

混流水轮机汽蚀特性的统计分析

⑩

57-62

赵林明

(动力系)

TV136.1

TK733.0

~~1774~~

[提 要] 本文应用灰色关联分析和多元统计分析方法,对混流水轮机汽蚀特性进行了统计分析,得到了较为满意的结果。

[关键词] 混流式水轮机,汽蚀特性,灰色关联分析,多元统计分析

前 言

对水轮机的汽蚀性能进行比较准确的估算,无疑对水轮机的设计、运行是有重要意义的。在一些文献中,介绍了水轮机的某特征汽蚀系数随比转速 n 的变化规律^[1,2],但这种方法不能全面反映水轮机各运行工况的汽蚀特性,也没有直接与水轮机过流部件的几何参数建立联系。本文探讨了用灰色关联分析和多元统计分析的方法,以我国型谱中给出的混流水轮机^[3]为样本,对水轮机汽蚀特性进行统计分析,得到了较为满意的结果。

1 混流水轮机汽蚀特性的一般回归分析

根据我国型谱中给出的混流水轮机的特性,将型谱中除美式机组外的混流水轮机特征转速 n ,与特征汽蚀系数 σ 的值列于表1中。这里的特征汽蚀系数 σ 是指:取最优单位转速 n_{10} ,单位流量 Q_1 为最优单位流量 Q_{10} 和限制单位流量 Q_1^* 的均值,即 $Q_1 = 0.5(Q_{10} + Q_1^*)$ 时, $\sigma = f(Q_1, n_1)$ 上查取的 σ 值,这样做兼顾了最优工况和限制工况两种典型的工况,具有典型代表意义。

表1 水轮机的汽蚀特性数据

特征比转速 n (m·kW)	100	120	160	180	200	220	240
特征汽蚀系数 σ	0.030	0.053	0.058	0.078	0.087	0.123	0.180

为计算方便,取 $t = n_i/100$,由表1中数据绘制 $\sigma = f(t)$ 的离散点图如图1所示。根据图1中 $\sigma = f(t)$ 的变化规律,分别建立线性回归模型

$$\sigma = a_1 + b_1 t \quad (1)$$

和指数回归模型

$$\sigma = a_2 + b_2 t^{a_2} \quad (2)$$

对表1中数据 (t, σ) ($i=1, 2, \dots, 7$)进行回归分析。

⑩ 本文于1992年9月收到。

采用文献[4]中给出方法,求出式(1)、(2)中回归系数 a_1, b_1, a_2, b_2 和 γ 值,最后得回归式为

$$\sigma = -6.9920 \times 10^{-2} + 9.0036 \times 10^{-2}t \quad (3)$$

和
$$\sigma = 3.6945 \times 10^{-2} + 4.4260 \times 10^{-4}e^{2.40t} \quad (4)$$

相应曲线也于图1中。计算得式(3)的相关系数 $R=0.8634$,式(4)的 $R=0.9905$ 。由图1中曲线及 R 值可以看出,指数模型(2)的回归效果好,因此,在下文的灰色关联分析中,采用指数模型。

2 混流水轮机汽蚀特性的灰色关联分析

2.1 灰色关联分析的方法

根据文献[5,6]中有关内容,将多序列灰色关联分析的方法作一简介。

设有序基本序列 $x_j(j=1,2,\dots,p)$ 与基本序列有关的状态序列为 $x_i(i=2,3,\dots,q;j=1,2,\dots,p)$,作映射 $x_i \rightarrow u_i$,这里

$$u_i = x_i/x_1 \quad (5)$$

定义绝对差 Δ_{ij} 为

$$\Delta_{ij} = |u_{ij} - u_{i1}| \quad (6)$$

并设

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_j \Delta_{ij}, \quad \Delta_{\min} = \min_i \min_j \Delta_{ij}$$

则关联度系数 ξ_{ij} 为

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \rho \Delta_{\max}} \quad (7)$$

最后得关联度 r_j 为

$$r_j = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \xi_{ij} \quad (j=1,2,\dots,p) \quad (8)$$

再由式

$$Z_j = 1/r_j \quad (9)$$

作映射 $r_j \rightarrow Z_j$,这样就得到了新的序列 Z_j 。

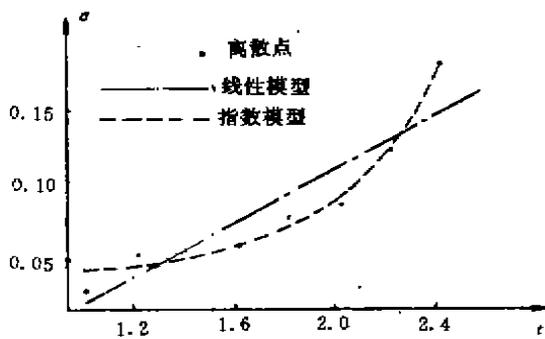


图1 $\sigma=f(t)$ 曲线

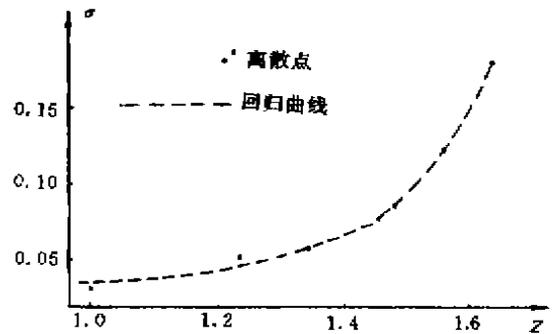


图2 $\sigma=f(Z)$ 曲线

若与 X_1 存在对应关系的序列为 $M_j (j=1, 2, \dots, p)$ 此时, 就可以对数据 (Z_j, M_j) 进行回归分析。在分析过程中, 可以调整式(7)中的分辨系数 $\rho (0 \leq \rho \leq 1)$, 以使 $M = f(Z)$ 的规律性更加明显。

2.2 在灰色关联分析的基础上对水轮机汽蚀系数进行回归分析

取水轮机的特征比转速 n 为基本序列, 模型水轮机的一些几何尺寸为状态序列, 水轮机特征汽蚀系数 σ 为序列 M , 然后进行关联分析。具体过程为, 设 x_1 为 l , x_2 为模型水轮机转轮叶片轴面投影图上上冠流线的长度 l 与转轮标称直径 D_1 之比 l/D_1 , x_3 为导水机构活动导叶相对高度 b_0/D_1 , x_4 为转轮出口直径 D_2 与 D_1 的比值, x_5 为尾水管高度与长度之比 h/l 。由型谱中查得 $x_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 列于表 2 中, 取 $\rho=0.55$, 按照式(5)到式(9)对表中序列进行关联分析, 得到序列 Z_j 出列于表 2 中。

由表 2 中数据绘制 $\sigma = f(Z)$ 离散点图如图 2 所示。仍用指数函数回归模型对数据 (Z_j, σ_j) 进行回归分析, 以计算得

$$\sigma = 3.4531 \times 10^{-2} + 3.2280 \times 10^{-6} e^{6.45Z} \quad (10)$$

该模型的相关系数 $R=0.9955$, 相应曲线也绘于图 2 中

从图 1 和图 2 中可发现, 考虑转轮几何形状, 以灰色关联分析处理后, σ 随变量的变化规律明显增强, 模型(10)的回归精度得以提高。

表 2 混流水轮机的有关数据

序 号	1	2	3	4	5	6	7
x_1	1.0	1.2	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
x_2	0.3125	0.2500	0.2195	0.1628	0.1667	0.2000	0.2069
x_3	0.100	0.120	0.224	0.200	0.200	0.250	0.365
x_4	0.700	0.762	1.035	1.060	1.084	1.082	1.078
x_5	0.600	0.6106	0.7780	0.5778	0.5778	0.7780	0.7780
Z	1.0000	1.2346	1.3397	1.4613	1.4884	1.5567	1.6359

3 混流水轮机汽蚀特性的多元回归分析

3.1 统计样本的选取

水轮机运行的大致范围是最优工况和限制工况间的区域, 因此, 选取各种混流水轮机在 $Q_1 \sim n_1$ 坐标系中的特性曲线上的 9 点作为统计样本, 这 9 点的选取是按以下标准进行的, 设 $Q = Q_1/Q_{10}, n = n_1/n_{10}$, 取 $Q=1.0, 1.1, 1.2; n=0.9, 1.0, 1.1$ 相应的 9 个工况点作为统计样本, 对每一对 (Q, n) , 分别建立多元线性回归式子

$$\sigma = c_0 + \sum_{i=1}^p c_i x_i \quad (11)$$

对汽蚀系数 σ 进行回归分析。式(11)中, c_i 为回归系数, x_i 为回归因子, 回归因子的选取, 对统计结果有很大的影响, 下面介绍回归因子的选取过程。

3.2 回归因子的选取

下面以 $Q=1.1, n=1.0$ 这一工况点为例, 介绍回归因子的选取方法。查取型谱中混流水轮机在这一工况点时的特性数据, 如表 3 中所列。

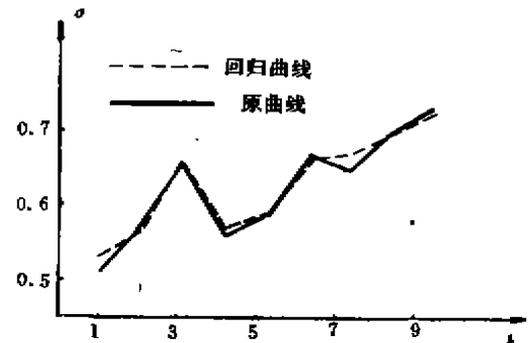
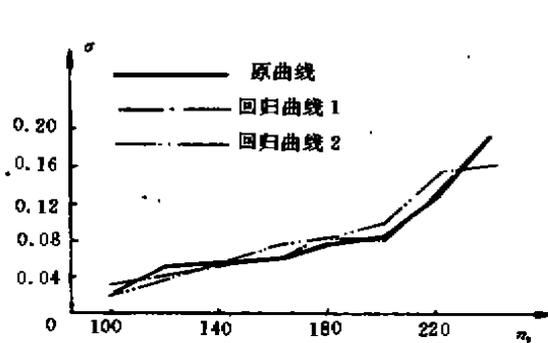
表3 水轮机的工作参数($Q=1.1, n=1.0$)

	1	2	3	4	5	6	7
特征比转速 n_s (m·kW)	100	120	160	180	200	220	210
单位流量 Q_1 (m ³ /s)	0.248	0.352	0.638	0.792	0.880	1.100	1.210
单位转速 n_1 (r/min)	61.5	62.5	67.5	67.0	68.0	70.0	72.0
水轮机效率 η	0.899	0.900	0.903	0.913	0.912	0.902	0.908
水轮机汽蚀系数 σ	0.022	0.053	0.059	0.078	0.085	0.127	0.195

以 Q_1, n_1, η 作为回归因子, 以回归分析后得回归结果, 如图3中回归曲线2(双点划线), 相应的相关系数 $R=0.9275$ 。

若定义 x_1 为选取工况点的比转速除以100, 即取 $x_1=3.132n_1 \sqrt{Q_1 \eta} / 100$, 另外取 x_2, x_3, x_4 及 x_5 为上文中给出的表示几何尺寸的参数。选取其中 x_3, x_4 和 x_5 作为回归因子作回归分析, 计算得 $R=0.9914$, 回归曲线如图3中回归曲线1(单点划线)。通过图中曲线的比较以及 R 值的大小比较不难看出, 同样是3个回归因子, 选用几何参数作回归因子回归结果要好。

经以上分析比较, 最终选用 $x_j (j=1, 2, \dots, 5)$ 作为式(11)中的回归因子, 其中 x_1 看作动态因子, 该因子反映了水轮机的工作状态, x_2 至 x_5 看作静态因子, 这些因子反映了水轮机的几何特征。

图3 回归结果比较($Q=1.1, n=1.0$) 图4 HL160水轮机汽蚀特性回归分析结果

3.3 回归分析的精度检验

对表3中给出的各水轮机的 σ 进行线性回归计算, 得到回归式为

$$\begin{aligned} \sigma = & 0.243035 + 0.147983x_1 - 0.373458x_2 + 0.264240x_3 - \\ & - 0.428661x_4 + 0.0578049x_5 \end{aligned} \quad (12)$$

该式相应的相关系数 R 达1.0000, 回归值列于表4中, 最大相对误差为0.45%, 说明式(12)的回归精度相当高。

表 4 回归结果比较($Q = 1.1, n = 1.0$)

原 σ 值	0.022	0.053	0.059	0.078	0.085	0.127	0.195
式(12)的 σ 回归值	0.0219	0.0531	0.0591	0.0781	0.0847	0.1273	0.1949
相对误差(%)	-0.45	0.19	0.317	0.13	-0.35	0.16	-0.05

表 5 回归结果精度检查

$R \backslash Q$	1.0	1.1	1.2
0.9	0.99637	0.99832	1.00000
1.0	0.99904	0.99999	0.99929
1.1	0.99395	0.99947	0.99994

对上述其余 8 个工况点的汽蚀特性进行同样的回归分析,分析结果列于表 5 中。由 R 值可以看出,回归结果呈高度显著,可供估算混流水轮机汽蚀特性时参考。

利用所得回归式子对 HL160 水轮机选取的九个工况点的 σ 进行计算,计算结果绘于图 4 中,图中, k 值是按 x_i 值大小排列的序号,图 4 表明,回归结果能够比较准确地反映水轮机的汽蚀特性。限于篇幅,其余型号水轮机的回归结果就不一一列出。

应用多元统计分析中的逐步回归分析方法,通过回归因子的显著性检验,可以使回归式子作一些简化。例如,在最优工况对时($Q=1.0, n=1.0$),舍去回归变量 x_3 ,得到只含四个回归因子的回归式子,相应的相关系数 $R=0.99873$,与表 5 中给出数据相比,仅降低 0.03%,说明舍去 x_3 后,回归结果也是可信的。

4 结 语

本文通过灰色关联分析的方法,建立了一描述混流水轮机特性和几何形状的综合指标 Z ,并给出了 $\sigma=f(Z)$ 的统计特性,可供大致了解混流式水轮机汽蚀特性时参考。这种统计分析方法与一般对 $\sigma=f(n_i)$ 的统计结果相比,具有考虑因素全面,统计结果精度高的特点。

另外,本文还给出了用多元统计方法,针对各种工况,对水轮机汽蚀特性进行统计分析的过程和部分结果,结果表明,这种统计方法是行之有效的。由于资料的局限性,本文所得的一些计算结果只是针对型谱中所列的一些机型的,同时,回归因子的选择也不全面,例如还可以考虑转轮叶片出口安放角等因素。如有条件的情况下,可以选取较多的统计样本和回归因子,按照文中给出方法做进一步的工作。

参 考 文 献

- 1 A. Luqarosi and A. Massa. *Kaplanturbine, design trends on the last decade, Water Power, 1988, No. 5*
- 2 A. Luqarosi and A. Massa. *Designing Francis turbine, trends on the last decade, Water Power, 1987, No. 11*

- 3 水电站机电设计手册(水力机械),水利电力出版社,1983
- 4 周纪芑. 实用回归分析方法,上海科技出版社,1990
- 5 邓聚奇. 灰色系统基本方法,武汉华中理工大学出版社,1987
- 6 张恒奇. 灰色模型中白化值的多因素关联构成,系统工程理论与实践,1992, No. 4

Statistic Analysis of Cavitation Characteristics of Francis Turbines

Zhao Linming

Abstract

In this paper, the cavitation characteristics of Francis turbines is analyzed by using Grey associated analysis method and multiple statistic analysis method. The result obtained is satisfactory.

Keywords: Francis turbine, Cavitation characteristics, Grey associated analysis, Multiple statistic analysis