

充水式潜水电机转子水磨耗的计算方法

王灵沼

(原天津市电机总厂, 天津 300201)

摘要: 充水式潜水电机转子水磨耗占电机机械损耗的绝大部分, 但至今还没有比较简单实用的计算方法。在理论分析和大量试验的基础上, 找出了影响转子水磨耗的主要因素, 研究、总结了比较实用的转子水磨耗的计算方法并在设计和生产中得到了验证和应用。

关键词: 充水式潜水电机; 水磨耗; 明渠水流; 圆盘摩擦因数; 水力半径; 湿周

中图分类号: TM 303 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)04-0092-04

Calculation Method of Water Abrasion of the Rotor in Water-Filled Submersible Motor

WANG Lingzhao

(Original Tianjin Electronic Motor General Factory, Tianjin 300201, China)

Abstract: Water abrasion of the rotor in water-filled submersible motor takes majority of mechanical loss of the motor. However, there is not a simple and practical method to calculate the water abrasion. Based on theoretical analysis and a large number of experiments, the main factors affecting water abrasion of the rotor were studied, and the calculation method for water abrasion of the rotor was proposed. This method was verified and employed in practical design and production.

Key words: water-filled submersible motor; water abrasion; open channel flow; disc friction coefficient; hydraulic radius; wetted perimeter

0 引言

充水式潜水电机的转子水磨耗约占电机机械损耗的 60%~90%, 而机械损耗在电磁计算程序中必须人工输入, 因此准确地计算转子的水磨耗对电机性能设计具有重要的作用。目前普遍采用的水磨耗计算公式中的摩擦因数 K 值^[1-2], 在不同的文献中差别较大, 文献[3]给出了较大的 K 值范围, 但对取值的方法和依据却没有作明确的规定, 需要设计人员自行选取, 因此该计算方法也就失去了实用价值。文献[4]对转子水磨耗也作了一些研究探索, 但是由于考虑的因素过多, 方法极其繁琐, 而且仅对个别产品进行了验证, 因此适用范围较窄。

为了满足市场需求、赶超国际先进水平, 2014

年中国机械工业联合会对 GB/T 2818—2002《井用潜水异步电动机》进行了修订。2014 版国标不但增加了较多的新机座号, 而且同一机座号中的单机最大功率比 2002 版国标增大 2~3 倍, 因而电机铁心长度必须加长, 水磨耗也必然增大。因此, 计算不同机座号、不同功率电机的转子水磨耗成为了亟待解决的研究课题。

本文结合理论分析和已有的试验结果, 找出了影响充水式潜水电机转子水磨耗的主要因素, 提出了实用的计算方法, 并通过实例验证了该方法。

1 问题的提出

充水式潜水电机转子水磨耗的计算公式为

$$P_{fw1} = K\rho v^3 D_2^2 \left(1 + \frac{5L}{D_2} \right) \quad (1)$$

作者简介: 王灵沼(1944—), 男, 正高级工程师, 研究方向为潜水电机的结构设计及优化、止推轴承新材料的应用。

式中: K ——圆盘摩擦因数(以下简称 K 值);

ρ ——水密度, kg/m^3 ;

v ——转子表面旋转速度, m/s ;

D_2 ——转子外径, m ;

L ——转子铁心长度, m 。

公式的推导参考文献[1]。

为了便于计算,用电机转速 n 来表示 v :

$$v = \frac{\pi D_2 n}{60} \quad (2)$$

式中: n ——电机转速, r/min 。

将式(2)代入式(1),则有:

$$P_{\text{fw1}} = K\rho \left(\frac{\pi D_2 n}{60} \right)^3 D_2^2 \left(1 + \frac{5L}{D_2} \right) \quad (3)$$

式(3)明确地反映了水磨耗与水密度、转子外径、铁心长度以及电机转速的关系。

根据 GB/T 1032—2012《三相异步电动机试验方法》规定:“空载时,电动机的转速接近同步转速,即转差率 $s \approx 0$ ”,因此可以用同步转速 n_s 替代 n 。水密度约为 $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$,代入式(3),转子水磨耗计算公式可以简化为

$$P_{\text{fw1}} \approx 0.143\,5Kn_s^3 D_2^4 (D_2 + 5L) \quad (4)$$

因为其他参数均已确定,所以 K 值的确定就成了计算的关键。

文献[1]推荐的 K 值为 1.2×10^{-6} ;文献[2]推荐的 K 值为 8.25×10^{-7} ;傅丰礼等^[3]提出:“对不同机座号、不同功率的电动机,当定子为闭口槽时,可取 $K=1.2 \sim 1.7$;当定子为半闭口槽时,可取 $K=1.5 \sim 2.0$ ”(采用的计量单位不同,导致 K 值数量级相差 10^6),虽然给出了取值范围,却没有提出取值的依据。文献[4]考虑了诸多的因素,如定转子气隙水流的雷诺数 Re 、运动黏性系数、液流速度系数、气隙宽度、转子表面绝对粗糙度、气隙相对粗糙度,再查图表后用插值法求得 K 值;文献[5]对单台高压潜水电机利用流体力学理论和摩擦学原理,建立流体场模型进行分析并与试验结果进行对比,只是得出转子水磨擦损耗与电机转速、转子表面粗糙度及冷却水流速有关的结论,但是对于究竟应该如何计算不同机座号、不同转速、不同气隙的潜水电机转子水磨耗却没有给出具体的计算方法。

影响转子水磨耗的主要因素和水磨耗的计算方法需要进行深入的研究和探讨。

2 影响转子水磨耗的主要因素

影响转子水磨耗的因素较多,不可能精确地进行计算,但是在初步设计时必须给出一个尽可能与实际水磨耗相接近的数值,然后计算总的机械损耗、输入电磁计算程序,进而算出电机的各项基本性能。

流体内部摩擦力主要来源于牛顿流体相邻两层间的分子吸引力,流体内部有相对运动时,在相邻的快层与慢层的接触面上就会产生摩擦力,称为流体内部摩擦力。牛顿内摩擦定律 $T = \mu A \frac{du}{dy}$ 表明当流体作层状流动时,流层之间的内摩擦力 T 的大小与液体的动力黏度 μ 、接触面积 A 以及垂直于流动方向上的速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 有关^[6]。

对同一电机来说,当环境温度、转速、转子铁心的长度和外径一定时, μ 、 A 、 u 也一定,因此这时电机内摩擦力就只与气隙长度有关,气隙增大,速度梯度减小,内摩擦力也减小。

需要指出的是:牛顿内摩擦定律只适用于牛顿流体处于层流时内摩擦力的计算。

流体运动的另一种形态是紊流。定、转子之间的液体不是在圆管中流动,因此属于明渠水流。

明渠水流的雷诺数 Re_c 计算公式^[6]为

$$Re_c = \frac{u_c R}{\nu} \quad (5)$$

式中: u_c ——平均流速, m/s ;

R ——水力半径, m ;

ν ——流体运动粘度, m^2/s 。

R 是明渠水流断面的特征几何尺寸,定义为

$$R = A/\chi \quad (6)$$

式中: A ——过流断面的面积, m^2 ;

χ ——过流断面与边界(如固体)表面相接触的周界,称为湿周, m 。

水力半径 R 是一个很重要的概念, R 越大越有利于过流。即,沿程损失随水力半径的增大而减小^[6]。

对潜水电机来说,过流断面的面积 $A = l\delta$ (l 为铁心长度, δ 为气隙长度)。由于潜水电机的铁心长度远大于气隙长度,所以 $\chi \approx 2L$,则水力半径

$R=A/\chi \approx L\delta/2L \approx \delta/2$, 可见电机定转子间的水力半径 R 与气隙长度密切相关: 气隙越大, 水力半径 R 也越大, 有利于过流。

综合以上的分析, 可以得出结论: 不管定转子气隙中的水流处于何种运动状态, 均是气隙增大, 阻力减小, 水磨耗也减小, 即气隙长度是影响转子水磨耗的最主要因素。

电机的空载试验数据表明: 定子槽口形式对转子水磨耗有很大的影响。例如 1218a/222 kW 和 1218a/230 kW 潜水电机的转子外径和气隙均相同, 而且采用同样的止推轴承, 但 22 kW 电机的机械损耗却大于 30 kW 电机。22 kW 电机为半开口槽、铁心长度 500 mm, 其水磨耗为 1 350 W; 30 kW 电机为闭口槽、铁心长度 660 mm, 其水磨耗为 1 230 W。因此 2 台电机转子铁心的轴向单位长度水磨耗分别为 2.7 W/mm 和 1.86 W/mm, 即半开口槽电机的转子水磨耗约是闭口槽电机的转子水磨耗的 1.45 倍。

水力模拟试验也表明摩擦因数 K 值与定子槽口形式有很大关系。以 630 kW 隔爆潜水电机为例, 转子外径为 0.326 6 m, 铁心长度 0.84 m, 气隙 1.7 mm, 同步转速 1 500 r/min, 水力模拟得到: 当定子为闭口槽时, 水磨耗为 17 kW; 当定子为开口槽时, 水磨耗增大到 25 kW, 即开口槽电机的转子水磨耗约为闭口槽电机的转子水磨耗的 1.47 倍。

由于采用不同加工方法得到的转子表面粗糙度差别不是很大, 定子槽形是闭口槽或是开口槽, 是影响转子水磨耗的另一个重要原因, 远大于转子表面粗糙度的影响。

3 摩擦因数 K 值的确定

3.1 定子闭口槽电机 K 值的确定

由于紊流的复杂性, 沿程阻力损失系数 λ 值的确定仍然只有经验和半经验的方法^[6], 因此只能通过对不同机座号、不同气隙长度的电机做大量的空载试验, 从所得的机械损耗数据计算出水磨耗: 转子水磨耗 = 机械损耗 - 滑板水磨耗 - 止推轴承摩擦损耗 - 导轴承摩擦损耗 - 泵轮功耗, 再根据式(4)求得 K 值。 K 值与电机气隙 δ 的对应表如表 1 所示。

表 1 定子闭口槽电机 K 值与气隙 δ 的对应表

δ/mm	0.55	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85	0.95
$K/10^{-6}$	1.97	1.80	1.53	1.42	1.33	1.24	1.10
δ/mm	1.00	1.10	1.30	1.55	1.65	1.70	2.00
$K/10^{-6}$	1.05	0.96	0.80	0.66	0.62	0.60	0.55

根据曲线求得 K 值与气隙 δ 的表达式为:

$$K \approx 1.055 \delta^{-1.02} \times 10^{-6} \quad (7)$$

3.2 定子开口槽电机 K 值的确定

根据前文分析及所举的示例表明, 当转子外径、铁心长度、气隙长度完全相同时, 定子开口槽电机的转子水磨耗约是闭口槽电机的 1.4 ~ 1.5 倍, 这个数值称为定子槽口水磨耗修正系数 C 。

因此, 开口槽电机的摩擦因数 K 值可以用气隙长度相同的闭口槽电机的 K 值乘以 C 求得。

4 潜水电机转子水磨耗的计算

4.1 计算公式

综上所述, 充水式潜水电机水磨耗的计算公式可表示为

$$P_{fw1} \approx 0.143 5 C K n_s^3 D_2^4 (D_2 + 5L) \quad (8)$$

式中: K ——闭口槽定子水摩擦因数;

C ——定子槽口水磨耗修正系数;

修正系数 C 的取值规则如下。

(1) 闭口槽定子: $C=1$ 。

(2) 半开口槽定子: $C=1.40 \sim 1.45$ 。定子槽数 $Z_1 \geq 24$, C 取大值; $Z_1 < 24$, 取小值。

(3) 开口槽定子: $C=1.45 \sim 1.50$ 。定子槽数 $Z_1 \geq 36$, 取大值; $Z_1 < 36$, 取小值。

4.2 计算实例

4.2.1 定子闭口槽电机转子水磨耗计算实例

示例 1: 1222a/2 100 kW 低压潜水电机。

铁心长度 $L=1.08$ m, 定子内径 $D_{i1}=0.104$ m, 定子槽形为闭口槽, 气隙长度 $\delta=0.8$ mm, 转子外径 $D_2=0.102 4$ m, 同步转速 $n_s=3 000$ r/min。

(1) 确定 K 值:

$$K \approx 1.055 \delta^{-1.02} \times 10^{-6} =$$

$$1.055 \times 0.8^{-1.02} \times 10^{-6} = 1.325 \times 10^{-6}$$

(查表 1, $\delta=0.8$ mm 时, $K=1.33 \times 10^{-6}$)。

(2) 计算转子水磨耗。

定子为闭口槽, $C=1$,

$$P_{fw1} \approx 0.143 5 C K n_s^3 D_2^4 (D_2 + 5L) = 0.143 5 \times$$

$$1 \times 1.325 \times 10^{-6} \times 3\,000^3 \times 0.102\,4^4 \times (0.102\,4 + 5 \times 1.08) \approx 3.1\text{ kW}。$$

该电机空载试验的转子水磨耗为 2.94 kW, 计算值与试验值的误差约 5.4%。

示例 2: 1166/41 900 kW 高压潜水电机。

铁心长度 $L=1.785\text{ m}$, 定子内径 $D_{i1}=0.35\text{ m}$, 定子槽形为闭口槽, 气隙长度 $\delta=1.65\text{ mm}$, 转子外径 $D_2=0.346\,7\text{ m}$, 同步转速 $n_s=1\,500\text{ r/min}$ 。

(1) 确定 K 值:

$$K \approx 1.055\delta^{-1.02} \times 10^{-6} = 1.055 \times 1.65^{-1.02} \times 10^{-6} = 0.63 \times 10^{-6}$$

(查表 1, $\delta=1.65\text{ mm}$ 时, $K=0.62 \times 10^{-6}$)。

(2) 计算转子水磨耗。

定子为闭口槽, $C=1$,

$$P_{fw1} \approx 0.143\,5CKn_s^3D_2^4(D_2 + 5L) = 0.143\,5 \times 1 \times 0.63 \times 10^{-6} \times 1\,500^3 \times 0.346\,7^4 \times (0.346\,7 + 5 \times 1.785) = 40.87\text{ kW}。$$

该电机空载试验的转子水磨耗为 42.24 kW, 计算值与试验值的误差约 3.2%。

4.2.2 定子开口槽电机转子水磨耗计算示例

示例 1: 1215a/215 kW 电机。

铁心长度 $L=0.6\text{ m}$, 定子内径 $D_{i1}=0.067\text{ m}$, 定子槽形为半开口槽, 24 槽, 气隙长度 $\delta=0.55\text{ mm}$, 转子外径 $D_2=0.065\,9\text{ m}$, 同步转速 $n_s=3\,000\text{ r/min}$ 。

(1) 确定 K 值:

$$K \approx 1.055\delta^{-1.02} \times 10^{-6} = 1.055 \times 0.55^{-1.02} \times 10^{-6} = 1.84 \times 10^{-6}$$

(查表 1, $\delta=0.55\text{ mm}$ 时, $K=1.97 \times 10^{-6}$)。

(2) 计算转子水磨耗。

定子为半开口槽, 24 槽, 取 $C=1.45$,

$$P_{fw1} \approx 0.143\,5CKn_s^3D_2^4(D_2 + 5L) = 0.143\,5 \times 1.45 \times 1.84 \times 10^{-6} \times 3\,000^3 \times 0.065\,9^4 \times (0.065\,9 + 5 \times 0.6) \approx 0.598\text{ kW}。$$

该电机空载试验的转子水磨耗为 0.64 kW, 计算值与试验值的误差约为 6.5%。

示例 2: YBQ 630 kW 电机。

铁心长度 $L=0.84\text{ m}$, 定子内径 $D_{i1}=0.33\text{ m}$,

定子槽形为开口槽, 36 槽, 气隙长度 $\delta=1.7\text{ mm}$, 转子外径 $D_2=0.326\,6\text{ m}$, 同步转速 $n_s=1\,500\text{ r/min}$ 。

(1) 确定 K 值:

$$K \approx 1.055\delta^{-1.02} \times 10^{-6} = 1.055 \times 1.7^{-1.02} \times 10^{-6} = 0.614 \times 10^{-6}$$

(查表 1, $\delta=1.7\text{ mm}$ 时, $K=0.6 \times 10^{-6}$)。

(2) 计算转子水磨耗。

定子为开口槽, 36 槽, 取 $C=1.5$,

$$P_{fw1} \approx 0.143\,5CKn_s^3D_2^4(D_2 + 5L) = 0.143\,5 \times 1.5 \times 0.614 \times 10^{-6} \times 1\,500^3 \times 0.326\,6^4 \times (0.326\,6 + 5 \times 0.84) \approx 22.97\text{ kW}。$$

电机空载试验的转子水磨耗为 22.4 kW, 计算值与试验值的误差约为 2.5%。

5 结 语

影响转子水磨耗的主要因素: 一是定转子间的气隙长度; 二是定子槽口形式是闭口槽还是开口槽。通过大量试验, 得出了闭口槽电机摩擦因数 K 值与气隙 δ 的对应曲线和计算公式, 并且确定了定子槽口水磨耗修正系数 C 值, 解决了潜水电机设计中水磨耗的计算困难问题。经过试验的验证, 本文所提确定 K 值以及转子水磨耗的计算方法简单、实用, 而且能够满足设计要求。

【参考文献】

- [1] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011: 602-604.
- [2] 查森. 叶片泵原理及水力设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 209.
- [3] 傅丰礼, 唐孝镐. 异步电动机设计手册[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007: 426.
- [4] 李惠寅. 充水式潜水电机机械耗的设计计算[J]. 中小型电机, 1992, 19(1): 18.
- [5] 鲍晓华, 盛海军, 单丽. 高压湿式潜水电机水摩擦损耗分析[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(10): 50.
- [6] 朱爱民. 流体力学基础[M]. 北京: 中国计量出版社, 2004: 14-127.

收稿日期: 2018-12-18