

# 南水北调邳州泵站 叶片过调原因分析及解决措施

施 伟<sup>1</sup>, 陈松山<sup>2</sup>, 倪 春<sup>1</sup>, 于贤磊<sup>1</sup>, 张建峰<sup>3</sup>, 李小川<sup>2</sup>

(1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司徐州分公司, 江苏 徐州 221200;

2. 扬州大学电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225000; 3. 江苏省江都水利工程项目管理处, 江苏 扬州 225200)

**摘要:** 针对南水北调邳州站叶片过调问题, 从液压式叶片调节系统的工作原理出发, 构建针阀和主配压阀复位运动的数学模型, 基于 Matlab Simulink 仿真, 揭示了针阀和主配压阀复位运动规律。研究结果表明, 邳州泵站叶片调节系统的针阀和主配压阀复位存在 1.4 s 左右的时间滞后, 此是导致叶片过调的主要原因。结合邳州泵站现状, 提出了增加限位调整螺母, 预留滞后时间差, 适当增大弹簧刚度系数的解决措施, 研究成果可为液压式叶调结构优化设计和同类工程问题的解决提供重要参考。

**关键词:** 泵站; 叶片调节; 液压系统

中图分类号: TV675

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2022)03-0026-0005

## Analysis on the causes of blade over-adjustment in Pizhou Pumping Station of South-to-North Water Diversion Project and countermeasures

SHI Wei<sup>1</sup>, CHEN Songshan<sup>2\*</sup>, NI Chun<sup>1</sup>, YU Xianlei<sup>1</sup>, ZHANG Jianfeng<sup>3</sup>, LI Xiaochuan<sup>2</sup>

(1. Xuzhou Branch of The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Jiangsu Water Resource Co., Ltd.,

Xuzhou 221200, China; 2. College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University,

Yangzhou 225000, China; 3. Jiangdu Water Conservancy Project Management Office, Yangzhou 225200, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of blade over-adjustment in Pizhou Station of the South-to-North Water Diversion Project, according to the working principle of the hydraulic blade adjustment system, mathematical models of the reset movement of the needle valve and the main pressure distribution valve are constructed. Based on Matlab Simulink simulation, the reset motion law of needle valve and main pressure distribution valve is revealed. The results show that there is a time lag of about 1.4s in the reset of the needle valve and the main pressure distributing valve of the vane adjustment system of Pizhou Pumping Station, which is the main reason for the over-adjustment of the vane. Combined with the current situation of Pizhou Pumping Station, this paper proposes solutions which is that increase the limit adjustment nut, reserve the lag time difference, and appropriately increase the spring stiffness coefficient. The research results will provide an important reference for the optimization design of the hydraulic blade adjustment structure and the solution of similar problems in similar projects.

**Key words:** pumping station; blade adjustment; hydraulic system

## 1 概 述

大型泵站工况调节的主要方式有变速和变角

调节。对南水北调东线工程中的大型轴流泵站和导叶式混流泵站而言, 主要还是以变角调节为主。变角调节又分为机械式和液压式调节, 其中在叶轮

收稿日期: 2021-10-10

作者简介: 施伟(1980—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水利工程建设与管理工作。E-mail: nsbdsw@126.com

通信作者: 陈松山(1968—), 男, 教授, 博士, 主要从事大型泵站水力优化设计与试验研究。E-mail: yzc08@yzu.edu.cn

直径 2.0 m 以上的大型泵站中均采用了液压式调节。按主接力器的位置不同液压式调节又有上置式、中置式和下置式之分。但不管何种形式的液压调节系统,它都包括压力油系统、主配压阀、受油器、操作油管(杆)、十字架、连杆、拐臂等。近年来,我国大型泵站液压式叶片调节系统取得一些成果,压力油供给方式从传统的压力油罐改为集成式蓄能器,主配压阀和受油器结构型式更加多样化<sup>[1]</sup>。但从南水北调东线工程运行实践看,部分大型卧式轴流泵站液压式叶调系统还是存在叶片过调、震荡调节等问题,如南水北调邳州站 2#机组叶片调节过程中正角度调节时间过长,有时会出现卡死,无法调至预设角度,需要人工现场微调;往负角度调节速度过快,来回震荡调整时间较长。

本文选择典型的大型竖井贯流泵站邳州站作为研究对象。该泵站安装液压全调节竖井贯流泵 4 台套(3 用 1 备),设计流量 100 m<sup>3</sup>/s,单机流量 33.4 m<sup>3</sup>/s,配套 10 kV 高压同步电机,转速 750 r/min,功率 1 950 kW,总装机容量 7 800 kW。主电机采用 TKS710-8TH 型卧式同步电机,叶调机构采用的是 BYKJ-BD-4-240-TS01 型机械液压式调节器,额定工作压力 4 MPa,额定输出流量 240 L/min。

针对邳州泵站出现的叶片过调、震荡调节问题,从液压式叶调系统工作原理出发,基于液动力系统仿真,深入剖析其产生原因,提出解决措施,为液压式叶调结构优化设计和同类工程同类问题的解决提供指导。

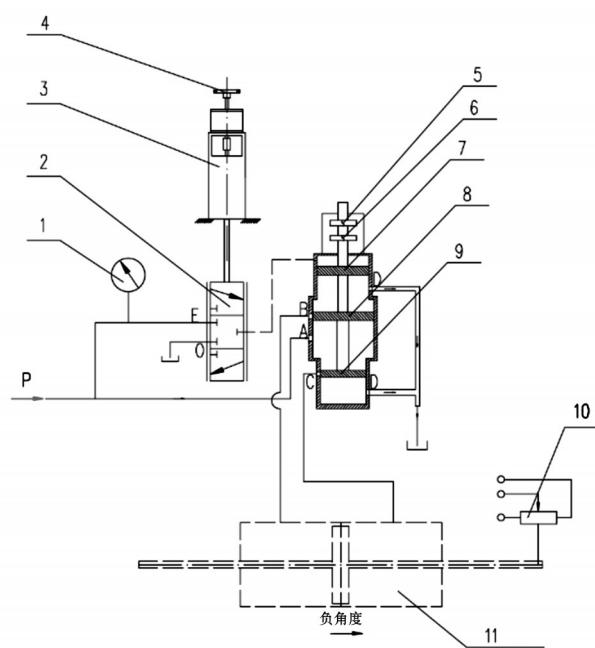
## 2 液压式叶调系统工作原理

为了探明邳州泵站叶片过调、震荡调节等问题原因,有必要先厘清液压式叶调系统工作原理。图 1 为笔者重新绘制的机械液压式叶调系统原理图,主配压阀结构见图 2,主配压阀详细结构见图 3。整个系统包括主配压阀、辅助接力器、主接力器、引导针阀、驱动系统、叶片位置反馈系统等。引导针阀阀芯运行的驱动系统则是由双头步进电机、滚珠丝杆、手轮、导筒、复位弹簧座和复位弹簧组成。

辅助接力器 7 上下移动是驱动主配压阀活塞 8、9 运动的动力,辅助接力器受力  $F$  计算式为

$$F = (p_2 - p_1)A_1 + p_3(A_2 - A_3) - G \pm F_f \quad (1)$$

式中: $p_1$ 、 $p_2$  分别为辅助接力器上、下腔油压,Pa; $p_3$  为主配压阀大小活塞间中腔压力,Pa; $A_1$  为辅助接力器活塞面积,m<sup>2</sup>;  $A_2$ 、 $A_3$  为主配压阀大、小活塞面积,m<sup>2</sup>;  $G$  为自重,N; $F_f$  为动摩擦力,N,向上取正,反之取负。

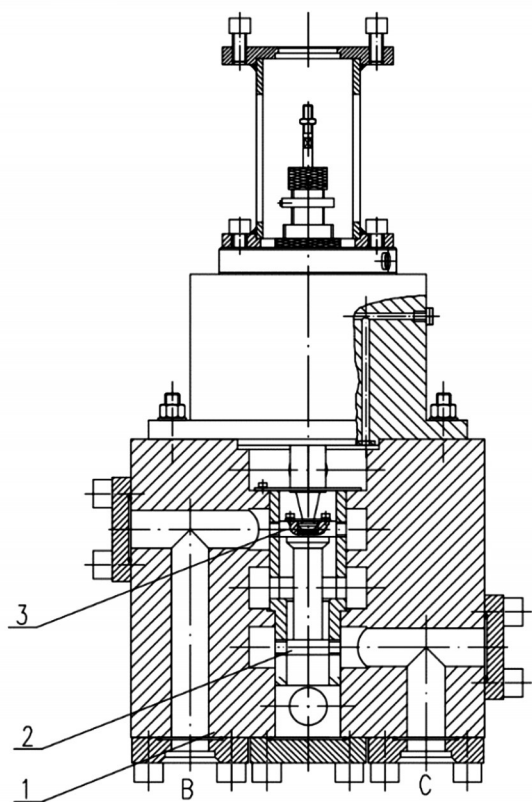


1-压力表;2-引导针阀;3-电气-位移转换器;4-手轮;5-正角度时间调整螺母(暂未设);6-负角度时间调整螺母;7-辅助接力器;8-主配压阀大活塞;9-主配压阀小活塞;10-位移传感器;11-水泵接力器

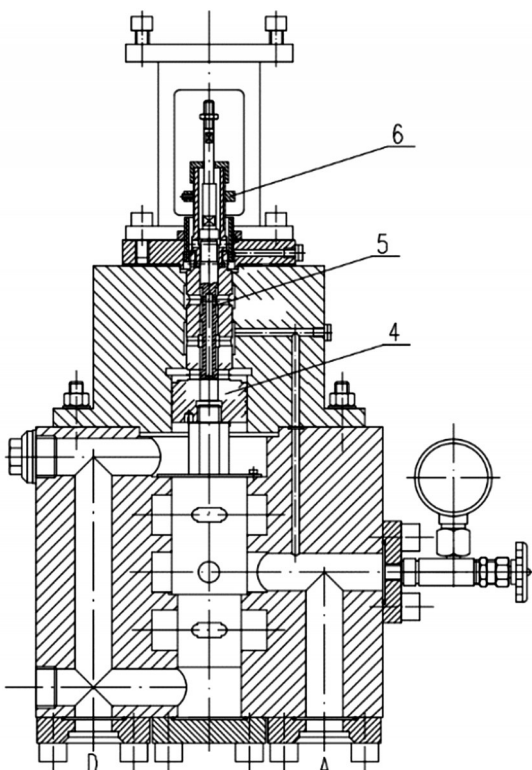
图1 邳州泵站机械液压式叶片调节原理

从图 1 可知,引导针阀 2 实际上是一个三位三通阀。中位时,油口互不相通,辅助接力器 7 的上腔不能进排油,因此无法上下移动,此时主配压阀大小活塞 8、9 封堵了油口 B 和油口 C,水泵接力器 11 不能水平移动,叶片被固定在某一角度。上位时,高压油导入辅助接力器 7 上腔,当式(1)中  $F < 0$ ,辅助接力器 7 下行,主配压阀的大小活塞 8、9 也相应下移,图 1 中的油口 C 与油口 A 相通,油口 B 与油口 D 相通,压力油进入水泵接力器 11 右腔,推动主接力器活塞左移,水泵接力器 11 左腔回油,叶片正角度调节。下位时,辅助接力器 7 上腔与回油箱相通,若式(1)中  $F > 0$ ,辅助接力器 7 上行,主配压阀的大小活塞 8、9 也上移,图 1 中的油口 C 与油口 D 相通,油口 B 与油口 A 相通,压力油进入水泵接力器 11 左腔,推动主接力器活塞右移,水泵接力器 11 右腔回油,叶片负角度调节。

上述工作过程的可靠性,取决于针阀 2 动作灵活性。针阀 2 的上下移动是由图 3 的驱动机构实现的。图 3 中的大螺距滚珠丝杠 5 将步进电机 2 或手轮 1 的旋转角位移转变为丝杠上螺母 6 的上下直线运行。针阀阀芯杆 11 通过导筒 7 与丝杆螺母 6 相连,螺母 6 移动驱动图 2(b)中的针阀阀芯 5 上下移动。



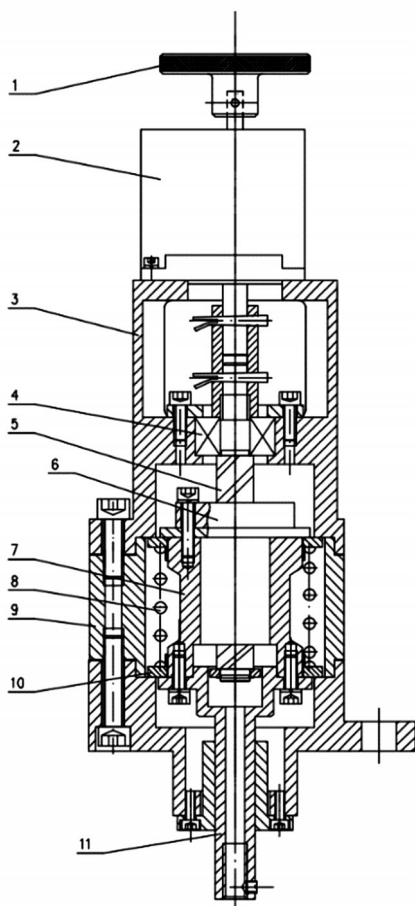
(a) 纵剖面图



(b) 横剖面图

1-主配压阀阀体;2-主配压阀小活塞;3-主配压阀大活塞;  
4-辅助接力器;5-引导针阀;6-调节螺母

图2 主配压阀结构



1-手轮;2-步进电机;3-支架;4-轴承;5-滚珠丝杆;6-螺母;  
7-导筒;8-弹簧;9-座体;10-弹簧座;11-针阀阀芯杆

图3 针阀驱动结构

### 3 叶片过调、震荡调节原因

在前述液压式叶调系统工作原理中还有一个关键环节未讨论,即丝杆螺母、针阀、辅助接力器和主配压阀大小活塞的复位以及叶片角度的位置反馈与控制,正是这一环节中的时间滞后性导致了叶片过调与震荡调节。

#### 3.1 信号反馈

图4为叶调机构控制与信号反馈原理图,二阶系统闭环传递函数<sup>[2-4]</sup>为:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \quad (2)$$

式中:阻比 $\xi=0.76$ ,无阻尼固有频率 $\omega_n=24.1 \text{ rad/s}$ 。根据式(2)可得阶跃信号作用下的调节滞后时间 $t_1=1.9 \text{ s}$ 。

#### 3.2 针阀阀芯复位

由图1可知,当磁致伸缩位移传感器11反馈信号判别叶片角度为设定的叶片角度时,图2中的步



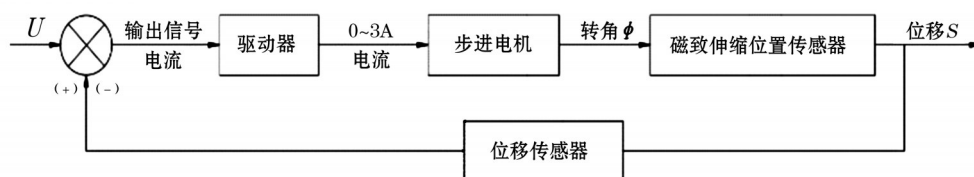


图4 叶片调节控制与反馈系统框架

进电机2或手轮1释放外部驱动力矩,滚珠丝杠螺母6主要到受弹簧8的弹力作用复位,与之相连的针阀阀芯也复位,但是实际上针阀复位是有时间滞后性的。阀芯机构运动可简化为图5所示模型,它的动力学方程表达为:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - c_1 \frac{dx}{dt} - c_2 \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 \quad (3)$$

式中:  $m=1.65 \text{ kg}$ ;  $k=5 \times 10^4 \text{ N/m}$ ;  $c_1=12.57$ ;  $c_2=0.0107$ 。

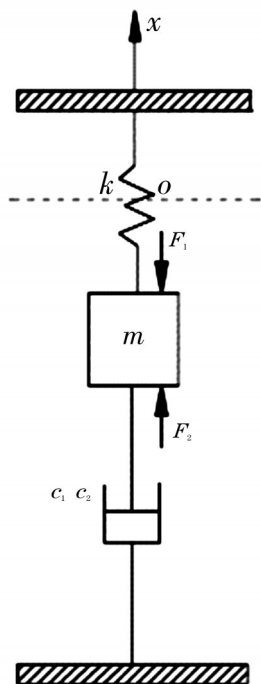


图5 针阀运动分析简图

利用 Matlab 对式(3)进行仿真分析,结果如图6所示。阀芯复位存在短历时震荡,在  $t_2=1.2 \text{ s}$  左右时趋于稳定。

当针阀阀芯复位后,辅助接力器和主配压阀活塞并未同时复位,此时位置如图7所示,其中图中油口标识与图1相同。

### 3.3 辅助接力器与主阀芯复位

以下仅就叶片正角度调节进行分析,负角度分析方法相同。辅助接力器和主配压阀活塞复位过

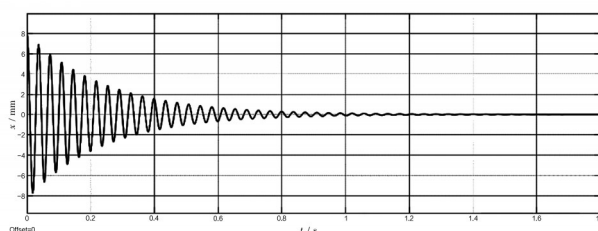


图6 针阀阀芯复位运动特性

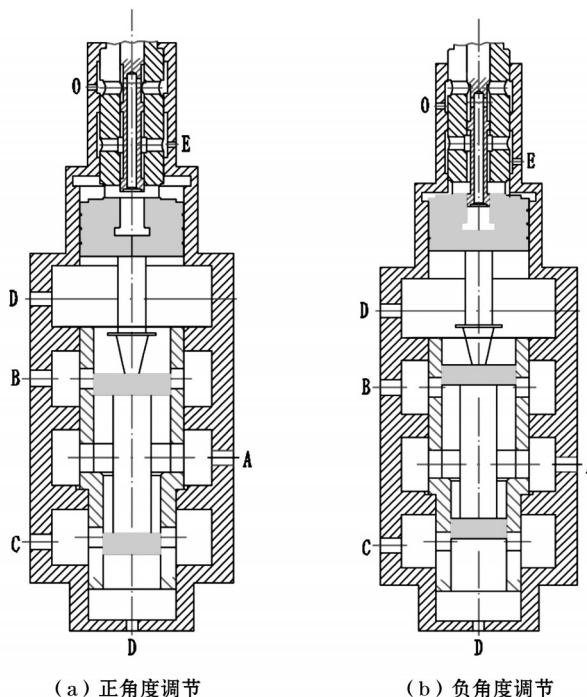


图7 辅助接力器和主配压阀活塞复位原理

程的动力学方程可表达为:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -(p_1 - p_2)A_1 + p_3(A_2 - A_3) - G - F_f \quad (4)$$

$$A_1 \frac{dx}{dt} = Q \quad (5)$$

$$p_1 - p_0 = \frac{128\mu l}{\pi d^4} Q + \frac{\xi p}{2A_0^2} Q^2 \quad (6)$$

式(4)中的  $F_f$  摩擦力和重力  $G$  较小,可忽略,将式(6)、式(5)代入式(4)中,取  $p_0 \approx p_2$ ,得:

$$m_z \frac{d^2 x}{dt^2} = - \left( \frac{128\mu l A_1^2}{\pi d^4} \right) \frac{dx}{dt} - \left( \frac{\rho \xi A_1^3}{2A_0^2} \right) \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + p_3(A_2 - A_3) \quad (7)$$

式中: $m_e$ 为辅助接力器及主阀阀芯运动部件的质量, $m_e=2.53\text{ kg}$ ; $\rho$ 为油密度, $\rho=872\text{ kg/m}^3$ ;油动力黏度 $\mu=0.0348\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ; $d$ 、 $l$ 为回油管直径和长度, $d=6\text{ mm}$ , $l=2.5\text{ m}$ , $A_1$ 为辅助接力器活塞面积, $A_1=3.3166\times 10^{-3}\text{ m}^2$ ; $A_2$ 、 $A_3$ 为主配压阀大、小活塞面积, $A_2=1.8086\times 10^{-3}\text{ m}^2$ , $A_3=1.0174\times 10^{-3}\text{ m}^2$ ; $p_3$ 为压力油压, $p_3=4\times 10^6\text{ Pa}$ ;回油小孔面积 $A_0=1.0\times 10^{-4}\text{ m}^2$ 。

回油孔局部阻力系数 $\xi$ 可近似表达为:

$$\xi=8566.5(x/d_0)^6-18318(x/d_0)^5+14821(x/d_0)^4-5535.8(x/d_0)^3+938.16(x/d_0)^2-55.91(x/d_0)+1.3723$$

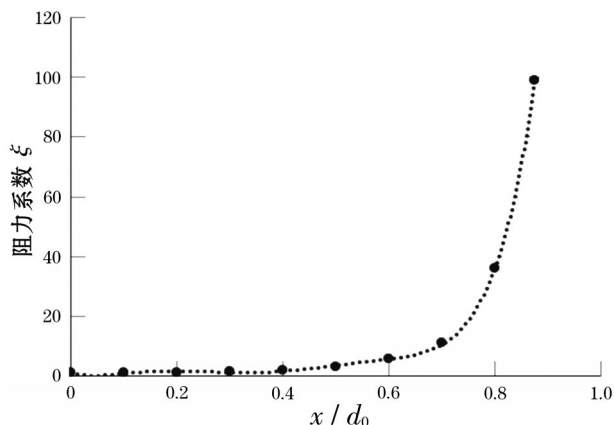


图8 辅助接力器回油孔局部阻力系数

利用 Matlab 对式(7)进行仿真分析,结果如图8所示。辅助接力器和主阀芯复位仅 $t_3=0.086\text{ s}$ 左右,历时较短。

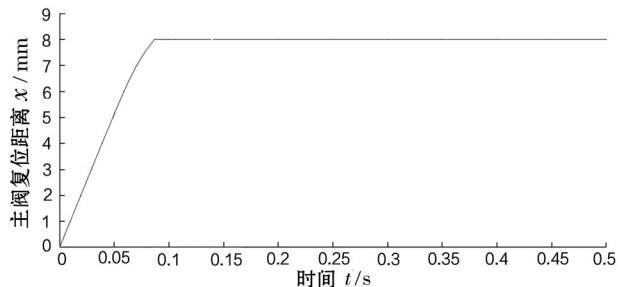


图9 辅助接力器及主阀芯复位运动特性

## 4 解决措施

从以上叶片过调、震荡调节原因分析可看出,液压系统复位过程中确实存在时间滞后现象。因时间滞后,导致叶片已调节至设定角度时,配压阀油口B和油口C并未封堵住,仍然有一定开度。

叶片过调程度与多出的供油量大小有关,近似表达为:

$$\Delta V = Q\Delta t \quad (8)$$

式中: $\Delta V$ 为多出的供油量,L; $Q$ 为单位时间输送到水泵主接力器左腔(或右腔)的体积,L/s; $\Delta t$ 为液压系统复位滞后时间,s。

从公式(8)可知,减小叶片过调,可从减小 $Q$ 和 $\Delta t$ 两个方面着手,为此提出以下几个改进措施。

### 4.1 增加机械式上限位调整螺母

现状邳州泵站的辅助接力器只设置下限位的负角度时间调整螺母(图2),还需要增加上限位正角度时间调整螺母(图1)。通过调节上下限位螺母,适当减小辅助接力器、主配压阀阀芯最大行程,主要目的是减小主配压阀油口B和油口C开度,减小式(1)中的 $Q$ ,同时因阀芯最大行程减小,也可缩短主阀芯复位时间 $\Delta t$ 。但采取措施时要注意,不能阀芯最大行程不能太小,否则叶片调节时间会大大加长。

### 4.2 预留滞后时间差

在叶片调节反馈控制系统中,充分考虑液压系统复位时间滞后性,采取主动预设针阀提前复位时间,消除 $\Delta t$ 。从上述分析中可知, $\Delta t \approx 1.4\text{ s}$ 。

### 4.3 适当增大弹簧刚度系数 $K$

由式(3)可知,适当增大弹簧刚度系数 $K$ ,可减小针阀阀芯复位时间。但也需要指出的是,如增大 $K$ 值,相应的步进电机扭矩会增大,涉及步进电机合理匹配问题。

## 5 结 语

本文在厘清液压系统针阀、辅助接力器和主配压阀工作原理、受力分析基础上,建立动力学仿真模型,仿真得到了针阀、辅助接力器和主配压阀动作过程,探明了邳州泵站机械液压式叶片调节系统叶片过调原因,即针阀、辅助接力器和主配压阀复位存在时间上的滞后性,提出了解决措施,旨在为邳州泵站叶调系统改进提供依据。

### 参考文献:

- [1] 问泽杭,吉庆伟,莫兆祥.泵站水泵叶片调节系统压力油装置的技术改造[J].人民长江,2008(6):92-93.
- [2] 何伟,林昌杰,等.一种新型的电-位移转换装置的研制[J].液压气动与密封,2007(3):41-42.
- [3] 李扬,夏方坤,周灿华,等.大型液压全调节立式轴流泵叶片调节机构故障分析与改造[J].中国农村水利水电,2021(6):1-13.
- [4] 俞鸿飞,刘安平,束炳芳,等.步进伺服电机式电-位移转换器在水轮机调速器上的应用[J].华东电力,2014,42(11):2466-2470.