —— 线段长度  
 $\eta_0, \eta_c$  —— 最优效率和图示最大等效率曲线的效率

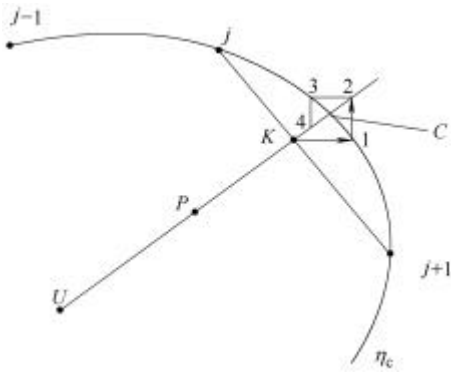


图 3 图示最大等效率曲线内工况点效率的求解

## 4 运转特性曲线的生成

水轮机模型特性曲线在数值模拟和选定水轮机后即可进行运转特性曲线的生成处理。虽然,这方面的内容讨论得较多。但实际应用中由于种种原因,大多在效率交工作特性曲线的一系列交点被确定后借助第三方软件(AutoCAD)进行运转特性曲线的绘制。无疑,不仅颇感繁琐而且增加用户的负担,特

别是在反盗版维护知识产权的当今更是如此。因此有必要对此进行研究。

在水轮机模型特性曲线被采集和模拟后以最小水头至最大水头范围内一系列水头及相应的单位转速可求得该水头下的各出力,通过模拟可获得水轮机的工作特性曲线(图 4)。以该特性曲线的最小至最大效率范围内可求得相应各效率线交工作特性曲线的一系列节点数据  $\{N_j^i, H_j^i\}_{j=0}^{n_i}$  ( $i$  对应效率;  $j$  对应节点数据;  $n_i$  交点数)。这些节点数据的排列不符合绘图的走笔顺序。因此按如下方法进行处理使之符合绘图的走笔顺序。

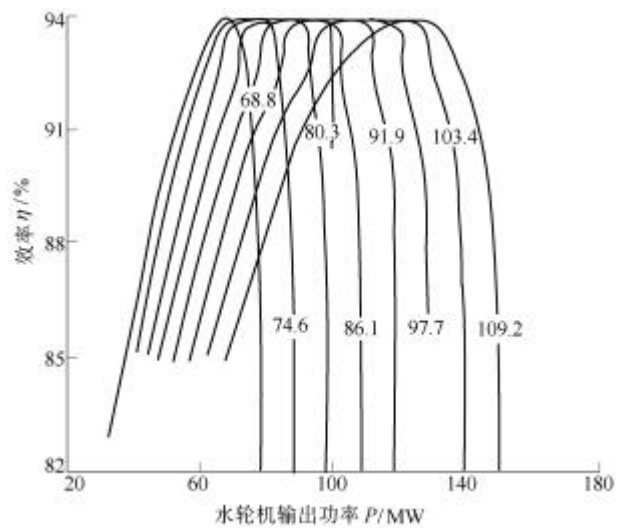


图 4 工作特性曲线(水头  $H/m$ )

(1) 对工作特性曲线中每条水头线上的节点以位于它顶点的左侧和右侧用标示符加以区别。

(2) 欲绘运转特性曲线的某效率曲线最小水头低于该效率的各节点  $\{N_j^i, H_j^i\}_{j=0}^{n_i}$  的最小水头  $H_{\min} = \min\{H_j^i\}_{j=0}^{n_i}$  时按水头降序排列各水头曲线顶点左侧的纪录,然后再按水头升序排列各水头曲线顶点右侧的纪录且该效率曲线按连续的一段曲线绘出(逆时针走笔)。

(3) 欲绘运转特性曲线的某效率曲线的最大水头大于该效率各节点的最大水头  $H_{\max} = \max\{H_j^i\}_{j=0}^{n_i}$  时按水头升序排列各水头顶点左侧的纪录,然后再按水头降序排列各水头顶点右侧的纪录且该效率曲线按一段连续绘制出(顺时针走笔)。

(4) (2)和(3)情形均存在的情形可按(2)或者(3)进行处理。

(5) 除(2), (3)和(4)以外情形的欲绘运转特性曲线的某效率曲线按水头升序或者降序分别对各水头曲线顶点左侧和右侧的纪录进行排序且按左右侧分段绘制。将以上处理后的纪录用 3 次序号参变量样

条磨光法进行拟合,其方程形态如方程式(3),只是  $R_3$  和  $r_i$  与被拟合的曲线相关,如是等效率曲线  $R_3 = (N, H)^T$  而  $r_i = (N_i, H_i)^T$ 。通过序号参变量的赋值即可绘出运转特性曲线(图 5)。

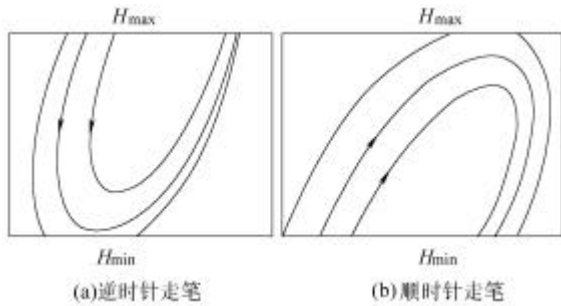


图 5 运转特性等效率曲线的绘制

### 5 实例

利用提出的方法所编程序将 HL180 模型转轮的综合特性曲线图装入计算机分别在单位流量和单位转速轴上用鼠标点击两点给出相应的特性值,即确定了图形坐标与特性坐标的关系。通过鼠标按顺序点击欲拟合曲线上的点进行数据采集和模拟,并在同一图中将模拟曲线绘出(图 6)。图 6 中序号为在等值效率曲线上用鼠标点击自动采样的节点序号。为清晰起见,图 6 中仅给出了效率曲线为 86% 的节点序号;模拟曲线的逼近误差限给定为  $10^{-5}$ 。从图 6 可见,提出的方法能够对图 6 中以曲线表达的特性数据进行自动采集且具有非常好的逼近性,可以达到任意所需的逼近程度。另外,图 7 和图 4 分别是用最小二乘法和提出的方法拟合后所绘出的工作特性曲线。为了清晰地对比将每条曲线的节点在图 7 中表示出图 7 和图 4 可见:最小二乘法所拟合的曲线拱高较大,其中一些曲线的效率大于水轮机的最优效率  $92\%+2.8\%=94.8\%$ ,显然这是错误的。而文中方法所得结果更符合实际,不会产生上述错误。

当给定表 1 的水电站选型参数,由提出的方法所编制的软件可获得 HL180 转轮的选型结果(表 2)和运转特性曲线(图 8)。表 3 和表 4 分别是通过软件自动获得的 93%效率线交工作特性曲线(图 4)的交点坐标纪录和该纪录按绘图走笔顺序重新排列后的纪录。

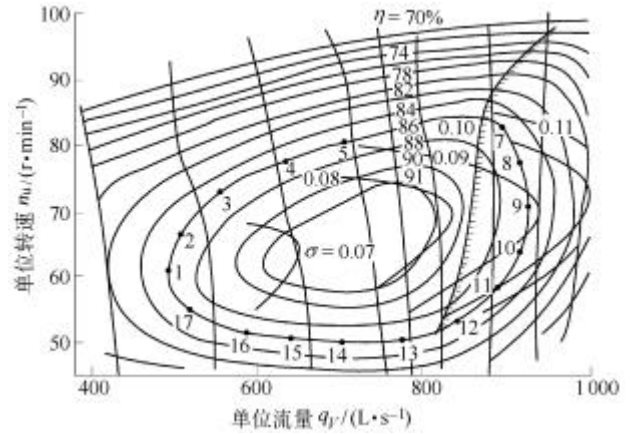


图 6 HL180 模型综合特性曲线图数据的采集与模拟

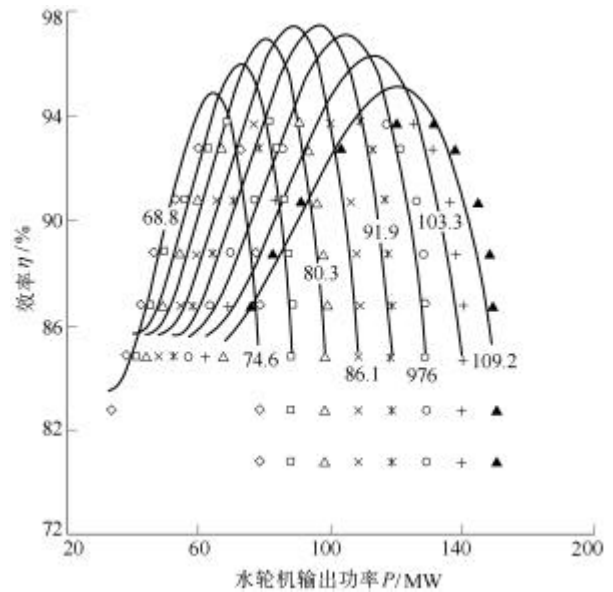


图 7 最小二乘法拟合所得工作特性曲线 (水头  $H/m$ )

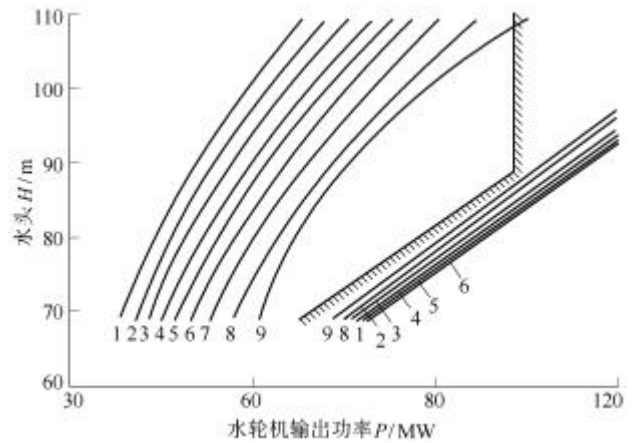


图 8 运转特性曲线

- 1. 85% 2. 86% 3. 87% 4. 88% 5. 89%
- 6. 90% 7. 91% 8. 92% 9. 93%

表 1 某水电站选型参数

设计水头 $H_{sj}/m$	最小水头 $H_{min}/m$	最大水头 $H_{max}/m$	单位流量 $q_v/(L \cdot s^{-1})$	单位转速 $n_u/(r \cdot min^{-1})$	水轮机输出功率 $P/MW$
89.0	68.8	109.2	850	65.2	100

表 2 选型结果

直径 $D_1/cm$	实际单位流量 $q_V/(L \cdot s^{-1})$	实际单位转速 $n_0/(r \cdot \min^{-1})$	效率 $\eta/\%$	转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	效率修正值 $\eta'/\%$	水轮机输出功率 $P/MW$
410	789	65.2	94	150	2.83	103.09

表 3 效率 93% 的  
交点坐标纪录

水头 $H/m$	水轮机功率 $P/MW$
68.800	61.022
68.800	73.153
74.571	63.449
74.571	83.116
80.343	66.888
80.343	92.673
86.114	72.061
86.114	102.274
91.886	78.183
91.886	111.851
97.657	85.233
97.657	121.093
103.429	93.766
103.429	129.620
109.200	105.194
109.200	136.799

表 4 按走笔顺序  
排列后的纪录

水头 $H/m$	水轮机功率 $P/MW$
109.200	136.799
103.429	129.620
97.657	121.093
91.886	111.851
86.114	102.274
80.343	92.673
74.571	83.116
68.800	73.153
68.800	61.022
74.571	63.449
80.343	66.888
86.114	72.061
91.886	78.183
97.657	85.233
103.429	93.766
103.429	105.194

## 6 结论

水轮机综合特性曲线图所表达的特性用计算机鼠标的点击自动地获得特性参数及生成高精度的拟合曲线无疑比以往的人工采样再录入到计算机具有很高的处理速度和精度，它满足于现代为个性化需求不断地提供新的模型转轮特性曲线所需要的快速处理。另外，文中方法的基本原理不仅适用于水轮机综合特性曲线图的数据采集而且适用于其他各类图的数据采集。

### 参 考 文 献

- [1] 王福军. 计算流体力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [2] 张昌期. 水轮机原理与数学模型[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1988.
- [3] 唐岳灏, 杨建东. Fortran 和 MATLAB 的混合编程在水轮机特性曲线处理中的应用[J]. 武汉大学学报, 2004, 35(2): 45-49.
- [4] 沈祖贻, 田树棠, 支培法. 水力机械优化设计和计算机辅助分析[M]. 南京: 河海大学出版社, 1995.

[5] 陈文毅. 泵特性曲线的拟合方法[J]. 舰船科学技术. 1995(4): 66-69.

[6] 李岳生, 齐东旭. 样条函数方法[M]. 北京: 科学出版社, 1979.

## COMPUTER-AIDED DATA COLLECTION, SIMULATION AND ESTABLISHMENT OF OPERATION CURVES FOR THE CHARACTERISTIC CURVE PICTURES OF TURBINE MODELS

ZHANG Rongsheng LIU Zhipeng QU Bo  
(College of Water Conservancy and Hydropower  
Engineering, Hehai University, Nanjing 210098)

**Abstract**: The selection of hydraulic turbines for a power station and the same kind of product designs depend on the performance curves of a turbine model. The curves are provided in graphs. During of the optimum design of a power station, various kinds of characters in the graphs need to be expressed in mathematic methods so as to design automatically. At present, they are read out by human and input into computer so that we have a great deal of work to do and errors are often let to. It is difficult to be satisfied for modern designs, therefore, the characteristic parameters in graphs are automatically gotten by the clicking of a mouse, curves are fitted with higher accuracy so as to design automatically and an arrangement record method in their drawing order is established. They can quickly deal with a large number of supplied performance curve for model turbines to meet the needs of modern individualization. In addition, the method is also suitable for the data collection of other kinds of pictures.

**Key words**: Characteristic curve

Computer-aided data collection

Numerical simulation Operation curve

作者简介: 张蓉生, 男, 1955 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为流体机械性能与最优化和微小气泡的生成机理及测量, 发表论文 50 余篇。

E-mail: rongsheng\_zhang@mail.edu.cn