

双叶片螺旋离心泵非定常压力脉动数值分析*

张金凤 徐宇平 袁寿其 周建佳 张磊

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 为了分析双叶片螺旋离心泵内部流动压力脉动特性,以 ZJ200-25 型螺旋离心泵为研究对象,采用 Navier-Stokes 方程和标准 SST $k-\varepsilon$ 湍流模型对其内部流场进行了多工况全流道非定常数值模拟。在叶轮与蜗壳耦合面上以及泵进出口处设置了 7 个监测点,计算得出了各监测点的压力脉动时域及频谱特性。计算结果表明,各工况下螺旋离心泵内压力波动呈明显的周期性变化规律;轴频和叶频是流道内压力脉动的主频;叶轮与蜗壳耦合处以及隔舌处的压力脉动主频基本为轴频,进、出口压力波动主频接近叶频;进口脉动幅值相对出口及泵内脉动幅值很小,高频成分也相对减少;同一监测点在不同流量下主频相同,但主频振幅各不相同,设计流量下的主频振幅最小,小流量下的主频振幅最大;叶轮与蜗壳耦合面上的监测点,在距离隔舌越远处,其压力脉动强度越低。

关键词: 双叶片螺旋离心泵 压力脉动 数值分析 动静干涉

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)12-0102-05

Numerical Analysis on Pressure Fluctuation of Unsteady Flow in Double Blade Screw Type Centrifugal Pump

Zhang Jinfeng Xu Yuping Yuan Shouqi Zhou Jianjia Zhang Lei

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

Abstract

In order to analyze the inner flow pressure fluctuation performance in screw type centrifugal pumps, a ZJ200-25 screw type centrifugal pump with double screw blades was chosen as the study subject. Based on Navier-Stokes equations and shear stress transport (SST) turbulent models, 3-D unsteady flow field of the pump was simulated numerically under several operating conditions. Seven monitor points were set at the impeller-volute coupling interface, inlet and outlet faces of the pump. The pressure fluctuation and the corresponding frequency spectrum at different monitor points were obtained from the simulation. The simulation results showed that the pressure fluctuation in the pump was periodical at different operating flow rates. The impeller blade passing frequency and impeller rotational frequency were the dominant frequency at different positions, where the dominant frequency of the impeller-volute coupling interface was nearly equal to the impeller rotational frequency, and that at the inlet and outlet face were nearly equal to the impeller blade passing frequency. The amplitudes of the pressure fluctuation at the inlet and outlet were lower than that of the impeller-volute coupling interface, and the high-frequency components at the inlet and outlet were fewer than that of the impeller-volute coupling interface. The dominant frequency at the same monitor point was constant but with different amplitude at different operating conditions, the pressure fluctuation at the coupling interface had a lower strength at the position where far away from the volute tongue.

Key words Double blade screw type centrifugal pump, Pressure fluctuation, Numerical analysis, Impeller-volute interaction

收稿日期: 2011-06-10 修回日期: 2011-09-08

* 国家自然科学基金资助项目(51009072)、国家杰出青年科学基金资助项目(50825902)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2010347)和江苏省自然科学基金创新学者攀登资助项目(BK2009006)

作者简介: 张金凤, 助理研究员, 主要从事流体机械理论与设计及流动分析研究, E-mail: zhangjinfeng@ujs.edu.cn

引言

螺旋离心泵是一种结构特殊的无堵塞泵,具有良好的吸入性、无堵塞性及抗汽蚀性。它主要用于输送含有固态或纤维物质的液体,广泛应用于矿山、电力、化工、食品、造纸以及清污等行业。研究表明,在这种泵内部,存在旋转叶片与静止部件间的相对运动、流道内水流的圆周运动和不对称流动,由此产生的压力脉动会引起泵系统的振动和噪声,严重时甚至会损毁设备^[1]。因此,研究其内部流场的压力脉动十分必要,但在螺旋离心泵内部流动的研究中,有关压力脉动的分析还很少。可以借鉴普通离心泵及其他水力机械的压力脉动研究方法及成果,对螺旋离心泵的内部流动的压力脉动进行深入分析。

国内学者针对水轮机和各种清水泵的压力脉动进行了研究。主要有试验^[2-4]和数值计算^[5-11]两种方法。而国外对水泵内部压力脉动的研究起步较早^[12-15]。

本文以 ZJ200-25 型双叶片螺旋离心泵为研究对象,采用标准 SST $k-\varepsilon$ 湍流模型对整泵进行全流道的非定常数值模拟。通过分析泵内关键位置压力脉动的时域及频域特征,初步揭示螺旋离心泵进出口以及动静交界面上的压力脉动特性,为进一步优化螺旋离心泵的水力和结构设计,提高泵运行时的稳定性提供重要依据。

1 计算模型与数值方法

1.1 模型参数及网格划分

计算模型设计参数:流量 $Q = 200 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 25 \text{ m}$,转速 $n = 1450 \text{ r}/\text{min}$,比转数 $n_s = 116$,叶片数 $Z = 2$ 。叶轮为半开式叶轮,进口直径 $D_1 = 160 \text{ mm}$,出口直径 $D_2 = 328 \text{ mm}$,出口宽度 $b_2 = 70 \text{ mm}$,蜗壳基圆直径 $D_3 = 360 \text{ mm}$ 。建模在三维造型软件 Pro/E 中完成。计算区域由进口管路、叶轮和蜗壳 3 部分水体组成,如图 1 所示。其中,螺旋形

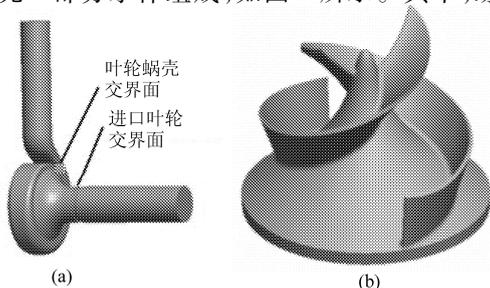


图 1 螺旋离心泵三维造型图

Fig. 1 3-D model of screw centrifugal pump

(a) 计算区域三维造型 (b) 叶轮结构图

叶片外缘与吸水壳体内壁间隙为 0.9 mm ,为保证计算的准确性,在建模时考虑了此处的水体。模型中未考虑叶轮后盖板与流体的摩擦损失以及容积损失。

将螺旋离心泵的三维模型(图 1a)导入网格划分软件 Gambit 生成计算区域的网格。划分网格时,考虑到螺旋形叶片在空间上的扭曲结构以及大包角的特点,为使离散方程更易收敛、求解压力梯度更加精确^[16],所有计算域网格类型均采用四面体非结构化网格,网格总数为 998 459。

1.2 监测点布置

图 2 为模型中监测点位置示意图,图中点 A 位于进口与叶轮交界面的圆心处,点 B 位于蜗壳的出口端面圆心处。根据文献^[12]所得结论:旋转叶轮与静止蜗壳的相互干涉作用是产生压力脉动的主要因素之一。因此,在图中 P1 ~ P5 的位置沿叶片出口边方向,每处设置 3 个监测点,并选择脉动相对规律的点进行分析。其中点 P1 为隔舌监测点,P2 ~ P5 为叶轮出口均布的监测点,间隔为 90° ,以期能够实现泵内关键位置压力脉动的监测。

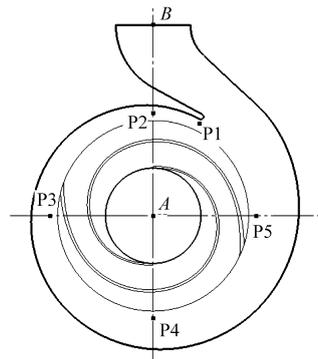


图 2 监测点分布图

Fig. 2 Monitoring points in the pump

1.3 数学模型及模拟方法

数值模拟在 ANSYS CFX12.1 全隐式耦合多网格线性求解器中进行。非定常计算采用 SST $k-\varepsilon$ 湍流模型,以定常 RANS 计算结果作为初始条件,通过更适宜于瞬态求解的 PISO 算法对动量方程和连续性方程进行联立求解。进、出口边界条件分别定义为速度进口和自由出流,设置参考压力为大气压,给定不同工况下的进口速度进行计算。固体壁面定义为无滑移边界条件,给定壁面粗糙度。进口与叶轮、叶轮与蜗壳间的交界面属于动静耦合交界面,故采用 frozen rotor 设置动静耦合面上的参数传递,将相应的交界面设置为 Transient Rotor Stator。以叶轮旋转 2° 作为一个时间步,每个时间步长 0.00023 s ,每个旋转周期包含 180 个时间步。选择 5 个旋转周期作为采样对象,900 步的总时间为 0.207 s 。

2 外特性预测

通过定常计算得出模型泵在5个工况点的扬程与效率,绘制 $Q-H$ 、 $Q-\eta$ 曲线并与该泵在江苏大学流体机械工程技术研究中心实验室的清水试验数据对比,结果如图3所示。

从图3中可以看出,模拟预测所得曲线与外特性试验所得曲线趋势一致,扬程曲线在大流量点和设计工况二者吻合良好,小流量点试验值略低于模拟值,但误差不超过总扬程的3.5%;效率曲线中各点的模拟值略高于试验值,相对误差不超过5.8%,故所选用的计算模型比较准确地预测了该泵的外特性,这也证实了本数值模拟的可靠性和可行性,为进一步的压力脉动分析提供了保证。

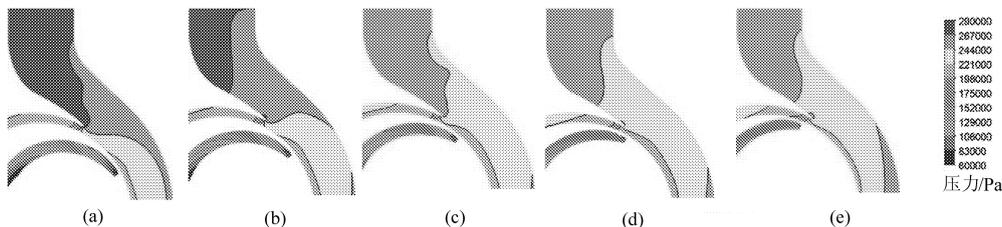


图3 性能曲线对比

Fig. 3 Comparison of performance curves

3 结果与分析

3.1 隔舌附近的压力云图

图4为设计流量下,叶片扫过隔舌不同时刻,蜗壳隔舌与叶片压力面的静压分布变化云图。

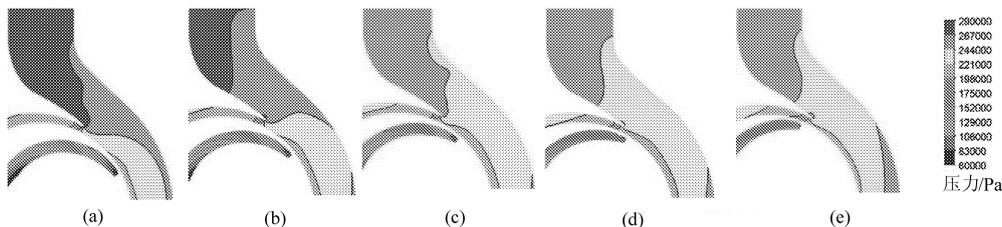


图4 叶片与隔舌静压分布云图

Fig. 4 Static pressure contour with different relative positions between blades and tongue

从图4中可以看出:

(1) 叶片扫过隔舌时,两处的静压分布出现了突变,叶片上的压力分布呈现高压区向低压区均匀扩散,平均静压值随之升高(如图4b~4d所示);蜗壳静压值在喉部及扩散段都有明显的降低趋势,这说明叶片转到隔舌位置的出口流量最大,远离隔舌时最小,这与文献[7]结论相似。

(2) 叶片扫过隔舌前后,隔舌头部存在一小片高压区(如图4b、4e所示),这是由于叶轮的出口速度遇到了隔舌的阻碍,叶片形成的尾流冲击隔舌头部,造成尾流速度的急剧下降,导致了头部压力的升高。

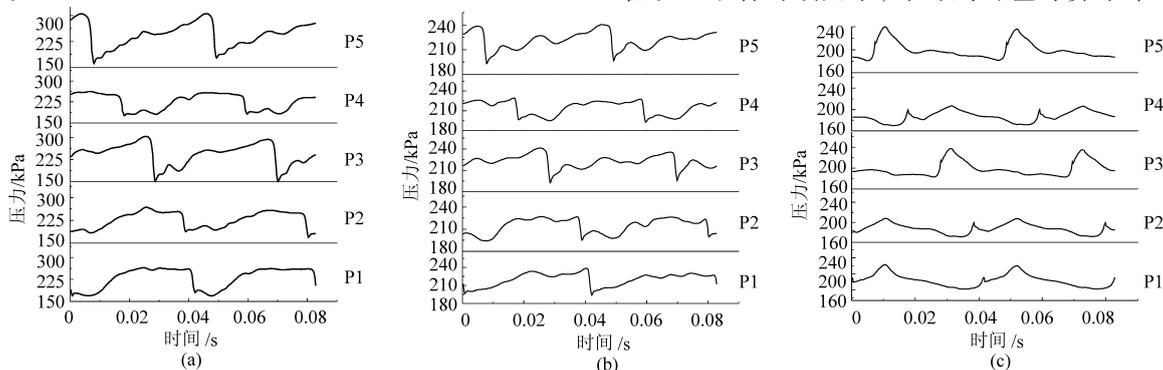


图5 不同流量下监测点P1~P5时域图

Fig. 5 Time-domain spectrums of monitor point P1 ~ P5 under different operating conditions

(a) 0.5Q (b) 1.0Q (c) 1.5Q

(3) 叶片到达隔舌时,蜗壳出口压力达到最大,高于出口静压均值(如图4a、4e所示),叶片远离隔舌时压力最小,这与蜗壳出口压力随时间变化的规律相符合。

3.2 叶轮与蜗壳耦合处的压力脉动分析

非定常计算在多个工况下进行,并选择0.5Q、1.0Q和1.5Q3个典型工况进行数据分析。各工况的计算在前3个旋转周期已经收敛,在第4、5旋转周期达到稳定,故选取这两个旋转周期的数据进行脉动分析,得到了不同流量下各点的时域图,如图5所示,图中自下而上依次是监测点P1~P5的压力值。以下各时域图中,零时刻对应计算中第4个旋

转周期的起始时刻。使用 Origin 8.0 绘图软件,对时域图中的压力-时间曲线作快速傅里叶变换,得到

对应的频域图,其中横坐标为频率,纵坐标为压力波动的幅值,如图 6 所示。

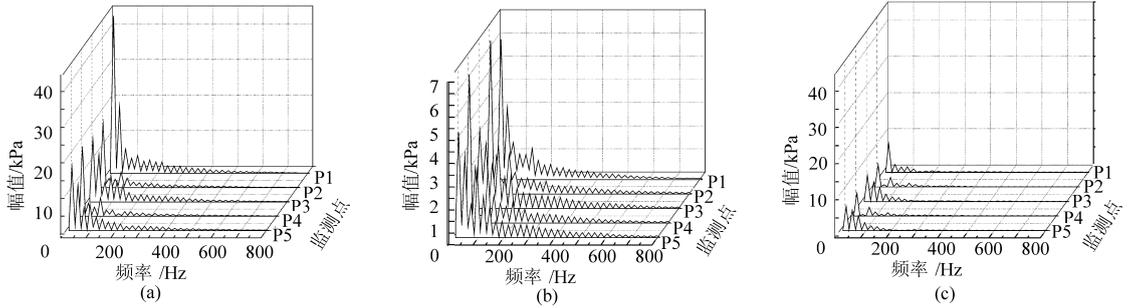


图 6 不同流量下监测点 P1 ~ P5 频谱图

Fig. 6 Frequency spectrums of monitor point P1 ~ P5 under different operating conditions

(a) 0.5Q (b) 1.0Q (c) 1.5Q

由图 5 各点压力波动特点可以看出,不同流量下各监测点压力波形具有明显的周期性,小流量下的压力平均值最大,大流量下各监测点的压力平均值最小,这与所预测外特性所得 $Q-H$ 曲线趋势一致。

测点 P1、P2,其主频幅值最大,而距离隔舌较远的监测点 P3 ~ P5 的主频幅值相对较小,总体呈现离隔舌越远幅值越小的趋势。

图 6 为监测点 P1 ~ P5 在不同流量下的频谱图,由各点频谱特性可以得出:200 Hz 以内的压力波动有较大的振幅,高于 200 Hz 频率的波动幅度相对很小,对压力波动的贡献也很小,因此泵内的压力波动主要受低频率波的影响。分析 FFT 变换所得数据可知,不同流量下,不同监测点的主频都集中在 24 Hz 左右。同时,在频率 48 Hz 左右的次主频振幅与主频振幅大小相当。这两个频率刚好与叶轮的轴频和叶频相符,这是由叶轮和蜗壳的动静耦合作用的影响以及蜗壳内流动不对称性所决定的。因此,泵内动静耦合处的压力脉动主要受轴频和叶频的影响,这与文献[13]和[14]得出的结论一致。

3.3 进出口压力脉动分析

图 7a、7b 为叶轮进口监测点 A 在不同流量下的压力脉动时域图及频谱图,时域图中自下而上分别为 0.5Q、1.0Q、1.5Q 3 种工况下的曲线。

进口监测点 A 位于叶轮进口前端,但通过时域图发现,泵入口段已有压力脉动存在,且与其他监测点压力脉动有明显差别。不同流量下进口处的压力脉动主频都是 48 Hz,是其他监测点的 2 倍,这主要是由于叶轮的螺旋段与蜗壳动静耦合作用的影响。其他几个多倍叶频对应的点幅值相对较大,幅值随着频率增大而递减,且轴频对应的幅值极小,高频脉动的成分极少,说明进口压力波动主要受 400 Hz 以内的叶频影响。

对比不同流量下的频谱图发现,0.5Q 的小流量下主频振幅最高,振动幅度达到了出口总压的 5%,设计工况下的主频振幅最小,振幅未超过出口总压的 3%,1.5Q 大流量下的主频振幅略高于设计工况,振幅在出口总压的 3.5% 以内。这说明,设计流量下的泵内压力脉动强度最小。各流量下,监测点 P1 ~ P5 的主频幅值大小差别明显,距离隔舌最近监

由频域图可知,大流量下的脉动幅值最小,设计流量和小流量的幅值差别不大,约为大流量下的 2 倍。对比监测点 P1 ~ P5 的脉动特性(幅值 8 ~ 45 kPa)可以看出,进口压力脉动在各流量下的振动幅度值(0.2 ~ 1.1 kPa)都是很小的,因此进口处的流动也相对稳定得多。

图 7c、7d 为蜗壳出口监测点 B 在不同流量下的压力脉动时域图及频谱图,时域图中自下而上分别

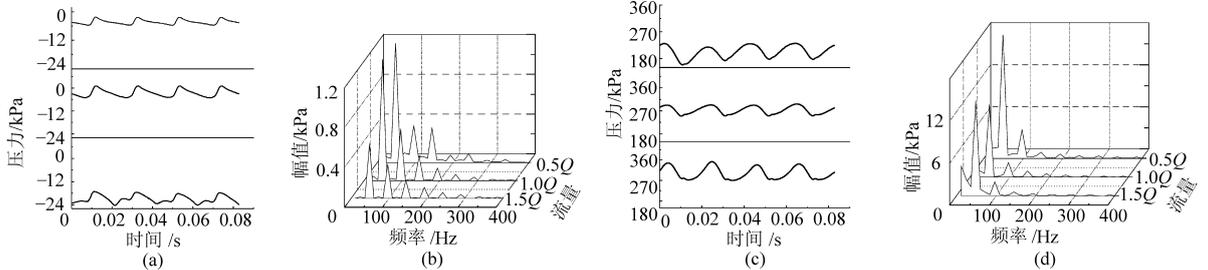


图 7 不同流量进出口监测点时域图及频谱图

Fig. 7 Time-domain and frequency spectrums of monitor points under the inlet and outlet under different operating conditions

(a) 进口压力脉动时域图 (b) 进口压力脉动频域图 (c) 出口压力脉动时域图 (d) 出口压力脉动频域图

为 0.5Q、1.0Q、1.5Q 3 种工况下的曲线。

由频域图可知,小流量下的静压值高于大流量的静压值,不同流量下的出口静压值在各自对应的扬程上下波动,与离心泵的流量-扬程曲线趋势一致。各流量下的压力波动呈现周期相同的正弦波形。由频谱图可知,各流量出口压力脉动的主频都为 48 Hz,与进口相同。小流量下的幅值最大,设计工况与大流量幅值偏小,这与耦合处(监测点 P1 ~ P5)的压力脉动具有相同的特征。相对于蜗壳耦合处的脉动,监测点 B 的轴频振幅降低很多,叶频也有小幅度降低。这表明出口压力脉动是泵内部压力脉动的延续,但强度已经减弱,出口压力脉动受叶频影响较大,轴频脉动影响相对较小。

4 结论

(1)不同工况下,螺旋离心泵内各监测点压力波动具有明显的周期性,蜗壳内压力脉动主频为轴

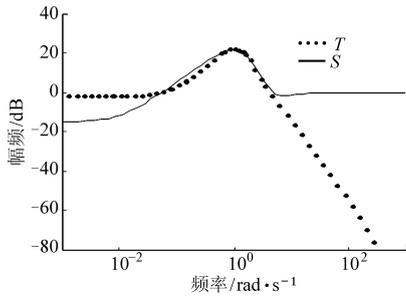
频,进出口脉动主频为叶频。进口脉动幅值相对出口及泵内脉动幅值很小;各工况下,同一监测点压力脉动具有相同的主频,但主频幅值在非设计工况下增大,在小流量下最大,设计流量下最小,大流量下幅值增大不明显。

(2)旋转叶轮与静止蜗壳隔舌间的动静耦合作用是螺旋离心泵内部压力脉动的主要脉动源。泵内压力脉动的主频幅值在隔舌附近最大,远离隔舌处脉动强度较低,说明由此产生的压力脉动在整个流道内传播,并有不同程度的减弱。

(3)由叶轮与蜗壳动静干涉作用所引起的压力脉动是十分明显的,这也是引起螺旋离心泵不稳定运行的重要因素,在水力及结构设计中要对此予以足够的重视,除满足外特性要求外,还应考虑内部流场的脉动情况。小流量下的脉动强度最大,对泵设备的破坏性也最强,因此,在运行及维护方面,应尽量避免螺旋离心泵在小流量下运行。

参 考 文 献

- 1 封俊. 螺旋式离心泵的研究现状与应用研究[J]. 水泵技术, 1992(3): 3 ~ 7.
- 2 袁寿其,薛菲,袁建平,等. 离心泵压力脉动对流动噪声影响的试验研究[J]. 排灌机械, 2009, 27(5):287 ~ 290.
Yuan Shouqi, Xue Fei, Yuan Jianping, et al. Experimental study on impact of pressure fluctuation on flow-noise in centrifugal pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(5): 287 ~ 290. (in Chinese)
- 3 姚志峰,王福军,肖若富,等. 离心泵压力脉动测试关键问题分析[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(3):219 ~ 223.
Yao Zhifeng, Wang Fujun, Xiao Ruofu, et al. Key issues in pressure fluctuation experiments for centrifugal pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery, 2010,28(3): 219 ~ 223. (in Chinese)
- 4 郑源,张飞,蒋小欣,等. 贯流泵装置模型试验转轮出水口压力脉动研究[J]. 流体机械, 2007, 35(1):1 ~ 4.
Zheng Yuan, Zhang Fei, Jiang Xiaoxin, et al. Research on outlet pressure pulsation of reverse operation in tubular pump model experiment[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(1):1 ~ 4. (in Chinese)
- 5 陈向阳,袁丹青,杨敏官,等. 300 MW 级核电站主泵压力脉动研究[J]. 核动力工程, 2010, 31(3):78 ~ 82.
Chen Xiangyang, Yuan Danqing, Yang Minguan, et al. Study on pressure fluctuation in main pump of 300 MW nuclear power plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(3):78 ~ 82. (in Chinese)
- 6 王春林,易同祥,吴志旺. 混流式核主泵非定常流场的压力脉动特性分析[J]. 动力工程, 2009, 29(11):1 036 ~ 1 040.
Wang Chunlin, Yi Tongxiang, Wu Zhiwang. Analysis on pressure fluctuations of unsteady flow field in mixed flow main coolant pump[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(11):1 036 ~ 1 040. (in Chinese)
- 7 杨敏,闵思明,王福军. 双蜗壳泵压力脉动特性及叶轮径向力数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009,40(11): 83 ~ 88.
Yang Min, Min Siming, Wang Fujun. Numerical simulation of pressure fluctuation and radial force in a double volute pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(11): 83 ~ 88. (in Chinese)
- 8 丛国辉,王福军. 双吸离心泵隔舌区压力脉动特性分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6):60 ~ 63.
Cong Guohui, Wang Fujun. Numerical investigation of unsteady of pressure fluctuations near volute tongue in a double-suction centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 60 ~ 63. (in Chinese)
- 9 王福军,张玲,黎耀军,等. 轴流式水泵非定常湍流数值模拟的若干关键问题[J]. 机械工程学报, 2008,44(8): 73 ~ 77.
Wang Fujun, Zhang Ling, Li Yaojun, et al. Some key issues of unsteady turbulent numerical simulation in axial-flow pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 73 ~ 77. (in Chinese)
- 10 钱忠东,郑彪. 不同同步导叶对混流式水轮机压力脉动的影响分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(3):203 ~ 208.
Qian Zhongdong, Zheng Biao. Analysis of pressure pulsation in francis hydraulic turbine with misaligned guide vanes[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(3):203 ~ 208. (in Chinese)
- 11 钱忠东,李万. 不同形式泄水锥对水轮机压力脉动的影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2010(12):156 ~ 159.
Qian Zhongdong, Li Wan. Influence of pressure oscillation on francis hydraulic turbine with different runner cones [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(12):156 ~ 159. (in Chinese)

图6 S 和 T 的奇异值Fig.6 Singular values curves of S and T functions

5 结论

(1) 设计的基于混合灵敏度 H_{∞} 的鲁棒控制器能够有效抑制混联式 HEV 能量控制系统行驶过程中存在的多种干扰和参数不确定的摄动,且超调量小,提高了系统的稳定性和快速性。

(2) 利用遗传算法确定了各加权函数参数。

(3) 仿真结果表明控制器能有效地防止能量控制系统发生误切换,提高了系统的抗干扰能力。

参 考 文 献

- Powell B K, Bailey K E, Cikanek S R. Dynamic modeling and control of hybrid electric vehicle power train systems[J]. Control Systems IEEE, 1998, 18(5): 17~33.
- Lu Hao, Li Yunhua, Tian Shengli, et al. Improved hybrid robust control method for the electromechanical actuator in aircrafts [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(4):443~450.
- Zhou Tong, Xing Huawei. Robust control of a four axis HTS coil based maglev system[C]//Proceedings of the 24th Chinese Control Conference, Guangzhou, China, 2005:559~563.
- 王益群,曹栋璞,陈星,等. 热连轧卷取机踏步系统鲁棒 H_{∞} 控制研究[J]. 机械工程学报, 2002,38(10): 62~65. Wang Yiqun, Cao Dongpu, Chen Xing, et al. Robust H_{∞} control of step-by-step system for coiler of hot continuous mill [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002,38(10): 62~65. (in Chinese)
- 孙建亮,彭艳,刘宏民,等. 基于测厚仪监控的厚控系统动态建模及其鲁棒 H_{∞} 控制器设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 160~170. Sun Jianliang, Peng Yan, Liu Hongmin, et al. Dynamic modeling of gauge control system based on thickness gauge and design of H_{∞} robust controller [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(6): 160~170. (in Chinese)
- 景鹏,童朝南,彭开香,等. 基于分散鲁棒控制策略的冷连轧板形板厚多变量系统研究[J]. 控制与决策, 2010, 25(4):581~586. Jing Peng, Tong Chaonan, Peng Kaixiang, et al. Distributed robust control for combined shape and gauge system in cold rolling process[J]. Control and Decision, 2010, 25(4):581~586. (in Chinese)
- 王幼民,司妙丽. 电液位置伺服系统干扰抑制问题的 H_{∞} 控制[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 164~166, 170. Wang Youmin, Si Miaoli. H_{∞} control of disturbance attenuation problem for electro hydraulic position servo system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 164~166, 170. (in Chinese)
- Ismail Meric, Can Uygan, Ahu Ece Hartavi, et al. Propulsion system design of a hybrid electric vehicle[J]. International Journal of Vehicle Design, 2010, 52(1/2/3/4): 96~118.
- 蔡自兴. 智能控制原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- 李西秦,刘冰,范承德. 天然气发动机怠速鲁棒控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 49~52. Li Xiqin, Liu Bing, Fan Chengde. Idle speed control of CNG engine based on robust control theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(4): 49~52. (in Chinese)

(上接第 106 页)

- Sudo S, Komatsu T, Kondo M. Pumpingplant noise reduction[J]. Hitachi Rev., 1980, 29(5):217~220.
- Dring R P, Joslyn H D, Hardwin L W, et al. Turbine rotor-stator interaction [J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1982, 104(4):729~742.
- Jose Gonzalez, Carlos Santolaria. Unsteady flow structure and global variables in a centrifugal pump[J]. ASME Journal of Fluids Engineering,2006,128(9): 937~945.
- Zhang Ye, Wang Xiaofang, Xu Shengli. Numerical analysis of pressure fluctuations caused by impeller-diffuser interaction in a mixed flow reactor coolant pump [C]// Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific, 2011(3):1~4.
- Thakker A, Hourigan F. A comparison of two meshing schemes for CFD analysis of the impulse turbine for wave energy applications [J]. Renewable Energy, 2005,30(9):1404~1410.