

变频调速灯泡贯流泵站停机过渡过程研究*

张仁田¹ 朱红耕¹ 李慈祥² 姚林碧³

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009; 2. 南京市水利规划设计院有限责任公司, 南京 210006;

3. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 扬州 225009)

摘要: 变频调速的灯泡贯流泵站借助于变频装置逐步降低机组转速, 实现机组的安全平稳停机。分析了变频调速机组的正常停机特点, 建立停机过程的水量平衡和力矩平衡动态方程。根据变频装置的特性设置转速的变化规律, 通过数值模拟停机过程中主要水力参数的变化特征, 寻求转速变化规律、起始时刻与闸门关闭时间之间的最佳匹配, 为变频调速灯泡贯流泵站的安全稳定运行提出了不同停机规律的建议。

关键词: 变频调速 灯泡贯流泵站 停机过渡过程 数值模拟

中图分类号: S277.9; TV675 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)03-0045-05

Shut-down Transient of Bulb Tubular Pumping Station with VFD

Zhang Rentian¹ Zhu Honggeng¹ Li Cixiang² Yao Linbi³

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2. Nanjing Water Planning & Design Ins., Ltd., Nanjing 210006, China

3. Jiangsu Surveying & Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225009, China)

Abstract: The shut-down process of bulb tubular pumping station with VFD will be a stable and safe transient process through the speed lowering gradually. The features of normal shut-down process with VFD were analyzed. The flowing rate balance and torque dynamic balance equations were established. According to the characteristics of the VFD, the speed lowering law was designed and the main hydraulic parameters were simulated during the shut-down transient period by the numerical calculation, the optimal combination between the speed-lowering, the starting time point and closing time of the gate was discovered. The findings of the study provided various shut-down suggestions for safety and stability operation of bulb tubular pumping stations with VFD.

Key words: Speed variable with VFD Bulb tubular pumping station Shut-down transient Numerical simulation

引言

低扬程大型泵站具有流道相对较短的特点, 因此无论是采用平直管出水还是虹吸式出水, 研究非正常(事故)停机时的动态特性是保证泵站运行安全性的重要内容^[1-3]。大型灯泡贯流泵机组由于具有流道顺直、水力损失较小、装置效率高等优点, 已广泛应用于南水北调等大型跨流域调水工程中。随着科技的发展, 变频技术逐步开始运用于大型灯泡

贯流泵的工况调节, 为机组的正常停机提供了便利, 借助于变频变速调节, 可以实现泵机组的“软停机”, 保证停机过程的平稳安全, 也有利于延长机组的运行寿命。变频调速灯泡贯流泵机组的事故停机过程与立式轴流泵站及定速运行的贯流泵机组类似, 已有较为深入的研究成果^[1-4]。本文重点研究变频调速灯泡贯流泵机组在正常停机过程中的主要水力参数变化特征、频率(速度)变化规律以及与快速闸门之间的最佳配合, 为变频调速大型灯泡贯流

收稿日期: 2012-03-15 修回日期: 2012-03-27

*“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAB04A03)和江苏省水利动力工程重点实验室开放课题资助项目(K100016)

作者简介: 张仁田, 教授, 博士生导师, 主要从事泵及泵站工程设计研究, E-mail: r_zhang@yzu.edu.cn

泵站在不同工况下的正常停机提供指导。

1 变频调速机组的停机特点

变频调速灯泡贯流泵站的正常停机是以发出停机指令,出水流道的快速闸门开始动作为标志,此时的电动机仍旧与电网联接并以工作频率作同步运行,在快速闸门按一定速度降落关闭流道出口的同时,通过变频装置设定转速下降的规律、励磁装置逐步减小励磁电流和电压,始终保持电磁力矩与机组阻力矩的平衡,直至闸门完全关闭、转速降低到零,这时再断开电动机与电源的联接,完成机组的停机过程^[5]。这种停机方式可以避免常规停机造成的机组经历制动工况和水轮机工况的多工况运行,减少动力冲击,还可以避免因突然停机引起的水泵水锤现象及机械冲击等相关问题。在变频调速灯泡贯流泵站“软停机”的过程中,即使出现快速闸门因某种原因不能完全关闭的特殊情况,机组也可以在稳定工况下继续运行。

2 数学模型

2.1 水量平衡方程

当快速闸门处于部分开启位置、机组运行在稳定工况时,则

$$Q = Q_{sl} + Q_{fl} \quad (1)$$

式中 Q ——水泵的流量, m^3/s

Q_{sl} ——闸门出口流量, m^3/s

Q_{fl} ——分流拍门出口流量, m^3/s

当机组开始降速或闸门关闭过程中,进、出水流道及泵体内的水流为有压非恒定流,因此

$$\frac{dQ}{dt} = \left(H - H_{sta} - SQ^2 - \zeta_{sl} \frac{Q_{sl}^2}{2gA_s^2} - \zeta_{fl} \frac{Q_{fl}^2}{2gA_f^2} \right) / \left(\frac{K_L}{g} \right) \quad (2)$$

其中

$$K_L = \int \frac{dl}{A(l)}$$

式中 S ——进、出水流道总摩阻系数

A_f ——拍门面积, m^2 H ——泵扬程, m

A_s ——闸门面积, m^2

H_{sta} ——上、下水位差

ζ_{sl} 、 ζ_{fl} ——闸门、拍门局部阻力系数

K_L ——流道的惯性常数

$A(l)$ ——流道断面面积随流道中心线变化的函数

l ——流道中心线长度, m

拍门在关闭时受到浮力、重力和阻力的共同作用,综合分析可得到拍门出水流量与开启角度的关系为^[6]

$$Q_{fl} = \frac{mA_f}{\cos\alpha} \sqrt{\frac{gs(\rho_s - \rho) \sin\alpha}{\varphi\rho}} \quad (3)$$

其中

$$A_f = wc$$

式中 w ——拍门宽度, m m ——拍门数量

c ——拍门高度, m s ——拍门厚度, mm

ρ_s ——拍门材料密度, kg/m^3

φ ——修正系数, φ 取 0.92 ~ 0.96

α ——拍门的开启角度

快速闸门一般由卷扬式或液压式启闭机控制,关闭规律近似为匀速运动,即快速闸门的关闭速度 V 为常数,闸门高度为 Z ,则闸门完全关闭的时间为

$$T_{sc} = \frac{Z}{V}; \text{假定从闸门开始到闭门时刻经过时间 } t, \text{ 则}$$

闸门的关闭面积为

$$A_{st} = ZB \frac{t}{T_{sc}} = A_s \frac{t}{T_{sc}} \quad (4)$$

其中

$$A_s = ZB$$

式中 B ——闸门宽度, m

水流经过快速闸门属于淹没孔口出流,则流量可以表示为

$$Q_{st} = \pm \mu e A_s \sqrt{2g|H - H_{sta}|} \quad (5)$$

其中

$$e = 1 - \frac{t}{T_{sc}} \quad \mu = 0.6 - 0.176e$$

式中 e ——闸门相对开度

μ ——流量系数

当 $H > H_{sta}$ 时, Q_{st} 为正流,式(5)取“+”;当 $H < H_{sta}$ 时, Q_{st} 为逆流,式(5)取“-”。

2.2 转动机械力矩平衡方程

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_D - M_L \quad (6)$$

式中 J ——机组的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

Ω ——瞬时角速度, rad/s

M_D ——同步电动机的电磁转矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$

M_L ——机组的阻力矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$

停机过程中的电磁转矩和机组阻力矩可按下列方式描述。

(1) 电动机的电磁转矩

电动机在工频下的电磁转矩一定是大于变频装置的需求值,否则无法采用变频控制实现正常停机。电动机的电磁转矩可以近似采用两段线性表示为速度的函数^[7],即

$$M_D = \begin{cases} f_{s0} M_n + (f_s - f_{s0}) M_d \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_{nS}} \right) & (\lambda_n < \lambda_{nS}) \\ M_n - (1 - f_s) M_d \left(\frac{\lambda_n - 1}{\lambda_{nS} - 1} \right) & (\lambda_n \geq \lambda_{nS}) \end{cases} \quad (7)$$

式中 f_{s0} ——转速比 $\lambda_n = 0$ 时的电动机电磁转矩与额定值之比

f_s —— $\lambda_n = \lambda_{n_s}$ 时的电动机电磁转矩与额定值之比

λ_{n_s} ——接近 1 的某一比值,此时的电动机电磁转矩有大于额定值的峰值,一般 $\lambda_{n_s} = 0.99$

M_n ——电动机的额定电磁转矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$

M_d ——变频装置提供的电磁力矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$

在停机过程中, M_d 与设定的频率(转速)成线性关系,当水泵的实际转速与设定值之间发生偏差时,变频装置则根据偏差值按照线性关系进行力矩修正,保证 M_d 大于等于水泵的需求值。

(2) 机组阻力矩

泵水阻力矩 M_B :从能量角度,泵水阻力矩一部分产生泵扬程所需转矩 M_H ,另一部分转化为水体与叶轮摩擦等各种损失阻力矩 M_h 。为简化过渡过程的分析,将机组转动部件和叶轮室中水体作为整体考虑,引入附加转轮惯量 GD_{np}^2 ,则大型灯泡贯流泵的泵水力矩表达式^[4,7]为

$$M_B = \frac{30\rho gQH}{\pi n\eta_p} + \frac{\pi}{30}K_J D^5 \frac{dn}{dt} + K_M D^2 \frac{dQ}{dt} \quad (8)$$

式中 D ——叶轮直径, m

K_J, K_M ——惯性常数

n ——转速, r/min

η_p ——泵效率

推力轴承摩擦力矩 M_C :泵叶轮水推力所产生的推力轴承摩擦力矩为

$$M_C = Pfr_{cp} \quad (9)$$

式中 P ——水泵轴向水推力, kN

r_{cp} ——推力头当量摩擦半径, m

f ——动压摩擦系数

电动机风扇阻力矩 M_F :近似与转速的二次方成正比,即 $M_F = f_1 n^2$, f_1 为系数。

电动机转子风阻力矩 M_Z :近似与转速的一次方成正比,即 $M_Z = f_2 n$, f_2 为系数。

油粘滞阻力矩 M_N :推力头与滑动轴瓦常浸在透平油中,旋转时因透平油的粘滞力作用产生阻力矩,由流体力学可知, M_N 近似与转速的一次方成正比,即 $M_N = f_0 n$, f_0 为系数。

径向轴承摩擦力矩 M_Δ :与泵机组转动部件重量、径向轴承半径有关,当动压摩擦系数为常数时,则 M_Δ 一定。

各种阻力矩的计算及系数的选择方法在文献[6,8]中均有详述,这里不再赘述。

由上述分析可得到灯泡贯流泵机组停机过渡过

程力矩平衡方程式为

$$J \frac{\pi}{30} \frac{dn}{dt} = M_D - \frac{30\rho gQH}{\pi n\eta_p} - \frac{\pi K_J D^5}{30} \frac{dn}{dt} - K_M D^2 \frac{dQ}{dt} - Pfr_{cp} - f_1 n^2 - f_2 n - f_0 n - M_\Delta \quad (10)$$

2.3 转速下降的变化规律

在变频装置控制下,可以采用多种转速下降的变化规律使之与闸门的关闭速度相匹配,最常用的是线性变化规律^[7],即

$$n = \begin{cases} n_r & (t \leq t_{s1}) \\ n_r - \frac{t - t_{s1}}{T_s - t_{s1}} & (t_{s1} < t < T_s) \\ 0 & (T_s \leq t) \end{cases} \quad (11)$$

式中 t_{s1} ——从快速闸门开始关闭到变频减速开始的时间, s

T_s ——机组从额定转速到零转速所用时间, s

图 1 为机组的变频减速过程示意图。

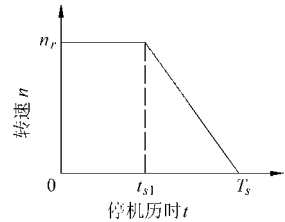


图 1 机组降速过程曲线

Fig. 1 Rotational speed decreasing curve

3 工程实例

3.1 基本情况

淮阴三站为南水北调东线一期工程中首座采用变频调速的灯泡贯流泵站,安装了直径为 3 140 mm 的机组 4 台套,配 2 200 kW 同步电动机,采用 PWM 多电平交-交变频装置及可控硅励磁装置。泵站纵剖面图如图 2 所示,不同转速下的特性如图 3。采用相似律回归得到不同转速下 $H-Q$ 、 $N-Q$ 关系为^[9]

$$H = \lambda_n^2 \left[12.927 - 6.488 \frac{Q}{\lambda_n} + 0.033 \left(\frac{Q}{\lambda_n} \right)^2 - 0.001 \left(\frac{Q}{\lambda_n} \right)^3 \right] \quad (12)$$

$$N = \lambda_n^3 \left[3760.00 - 203.70 \frac{Q}{\lambda_n} + 11.80 \left(\frac{Q}{\lambda_n} \right)^2 - 0.24 \left(\frac{Q}{\lambda_n} \right)^3 \right] \quad (13)$$

式中 N ——水泵轴功率, kW

电动机定子额定电压 6 600 V,在额定频率下的电动机同步转速为 125 r/min ,机组转动惯量 GD_{np}^2 为 455.18 $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ 。流道惯性常数为 1.22,快速闸门宽

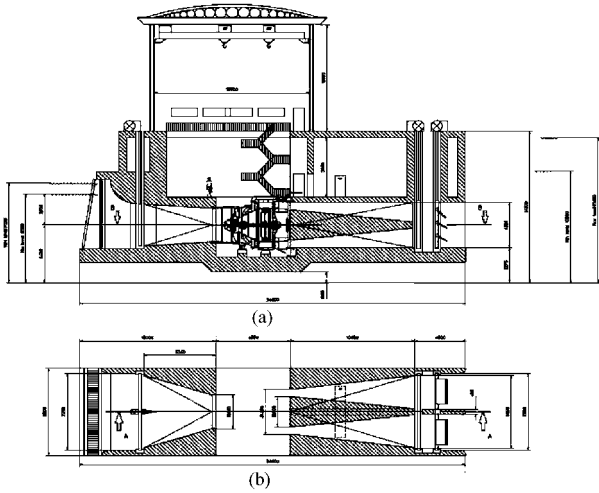


图2 淮阴三站结构图

Fig. 2 No. 3 Huaiyin pumping station

(a) 泵站纵剖面图 (b) 流道平面图

度 7.2 m、高度 4.0 m，两页分流小拍门的尺寸为 1.8 m × 1.3 m × 20 mm(厚度)。快速闸门采用液压启闭机控制，闭门速度为 2 m/min。

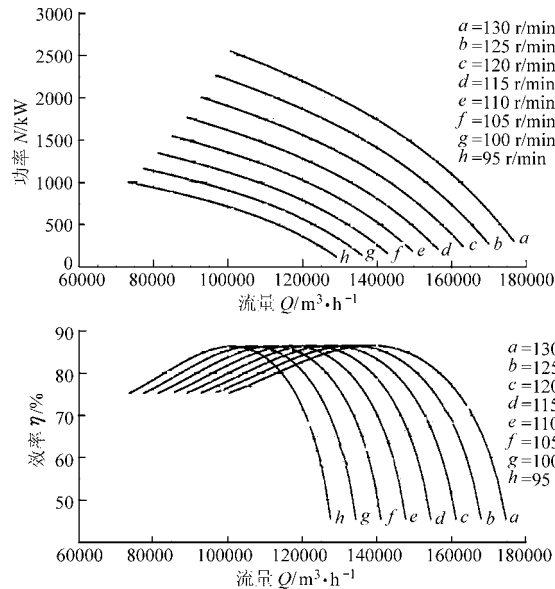


图3 淮阴三站不同转速下的综合性能曲线

Fig. 3 Performance curves of No. 3 Huaiyin pumping station in various speeds

3.2 停机过程的数值模拟

在设计工况下，保持闸门的关闭速度 V 不变，分别采用 3 种方案进行停机过程的模拟^[10]：开始变频减速的时刻为 $t_{s1} = 120$ s，减速历时 $T_s = 20$ s；开始变频减速的时刻为 $t_{s1} = 60$ s，减速历时 $T_s = 150$ s；开始变频减速的时刻为 $t_{s1} = 0$ ，减速历时 $T_s = 300$ s。数值模拟程序框图如图 4，方案 1 的力矩变化情况如图 5 所示。3 种方案停机过程中主要参数的变化情况如表 1 和图 6（不同参数的相对值为瞬时值与

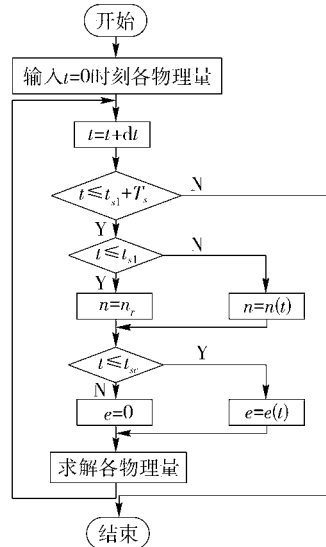


图4 数值模拟程序框图

Fig. 4 Flow chart of numerical simulation program

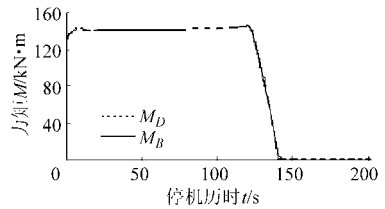


图5 方案1 停机过程中力矩变化情况曲线

Fig. 5 Torques variable during shut-down transient for scheme 1

表1 不同停机方案参数模拟结果

Tab. 1 Simulating results of various parameters for different shut-down schemes

方案	流量为零时的机组转速/ $r \cdot \min^{-1}$	最大瞬间扬程与设计扬程之比	分流拍门出流比	停机历时/s
1	74.0	1.42	0.28	140
2	74.9	1.13	0.12	210
3	75.0	1.03	0.06	300

设计值之比) 所示。

为避免机组低速运行时间过长，对轴承等机械部件产生不利影响，可以采用两段式降速变化规律，例如针对方案 3，在 120 s 内快速闸门完全关闭，转速为 75 r/min 时，加快降速，20 s 内转速减小到零，则停机历时仅为 140 s，停机过程中各参数的变化情况如图 7 所示。

4 结论

(1) 建立了采用变频调速灯泡贯流泵机组的正常停机数学模型，通过模拟分析，减速越快、流量为零时的转速越低、流道内压力上升的比例越高、拍门

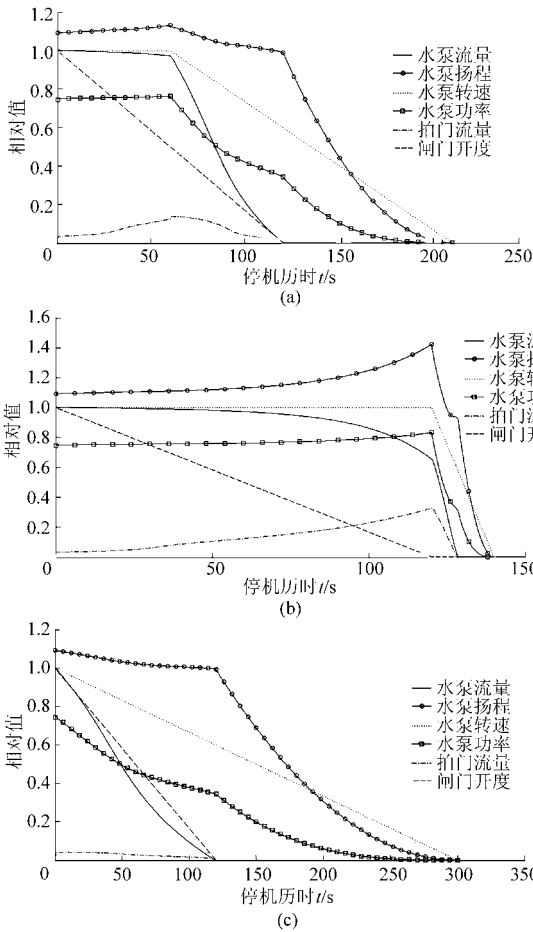


图6 不同停机方案模拟结果

Fig.6 Simulation results of different shut-down schemes

(a) 方案1 (b) 方案2 (c) 方案3

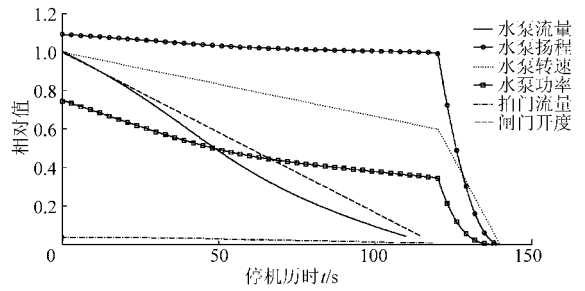


图7 分段关闭模拟结果

Fig.7 Simulation of two-stage shut-down scheme

分流作用越大,但文中所模拟的3种方案都能够实现安全、可靠停机。对于闸门完全关闭、再减速停机的特殊工况,瞬间扬程上升的最大比例为142%,没有超过1.5倍设计扬程的规定。

(2)考虑快速闸门关闭与频率(转速)变化的起始时刻及规律的最佳匹配,可保证不同特征扬程下机组停机的最大瞬间扬程上升较小,实现机组平稳停机。采用分段减速的变化规律,可避免机组长时间低速运转,其研究结果已经在淮阴三站的运行中得到检验,具有较好的实用性。

(3)影响变频调速灯泡贯流泵站停机动态特性的因素较为复杂,例如频率下降的不同变化规律、上游水位的变幅及快速闸门的关闭速度与规律等,有待于进一步深入研究。

参 考 文 献

- 1 周大庆,张仁田,屈波,等.大型立式轴流泵站停泵过渡过程研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(3):272~275.
Zhou Daqing, Zhang Rentian, Qu Bo, et al. Research on hydraulic transient of vertical axial-flow pumping station at power failure [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(3):272~275. (in Chinese)
- 2 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.
Lu Weigang, Guo Xingming, Zhou Xiucui, et al. Theoretical study on stop gate breaking flow in large pumping station [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(4):56~59. (in Chinese)
- 3 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.
Chen Songshan, Yan Dengfeng, Jiang Lijun, et al. Numerical calculation of hydraulic transient for a low-head pump station during its suspending period [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(3):58~60. (in Chinese)
- 4 陈松山,周正富,何钟宁,等.贯流泵站液压快速门断流停泵过渡过程分析[J].河海大学学报:自然科学版,2008,32(2):179~184.
Chen Songshan, Zhou Zhengfu, He Zhongning, et al. Transient process of tubular pumping station with quick-stop gate breaking flow while pump is off [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 32(2):179~184. (in Chinese)
- 5 Arnold J, Nijhuis G J. Selection design and operation of rotodynamic pumps [M]. Netherlands: Nijhuis Pompen, 2005.
- 6 张仁田,李慈祥,姚林碧,等.变频调速灯泡贯流泵的启动过渡过程[J].排灌机械工程学报,2012,30(1):46~52.
Zhang Rentian, Li Cixiang, Yao Linbi, et al. Startup transient behavior of bulb pump unit with VFD [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(1):46~52. (in Chinese)
- 7 Bin Wu. 大功率变频器及交流传动[M].卫三民,等译.北京:机械工业出版社,2008.
- 8 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.
Ge Qiang, Chen Songshan, Wang Guiqin, et al. The simulation during start-up transition of bulb type tubular pumping station [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5):159~163. (in Chinese)
- 9 Zhang Rentian, Zhu Honggeng, Jaap Arnold, et al. Development and optimized design of propeller pump system & structure with VFD in low-head pumping station [C] // Proceedings of the 10th Asian International Conference on Fluid Machinery, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010: 147~161.
- 10 李慈祥.变频调速灯泡贯流泵过渡过程研究[D].扬州:扬州大学,2011.