

# 离心泵关死点扬程的计算及修正

刘厚林, 吴贤芳<sup>\*</sup>, 谈明高

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

**摘要:** 离心泵关死点扬程的计算一直是一个难题。该文详细总结了目前各种离心泵关死点扬程的计算方法并给出了各种计算方法准确的数学表达式。通过对 34 台离心泵的实际计算与比较, 分析了各种计算方法的精度和适用范围。分析结果表明, Euler 方法计算的是离心泵关死点扬程的理论值, 计算偏差大于 60%; Throne 计算方法的计算精度最高, 平均偏差为 4.29%; Stirling 计算方法的精度最低, 平均偏差为 11.30%。以比转数作为自变量, 采用非线性回归分析法对离心泵关死点扬程的 7 种计算方法分别进行了修正并给出了修正系数数学表达式和置信度。实例计算表明: 修正后的各关死点扬程计算公式精度明显提高, 适用范围更广, 都能够为工程实际所应用。

**关键词:** 离心泵, 关死点, 扬程, 回归分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.09.009

中图分类号: TH311

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-09-0043-05

刘厚林, 吴贤芳, 谈明高. 离心泵关死点扬程的计算及修正[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 43-47.

Liu Houlin, Wu Xianfang, Tan Minggao. Head calculation and amendments for centrifugal pumps at shut off conditon[J].

Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 43-47. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

一直以来, 国内外对离心泵关死点性能的研究都比较少<sup>[1]</sup>。当前, 随着经济的发展很多离心泵的设计都对关死点性能有明确的要求, 比如核电用泵和以绿色能源为动力的太阳能泵以及风能泵<sup>[2-4]</sup>。通过关死点扬程的预测可以让设计者在设计时能够控制泵性能曲线的形状, 从而可以判断泵是否能够稳定运行<sup>[5-7]</sup>; 通过减小关死功率可以提高太阳能泵或风能泵的工作效率, 使其早抽水, 多抽水<sup>[8]</sup>。因此, 对离心泵关死点扬程和功率的研究越来越受到研究人员的重视。国内在关死点理论分析、试验测试以及数值计算等方面至今仍基本为空白。国外 Dyson 等在这方面做了较多的工作<sup>[9-11]</sup>。文献[9]和[10]对离心泵关死点内部流动进行了数值计算并给出了此时泵内流动的诸多细节, 但没有进行试验验证。文献[11]和[12]对目前离心泵关死点扬程的计算做了一定的总结, 但两篇文献给出的关死点扬程数学计算表达式存在着一定的笔误且有部分变量未说明或交代不清, 因此无法直接应用, 大大降低了这两篇文献的参考价值。文献[13]在假定离心泵关死点内部流动规律的基础上, 应用理论推导给出了关死点扬程的计算公式。

本文首先对现有的离心泵关死点扬程计算方法进行总结, 给出各种计算方法详细准确的数学表达式。然后根据实例计算分析各个公式计算精度。最后根据试验结果应用非线性回归分析对各计算公式进行修正。

## 1 离心泵关死点扬程计算方法

目前主要有 9 种关死点扬程计算方法, 总体可以分为两类, 第一类是对欧拉方程进行修正; 第二类是分别计算各过流部件对关死点扬程的影响。

### 1) Euler 方法

假设进口没有预旋, 不考虑滑移, 当流量  $Q=0$  时, 关死点扬程  $H_{so}$  的理论值可由下式得到:

$$H_{so} = U_2 \times \left( U_2 - \frac{Q}{\psi \pi D_2 b_2 \tan \beta_2} \right) / g = U_2^2 / g \quad (1)$$

这是目前工程上最为简便的计算方法, 其计算结果为关死点扬程最大理论值。

式中,  $H_{so}$  为关死点扬程, m;  $U_2$  为叶轮出口圆周速度, m/s;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $Q$  为流量,  $m^3/s$ ;  $\psi$  为叶轮出口排挤系数;  $D_2$  为叶轮外径, m;  $b_2$  为叶片出口宽度, m;  $\beta_2$  为叶片出口宽度,  $^\circ$ 。

### 2) Stepanoff 方法

$$H_{so} = \alpha \times U_2^2 / g \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为修正系数, 取值为 0.585。

Stepanoff 并未说明 0.585 的由来, 估计应该是由统计得到的。

### 3) Peck 方法

$$H_{so} = \frac{\alpha}{2} \times U_2^2 / g \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为修正系数, 与结构有关, 对于蜗壳式离心泵取

收稿日期: 2010-11-29 修订日期: 2011-04-18

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (50825902); 国家自然科学基金 (51079062); 江苏省自然科学基金 (BK2010346); 江苏省教育厅项目 (09KJD470002)

作者简介: 刘厚林 (1971-), 男, 江苏溧水人, 研究员, 博士生导师, 主要从事泵现代设计理论与方法研究。镇江 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 212013。Email: liuhoulin@ujs.edu.cn

\*通信作者: 吴贤芳 (1980-), 女, 江苏大丰人, 博士生, 主要从事离心泵关死点能量性能和动力学特性的研究。镇江 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 212013。Email: demonwt@sohu.com

值为 1.0~1.1, 对于导叶式离心泵取值为 1.15~1.25。

该方法与 Stepanoff 方法基本一致, 都是对 Euler 方法修正, 仅是系数的微小区别, 这很有可能是统计对象和数量不同产生的差异。

#### 4) Pfleiderer 方法

$$H_{so} = \left( \frac{U_2^2}{g} \right) \left[ \sigma - \left( \frac{\psi}{2} \right) \left( \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 + \left( \frac{D_2}{D_c} \right)^2 \times \sigma^2 \right) \right] \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{1}{1+P} \quad P = 2 \times \frac{a}{z} \left( 1 + \frac{\beta_2}{60} \right) \frac{D_2^2}{D_2^2 - D_1^2}$$

式中,  $\psi$  为修正系数, 与水力效率和流量有关;  $a$  为经验系数, 蜗壳式离心泵取 0.77;  $z$  为叶片数;  $D_1$  为叶片进口直径;  $D_c$  为蜗壳隔舌直径。

#### 5) Throne 方法

$$H_{so} = \left( \frac{U_2^2}{g} \right) \left[ \sigma - \left( \frac{V_{m1}}{2U_1} \right) \left( \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 + \left( \frac{D_2}{D_c} \right)^2 \times \sigma^2 \right) \right] \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{1}{1+P} \quad P = 2 \times \frac{a}{z} \left( 1 + \frac{\beta_2}{60} \right) \frac{D_2^2}{D_2^2 - D_1^2}$$

式中,  $U_1$  为叶轮进口圆周速度, m/s;  $V_{m1}$  为叶轮进口轴面速度, m/s。

从上式可以看出, Throne 方法与 Pfleiderer 方法基本一样, 其改进之处是给出了修正系数  $\psi$  的取值, 从而增加了公式的实用性。

#### 6) Patel 方法

$$H_{so} = \left( 0.65 - 0.00344 \times \frac{n_s}{3.65} \right) \times \frac{U_2^2}{g} \quad (6)$$

式中,  $n_s$  为比转数。

Patel 通过实验给出了欧拉方程的修正系数, 该系数与比转数有关。

#### 7) Chiappe 方法

$$H_{so} = k \times \alpha \times \eta_h \times U_2^2 / g \quad (7)$$

式中,  $k$  为常数, 取值范围 0.8~0.72;  $\alpha$  为修正系数, 通过 Chiappe 图表查得;  $\eta_h$  为水力效率, Chiappe 假定为常数 0.9。

#### 8) Stirling 方法

Stirling 认为关死点扬程由 3 部分组成, 分别是叶轮、蜗壳以及进口回流, 因此关死点扬程的计算应体现这三者的影响。

$$H_{soimp} = \frac{U_2^2 - 0.5 \times U_1^2}{2g} \quad (8)$$

$$H_{sovol} = \frac{U_2^2}{2g} \left( \sigma - \frac{\phi_R}{\tan(\beta_2 - \delta_A)} \right) \phi_R Y \quad (9)$$

$$H_{so} = H_{soimp} + H_{sovol} \quad (10)$$

式中,  $H_{soimp}$  为叶轮关死点扬程, m;  $H_{sovol}$  为蜗壳关死点

扬程, m;  $\sigma$  为威斯奈(Weisner)滑移系数,  $\sigma = 1 - \frac{\sqrt{\sin \beta_2}}{z^{0.7}}$ ;

$\phi_R$  为回流影响因子,  $\phi_R = -0.2331 \times D_1 / D_2 + 0.1952$ ;  $\beta_2$  为叶片出口角, °;  $z$  为叶片数;  $\delta_A$  为液流偏角, °,

$\delta_A = 1.75 \times 10^{-3} \times P_2 \beta_2 / C_d$ ;  $P_2$  为叶片出口间距;  $C_d$  为圆盘损失计算系数, 取为  $1.21 \times 10^{-3}$ ;  $Y$  为面积比,  $Y = F_8 / (\pi D_2 b_2)$ , 其中  $F_8$  为蜗壳喉部面积。

#### 9) Frost 方法

Frost 通过假定叶轮和蜗壳内的速度分布, 从理论上给出了离心泵关死点扬程计算表达式。

$$H_{soimp} = \frac{U_2^2}{2g} \left( 1 - \frac{D_1^2}{D_2^2} \right) \quad (11)$$

$$H_{sovol} = \frac{1}{g} \left( \frac{\omega r_2}{r_m - r_2} \right)^2 \left( r_m^2 \ln \left( \frac{r_4}{r_2} \right) - 2r_m (r_4 - r_2) + \frac{r_4^2 - r_2^2}{2} \right) \quad (12)$$

$$H_{so} = H_{soimp} + H_{sovol} \quad (13)$$

式中,  $\omega$  为角速度, rad/s;  $r_2$  为叶轮出口半径, m;  $r_4$  为蜗壳出口段外壁半径, 按第八断面处取值, m;  $r_m$  为蜗壳平均半径,  $r_m = 0.5 \times (r_4 + r_c)$ 。

对上述 9 个计算公式仔细分析可知, Pfleiderer 公式中由于经验系数  $\psi$  的取值难以确定, 从而使其应用受到限制; Chiappe 方法由于需要查图表确定修正系数  $\alpha$ , 使得其应用也极为不便。因此, 下面就以另外 7 个计算公式作为分析对象。

## 2 各计算方法的精度分析

为了分析这 7 种关死点扬程计算方法的精度, 收集了 34 个具有一定代表性的离心泵水力模型作为实例计算对象。这 34 个模型的比转数范围在 23 和 260 之间。限于篇幅, 这里仅给出了其中 10 个模型的试验结果与几何参数, 见表 1。本文各表中各符号的含义与第一部分各公式中符号含义相同。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

No	$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	$H/m$	$n/(r \cdot min^{-1})$	$n_s$	$H_{so}/m$	$z$	$D_1/m$	$D_2/m$	$\beta_2/^\circ$	$b_2/m$	$r_c/m$	$r_4/m$	$F_8/m^2$
1	12.50	80.78	2 900	23.1	84.38	4	0.052	0.242	26	0.004	0.127	0.140	0.000425
2	23.15	72.00	2 900	34.3	82.25	4	0.045	0.248	34	0.005	0.130	0.139	0.000363
3	24.75	51.06	2 900	45.9	60.40	5	0.050	0.209	34	0.004	0.111	0.126	0.000489
4	37.20	46.08	2 900	60.8	51.33	5	0.054	0.194	38	0.007	0.109	0.130	0.000826
5	32.40	30.00	2 900	78.3	33.21	6	0.052	0.157	33	0.010	0.089	0.112	0.001045
6	100.00	55.30	2 900	87.0	60.97	6	0.098	0.215	27	0.014	0.119	0.157	0.002584
7	50.00	20.54	2 900	129.3	26.07	6	0.076	0.137	30	0.014	0.077	0.118	0.002202
8	317.50	19.80	1 450	167.5	21.15	6	0.160	0.265	30	0.030	0.151	0.277	0.018087
9	100.00	18.78	2 900	195.6	23.75	6	0.089	0.140	24	0.027	0.081	0.140	0.003989
10	400.00	12.81	1 450	260.5	14.08	5	0.188	0.244	28	0.058	0.141	0.290	0.026980

由于计算结果数据繁多，二维曲线需要绘制多张曲线图才能清楚显示计算偏差，故以三维曲线图的形式给出各公式的计算偏差，如图 1 所示。图中  $x$  轴代表比转数， $z$  轴代表计算偏差，单位为百分比。 $y$  轴是为了使曲线看得更清楚而添加的一个坐标轴，每一条曲线分别在一个  $y$  的等值面内，具体见图中标识。

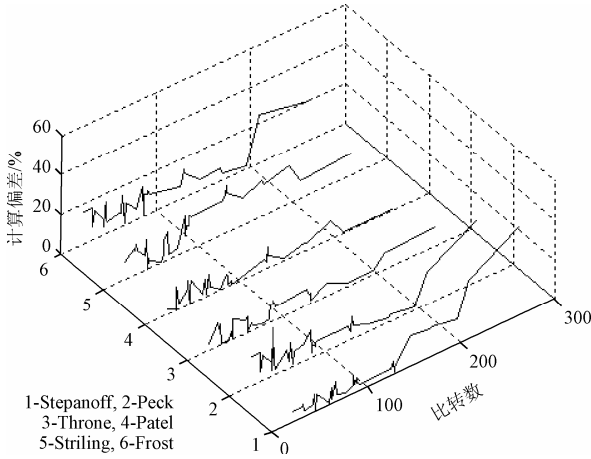


图 1 不同计算方法的计算偏差  
Fig.1 Deviation of different calculating methods

另外，由于 Euler 方法只是计算关死点扬程的最大理论值，其计算偏差必然很大。因此图 1 中没有给出 Euler 方法的计算偏差曲线。实际计算也表明，Euler 方法的计算偏差的确很大，最小值也在 60% 以上，故工程中不宜采用此法预测离心泵关死点扬程。

总体分析计算结果可知，Stepanoff 方法在比转速大于 130 后偏差就会增大，达到 10% 以上；比转速小于 130 时，该方法的偏差基本都在 5% 以内。当比转数大于 200 后，Stepanoff 方法、Euler 方法、Peck 方法和 Frost 方法的计算偏差明显增大很多。与这 4 种方法相比，Throne 方法、Patel 方法和 Stirling 方法在整个计算范围内的偏差浮动都比较小。

表 2 计算偏差

Table 2 Calculation discrepancy

计算方法	最大偏差/%	平均偏差/%	最小偏差/%
Euler	149.50	81.56	62.61
Stepanoff	45.94	7.63	0.56
Peck	30.97	8.51	1.09
Throne	11.69	4.89	0.11
Patel	12.67	4.92	0.12
Stirling	23.76	11.30	0.03
Frost	24.48	9.72	0.10

表 2 给出了各种计算方法的最高偏差、平均偏差和最低偏差。通过平均偏差可以知道，各方法的计算精度由高到低依次为 Throne 方法、Patel 方法、Stepanoff 方法、Peck 方法、Frost 方法、Stirling 方法、Euler 方法。各种方法的计算偏差表明所有方法都需要一定的修正才能应用于实际计算。

### 3 关死点扬程计算的修正

#### 3.1 修正方法

上文已应用各个公式对收集到的 34 个模型的关死点扬程进行了计算，并得到了各公式相应的计算结果。对于所研究的 7 个公式中任一公式，都有一组 34 个数据，用这一组数据去除每个的模型试验结果得到 34 个比值。由于比转数是离心泵综合性判别标准，故以比转数作为自变量对这 34 个比值进行非线性回归分析<sup>[14]</sup>，得到一个精确的数学表达式，即每个公式的修正系数。

图 2 给出了 Euler 方法修正系数回归分析用的数据点分布及其回归分析曲线，其回归分析结果为式 (15)。

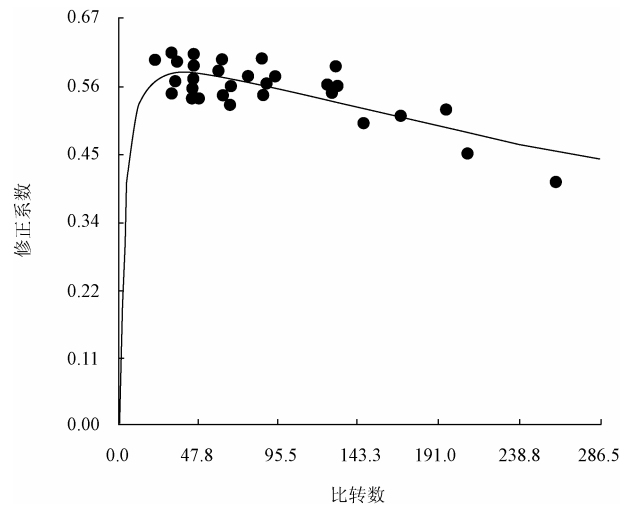


图 2 Euler 方法数据点及回归曲线  
Fig.2 Data and regression analysis curve for Euler method

修正后关死点扬程计算方法如下式所示。

$$H'_{so} = k \times H_{so} \quad (14)$$

式中， $k$  为修正系数； $H'_{so}$  为修正的关死点计算扬程。

#### 3.2 修正结果

1) Euler 公式的修正

$$k_c = \frac{0.00013 + 0.2355 \times n_s}{1 + 0.3558 \times n_s + 0.00061 \times n_s^2} \quad \gamma = 0.9653 \quad (15)$$

2) Stepanoff 公式的修正

$$k_{ste} = \frac{0.00017 + 0.4879 \times n_s}{1 + 0.4358 \times n_s + 0.00072 \times n_s^2} \quad \gamma = 0.9639 \quad (16)$$

3) Peck 公式的修正

$$k_{pe} = \frac{0.00015 + 0.5507 \times n_s}{1 + 0.4362 \times n_s + 0.00077 \times n_s^2} \quad \gamma = 0.9520 \quad (17)$$

4) Throne 公式的修正

$$k_t = \frac{n_s}{n_s + 0.32 \times \left(\frac{n_s}{100}\right)^2} \quad \gamma = 0.9429 \quad (18)$$

5) Patel 公式的修正

$$k_{pa} = \frac{1}{28.11 - 26.827 \times n_s^{0.00232}} \quad \gamma = 0.9641 \quad (19)$$

## 6) Stirling 公式的修正

$$k_{\text{sti}} = \frac{0.014 + 0.0868 \times n_s}{1 + 0.0653 \times n_s + 0.1485 \times \left(\frac{n_s}{100}\right)^2} \quad \gamma = 0.9345 \quad (20)$$

## 7) Frost 公式修正

$$k_r = \frac{0.00024 + 0.509 \times n_s}{1 + 0.401 \times n_s + 0.000656 \times n_s^2} \quad \gamma = 0.9469 \quad (21)$$

## 4 计算实例

选用 5 台不同比转数的离心泵来检验上文的修正系数的精度, 各模型参数见表 3。

表 4 给出了修正后各公式的计算结果。由表 4 可知: 所有方法对这 5 个模型关死点扬程的计算偏差都在 5% 以内。对于模型 1、2、3、4 和 5, 计算偏差最大的方法依

次是 Frost 方法、Throne 方法、Stepanoff 方法、Throne 方法和 Frost 方法, 其值依次为 3.38%、4.57%、4.26%、1.24% 和 4.77%; 计算偏差最小的方法依次是 Throne 方法、Frost 方法、Throne 方法、Stepanoff 方法 (Euler 方法) 和 Patel 方法, 其值依次是 0.002%、0.46%、0.46%、0.20% 和 2.71%。

纵向计算可知: Euler 方法平均偏差为 2.93%; Stepanoff 方法平均偏差为 2.88%; Peck 方法平均偏差为 2.45%; Throne 方法平均偏差为 2.04%; Patel 方法平均偏差为 2.50%; Stirling 方法平均偏差为 2.65%; Frost 方法平均偏差为 2.39%。

由此可见, 修正后的 7 个关死点扬程公式计算精度明显提升, 精度提高最大的是 Euler 方法, 精度提高最小的是 Throne 方法。

表 3 计算模型参数

Table 3 Calculation model parameters

No	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	$H/\text{m}$	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$n_s$	$H_{\text{so}}/\text{m}$	$z$	$D_1/\text{m}$	$D_2/\text{m}$	$\beta_2/^\circ$	$b_2/\text{m}$	$r_c/\text{m}$	$r_d/\text{m}$	$F_g/\text{m}^2$
1	32.40	87.53	2 950	35.70	101.03	5	0.065	0.263	32	0.005	0.132	0.152	0.000340
2	20.00	30.80	2 900	60.34	36.72	6	0.052	0.162	32.0	0.007	0.095	0.109	0.000701
3	108.00	15.91	1 500	119.04	19.04	6	0.116	0.232	28.0	0.0215	0.125	0.193	0.004418
4	162.54	12.45	1 450	169.67	14.63	6	0.132	0.222	31.5	0.030	0.125	0.213	0.008861
5	285.00	14.32	1 485	207.17	17.40	6	0.157	0.246	25	0.039	0.131	0.275	0.017450

表 4 计算结果

Table 4 Calculation results

No	Euler		Stepanoff		Peck		Throne		Patel		Stirling		Frost	
	$H_{\text{so}}/\text{m}$	$\Delta/\%$	$H_{\text{so}}/\text{m}$	$\Delta/\%$	$H_{\text{so}}/\text{m}$	$\Delta/\%$	$H_{\text{so}}/\text{m}$	$\Delta/\%$	$H_{\text{so}}/\text{m}$	$\Delta/\%$	$H_{\text{so}}/\text{m}$	$\Delta/\%$	$H_{\text{so}}/\text{m}$	$\Delta/\%$
1	97.68	3.31	98.09	2.91	98.91	2.09	101.03	0.002	97.86	3.14	104.96	3.88	97.62	3.38
2	35.50	3.32	35.51	3.30	35.72	2.72	38.40	4.570	35.64	2.95	36.17	1.48	36.55	0.46
3	18.25	4.17	18.23	4.26	18.25	4.17	19.13	0.460	18.50	2.84	18.51	2.80	18.62	2.19
4	14.66	0.20	14.66	0.20	14.62	0.08	14.81	1.240	14.76	0.88	14.78	1.05	14.80	1.16
5	18.03	3.65	18.05	3.73	17.95	3.19	18.09	3.950	17.87	2.71	18.10	4.02	18.23	4.77

## 5 结论

1) Euler 方法的计算偏差大于 60%, 不能应用于工程实际; Stepanoff 方法在比转数小于 130 时, 计算偏差小于 5%; Throne 方法的计算精度最高, 平均偏差小于 5%。

2) 现有的 7 种离心泵关死点扬程计算方法的精度由高到低依次为 Throne、Frost、Peck、Patel、Stirling、Stepanoff、Euler。

3) 用回归分析的方法给出了各关死点扬程的计算方法的修正系数, 较大地提高了离心泵关死点扬程的计算精度。

## [参 考 文 献]

- [1] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 宇航出版社, 2011.
- [2] Short T D, Oldach R. Solar powered water pumps: the past, the present - and the future[J]. Transactions of the ASME, 2003, 125(1): 76-82.
- [3] 郑诗程, 苏建徽, 沈玉梁, 等. 具有 TMPPT 功能的数字

式光伏水泵系统的设计[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 270-274.

Zheng Shicheng, Su Jianhui, Sheng Yuliang, et al. Design of digital photovoltaic pumping system with the function of true maximum power point tracking[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineerin, 2004, 20(5): 270-274. (in Chinese with English abstract)

- [4] 袁寿其, 付强, 朱荣生, 等. 核电站离心式上充泵多工况水力设计[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(3): 185-189. Yuan Shouqi, Fu Qiang, Zhu Rongsheng. Multi-operating-condition hydraulic design of centrifugal charging pump for nuclear power plant[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(3): 185-189. (in Chinese with English abstract)
- [5] Felix A M, Peter H, Philippe D. CFD calculation of a mixed flow pump characteristic from shutoff to maximum flow[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 798-802.
- [6] Throne E W. Head and power at closed valve[C]// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Conference on Part-load Pumping Operation, Control and Behaviour, 1988,

- London, England, 7—13.
- [7] Stirling T E. Analysis of the design of two pumps using NEL methods[C]// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Conference on Centrifugal Pump-Hydraulic Design, 1982, London, England, 55—73.
- [8] Kala M, Steven F, Sadrul U. Solar Photovoltaic Water Pumping for Remote Locations[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(2): 472—487.
- [9] Dyson G, Teixeira J. Investigation of closed valve operation using computational fluid dynamics[C]// Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, August 2—5, 2009, Vail, Colorado, USA.
- [10] Dyson G, Teixeira J A, Ivey P C. Closed valve flow field investigation using computational fluid dynamics[C]// Proceedings of the Second International Symposium on Centrifugal Pumps: The State of the Art and New Developments, September 22, 2004, London, United kingdom, 1—16.
- [11] Dyson G. A Review of closed valve head prediction methods for centrifugal pumps[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2002, 216(4): 329—337.
- [12] Newton T M. Rotor-stator Interaction in Radial Flow Pumps and Fans at Shut-Off Conditions[D]. Newcastle: Newcastle University, 1998.
- [13] Frost T H, Nilsen E. Shut-off head of centrifugal pumps and fans[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 1991, 205(3): 217—223.
- [14] 印凡成. 概率论与数理统计[M]. 南京: 河海大学出版社, 2004.

## Head calculation and amendments for centrifugal pumps at shut off condition

Liu Houlin, Wu Xianfang, Tan Minggao

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** How to calculate head of the centrifugal pump at shut off condition has been a difficult problem. The existing methods to compute head of centrifugal pump at shut off condition and their detail formula were introduced. Based on the practical calculation of 34 centrifugal pumps, the precision and application range of all methods were analyzed. The analysis indicates that the result of Euler method is theoretical head of centrifugal pump at shut off condition and its deviation is more than 60%. The precision of Throne method is the highest and its average deviation is 4.29%. The precision of Stirling method is the lowest and its average deviation is 11.3%. The specific speed was chosen as independent variable and non-linearity regression analysis was used to amend the seven methods. The revision formula and confidence parameters were presented. At last, 5 centrifugal pumps were chosen to check up the regression analysis results and the practical application indicates that the precision of the modified formula is improved obviously and can meet the engineering requirement.

**Key words:** centrifugal pumps, shut off condition, head, regression analysis