

大型立式轴流泵站停泵过渡过程研究

周大庆¹ ,张仁田² ,屈 波¹ ,王煦时¹ ,严亚芳¹

(1.河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098 ;2.江苏省水利勘测设计研究院 ,江苏 扬州 225009)

摘要 :根据转动机械力矩平衡方程、水量平衡方程以及泵装置系统能量守恒方程 ,结合水泵全特性 ,建立了大型立式轴流泵站停泵过渡过程数学模型 .通过数值计算 ,研究了不同的闸门运行方式及不同叶片转角对轴流泵站停泵过渡过程的影响 ,得到了不同工况条件下的水力参数和机组转速随时间的变化规律 ,从而为泵站设计及运行提供了合理的依据和建议 .

关键词 :轴流泵站 ;停泵过渡过程 ;数值计算 ;快速闸门 ;叶片转角

中图分类号 :TV675 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2006)03-0272-04

我国在南水北调东线工程及沿江滨湖地区 ,已建及待建的大型泵站工程多数为低扬程泵站 .停泵动态特性是大型轴流(混流)泵、泵装置及泵站的重要运行特性之一 ,是校核水泵装置运行安全性的重要内容 .近年来 ,在断流闭锁装置本身的运动规律、事故停泵的动态特性等方面 ,已有不少研究成果^[1-4] .本文在水量平衡方程以及泵站系统能量守恒方程的基础上 ,根据转动机械力矩平衡方程 ,结合水泵全特性 ,建立了大型立式轴流泵站停泵过渡过程数学模型 .

1 数 学 模 型

1.1 水量平衡

若为满管流 ,则

$$Q_{out} = Q_p \tag{1}$$

式中 : Q_{out} ——出水流量 ; Q_p ——水泵流量 .

若出水流量水面下降 ,则还需满足

$$(Q_p - Q_g) \Delta t = F_H \Delta h \tag{2}$$

式中 : Q_g ——闸门过水流量 ; F_H ——出水管的水平截面积 , $F_H = f(h)$,是高程 h 的函数 ; Δt ——时间间隔 , Δh ——水位下降高度 .

1.2 能量守恒

$$h_t = h_n + h_s + h_f + h_p \tag{3}$$

式中 : h_t ——装置总扬程(水头) ; h_n ——净扬程(水头) ; h_s ——惯性水头^[2] , $h_s = \frac{1}{g} \frac{dQ}{dt} \int \frac{1}{F(l)} dl$, $F(l)$ 为断面面积随流道中心变化的函数 , l 为流道中心线长度 ; h_f ——水头损失 ,出水管中水面以下的过水流道中的水头损失(包括局部损失和沿程损失) , $h_f = KQ^2$,正向流动与负向流动时 , K 方向相反 ,数值不同 ; h_p ——闸门出流施于出水管水体上的附加能量 ,以水头表示 .

1.3 转动机械力矩平衡方程^[5]

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_0 - M_1 - M_2 - M_3 \tag{4}$$

式中 : J ——机组的转动惯量 , $kg \cdot m^2$; ω ——机组断电过程中的角速度 , rad/s ; M_0 ——电机电磁力矩 , $N \cdot m$,在断电过程中 , $M_0 = 0$; M_1 ——水泵的水力矩 , $N \cdot m$,由水泵的全特性曲线得到 ,从水泵断电开始→水泵工况→

制动工况→水轮机工况→飞逸,其数值均为正,飞逸之后的制动工况、反水泵工况其值为负; M_2 ——轴承摩擦力矩, $N\cdot m$, $M_2=(G+P)\mu R$,其中 G 为电动机转子重量, P 为水泵转动部分重量与轴向水推力之和, μ 为摩擦系数, R 为轴承止推镜板的平均半径; M_3 ——电机风损力矩, $N\cdot m$,与机组转速有关,在额定转速条件下,约为电动机额定力矩的2%,当转速为正时,其值为正,当转速为负时,其值为负。

2 数值计算过程

2.1 原始资料的处理

本文所采用的数值计算方法主要依据是水泵全特性曲线及水泵运行综合特性曲线,比转速 $n_s=850\text{ r/min}$ 转轮各转角下的全特性曲线是根据已有的比转速 $n_s=950\text{ r/min}$ 和 $n_s=530\text{ r/min}$ 的全特性曲线按比转速线性插值而获得,并整理成数据库文件格式,以便于程序计算时调用。

此外,为了过渡过程计算的需要,还需建立若干条计算辅助曲线,如:流道水平面积和体积随高程变化曲线,流道断面面积随中心线变化曲线,推力轴承摩擦系数与转速的关系曲线,风损与转速的关系曲线,流道内正、反水头损失系数等^[6]。

2.2 数值计算关键步骤

数值计算关键步骤如下:(a)输入停泵前工况参数;(b)求出阻力矩,根据转动机械力矩平衡方程式,可得新的水泵转速;(c)由新的水泵转速和全特性曲线,得到在此转速下的水泵流量与扬程(水头)关系曲线;(d)求管道特性曲线,并求出它与水泵特性曲线的交点流量、扬程(水头)数值;(e)通过交点流量、扬程(水头)数值,查全特性曲线,得到新的水力矩数值。

根据运行方案,重复步骤(b)至(e),直到水力矩为零,即飞逸工况,或继续计算直至转速小于 25 r/min ,机组进行制动,计算结束。

3 工程算例

3.1 基本资料

南水北调东线工程第一期某一泵站工程,安装3100ZLQ—85轴流泵,转轮叶片转角为 0° 时,额定转速为 136.4 r/min ,单机流量 $31.5\text{ m}^3/\text{s}$,配套同步电机功率 2800 kW ,采用肘形进水流道,平直管式出水流道,带小拍门的快速闸门断流,进水口最低运行水位高程为 26.00 m ,出水池正常运行水位高程为 31.84 m 。

为考察出水闸门的运行方式及不同叶片转角对停泵过渡过程的影响,设计了以下运行方案:

a. 机组断电,叶片转角 $\varphi=0^\circ$,闸门关闭时间分别为 90 s 、 75 s 、 60 s 、 45 s 、 30 s ,以及闸门不关运行方案和闸门事先关闭、拍门断流运行方案。

b. 机组断电,闸门 90 s 关闭,叶片转角分别为 $\varphi=-6^\circ$ 、 $\varphi=-4^\circ$ 、 $\varphi=-2^\circ$ 、 $\varphi=0^\circ$ 、 $\varphi=+2^\circ$ 、 $\varphi=+4^\circ$ 6种运行方案。

3.2 计算结果及分析

经过计算,得到了各方案流量、扬程(水头)和转速随时间变化规律的数据资料。由于机组断电,叶片转角 $\varphi=0^\circ$,闸门关闭时间为 90 s 运行方案的停泵过渡过程具有典型性,图1给出了该方案的停泵过程轨迹。

机组断电后,水泵转速随之减小,其流量和扬程也随之减小,经过 3.3 s 后,水泵水量降为0,此时水泵的扬程刚好等于进出水池的水位差;此后水泵进入制动工况,水流开始倒流,负流量迅速增加,转速迅速减小;经 8.8 s 后,机组转速为0,之后机组在出水池水压作用下,开始反转,进入水轮机工况;反向流量和反转转速逐渐增加,经 40.7 s 机组水力矩 $M=\alpha$ (实际应为轴承损耗和电机风损之和)机组达到飞逸,此时闸门开度为 2.27 m ,反向转速为 167.1 r/min ,反向流量为 $41.0\text{ m}^3/\text{s}$,作用在

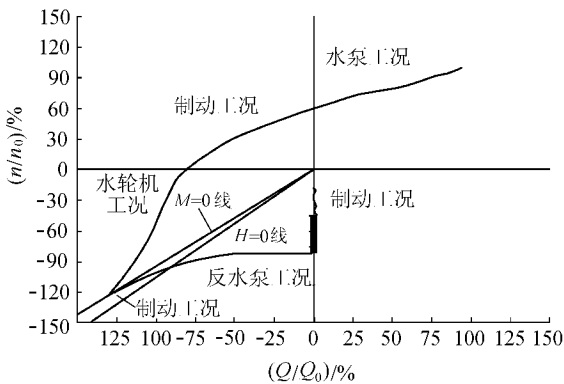


图 1 典型方案停泵过程轨迹

Fig.1 Hydraulic transient at power failure for typical schemes

转轮上的水头为 3.46 m,接下来,水泵再次进入制动工况,倒流流量及反向转速逐渐减小,直至作用在转轮上的水头 $H=0$,此时闸门尚未完全关闭,机组的反向转速仍相当大,约为 120.07 r/min,此后进入反水泵工况,机组向下压水,当管中的水面为转轮叶片转轴中心线高程时,此时作用在转轮上的负水头为 -3 m ,即为进水池水位与叶片转轴中心线高程之差;接着,水泵进入一个压水过程和水流回流过程反复交替进行的不稳定区,图 1 中以黑粗线示之。

当机组转速进一步下降,机组的反水泵扬程小于或等于 3 m 时,又进入制动工况区,此时闸门已关闭,在进水池水位的作用下,水流开始回流,即正流量,经几次波动后,当转速为 25 r/min 时,机组开始制动使之停止。整个停泵过渡过程经历了水泵工况、制动工况、水轮机工况、制动工况、反水泵工况、制动工况过程。

有关各方案停泵过渡过程重要参数计算结果见表 1。

表 1 不同闸门运行方案水泵参数计算结果
Table 1 Calculated results of water pump parameters according to different operational schemes of gate

闸门运行方案	流量为 0 时间/s	转速为 0 时间/s	力矩为 0 时间/s	停泵过程 总历时/s	最大反向 转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
闸门关闭时间为 90 s	3.3	8.8	40.7	156.3	167.1
闸门关闭时间为 75 s	3.3	8.8	38.4	144.2	165.9
闸门关闭时间为 60 s	3.3	8.8	35.7	132.1	164.0
闸门关闭时间为 45 s	3.3	8.8	31.9	121.7	159.6
闸门关闭时间为 30 s	3.3	8.8	26.2	108.2	145.5
闸门不关	3.3	8.8	78.7		170.9
闸门事先关闭,拍门断流	3.2	11.1	23.7	24.0	34.8

由表 1 可知,在闸门各运行方案中,水流倒流时间和机组倒转时间不变,表明前 6 种闸门运行方案对它们影响非常小,这是由于这两过程历时较短,闸门开度还很大,过流能力强,从而不会对水泵流量造成制约,这与文献[7]的研究成果有一致之处。但是,不同的闸门运行方式对应的力矩为 0 时间、停泵过程总历时及最大反向转速,则存在明显的区别。闸门关闭时间越短,力矩为 0 时间和停泵过程总历时也越短,最大反向转速也越小。

若在水泵断电之前,先将闸门关闭,机组断电之后经 3.2 s 拍门关闭,又经不到 1 s,水流开始倒流,进入制动工况,经 11.1 s 后进入水轮机工况,最大反向转速仅为 34.8 r/min,总历时约 24 s。所以,先关闸门,采用拍门运行的停机方式,反向转速最小,历时最短,应是适宜的停机方式。

在闸门全关时间为 90 s 的情况下, $\varphi=+4^\circ$ 时,最大反向转速为 157.9 r/min,而 $\varphi=-6^\circ$ 时,最大反向速度为 188.0 r/min。可见,当闸门关闭速度相同时,叶片转角越小,所产生的最大反向转速就越大,在一定的转角范围内,这一规律与叶栅理论分析结果相一致,也与相关试验结论[8]相符。同样,表 2 数据表明,叶片转角越小,整个停机过程历时越长。

在闸门不关的情况下,机组的飞逸转速随叶片转角的减小而增大,计算结果显示, $\varphi=-6^\circ$ 时转速高达 194.2 r/min,约为额定转速的 1.4 倍。

4 结 语

a. 本文运用数学模型中水量平衡与能量守恒方程,对快速闸门带有小拍门断流装置形式的轴流泵站停泵过渡过程进行数值计算,获得了在不同闸门运行方式和不同叶片转角运行方案下,不同特性的水力参数和机组转速随时间变化的规律。

b. 闸门关闭时间为 90 s 的停泵方案,亦产生较大的反向转速,所以正常机组停机方式宜采用先将闸门关闭再断电的方式,该种方式反转转速很小,过渡过程历时短。若泵站发生事故停机时,不能事先关闭闸门,

表 2 不同叶片转角下参数计算结果

Table 2 Calculated results of water pump parameters under different blade angles

叶片 转角 $\varphi/(^\circ)$	流量为 0 时间/s	转速为 0 时间/s	力矩为 0 时间/s	停泵过程总 历时/s	最大反向转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
-6	3.5	10.6	50.3	220.5	188.0
-4	3.4	9.8	46.9	188.5	180.7
-2	3.5	9.4	44.0	162.0	173.3
0	3.3	8.8	40.7	156.3	167.1
+2	3.1	8.2	37.5	152.7	162.2
+4	3.1	7.8	35.3	146.1	157.9

或闸门出现故障不关闭等 ,机组将会发生飞逸 ,转速最大值可达额定转速的 1.4 倍左右 ,因此电机的转子结构强度应按此转速进行校核 ,推力轴承设计也要考虑能否适应如此大的反向转速 ,以确保水泵机组可靠安全运行 .

参考文献 :

[1] 陆伟刚 ,郭兴明 ,周秀彩 ,等 .大型泵站快速闸门断流过程理论研究 [J].农业机械学报 ,2005 ,36(4) :56-59 .
[2] 陈松山 ,严登丰 ,蒋丽君 ,等 .低扬程水泵装置停泵过渡过程的近似计算 [J].农业机械学报 ,2004 ,35(3) :58-60 .
[3] 葛强 ,陈松山 ,汪桂钦 ,等 .灯泡式贯流泵站机组启动过渡过程仿真计算 [J].中国电机工程学报 ,2006 ,26(5) :159-163 .
[4] 杨远东 ,邓志光 .停泵水锤计算及其防护措施 [J].中国给水排水 ,2000 ,16(5) :29-32 .
[5] 严亚芳 .水力机组暂态特性及参数优化 [M].北京 :中国水利水电出版社 ,1995 :47 .
[6] 董曾南 .水力学 :上册 [M].北京 :高等教育出版社 ,1995 :463-467 .
[7] 刘梅清 ,刘光临 ,冯卫民 ,等 .大型泵站水力过渡过程计算及蓄能式液压启闭闸门的研究 [J].农业机械学报 ,2000 ,31(3) :55-58 .
[8] 关醒凡 ,聂书彬 ,黄道见 ,等 .轴流泵飞逸转速特性试验研究 [J].水泵技术 ,2002(5) :14-15 .

Research on hydraulic transient of vertical axial-flow
pumping station at power failure

ZHOU Da-qing¹ , ZHANG Ren-tian² , QU Bo¹ , WANG Xu-shi¹ , YAN Ya-fang¹

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources , Yangzhou 225009 , China)

Abstract : In combination with the complete characteristics of pumps , a mathematical model for hydraulic transient of the pumping station at power failure was established based on the rotation moment balance equation , the discharge balance equation , and the equation of energy conservation of pump devices . By numerical calculation , the hydraulic transient of the vertical axial-flow pumping station at power failure was studied under different operational schemes of the gate and different blade angles , and the regularities of hydraulic parameters and rotational speed of units were obtained under different working conditions , providing a rational basis and suggestions for design and operation of pumping stations .

Key words : axial-flow pumping station ; hydraulic transient at power failure ; numerical calculation ; rapid-drop gate ; blade angle