

高压断路器液压操动机构管道特性研究*

刘伟 杨华勇 徐兵 魏忠永
(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 杭州 310027)

【摘要】以550 kV SF₆高压断路器液压操动机构为研究对象,分析了液压机构分合闸过程中的管道损失和压力波传递效应,建立了管道损失和压力波动分布参数模型。对系统进行了建模和仿真,讨论了液压机构的管道特性及管道结构参数对系统分合闸性能的影响。试验验证了仿真结果,证明了仿真模型的准确性。

关键词: 高压断路器 液压操动机构 管道损失 分合闸速度 压力波传递
中图分类号: TH137.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)01-0182-06

Pipe Characteristics of High Voltage Circuit Breaker
with Hydraulic Operating Mechanism

Liu Wei Yang Huayong Xu Bing Wei Zhongyong
(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract

The 550 kV high voltage circuit breaker with hydraulic operating mechanism is taken as the investigation subject. The pressure loss in pipe and the pressure wave propagation in the process of opening and closing motion are analyzed. The model of the pressure loss in pipe and the model of the pressure wave distributed parameter are established. Simulation is carried out by using AMESim software. The influence of the pipe characteristics and structure parameters on the system performance is discussed. The simulation results are thought to be in accordance with the experiment results. It shows that the models are correct.

Key words High voltage circuit breaker, Hydraulic operating mechanism, Pressure loss in pipe, Opening and closing velocity, Pressure wave propagation

引言

液压操动机构是高压断路器的核心部分之一,它的高可靠性能是高压断路器及电网正常运行的重要保证。液压机构瞬时流量每分钟达几千升,液压缸速度高达10 m/s,整个操动时间在几十毫秒内完成。与其他液压系统相比,断路器液压操动机构具有高压,高速大流量和瞬时爆发大功率等特点^[1~2]。

液压传输管道对液压系统的静态和动态性能都有着显著的影响。对于高速大流量特性的液压操动机构系统而言,液压管道损失是主要的压力损失部

分,因而也是液压机构设计优化分析的重要方面。在传动的液压系统分析理论中,往往将管路作为一个集中参数模型来处理,即只考虑其液阻和容腔效应的影响,而忽略了压力波在管道内传递时间的影响。这种处理方法在常规工程上不会导致较大分析误差,但是针对管路较长或者高速响应系统则会产生较大分析误差。在长管路或者高速响应系统中考虑管道波动效应是很有必要的。针对断路器液压操动机构的可靠性,一般分析只考虑了高速液压缸的冲击及系统泄漏,而忽略了液压管道中压力波传递产生的冲击对系统的影响。在液压操动机构高速液

收稿日期: 2008-12-26 修回日期: 2009-02-23
* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAF01B12-02)和国家自然科学基金资助项目(50675203)
作者简介: 刘伟,博士生,主要从事高压断路器液压操动机构的设计和机电液控制技术研究, E-mail: lw2002cn2000@163.com
通讯作者: 徐兵,教授,主要从事机电控制及液压传动控制技术研究, E-mail: bxu@zju.edu.cn

流的管道中,控制阀门突然关闭和打开时,往往在管道中会产生强烈的液压冲击和振动,对系统管接头的连接和密封件都有重要的影响,严重影响了断路器的系统可靠性和使用寿命^[1~2]。

本文以 550 kV 高压断路器液压操动机构为研究对象,建立管道压力损失方程,并考虑管道真实模型——分布参数模型,采用波动方程描述管路动态特性的影响,通过数值仿真的方法再现管道内的流动,试验验证液压操动机构系统的管道特性。

1 管道损失及压力波传递效应

图 1 为 550 kV SF₆ 高压断路器液压操动机构原理图,该机构属于恒高压高速大功率双稳态电液驱动系统。蓄能器为系统提供工作油源,分合闸动作完成后电机油泵启动给蓄能器补油。液压缸活塞杆通过连杆机构与断路器的灭弧机构相连,有杆腔处于常高压状态,通过二位三通电磁方向控制阀控制液压缸无杆腔油压进行断路器的分合闸动作。电磁方向控制阀由电磁铁、一级阀、二级阀及主阀结构组成。高速大流量是液压机构的重要特性,除管路损失外,管路动态特性对液压机构系统影响也非常大^[3]。图 2 为液压机构简化示意图。系统集成度高,阀、缸与油箱相互之间管路较短,蓄能器到液压缸有杆腔之间的管路是液压机构中最长的管道。

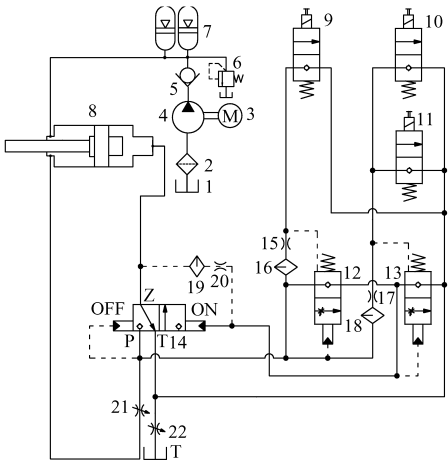


图 1 550 kV 高压断路器液压操动机构原理图

Fig. 1 Principle of the hydraulic operating mechanism

1. 油箱 2. 过滤器 3. 电动机 4. 泵 5. 单向阀 6. 蓄能器
7. 溢流阀 8. 液压缸 9. 合闸一级阀 10、11. 分闸一级阀
12. 合闸二级阀 13. 分闸二级阀 14. 主阀 15、17、21、22. 阀内
节流孔 16、18、19. 阀内过滤器

图 3 为液压机构分闸动作完成(主阀 T 与 Z 口相通)后压力波产生及传递示意图,当机构分闸完成时,液压缸活塞完成动作,此时液压缸内液流的动能转化为势能形成一个压力波。压力波以液压缸为起源通过管道传播,经过 L/C 时间到达蓄能器出

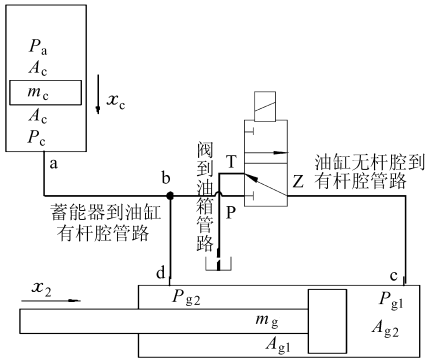


图 2 蓄能器-管路-控制阀简化结构示意图

Fig. 2 Configuration of accumulator-pipe-control valve

口。蓄能器出口处压力相对稳定,可以看作波传递介质中的固定端,根据波的反射原理,半波损失使管路返回一个与初始压力波相位差为 180° 的压力波。压力波在蓄能器与液压缸之间的管路来回传递,经过图 3 所示的 $4L/C$ 时间来回传递,压力波以最初相位返回液压缸处,完成一个波的周期传递^[4~5]。

图 3 中 L 为管道长度, C 为波传递速度, T 为波传递时间。

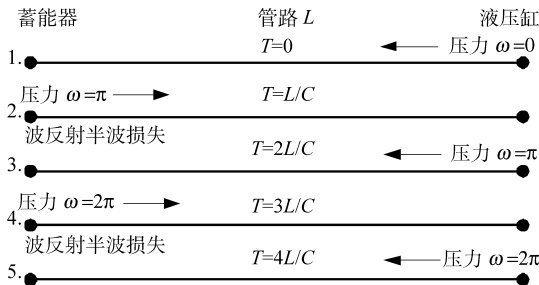


图 3 管道压力波传递示意图

Fig. 3 Sketch of pressure wave propagation

压力波动在管道中交替升降来回传播伴随很大的压力变化,使液压机构产生强大冲击和振动,严重影响系统的可靠性。如果没有阻尼作用,压力波在管道中将一直进行下去,形成周期的振荡。实际上由于流体摩擦以及流体和管壁的非弹性等作用,将使振荡产生阻尼,并最终使流动消失。压力波的传递速度和波动频率通过公式计算^[4]为

$$C = \sqrt{K/\rho} \tag{1}$$

$$f = \frac{C}{4L} \tag{2}$$

式中 K ——有效体积弹性模量
 ρ ——液体密度 f ——压力波频率, Hz

2 管道压力损失和分布参数建模

2.1 管道压力损失模型

管道压力损失包括沿程和局部损失两部分,损失系数与管道结构和工作环境有关,压力损失方程^[4]为

$$\Delta p_l = \lambda \frac{L \rho v^2}{d \ 2}$$

(3)

$$\Delta p_m = \sum \xi \frac{\rho v^2}{2}$$

(4)

式中 d ——管道直径
 v ——管道中的油液流速
 λ, ξ ——沿程、局部压力损失系数

2.2 管道分布参数模型

管道内一维非恒定流动用波动方程^[5-8]描述为

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\rho Q}{A^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\rho}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + f(Q) = 0$$

(5)

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\rho \alpha^2}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

(6)

式中 $f(Q)$ ——与流量有关的摩擦阻力项
 x ——沿管轴的坐标距离
 A ——过流面积 α ——压力波速

3 仿真与试验结果分析

结合管道数学模型,对液压机构包括控制阀,液压缸,油源,负载等进行了建模和仿真。开发了图 4 所示的液压机构试验测试装置,并对仿真结果进行了试验验证。表 1 为系统主要参数。

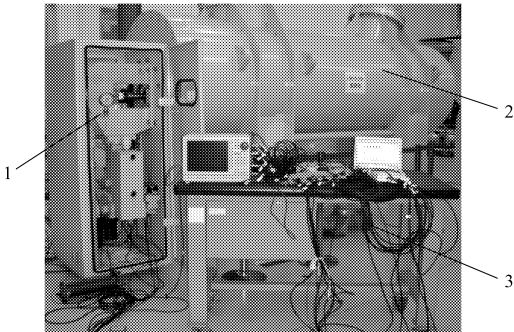


图 4 550 kV 高压断路器液压机构试验装置

Fig. 4 Test rig of the hydraulic mechanism

1. 液压操动机构 2. 断路器灭弧室机构 3. 数据采集设备

表 1 系统主要参数

Tab. 1 System parameters

参数	数值	参数	数值
液压系统额定压力/MPa	32.6	a - d 管道长度/m	0.85
液压缸行程/mm	180	a - b 管道长度/m	0.1
液压缸内径/mm	70	T/P 到油箱管道长度/m	0.065
液压缸杆径/mm	35	环境温度/℃	20
蓄能器容积/L	17	液压油液弹性模量/MPa	850
主油路管道内径/mm	32	液压油液密度/g·cm ⁻³	0.85

3.1 液压操动机构分闸特性

该断路器要求液压机构满足分闸速度为 8.7 ~ 9.5 m/s,固分时间为 18 ~ 22 ms。图 5、6 所示液压缸位移的仿真和试验结果基本吻合,0 ms 为电磁铁

给电激励时刻,液压缸仿真和试验最大速度分别为 10.2 m/s 和 9.92 m/s。分闸起始阶段,气体压缩量较小,反力不大,速度上升较快。随着油缸运动,压气室气体压缩量变大,反力急剧上升。喷口开启前后,压气室气体压缩与排气过程基本持平使气体体积不变,反力变化不大。在后期,灭弧室喷口打开使气体排尽,灭弧室反力急剧减小,主要是油缸缓冲阻力。

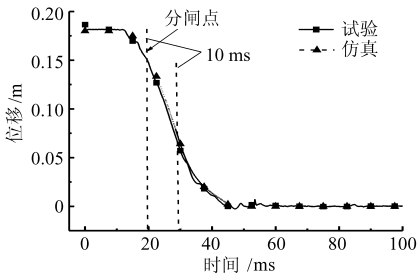


图 5 液压缸位移特性

Fig. 5 Displacement of the hydraulic cylinder

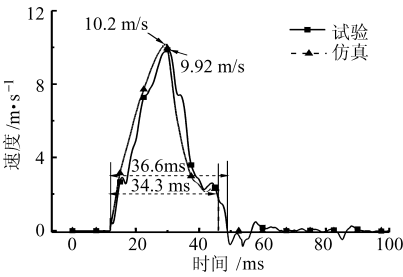


图 6 液压缸速度特性

Fig. 6 Velocity of the hydraulic cylinder

灭弧室触头在油缸行程 154 mm 处分开,断路器固分时间和分闸速度分别为 19.5 ms、8.9 m/s,满足高压断路器系统性能要求。同时也证明了系统模型的正确性,为进一步分析提供了依据。

3.2 分合闸过程液压管道损失

图 7 是液压机构分闸过程中控制阀和管道内压力损失的仿真与试验曲线对比。阀入口压力和阀出口压力之间压力差为阀内损失,阀出口压力和油箱压力之间压力差为管道损失,仿真和试验曲线基本一致,管道压力损失约为系统损失的 25%,30 ms 左右,液压缸速度增大,管道内液体流速变大,管道损失明显加剧。

图 8 是合闸过程中控制阀和管道内压力损失仿真与试验曲线对比,阀入口压力和阀出口压力之间的压力差为阀内损失,蓄能器出口压力与阀入口压力之间的差为管道损失,仿真和试验曲线基本一致,管道损失约为系统压力损失的 40%。由于合闸比分闸过程液压油流经的主管道长,弯管多,因此管道损失明显大于分闸。同时也证明了管道压力损失在液压机构中的重要性。

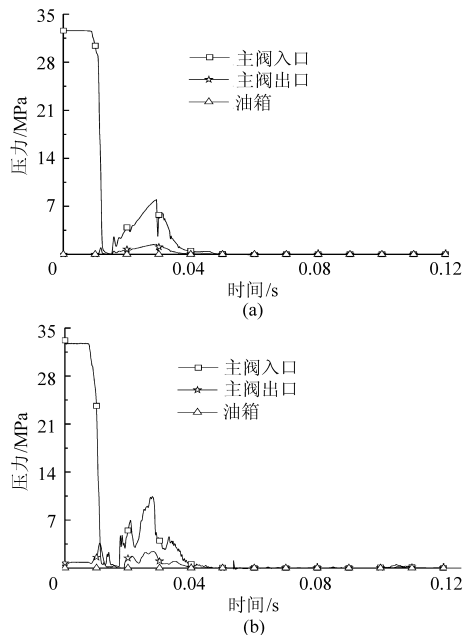


图 7 阀和管道内压力损失比较(分闸)
Fig. 7 Comparison of pressure loss in valve and pipe (opening)
(a) 仿真 (b) 试验

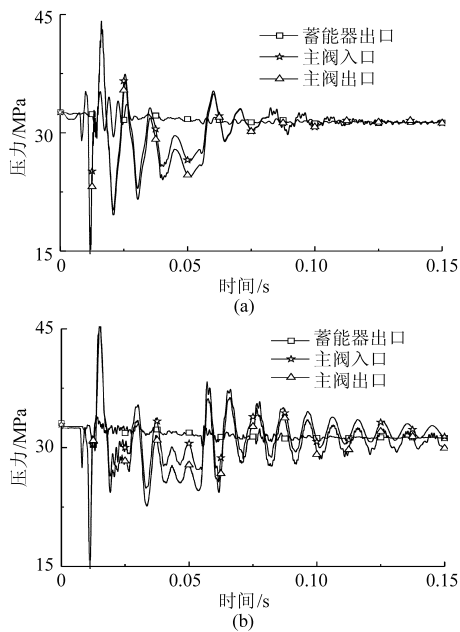


图 8 阀和管道内压力损失比较(合闸)
Fig. 8 Comparison of pressure loss in valve and pipe (closing)
(a) 仿真 (b) 试验

3.3 管道损失对分闸速度特性的影响

图 9、10 反应了主管道压力损失对液压机构分合闸速度的影响。随着主管路长度增加和弯管转折数目增多,液压机构分合闸速度明显降低。

对本机构,当管道长度超过 1.5 m,90°管道转折数超过 5 个时,分闸速度将低于 8.7 m/s,不能满足系统分闸性能要求。与国外产品相比,优化液压管道布局,增强结构紧凑性和无管化特征是提高液

压机效率率和分合闸性能的重要方向。

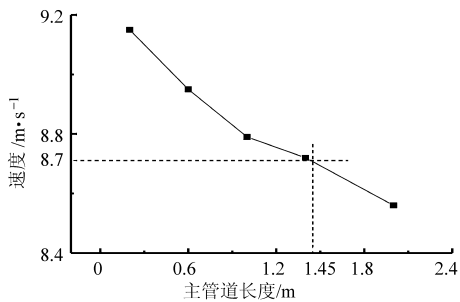


图 9 主管道长度对分闸速度的影响
Fig. 9 Effect of pipe length on opening velocity

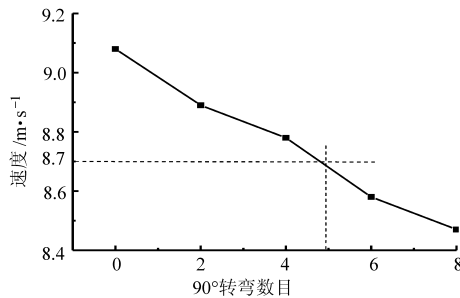


图 10 主管道局部损失对分闸速度的影响
Fig. 10 Influence of the number of pipe elbow on opening velocity

3.4 管道压力波传递效应

图 11、12 分别为未考虑波动传递模型和考虑波动模型分闸过程中的控制阀 P 口压力仿真曲线与试验对比图。未考虑波动传递效应时,仿真曲线与试验曲线的振动中心基本一致,而考虑波动效应后,试验和仿真结果相一致,压力波动的幅度和周期也相差不大,误差在 5% 左右,主要是由于液压油含气和管道材料弹性模量等对整体有效弹性模量的影响以及管道内壁的摩擦因素。

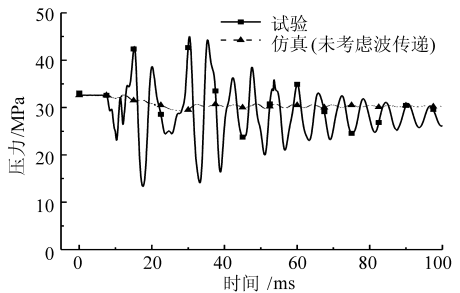


图 11 未考虑波在管道中传递 P 口压力(分闸)
Fig. 11 Without considering pressure wave propagation (opening)

压力波动最大达到 46 MPa,如此高压和强烈的振动使液压管接头松动和密封圈受损,对液压元件的使用寿命和系统可靠性带来严重影响。

图 13、14 分别为未考虑波动传递模型和考虑波动模型合闸过程中控制阀的 P 口压力仿真曲线与试验对比图。考虑管道压力波传递后,仿真和试验

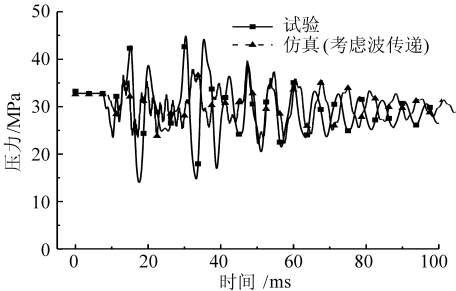


图 12 考虑波在管道中传递 P 口压力(分闸)

Fig. 12 Pressure wave propagation considered (opening)

曲线吻合较好,由于合闸比分闸速度低,压力波动传递的管道稍长,当管道内出现 48 MPa 压力峰值后,由于摩擦力等的影响,压力波衰减明显变快。

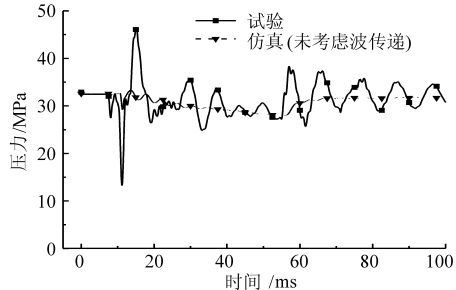


图 13 未考虑波在管道中传递 P 口压力(合闸)

Fig. 13 Without considering pressure wave propagation (closing)

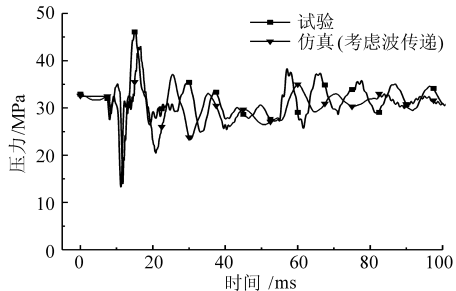


图 14 考虑波在管道中传递 P 口压力(合闸)

Fig. 14 Considering pressure wave propagation (closing)

3.5 管道参数对压力波动的影响

管道长度和直径是影响管道内压力波传递的重要参数。图 15 表明管道直径对液压操动机构在分合闸过程中最大的影响主要是系统中的压力波动的幅值。

管道越粗,压力波动幅值越小,管道越细幅值越大,而高幅度的压力波动对液压系统是不利的。因此适当增加管道直径可以减小压力波动的影响,提高系统性能。

图 16、17 反映了分、合闸时缸到蓄能器间管道长度对管道内压力波动的影响。管道长度越长,压力波动的幅度越大,波动频率越低。而对于液压系统,高幅度的压力波动对于系统的稳定性,安全性总是不利的;同时低频的压力波动对于液压系统的影

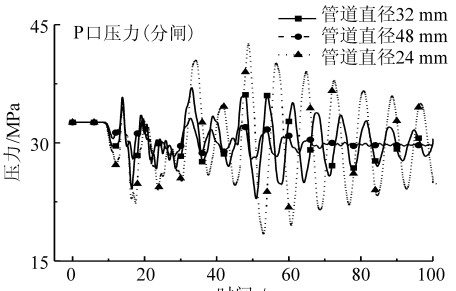


图 15 管道直径对压力波动的影响(分闸)

Fig. 15 Influence of pipe diameter on pressure transient (opening)

响来说也高于高频的压力波动。与国外机构相比,采用集成阀块,无管道化结构设计是国产液压结构的重点改进方向之一。

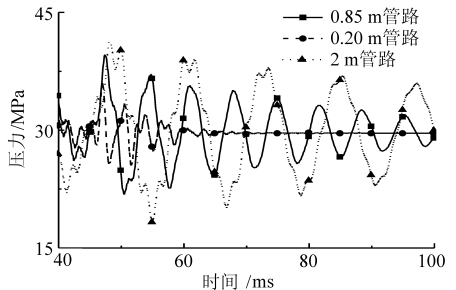


图 16 管道长度对分闸时压力波动的影响(分闸)

Fig. 16 Influence of pipe length on pressure transient (opening)

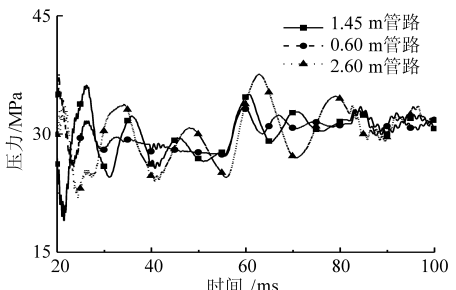


图 17 管道长度对合闸时压力波动的影响(合闸)

Fig. 17 Influence of pipe length on pressure transient (closing)

4 结论

(1)分析了 550 kV 高压断路器液压操动机构管道压力损失和压力波动传递效应,建立了液压传输管道的分布参数模型,结合 AMESim 软件对液压机构建立了精确的仿真模型,并试验验证了模型的正确性,开发的液压机构分闸性能满足开关设备的开断要求。

(2)管道损失和管道压力波传递带来的压力冲击对高压断路器高速大流量的液压机构系统性能影响较大。管道过长或者转折过多,系统效率下降,将不能满足断路器分合闸性能要求。管道冲击压力过

高,严重影响液压元件和系统的可靠性和寿命。管道长度和直径是重要的影响因素,仿真模型可以很好地指导管道参数设计,对电力系统高压开关设备液压操动机构的设计优化具有参考价值。

参 考 文 献

1

苑舜. 高压断路器液压操动机构[M]. 北京:机械工业出版社,2000.

2

Yoshio Yoshioka. Present status of power circuit breaker and its future[J]. IEEJ Trans. , 2006, 126(7):653 ~ 656.

3

魏俊梅, 林莘. SF₆ 高压断路器压力特性与机械特性耦合数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2007, 27(15):110 ~ 116.
Wei Junmei, Lin Xin. Pressure character and mechanism character coupling computation of SF₆ high voltage circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE,2007, 27(15):110 ~ 116. (in Chinese)

4

李壮云. 液压元件与系统[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

5

李洪人,陈照弟. 新的液压管路分段集中参数键图模型及其试验研究[J]. 机械工程学报,2000,36(3):61 ~ 64.
Li Hongren, Chen Zhaodi. New sectional concentrated-parameter model using bond graphs for hydraulic pipelines [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000,36(3):61 ~ 64. (in Chinese)

6

Thanapong Suwanasri. Investigation on no-load mechanical endurance and electrical degradation of a circuit breaker model under short circuit current interruption[D]. Rheinisch Westfälischen; Technischen Hochschule University, 2006.

7

孙海平, 邓景流. 液体弹性模量和异管径连接面对压力瞬变影响[J]. 华南理工大学学报,2000,28(6):100 ~ 104.
Sun Haiping, Deng Jingliu. The effect of fluid bulk modulus and the pipe junction with different diameters on pressure transients[J]. Journal of South China University of Technology,2000,28(6):100 ~ 104. (in Chinese)

8

杨务滋, 王长春. 管路效应对液压冲击器性能影响的研究[J]. 机床与液压,2008,36(5):73 ~ 75.
Yang Wuzi, Wang Changchun. The influence of pipeline effects on the performance of hydraulic impactor[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(5):73 ~ 75. (in Chinese)

9

田树军,张宏. 液压管路动态特性的 Simulink 仿真研究[J]. 系统仿真实报,2006,18(5):1 136 ~ 1 138.
Tian Shujun, Zhang Hong. Study on simulation of hydraulic pipelines' dynamic characteristic by Simulink software [J]. Journal of System Simulation,18(5): 1 136 ~ 1 138. (in Chinese)

(上接第 171 页)

4

朱江丽,李景彬,坎杂. 新疆兵团脱绒棉种分选现状及发展趋势[J]. 农机化研究,2008(1):216 ~ 219.
Zhu Jiangli, Li Jingbin, Kan Za. The simple analysis of the current situation and the development tendency of sorting cotton seed which escaping the fabric in Xinjiang production and construction corps [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(1):216 ~ 219. (in Chinese)

5

史建新,王庆惠,宋玲. 新型介电式棉种分选机的设计与试验[J]. 农机化研究,2007(10):128 ~ 130.
Shi Jianxin, Wang Qinghui, Song Ling. Design and experiment on the new type dielectric separator of cotton seeds [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007(10):128 ~ 130. (in Chinese)

6

温强,胡明明,桑楠. 基于彩色线阵 CCD 的大米色选算法[J]. 农业机械学报 2008,39(10):105 ~ 108.
Wen Qiang,Hu Mingming, Sang Nan. Color sorting algorithm based on color linear CCD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10):105 ~ 108. (in Chinese)

7

Luo X, Jayas D S, Symons S J. Identification of damaged kernels in wheat using a color machine vision system[J]. Journal of Cereal Science, 1999,30(1):49 ~ 59.

8

陈兵旗,孙明. 实用数字图像处理与分析[M]. 北京:中国农业大学出版社,清华大学出版社,2008.

9

赵晓霞,陈兵旗,张铁中,等. 类圆果实图像的分离测量算法研究[J]. 安徽农业科学, 2008,36(19):8 226 ~ 8 228, 8 236.
Zhao Xiaoxia, Chen Bingqi, Zhang Tiezhong, et al. Study on the fruits recognition algorithm for peach picking robots [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008,36(19):8 226 ~ 8 228, 8 236. (in Chinese)