

国家自然科学基金项目专题

## 交流伺服电机直驱液压机传动系统研究综述

范淑琴<sup>1</sup>, 赵升吨<sup>1</sup>, 陈超<sup>1</sup>, 杨建辉<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049; 2. 中国第二重型机械集团公司, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 交流伺服电机直驱液压机相比传统液压机, 具有低速锻冲、快速空程向下及快速回程的特点, 其交流伺服电机直驱的传动方式可有效减少滑块上行和下行的时间, 大大提高液压机工作速度。介绍了国内外交流伺服电机直驱液压机传动系统的研究现状, 提出了一种无油泵交流伺服电机直驱新型液压机传动方式, 介绍了该新型液压机传动系统的构成及工作原理, 并提出了研制该无油泵交流伺服电机直驱新型液压机所需要解决的科学问题。

**关键词:** 液压机; 交流伺服直接驱动; 螺旋传动; 增压缸; 液压系统

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.02.001

**中图分类号:** TG315.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2015)02-0001-06

### A Research Review on the Transmission System of AC Servo Motor Direct Drive Hydraulic Press

FAN Shu-qin<sup>1</sup>, ZHAO Sheng-dun<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>1</sup>, YANG Jian-hui<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China National Erzhong Group Co., Deyang 618000, China)

**ABSTRACT:** Compared to the traditional hydraulic press, Ac servo motor direct drive hydraulic press has the characteristics including rapid falling, slow forging and fast return. The transmission mode of AC servo motor direct drive can effectively reduce both the falling time and rising time of the slider, and greatly improve the working speed of hydraulic press. The research status of transmission system of Ac servo motor direct drive hydraulic press are introduced in this paper, and the transmission model of a new type AC servo motor direct drive hydraulic press without oil pump is proposed. Both the composition and working principle of the transmission system of the new type hydraulic presser are introduced, and the scientific problems about the new type AC servo motor direct drive hydraulic press without oil pump are put forward.

**KEY WORDS:** hydraulic press; AC servo direct drive; screw transmission; pressurized cylinder; hydraulic system

液压机是一种利用液体静压力来加工金属、塑料、橡胶、木材、粉末等制品的机械,也是应用最早的液压传动机械之一<sup>[1]</sup>,其工作原理是利用液体的压力传递能量以完成各种压力加工<sup>[2]</sup>,常用于压制工艺和

压制成形工艺。液压机具有结构简单、工艺适应性强、环境污染小等其他设备不可替代的特点,已被广泛应用于国民经济的各个领域,据不完全统计,目前我国以液压机为主要产品的设计部门和生产厂已达

收稿日期: 2015-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(51305333);陕西省科学技术研究发展计划工业攻关计划(2014K07-23)

作者简介: 范淑琴(1977—),女,山西人,博士,讲师,主要研究方向为塑形成形工艺及设备。

百家之多,产值达上百亿元<sup>[3]</sup>。随着国民经济的发展和技术的进步,其应用领域将越来越广,市场前景十分广阔<sup>[4]</sup>。

液压机一般由本体(主机)、操作系统及泵站三大部分组成,其中泵站为动力源,供给液压机各执行机构及控制机构以高压工作液体;操作系统属于控制机构,它通过控制工作液体的流向来使各执行机构按照工艺要求完成应有的动作;本体为液压机的执行机构。传动系统作为液压机的动力传递驱动部分,决定了滑块运行的规律、稳定性以及精度,实现高效精密的传动机构是设计液压机的关键。图1所示为传统液压机的传动系统原理示意图,执行元件所需的高压液体全部由液泵供给。工作行程时液泵打出的高压液体,经分配阀进入工作缸,回程时,液泵打出的高压液体,经分配阀进入回程缸<sup>[5]</sup>。

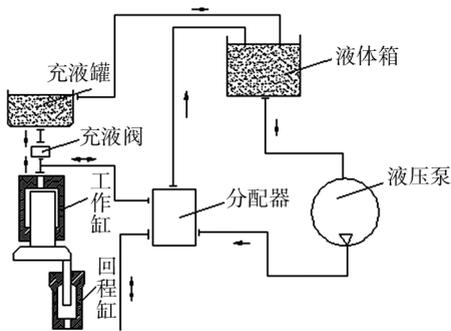


图1 传统液压机的传动系统<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Transmission system of traditional hydraulic press

由于液压机的传动系统最终是要满足滑块带动模具进行锻冲工件的工作要求,因此其传动系统应按滑块运动方式进行设计。通常金属材料的塑性变形抗力均随着应变速率的增大而增大,因此往往要求滑块带动模具进行锻冲工作时低速慢行,以保证冲压的精度和保护模具。但考虑到大规模、高效率的生产要求及传统液压机本身低速特点,为实现低速锻冲的同时仍可提高液压机的工作效率,因此要求滑块下行及回程的速度要快。因此对液压机传动系统来说,滑块的运动应具备低速锻冲、快速空程向下及快速回程的特性。另外从交流伺服电动机功率匹配和扭矩匹配的角度来看,在液压机冲压工作阶段,交流伺服电动机轴上的负载扭矩和负载功率不能过大,即传动机构必须具有增力效果,使传递到电动机主轴上的负载扭矩和负载功率尽可能小,从而降低液压机的开发成本、提高机器的使用寿命。

传统液压机最主要的缺点是速度低,快降及回程

速度只有 100 ~ 200 mm/s,随着先进制造技术、微电子技术、计算机技术、液压技术的发展和运用,现代工业生产对液压机提出了高压、高速、高效化、产品绿色化(无油污、噪声污染、节能等)、机电液一体化、数控控制能化、系统集成化等技术要求<sup>[6]</sup>。近些年来世界各主要工业发达国家都在努力提高液压机的速度,以提高生产率。提高液压机的工作速度即缩短液压机的一个工作循环时间,其关键是缩短其快速上行和下行的时间<sup>[7]</sup>。因此,提高快速上行和下行的速度,是解决传统液压机效率低下的关键。

## 1 交流伺服液压机的国内外研究现状及发展动态

新型快速伺服液压机对液压电控系统的先进性提出了更高的要求,如高性能的交流伺服电机、精密、高效的传动机构、大流量、快速响应的液压控制系统,以适应快速、高效、精密数控液压机的要求。早期的伺服数控锻压设备主要是指液压伺服压力机,它的控制主要体现在T轴、工作台、自动送料、气路等机床辅助部分的控制上,很少对影响压力机工作功能和加工产品质量最为显著的传动机构进行直接而精确控制。例如美国的 WIDEMANN 和 W. A. WHITNEY 公司,西德的 TRUMPF 和 NIXOORF DARADORN 公司,日本的 AIDA 和 NISSHINBO 公司,以及瑞士的 RASKIN 公司都是生产这种液压伺服压力机、转塔冲床或多工位机械压力机<sup>[8-10]</sup>。

液压机的液压系统和整机结构等方面发展已经比较成熟,国内外机型无较大差距,主要差别在于加工工艺和安装方面<sup>[11]</sup>:(1)在油路结构设计方面,国内外都趋向于集成化、封闭式设计、插装阀、叠加阀和复合化元件及系统在液压系统中得到广泛的应用;(2)在安全性方面,国外某些采用微处理器控制的高性能液压机利用软件进行故障的检测和维修,产品可实现负载检测、自动模具保护和错误诊断等功能;(3)液压机的发展最主要体现在控制系统方面。微电子技术飞速发展改进为改进液压机的性能、提高稳定性、加工效率等方面提供了前提条件。相比之下,国内机型虽然种类齐全,但技术含量相比较低,缺乏高档机型,这与机电液一体化和中小批量柔性生产的发展趋势不相适应。

随着大功率伺服电机的研制成功,交流伺服电机直接驱动传动机构已经成为可能,取代了传统的交流

异步电机,逐渐成为伺服液压机的主角,省掉了离合器制动器,使用时不存在巨大的离合器排气噪声,可降噪 20 ~ 30 dB,节能明显,可达 30% ~ 40%。1994 年,小松 KOMATSU 公司就成功开发出了液压伺服压力机,并提出了自由运动压力机(Free Motion Press)的概念<sup>[12]</sup>。交流伺服电机驱动滚珠丝杠带动液压缸动作是现阶段伺服液压机较常用的驱动方式。日本小松公司首先开发了 HCP3000 型任意曲线伺服压力机,公称压力为 800 kN,如图 2 所示<sup>[13]</sup>,由于采用了交流伺服电机、滚珠丝杠等新型部件,可以自由控制滑块的运动模式,具有高生产率、超柔性、高精度、降噪节能等优点。

日本菊池株式会社的一柳健在欧洲专利局公开的“混合驱动式油压装置”,如图 3 所示<sup>[14]</sup>,采用交流伺服电机驱动滚珠丝杠带动液压缸动作,可以快速、精确控制液压缸动作,具有高效、高精度等优点。该混合驱动式油压装置仅仅是采用伺服电机驱动活塞来代替原来的油泵,但液压机原有液压缸的结构及回程方式不变,所以空程及回程速度低,并且没有设置增压缸进行增压。

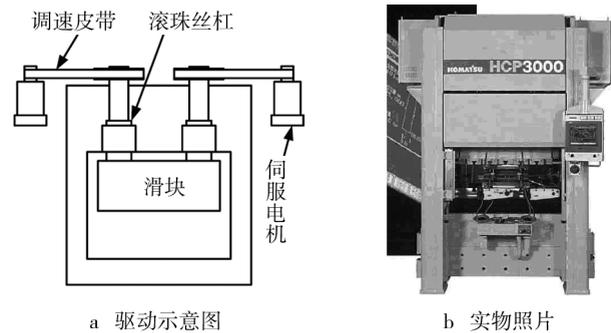


图 2 小松公司 HCP3000 型压力机<sup>[13]</sup>

Fig. 2 HCP3000 type press of KOMATSU

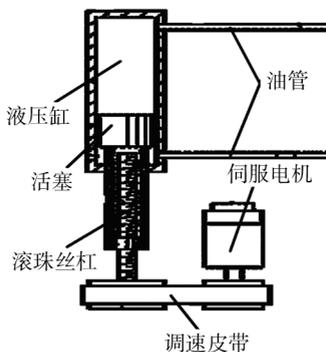
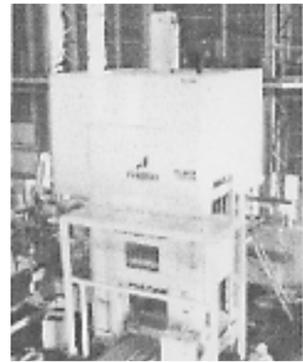


图 3 日本菊池株式会社混合驱动式油压装置示意图<sup>[14]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of Hybrid type oil pressure unit of Japan kikuchi Co., Ltd.

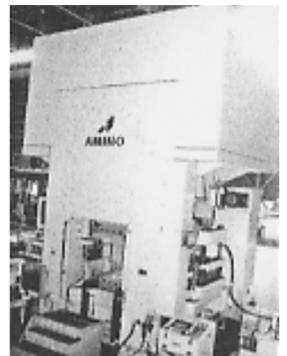
日本网野公司生产的液压式伺服压力机如图 4 所示,不使用油泵和溢流阀,用伺服电机驱动油缸,所以系统不发热<sup>[15-17]</sup>,其特点有:停止精度高、成形性能好、安全性高、电力消耗少、噪声振动小、工作用油少。其液压机滑块的回程采用液压回程的方式,所以空程及回程速度小,也没有设置增压缸进行增压。



a 25 × 10<sup>6</sup> kN



b 6 × 10<sup>6</sup> kN



c 12 × 10<sup>6</sup> kN

图 4 日本网野液压式伺服压力机<sup>[15-17]</sup>

Fig. 4 Hydraulic servo press of AMINO

传统液压机最主要的缺点是速度小。近些年来世界各主要工业发达国家都在努力提高液压机的速度。提高液压机的工作速度即缩短液压机的一个工作循环时间,关键是缩短其快速上行和下行的时间<sup>[6]</sup>,因此,提高快速上行和下行的速度,是解决传统液压机效率低下的关键。继而出现了能成倍地提高液压机效率的快速锻造液压机、快速冲裁拉深液压机、高速液压机、高速多工位液压机等快速液压机。

普通液压机的快降及回程速度只有 100 ~ 200 mm/s,而现在的快速液压机则已经高达 450 mm/s。国外的一些高速小型液压机每分钟的行程次数达到数百次以上<sup>[18-20]</sup>。日本小松公司提出的液压机的高速安全回路如图 5 示,是一种用于其中的滑块由液压缸垂直驱动的液压机的高速安全回路,其特征在于,主缸应力接受面积大于副缸的应力接受面积,主缸和

副缸在同一中心线上垂直放置,主缸中的活塞和副缸中的活塞用副缸中的活塞杆相互连接,副缸中活塞的直径小于主缸中活塞杆的直径<sup>[21]</sup>。

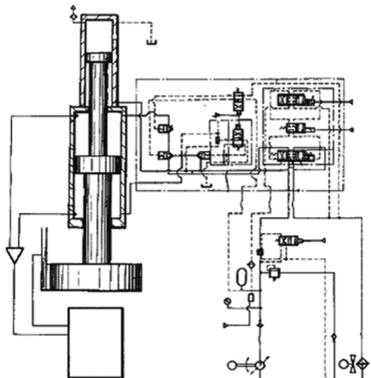


图5 小松公司液压机高速安全回路<sup>[21]</sup>

Fig. 5 High speed safety circuit of Hydraulic press of KOMATSU

随着国内外锻压行业之间科研交流活动的进一步展开以及快速液压机带来的巨大的生产和市场效益,国内关于此方面的研究也越来越广泛和深入。国内从20世纪80年代开始对快锻液压机的研制工作,由西安重型机械研究所和北京重机厂研制的国产第一台8000 kN快锻液压机组在兰州石化总厂投入运营。合肥锻压机床股份有限公司研制的YH94-1000型 $10 \times 10^6$  kN六工位快速液压机如图6所示,其滑块快降速度400 mm/s,滑块工作速度22~30 mm/s,滑块回程速度300 mm/s<sup>[22]</sup>。

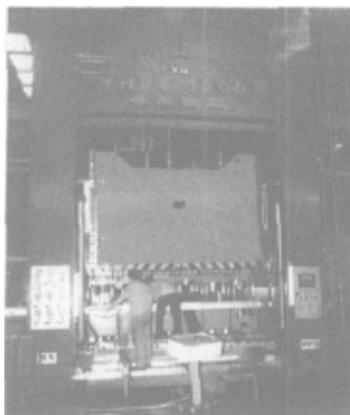


图6 六工位快速液压机图<sup>[22]</sup>

Fig. 6 Six-working Station high-speed hydraulic press

徐州压力机械有限公司2000年为中国一汽模具制造有限公司开发研制的YX28-1700/2500大型双动薄板拉伸数控液压机如图7所示。该机是目前国内最大(压力与台面)、速度最快的双动薄板拉伸液压机。其总吨位可达31 000 kN(拉伸力17 000 kN、压边力8000 kN、液压垫顶出力为6000 kN),冲裁力可达

8000 kN,工作台面5500 mm×2800 mm,工作速度70 mm/s,下行速度400 mm/s。

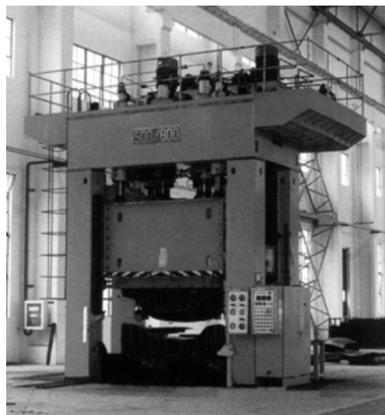


图7 YX28-1700/2500 液压机<sup>[23]</sup>

Fig. 7 YX28-1700/2500 hydraulic press

济南铸锻所捷迈机械有限公司液压机电分公司设计开发的快锻压机系统在16/25/31.5/40 MN等多种快速锻造液压机上得到应用<sup>[24-25]</sup>;合肥锻压机床股份有限公司研制的YH61-630型快速热挤压液压机,提高了我国快速热挤压机的技术水平,打破了国外公司在该项技术上的封锁<sup>[26]</sup>;除此之外,西安重型机械研究所、兰州石化总厂也在快锻液压机和快速液压机等方面取得了喜人的成绩和突破。到目前为止,快速液压机的主要性能指标已基本接近国外同类设备水平。

台湾地区的锻压机床起步于20世纪50年代<sup>[27]</sup>,岛内长期作为发达国家代工基地,具有全面先进的各方面技术,在国际市场上赢得了良好声誉,每年有80%的锻压设备出口。江铃汽车零部件有限责任公司进口安装了台湾LIEN CHIEH公司生产的4台高速液压机<sup>[27]</sup>,如图8所示,用于冲压件的生产,其快下速度达到600 mm/s。

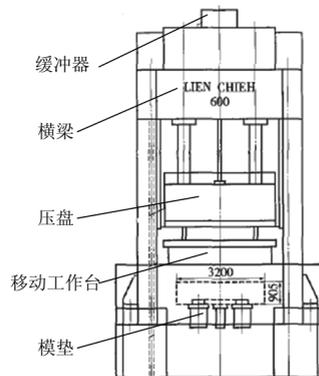


图8 LIENCHIEN 高速液压机<sup>[26]</sup>

Fig. 8 LIENCHIEN high-speed hydraulic press

新型快速伺服液压机作为一种新型液压机,在国际上已有10多年的发展历史,但针对600 mm/s以上高速伺服液压机的研究还在火热进行当中。文中提出一种无油泵交流伺服直驱新型液压机的传动系统,通过液压机传动机构及其液压系统的创新设计,使液压机滑块的位置、速度可调,并达到极高的空程速度,能满足多种工艺的需要,实现滑块位移和加载压力的全闭环伺服控制。

## 2 无油泵交流伺服直驱新型液压机传动系统

如图9所示为无油泵交流伺服直驱式新型液压机传动系统的原理示意图,该新型传动机构主要由交流伺服电动机、小带轮、齿形带、大带轮(作为飞轮)、滚珠丝杠副、连杆、刚性拉杆、柱塞、主缸等组成,采用无泵驱动方式,交流伺服电动机经一级齿形带减速将动力传至滚珠丝杠副,滚珠丝杠副通过同一轴线上放置的主、副缸的液压系统驱动滑块运动,同时保留适当转动惯量的飞轮,滚珠丝杠副螺母与大带轮键连接,大带轮旋转带动丝杠下行,进而驱动液压系统;回程时,采用刚性拉杆代替回程缸带动滑块回程。

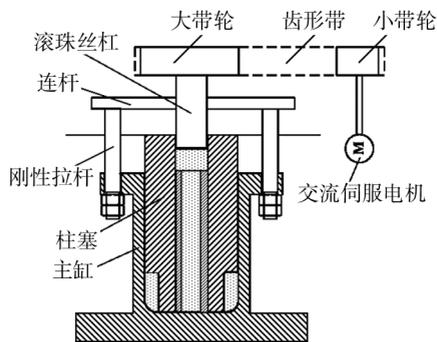


图9 无油泵交流伺服直驱新型液压机传动系统原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the transmission System of AC servo motor direct drive hydraulic press without oil pump

该无油泵交流伺服直驱新型液压机传动系统应用了螺旋压力机的飞轮传动理论,大带轮通过支撑套支撑在轴承上成为惯性轮,实现滚珠丝杠高速下行运动,最大限度地利用惯性力,节能降耗;摒弃了传统液压机传动系统所用的液压油泵,采用带有飞轮和电动机联合提供能量的方式,利用交流伺服电动机直接驱动丝杠-螺母运动副,将旋转运动转化为直线运动,使得活塞压缩液压油产生压力,工作时用油压,回程时采用刚性拉杆替代传统的回程缸。液压机滑块快速

下行和回程均是靠交流伺服电机直接驱动滚珠丝杠完成,滑块空程下行和上行速度高,实现了液压机传动系统的高效和节能。

该新型液压机传动系统应用了液压增压缸的原理,将两个面积不等的活塞固联在一起,压力比是面积比的正比,速度比是面积比的反比,巧妙实现空载高速、负载时低速增力压制;采用液压管路、阀、缸、滑块四位一体的设计,液压阀、油箱、管路连接紧凑,解决了液压机高速大流量与大通径管路的矛盾,主缸体与滑块一体,大小充液阀浸入油箱中,快速下行和上行时,迅速反应充液和排液,提高液压系统的响应性,并可有效地减轻了滑块系统的质量。

## 3 结论和展望

目前采用交流伺服电机的液压伺服压力机的研究已成为热点,无油泵交流伺服直驱式新型液压机的新原理传动方案,摒弃了传统的液压油泵,巧妙地结合了机械压力机的飞轮传动与螺旋压力机的螺旋传动方式,采用交流伺服电动机直接驱动丝杠-螺母运动副的方式产生所需的油的压力势能,并采用液压增压缸原理,实现低速增力压制工作,回程采用刚性拉杆带动滑块的机械传动方式替代传统的液压回程方式,滑块空程与回程的速度显著提高。

该无油泵交流伺服直驱式新型液压机的新原理传动方案优点突出,液压机新原理的传动方案必然会带来一系列的科学问题,要完成无油泵交流伺服直驱新型液压机的研制,亟需解决的科学问题如下。

1) 无油泵交流伺服直驱式液压机新的传动原理。综合机械压力机的带飞轮传动原理、螺旋压力机的螺旋传动方式、以及液压机的帕斯卡增压原理,巧妙地结合了这3种设备传动方案的优点,构建出交流伺服电动机直接驱动螺旋运动,产生液体压力势能,并使用增压缸的原理实现大压力输出。

2) 无油泵液压机交流伺服直接驱动与传动的能量以及运动传递理论。利用飞轮旋转所提供的能量来代替部分伺服电机所应提供的能量,可有效降低所需伺服电机的功率,大大降低液压机的造价且节能降耗。无油泵交流伺服直驱新型液压机中采用带有飞轮和电动机联合提供能量的方式,需要解决交流伺服电动机转子转动惯量与负载惯量最佳匹配,以及能量与运动的传递理论的难题。

3) 无油泵交流伺服直驱新型液压机滑块运动的

高精度控制策略。对无油泵交流伺服直驱新型液压机的滑块直线运动位置精度实施闭环控制,需要建立该控制系统的运动学与动力学模型,提出合理的控制策略,实现加载压力和滑块位移曲线可任意设定。

### 参考文献:

- [1] 张苓. 传统液压机的 PLC 改造[J]. 重型机械科技, 2002(2):39—41.  
ZHANG Ling. PLC Reconstruct for Conventional Hydraulic Press[J]. Heavy Machinery Science and Technology, 2002(1):39—41.
- [2] 朱钊, 张志, 张道富, 等. 国内外液压机技术现状及发展趋势[J]. 机床与液压, 2000(1):6—7.  
ZHU Fan, ZHANG Zhi, ZHANG Dao-fu, et al. Status and Development Trend of Hydraulic Press[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2000(1):6—7.
- [3] 金森, 聂绍珉, 郭宝锋, 等. 液压机本体 CAD 的现状与发展[J]. 锻压机械, 2000(2):39—40.  
JIN Miao, QIE Shao-min, GUO Bao-feng, et al. CAD Status Quo & Development of Hydraulic Press Noumenon[J]. Metalforming Machinery, 2000, (2):39—40.
- [4] 钟伟弘, 徐燕申, 胡亚辉, 等. 面向大规模定制的液压机产品设计开发模式[J]. 机床与液压, 2003(6):78—80.  
ZHONG Wei-hong, XU Yan-shen, HU Ya-hui, et al. A Design and Development Paradigm of Hydraulic Press for Mass Customization[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2003(6):78—80.
- [5] 王敏, 方亮, 赵升吨, 等. 材料成形设备及自动化[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.  
WANG Min, FANG Liang, ZHAO Sheng-dun, et al. Material Forming Equipment and Automation [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [6] 张利平, 刘青社. 现代液压机研发中的液压系统设计[J]. 锻压机械, 2002(6):7—8.  
ZHANG Li-ping, LIU Qing-she. Design of Hydraulic System in research and development of Modern Hydraulic Press [J]. Metalforming Machinery, 2002(6):7—8.
- [7] 张志, 朱钊, 湛从昌, 等. 高速低噪智能型液压机控制系统的研制[J]. 武汉科技大学学报, 2000, 23(2):163—174.  
ZHANG Zhi, ZHU Fan, ZHAN Cong-chang, et al. Control System of High Speed and Low Noise Intelligent Hydraulic Machine[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2000, 23(2):163—174.
- [8] SUN P, GRACIO J J, FERREIRA J A. Control System of a Mini Hydraulic Press for Evaluating Springback in Sheet Metal Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 176(1-3):55—61.
- [9] WANG Chang-li, CUI Yue-xian, CUI Li. Investigation of Pitting Corrosion Damage of a Hydraulic Press Trunk Piston [J]. Engineering Failure Analysis, 2003, 10(2):251—254.
- [10] FULLAND M, SANDER M, KULLMER G, et al. Analysis of Fatigue Crack Propagation in the Frame of a Hydraulic Press[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 75(3-4):892—900.
- [11] 秦勇. 液压机技术的现状与发展趋势[J]. 煤矿机械, 2000(11):3—4.  
QIN Yong. The Actuality and Development Directions of Hydraulic Machines Technology[J]. Coal Mine Machinery, 2000(11):3—4.
- [12] 徐大任. AC 伺服冲压机及其应用[J]. 机械工人, 2005(4):19—21.  
XU Da-ren. AC Servo Press and Its Application [J]. Machinist Metal Forming, 2005(4):19—21.
- [13] Komatsu Globa [EB/OL]. [2014-05-13]. <http://www.komatsu.co.jp>.
- [14] 日本菊池株式会社. 混合驱动式油压装置: 欧洲, 2006-150422 [P]. 2006-6-15.  
KIKUCHI. Hybrid Hydraulic Device: Europe, 2006-150422 [P]. 2006-06-15.
- [15] 日本网野公司. 6000 吨汽车纵梁冲裁及成型液压机生产线[R]. 陕西: 陕西重型汽车有限公司, 2006.  
AMINO. Production Line of 6000 Tons Hydraulic Press of Blanking and Forming Auto Longerons [R]. Shaanxi: Shaanxi Heavy-duty Truck Co., LTD, 2006.
- [16] Amino Corporation [EB/OL]. [2013-02-15]. <http://www.amino.co.jp>.
- [17] 吕言, 周建国, 阮澍, 等. 最新伺服压力机的开发以及今后的动向[J]. 锻压设备与制造技术, 2006(1):11—14.  
LYU Yan, ZHOU Jian-guo, RUAN Shu, et al. The Newest Development of Servo Press and Future [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2006(1):11—14.
- [18] 魏伟. 快锻液压机国内外现状及旧水压机改造[J]. 锻压机械, 1998(2):7—8.  
WEI Wei. Current State of High Speed Forging Hydraulic Press at Home and Abroad and Reconstruction for Old Water Press [J]. Metalforming Machinery, 1998(2):7—8.
- [19] 李贵闪, 何晓燕, 荣兆杰, 等. 我国液压机行业的现状与发展[J]. 锻压设备与制造技术, 2006(4):17—19.  
LI Gui-shan, HE Xiao-yan, RONG Zhao-jie, et al. Introduction and Development of Hydraulic Presses and the Trade of Hydraulic Presses [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2006(4):17—19.

- [54] LI Jing-xiang, ZHAO Sheng-dun, ISHIHARA K. Experimental Study on Performance of Various Mufflers for Intermittent Exhaust Noise Reduction [C]. 40th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2011, INTER-NOISE 2011, 2011; 229—234.
- [55] SULLIVAN J W. A Method for Modeling Perforated Tube Muffler Components. II. Applications [J]. Journal of the Acoustical Society of America 1979, 66(3): 779—787.
- [56] CUHADAROGLU B, AKANSU Y, TURHAL A. An Experimental Study on the Effects of Uniform Injection through One Perforated Surface of a Square Cylinder on Some Aerodynamic Parameters [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31(8): 909—915.
- [57] DENIA F, SELAMET A, FUENMAYOR F, et al. Acoustic Attenuation Performance of Perforated Dissipative Mufflers with Empty Inlet/outlet Extensions [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302(4-5): 1000—1017.
- [58] ATALLA N, SGARD F. Modeling of Perforated Plates and Screens Using Rigid Frame Porous Models [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 303(1-2): 195—208.
- [59] ZHANG B, CHEN T N. Calculation of Sound Absorption Characteristics of Porous Sintered Fiber Metal [J]. Applied Acoustics, 2009, 70(2): 337—346.
- [60] DELENY M E, BAZLEY E N. Acoustical Properties of Fibrous Materials [J]. Applied Acoustics, 1970, 3: 105—116.
- [61] ALLARD J F, ATALLA N. Propagation of Sound in Porous Media; Modeling Sound Absorbing Materials, Second edition [M]. New York: Wiley, 2009.
- [62] UMNOVA O, ATTENBOROUGH K, SHIN H, et al. Deduction of Tortuosity and Porosity from Acoustic Reflection and Transmission Measurements on Thick Samples of Rigid-porous Materials [J]. Applied Acoustics, 2005, 66(6): 607—624.
- [63] LAGRAIN B, BOECKX L, WILDERJANS E, et al. Non-contact Ultrasound Characterization of Bread Crumb: Application of the Biot - Allard Model [J]. Food Research International, 2006, 39(10): 1067—1075.
- [64] AYGUN H, ATTENBOROUGH K. The Insertion Loss of Perforated Porous Plates in a Duct without and with Mean Air Flow [J]. Applied Acoustics, 2008, 69(6): 506—513.
- [65] LEE C M, XU Y. A Modified Transfer Matrix Method for Prediction of Transmission Loss of Multilayer Acoustic Materials [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 326(1/2): 290—301.
- [66] MADEO A, GAVRILYUK S. Propagation of Acoustic Waves in Porous Media and Their Reflection and Transmission at a Pure-fluid/porous-medium Permeable Interface [J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2010, 29(5): 897—910.
- [67] LI J X, ISHIHARA K, ZHAO S D. Study on Transient Exhaust Process of Pneumatic System with Sintered Bronze Silencer; Modeling and Experimental Verification [C]. The 6th International Conference on Advanced Materials Development and Performance, 2011.

(上接第6页)

- [20] 王建军. 20 MN 快锻液压机关键部件结构分析 [D]. 河北: 燕山大学, 2007.  
WANG Jian-jun. Structure Analysis on the Key Parts of 20 MN Fast Forging Hydraulic Press [D]. Hebei: Yanshan University, 2007.
- [21] HIDEAKI NAKABAYASHI, HITOSHI SAWAMURA. High-speed Safety Circuit for a Hydraulic Press; US, 5865088 [P]. 1999-02-02.
- [22] 蒙争争, 宋雨芳. 多工位快速液压机的研制 [J]. 机械工程师, 2005(6): 27—28.  
MENG Zheng-zheng, SONG Yu-fang. The Design and Manufacture of the High-speed Transfer Hydraulic Press [J]. Mechanical Engineer, 2005(6): 27—28.
- [23] 徐州压力机械有限公司 [EB/OL]. [2014-08-13]. <http://xzpm.com>.  
Xuzhou Pressure Machinery [EB/OL]. [2014-08-13]. <http://xzpm.com>.
- [24] 吴秀峰, 张婷婷. 快速锻造液压机的设计开发 [J]. 锻压设备与制造技术, 2007(4): 40—41.  
WU Xiu-feng, ZHANG Ting-ting. The Design and Exploration of the Quick-forging Hydraulic Press [J]. China Metal-forming Equipment & Manufacturing Technology, 2007(4): 40—41.
- [25] 吴秀峰, 张婷婷, 周亚丽. 高速数控冲液装置设计开发 [J]. 锻压设备与制造技术, 2007(3): 41—42.  
WU Xiu-feng, ZHANG Ting-ting, ZHOU Ya-li. The Design and Exploration of the High-speed CNC Punching Hydraulic Device [J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2007(3): 41—42.
- [26] 钱红, 甄冒发. YH61-630 型快速热挤压液压机的研制 [J]. 锻压设备与制造技术, 2007(2): 37—39.  
QIAN Hong, ZHEN Mao-fa. The Development of Quick Hot Extrusion Hydraulic Press of YH61-630 [J]. China Metal-forming Equipment & Manufacturing Technology, 2007(2): 37—39.
- [27] 王永平, 尚菊根. 用于汽车工业的高速液压机 [J]. 设备管理与维修, 2006(5): 33—34.  
WANG Yong-ping, SHANG Ju-gen. High Speed Hydraulic Press Used in the Automotive Industry [J]. Plant Maintenance Engineering, 2006(5): 33—34.