

运用变转速法计算离心泵启动停机的瞬态流动性能

黄思¹, 张杰¹, 张雪娇¹, 区国惟²

1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510640

2. 广东省佛山水泵厂有限公司, 佛山 528000

摘要 离心泵启动和停机等问题归根结底是离心泵水力性能随转速变化的瞬态过程。以常用的IS125型管道离心水泵为例,在数值模拟中采用叶轮转速随时间变化的CFD计算方法,研究离心泵开机、停机等变转速过程中水泵内部流动状态以及外特性的动态变化。整个模拟计算过程包括泵启动、正常运行、停机和停机后4个阶段。模拟计算得到了4个阶段不同时刻泵内流场分布状况,得到了4个阶段流量扬程等水泵外特性参数随时间的变化规律,可为改善水泵的设计性能和实际运行性能提供理论依据。

关键词 变转速方法;离心泵启动停机;非正常流场;数值模拟

中图分类号 TQ051.7

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.02.006

Numerical simulation of transient flow performance during starting and stopping processes in centrifugal pump by varied-speed method

HUANG Si¹, ZHANG Jie¹, ZHANG Xuejiao¹, OU Guowei²

1. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

2. Foshan Pump Factory Co., Ltd., Foshan 528000, China

Abstract The starting and stopping processes of a centrifugal pump are essentially transient processes, where the hydraulic performance changes with the rotational speed of the pump. In this paper, the CFD simulation is made by changing the impeller rotational speed over time for the type IS125 centrifugal pump to study the transient internal flow field and the external performance of the pump during starting and stopping processes. The entire simulation consists of four stages, including the startup, the normal running, the stopping and post-stopping of the pump. The variations of the flow field are obtained from the transient simulation. The flow-rate, the head and other external performance parameters against time are also obtained, which can be used in pump designs and actual operations.

Keywords varied-speed method; starting and stopping processes of centrifugal pump; transient flow field; numerical simulation

离心泵启动和停机等过程会使水泵内部流动产生瞬时显著变化,体现在离心泵的转速、流量、扬程和效率等外特性参数随时间发生改变。近年来,离心泵启动和停机等瞬 时水力特性的研究引起了广泛关注,从理论公式推导、外特性实验、内流场测试等方面开展了有价值的工作^[1-8]。一些学者对离心泵启动、停机等过程的流动数值计算也进行了尝试^[9-11],

但在计算方法上都未能采用叶轮变转速的直接方式。

离心泵启动和停机等瞬态问题归根结底是离心泵水力性能随转速变化的过程,因此本文在离心泵瞬态流动计算中采用叶轮转速随时间变化的CFD计算方法,研究探讨泵开机停机过程中水泵内部流动状态以及外特性的动态变化规律,为改善水泵的设计性能和实际运行性能提供理论依据。

收稿日期:2014-11-18;修回日期:2014-12-17

作者简介:黄思,教授,研究方向为流体机械及工程,电子邮箱:huangsi@scut.edu.cn

引用格式:黄思,张杰,张雪娇,等.运用变转速法计算离心泵启动停机的瞬态流动性能[J].科技导报,2015,33(2):49-53.

1 计算方法

1.1 变速参考系下的流体控制方程

叶片机械因叶轮的旋转运动使得内部流动变得非常复杂,一般需要在叶轮上建立一个相对运动参考系(非惯性系)与静止参考系(惯性系)结合进行多参考系下的流场分析。如图1所示,静止参考系和运动参考系的速度关系为

$$v_i = v - u_i \quad (1)$$

式中

$$u_i = v_i + \omega \times r \quad (2)$$

其中, v_i 为运动参考系下的相对速度, v 为静止参考系下的绝对速度; u_i 为运动坐标系在静止参考系下的速度,其中 v_i 为平动速度, ω 为角速度。这里 v_i 和 ω 可以是常数(恒速),也可以是时间 t 的函数(变速)。将式(1)代入静止惯性系的流体控制方程组,得到运动参考系下的连续方程和动量方程分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \nabla \cdot (\rho v_i v_i) + \rho [2\omega \times v_i + \omega \times (\omega \times r) + \varepsilon \times r + a] = -\nabla p + \nabla \cdot [\tau_{ij}] + F \quad (4)$$

其中 $\varepsilon = d\omega/dt$ 和 $a = dv/dt$ 分别为运动参考系在静止参考系下的角加速度和平动加速度。 ρ 为流体密度, p 为静压, $[\tau_{ij}]$ 为运动参考系下的黏性应力张量, F 为流体体积力。

动量方程式(4)中含有4个加速度项,其中哥氏(Coriolis)加速度 $2\omega \times v_i$ 和离心加速度 $\omega \times (\omega \times r)$ 无论是恒速运动参考系还是变速参考系都是存在的。另外2个加速度项 $\varepsilon \times r$ 和 a 在恒速旋转或平动时为零,但在变速旋转或平动时不能为零,式(3)和式(4)为变速参考系下的流体控制方程组。

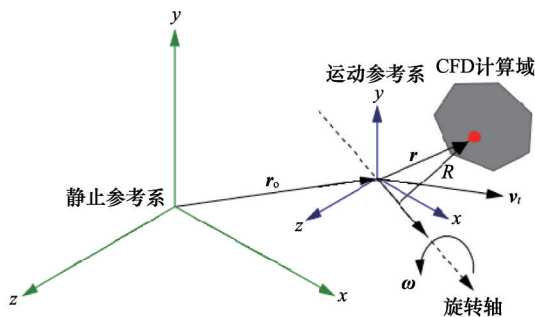


图1 静止和运动参考系的关系

Fig. 1 Relationship between stationary and moving frames of reference

1.2 计算域及网格划分

选取IS125型管道离心水泵(比转速 $n_b=65$, 叶轮叶片数 $Z=6$)为研究对象。流场计算域由入口管路、叶轮、蜗壳和出口管路组成。应用Pro-E软件构造流动计算域的三维模型,导入ICEM软件中进行计算网格划分,得到如图2所示的结构网格单元。网格单元总数为1019538,其中进口段、叶轮、蜗壳和出口段计算域的网格数分别为334500, 331888, 279810

和73340。运用Ansys-CFX软件在多参考系下进行离心泵非定常流场计算,设置入口段、泵体与叶轮的交界面为滑移界面,叶轮计算域设在旋转参考系,其余计算域设在静止参考系。变速参考系下,式(4)中角加速度项 $\varepsilon \times r$ 不能为零,本文所使用的Ansys软件具备了多参考系的求解器并兼顾了角加速度项不为零的功能。

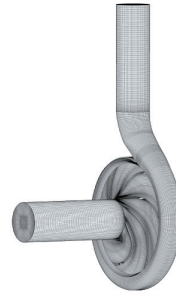


图2 计算域网格单元

Fig. 2 Computational meshes

1.3 泵工况及流体物性

水泵的介质是20℃清水,其密度 ρ 为 998.2 kg/m^3 , 流量 Q 设定为 $0 \sim 96 \text{ L/s}$, 其中,额定流量 $Q_n=54 \text{ L/s}$, 转速 n 为 $0 \sim 2950 \text{ r/min}$, 额定转速 $n=2950 \text{ r/min}$, 动力黏度 μ 为 $1.003 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。

1.4 边界条件

计算域进出口阀门为全开,进出口边界条件均采用总压力条件,进出口总压差值可按阀门开度对应的扬程值设定。采用无滑移固壁条件,并使用标准壁面函数确定固壁附近流动。

1.5 变速非定常计算方法

现有的研究资料表明,水泵启动和停机的转速变化与加速方法和材料固有特性有关^[1]。如采用电机直接启动,水泵从静止到额定转速 $n=2950 \text{ r/min}$ 所用时间约为 0.5 s ^[8]。若采用快速启动措施,还可能进一步缩短所需的启动时间^[9]。此外,不同条件下测试的启动或停机转速随时间有不同的变化过程,例如文献[9]报道离心泵启动转速随时间作指数函数增加,文献[8]、[10]的离心泵启动转速随时间则近似作线性变化。文献[2]测试的离心泵停机转速随时间近似作直线衰减,文献[7]测试的混流泵停机转速随时间近似成二次曲线衰减。鉴于上述情况,为简化计算,本文假设叶轮启动和停机均在 0.2 s 内完成且转速 n 近似随时间 t 作线性变化,整个模拟计算过程包括泵启动、运行、停机和停机后4个阶段。将 n 与 t 的关系写成如下函数形式,并直接设置到软件的叶轮转速中进行瞬态计算。

$$n = \begin{cases} 14750t & t < 0.2 \text{ 启动增速} \\ 2950 & 0.2 \leq t \leq 0.6 \text{ 正常运行} \\ 11800 - 14750t & 0.6 < t \leq 0.8 \text{ 停机减速} \\ 0 & t > 0.8 \text{ 停机后} \end{cases} \quad (5)$$

离心泵启动和停机过程是叶轮突然起动加速或减速引起内部复杂流动的瞬态过程,泵内流动经历了层流、过渡及湍流等不同阶段,在现有湍流模型中尚未有一个计算模型可

以涵盖整个过程。为简化起见,本文选取工程中常用的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, SIMPLEC 算法求解压力和速度的耦合。设置流动计算时间步长 $\Delta t = 60/65nZ$, 以静止流速和静止转速作为计算初始条件,通过设置计算残差和监测水泵流量 Q 、扬程 H 是否为零值作为计算结束条件。

2 计算结果及分析

2.1 速度场分布

图3和图4分别给出了离心泵在启动加速、停机减速过

程中不同时刻的流速和压力分布,图中左侧是流速矢量图(其中叶轮内流速为相对流速,下同),右侧是压力云图。在启动加速阶段($t < 0.20$ s),由图3可见,随着转速 n 的增加,水泵内流速和压力值逐渐增大。根据后处理结果,从启动开始($t=0$ s)时的泵内零流速和零静压值,到泵转速稳定($t=0.20$ s)时,泵内平均流速升到 16.3 m/s,平均静压值升到 1.34×10^5 Pa。由于泵进出口阀门处于全开状态,当泵叶轮转速 n 达到额定值 2950 r/min ($0.20 \text{ s} < t < 0.60$ s)后,泵出口附近的流速较高。

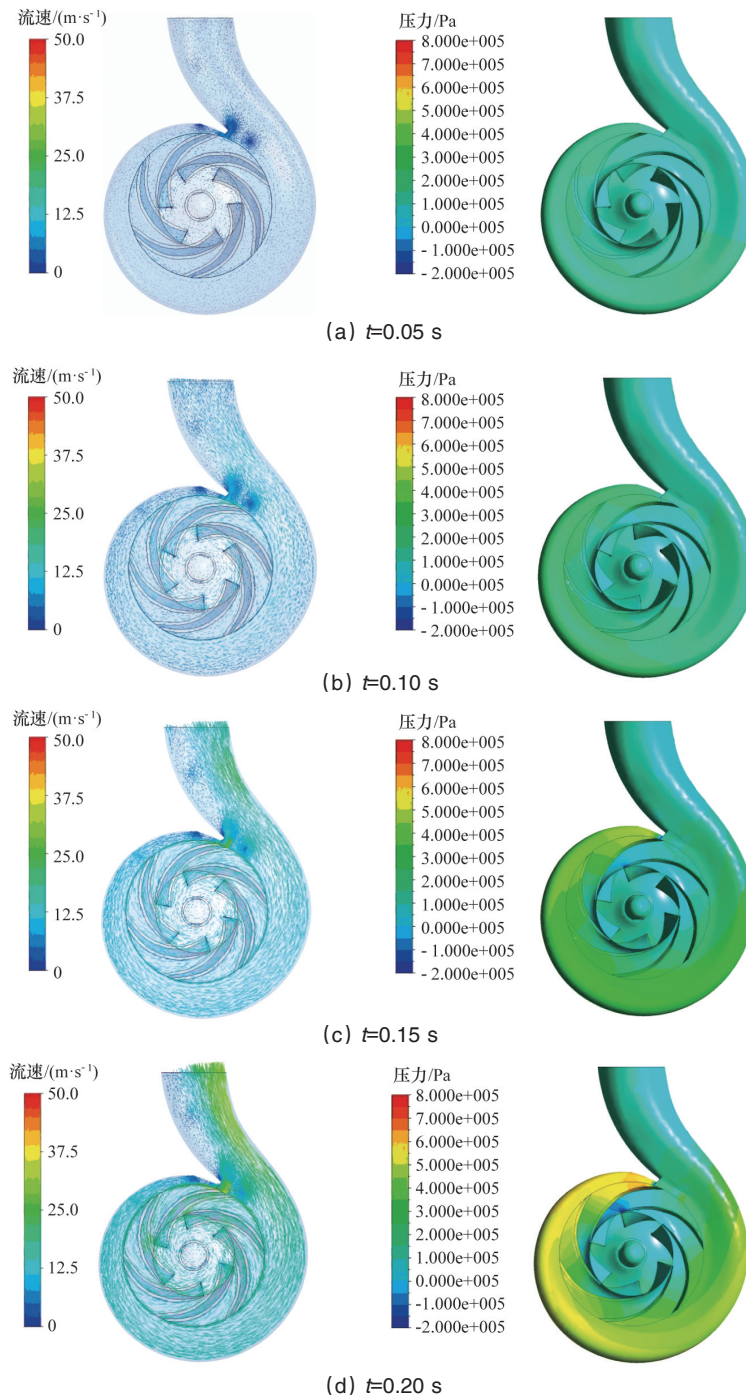


图3 启动加速阶段泵内流速和压力分布

Fig. 3 Velocity and pressure distributions inside pump during starting and accelerating stages

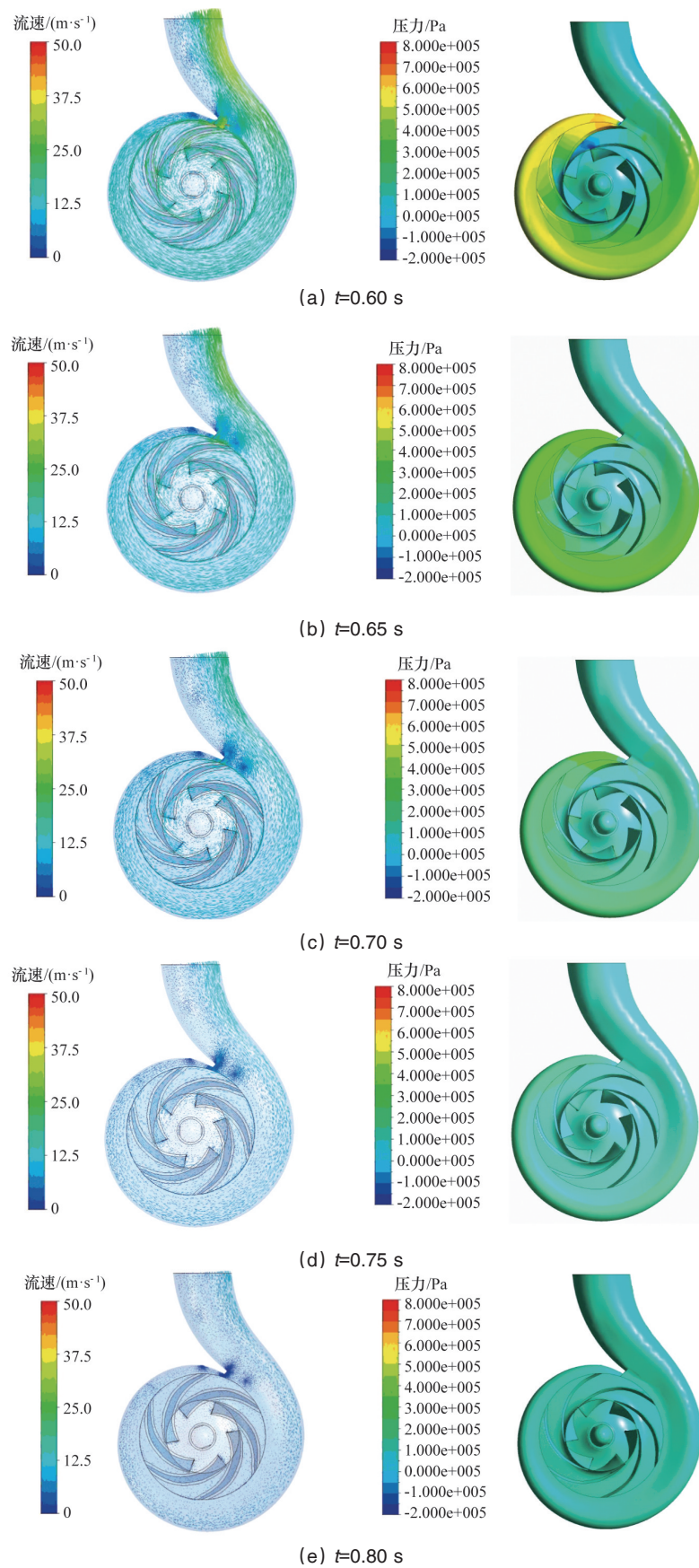


图4 停机减速阶段泵内流速和压力分布

Fig. 4 Velocity and pressure distributions inside pump during stopping and decelerating stages

由图4可见,在停机减速阶段($0.60\text{ s} < t < 0.80\text{ s}$),随着转速 n 的减小,水泵内的流速和压力值逐渐减小。从停机开始($t=0.60\text{ s}$)时泵内平均流速 16.79 m/s 和平均静压值 $1.34 \times 10^5\text{ Pa}$,到泵转速为零值($t=0.80\text{ s}$)时,泵内平均流速降到 2.22 m/s ,平均静压值降到 461.4 Pa ,可见当泵转速 n 达到零值后泵内仍存在流动和压差。

2.2 非正常外特性

图5给出了计算得到的变转速过程中离心泵出口流量 Q 和扬程 H 随时间 t 的变化结果。由图5可见,离心泵在启动($t < 0.2\text{ s}$)过程中,流量 Q 和扬程 H 随转速 n 增大而增大;对式(5)在启动加速段求时间导数,得到叶轮的启动角加速度 $\varepsilon = d\omega/dt = (\pi/30)dn/dt = 1544.6\text{ rad/s}^2$ 。

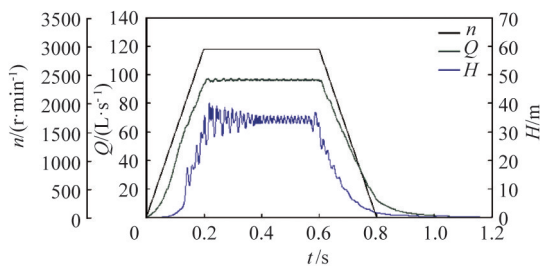


图5 变速过程中离心泵的外特性与时间关系

Fig. 5 Relationship between pump performance and time in varied-speed process

当 n 达到额定值 2950 r/min 后($t \geq 0.2\text{ s}$),此时叶轮的角加速度由原来的 $\varepsilon = 1544.6\text{ rad/s}^2$ 突然降为0,导致 Q 值和 H 值出现不同程度的震荡, H 值的振幅明显大于 Q 值的振幅,说明泵叶轮的旋转加速度变化对扬程 H 脉动产生较显著的影响;经过一段时间的调整,水泵进入正常运行状态, Q 值和 H 值显示稳定的谐波变化;在停机减速阶段($0.6\text{ s} < t < 0.8\text{ s}$),离心泵的 Q 值和 H 值随 n 值的减小而减小,但 Q 值和 H 值的减小滞后于转速 n 的下降。在离心泵停机后($t \geq 0.8\text{ s}$),此时叶轮虽已失去动力源,但由于流体的惯性作用,泵的 Q 和 H 持续了一段时间后才达到零值,该持续时间几乎是停止转速所需时间的2倍。

3 结论

1) 采用叶轮转速随时间变化的CFD计算方法,研究离心泵开机停机等变转速过程中水泵内部流动状态以及外特性的动态变化是切实可行的。

2) 模拟计算整个过程包括泵启动、运行、停机和停机后4个阶段。计算结果显示,离心泵内流速、压力值以及外特性参数流量和扬程与叶轮转速成正比。当启动加速达到额定转速后,因叶轮旋转角加速度的突然变化使得 Q 值和 H 值出现不同程度的震荡,其中 H 值的振幅明显大于 Q 值的振幅。

3) 离心泵叶轮停止转动后,由于流体的惯性作用,泵的

Q 和 H 持续一段时间后才达到零值,该持续时间几乎是停止转速所需时间的2倍。

参考文献(References)

- [1] Tsukamoto H, Ohashi H. Transient characteristics of a centrifugal pump during starting period[J]. ASME Journal of Fluid Engineering, 1982, 104(1): 6-13.
- [2] Tsukamoto H, Matsunaga S, Yoneda H, et al. Transient characteristics of a centrifugal pump during stopping period[J]. Journal of Fluids Engineering, 1986, 108(4): 392-399.
- [3] Saito S. The transient characteristics of a pump during start up[J]. Bulletin of JSME, 1982, 25(201): 372-379.
- [4] Tanaka T, Tsukamoto H. Transient behavior of a cavitating centrifugal pump at rapid change in operating conditions- Part 2: Transient phenomena at pump startup/shutdown[J]. Journal of Fluids Engineering, 1999, 121(4): 850-856.
- [5] Elaoud S, Hadj-Taïeb E. Influence of pump starting times on transient flows in pipes[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(9): 3624-3631.
- [6] 平仕良, 吴大转, 王乐勤. 离心式水泵快速开启过程的瞬态效应分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(5): 814-817.
Ping Shiliang, Wu Dazhuan, Wang Leqin. Transient effect analysis of centrifugal pump during rapid starting period[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(5): 814-817.
- [7] 陈炜, 柯仙文, 吴大转, 等. 混流泵停机过程的瞬态水力特性分析研究[J]. 流体机械, 2006, 34(12): 1-4.
Chen Wei, Ke Xianwen, Wu Dazhuan, et al. Analysis on transient performance of mixed flow pump during stopping period[J]. Fluid Machinery, 2006, 34(12): 1-4.
- [8] 陈颂英, 李春峰, 曲延鹏, 等. 离心泵在启动阶段的水力特性研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(5): 781-783.
Chen Songying, Li Chunfeng, Qu Yanpeng, et al. Transient hydraulic performance of a centrifugal pump during rapid starting period[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(5): 781-783.
- [9] 吴大转, 许斌杰, 李志峰, 等. 离心泵瞬态操作条件下内部流动的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(5): 781-783.
Wu Dazhuan, Xu Binjie, Li Zhifeng, et al. Numerical simulation on internal flow of centrifugal pump during transient operation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(5): 781-783.
- [10] 许斌杰, 李志峰, 吴大转, 等. 离心泵启动过程瞬态湍流流动的数值模拟研究[J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(9): 683-687.
Xu Binjie, Li Zhifeng, Wu Dazhuan, et al. Numerical simulation for transient turbulence flow of centrifugal pump during starting period[J]. Sciencepaper Online, 2010, 5(9): 683-687.
- [11] 汤跃, 成军, 汤玲迪, 等. 不同转动惯量叶轮对泵开机瞬态特性的影响[J]. 流体机械, 2013, 41(8): 6-11.
Tang Yue, Cheng Jun, Tang Lingdi, et al. Analysis on the influence of the pump starting transient performance with different inertia impeller [J]. Fluid Machinery, 2013, 41(8): 6-11.

(责任编辑 刘志远)