

直线电机驱动柱塞泵的运动规划研究

董武涛 聂松林

北京工业大学,北京,100124

摘要:为了改善柱塞泵的流量特性,系统研究了恒流量直线电机驱动柱塞泵的可行运动规划。经计算,四电机双作用柱塞泵以三角波间隔 $\pi/2$ 相位差或以间断式梯形波间隔 $\pi/2$ 相位差为运动规划,是具有冗余功能的可行方案。应用 AMESim 软件,构建了四直线电机双作用柱塞泵系统的仿真模型。仿真实验发现,三角波曲线间隔 $\pi/2$ 相位差的方案是实际流量脉动较小的优选运动规划。

关键词:直线电机;柱塞泵;恒流量;运动规划

中图分类号:TH322;TH39

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.08.017

Research on Motion Planning of Linear Motor Driven Piston Pump

Dong Wutao Nie Songlin

Beijing University of Technology, Beijing, 100124

Abstract: To improve the flow rate properties of piston pump, the feasible motion planning of a linear motor driven piston pump was investigated systematically, which was easier to achieve constant flow rate. Through computation, it is found that the solution of four double-acting motor driven piston pump in motion planning of triangular waves with phase difference of $\pi/2$ or incontinuous trapezoidal waves with phase difference of $\pi/2$ is the possible one with redundancy. The system model of four double-acting linear motor driven piston pump was established by the software of AMESim, using the feasible solution to achieve the constant flow of piston pump theoretically. Through simulation, the solution of triangular waves with phase difference of $\pi/2$ is the preferred motion planning, which has less actual flow pulsation.

Key words: linear motor; piston pump; constant flow rate; motion planning

0 引言

针对石油矿场机械用往复泵可靠性差的问题,有学者研制了多种直线电机驱动的往复泵或抽油机^[1-4],并研究了其流量特性。文献[5-8]对单作用、双作用直线电机三缸往复泵能实现流量稳定输出的运动特性进行了深入研究。张金中等^[9-10]对比研究了三直线电机、四直线电机双作用往复泵方案(两种方案均能实现流量恒定),基于成本考虑,确定采用三直线电机方案。文献[11-12]研究了一种直线伺服电机驱动的数控双作用恒流量柱塞泵,获得了三角波形的速度曲线以一定相位差组合实现柱塞泵流量恒定的方案。但是,对多直线电机柱塞泵单元组合实现恒流量的可行运动规划方案,还缺乏系统研究。

水压传动与控制技术是一种绿色传动技术,

在核电站、食品及药物生产、海洋开发和农业机械等领域应用广泛^[13-16]。本文将直线电机技术与水液压技术结合,设计出一种新型直线电机驱动柱塞泵。该柱塞泵结构简单,只存在柱塞一缸体这一对关键摩擦副,降低了柱塞泵对于材料性能的要求。直线电机易于实现自动化控制,可通过调节柱塞速度来调节输出流量,尤其适用于泵控系统。

1 直线电机速度曲线和恒流量原理

1.1 直线电机典型速度曲线

直线电机动态响应快、速度和加速度特性很好,易于自动化控制。通过调节电压或频率,或更换次级材料,易于调节和控制直线电机的速度、电磁推力^[17-18]。实际上,直线电机的速度规划曲线可以通过设置控制器的运行模式进行改变。Delta Tau 控制器可与驱动器、光栅尺组成闭环系统,实时控制直线电机,以线性模式、圆弧模式、快速模式、样条模式和位移速度时间模式等移动模式运动^[19]。其中,位移速度时间模式通过设置具

收稿日期:2014—01—06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075007,51375018);国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA091103);北京市长城学者计划资助项目(CIT&TCD 20130316);北京工业大学研究生科技基金资助项目(ykj-2011-6558)

体的边界点位移和速度,容易实现直线电机以三角波形、梯形波形、S形波形及多样条曲线组合等多种速度规划曲线运动(以下简称速度曲线或曲线)。为了实现直线电机驱动柱塞泵输出流量和压力的稳定,以及泵阀的运动特性与柱塞运动规划匹配,直线电机驱动柱塞泵采用典型速度规划曲线(速度规划曲线是周期函数),即三角波形和梯形波形^[5-7,9-12]。

三角波形速度规划曲线的函数为

$$g(\theta) = \begin{cases} 2A\theta/\pi & 0 \leq \theta \leq \pi/2 \\ -2A\theta/\pi + 2A & \pi/2 < \theta \leq 3\pi/2 \\ 2A\theta/\pi - 4A & 3\pi/2 < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

梯形波形速度曲线的函数为

$$g(\theta) = \begin{cases} 3A\theta/\pi & 0 \leq \theta \leq \pi/3 \\ A & \pi/3 < \theta \leq 2\pi/3 \\ -3A\theta/\pi + 3A & 2\pi/3 < \theta \leq 4\pi/3 \\ -A & 4\pi/3 < \theta \leq 5\pi/3 \\ 3A\theta/\pi - 6A & 5\pi/3 < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (2)$$

1.2 柱塞泵恒流量原理

直线电机驱动柱塞泵通过直线电机的动子直接带动柱塞在缸体中往复运动,因此柱塞的速度曲线与直线电机动子往复运动的速度曲线一致。柱塞泵以直线电机驱动一个柱塞或在两端同时驱动两个柱塞,而分为单作用柱塞泵和双作用柱塞泵。柱塞泵的瞬时流量与柱塞的瞬时有效速度成正比,因此柱塞泵的流量曲线与柱塞的有效速度曲线即直线电机动子的有效速度成正比。

柱塞泵的流量曲线对应于直线电机的有效速度曲线,因此每个单直线电机驱动柱塞泵的瞬时流量函数为

$$Q(\theta) = \pi \eta d^2 G(\theta) / 4 \quad (3)$$

式中, η 为单缸容积效率; d 为柱塞直径; $G(\theta)$ 为有效速度函数。

单作用直线电机的有效速度曲线的函数为

$$G(\theta) = \begin{cases} g(\theta) & g(\theta) \geq 0 \\ 0 & g(\theta) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$G(\theta) \geq 0$ 时,单作用柱塞处于压液行程; $G(\theta) < 0$ 时,单作用柱塞处于吸液行程。

对于双作用直线电机,有效速度曲线的函数为

$$G(\theta) = |g(\theta)| \quad (5)$$

双作用柱塞始终处于一端吸液,另一端排液的状态,因此双作用直线电机的有效速度曲线指直线电机速度绝对值曲线。

对函数进行量纲一化处理,建立多直线电机柱塞泵的组合瞬时流量的数学模型:

$$Q(\theta, \Delta\theta) = \pi \eta d^2 \varphi(\theta, \Delta\theta) / 4 \quad (6)$$

$$\varphi(\theta, \Delta\theta) = G(\theta) + f_1 G(\theta + \Delta\theta) + f_2 G(\theta + 2\Delta\theta) + f_3 G(\theta + 3\Delta\theta) \quad (7)$$

其中, $\Delta\theta$ 为相邻曲线间的相位差; $\varphi(\theta, \Delta\theta)$ 为有效速度曲线的组合量。 f_1, f_2 和 f_3 与图1对应,根据直线电机是否作用赋值1或0,例如, $f_2=1$ 指该直线电机单元有效, $f_2=0$ 指该直线电机无效, $G(\theta, \Delta\theta)$ 与 $G(\theta)$ 的相位相差为 $\Delta\theta$ 。

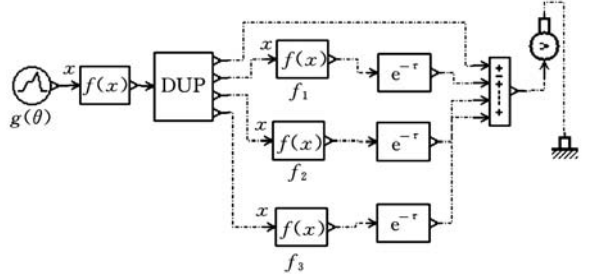


图1 多曲线组合计算模型

由于柱塞泵的组合流量与直线电机的速度规划组合量成正比,因此多条有效速度规划曲线以一定相位差的组合得到常量,即多台柱塞泵单元的组合流量是常量,这就是恒流量柱塞泵的基本原理。

因此根据上述数学模型,构建多条速度规划曲线以一定相位差组合的计算模型,如图1所示。计算得到的多条有效速度规划曲线单元以一定相位差组合得到常量的方案,即为直线电机驱动柱塞泵恒流量输出的可行运动规划方案:

$$\left. \begin{aligned} A &= 1 \\ \tau &= T\Delta\theta / (2\pi) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, τ 为速度规划曲线间的时间差; T 为速度规划曲线函数的周期,为简化计算,定义速度规划曲线的幅值 $A=1$ 。

2 直线电机运动规划方案

2.1 两曲线单元以一定相位差组合的方案

通过定义模型的输入曲线 $g(\theta)$,调节连续时滞块的参数 $\tau, f_1=1, f_2=f_3=0$ 。 f_1, f_2, f_3 分别对应于曲线2,3,4, $f_2=f_3=0$ 时,曲线3,4的幅值为零。经量纲一化计算,得到双作用曲线以一定相位差组合得到常量的方案,如图2、图3所示。

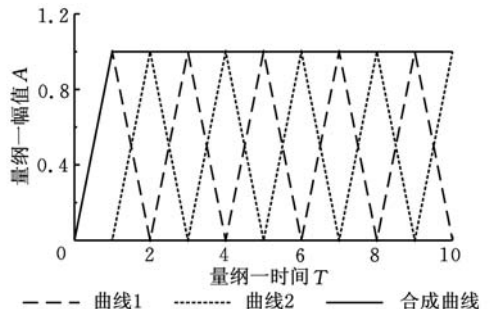


图2 两个双作用连续三角波曲线间隔 $\pi/2$ 相位差组合

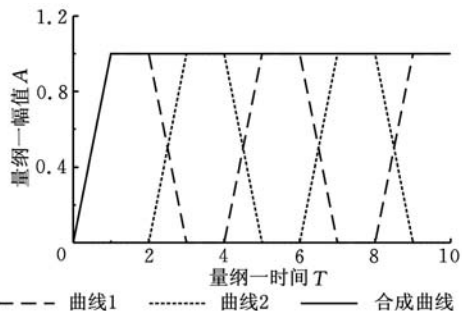


图 3 两个双作用间断梯形波曲线间隔 $\pi/2$ 相位差组合

由图 2、图 3 所示的速度规划曲线组合方案可以得到以连续三角波形之间相隔 $\pi/2$ 相位差的运动规划,或以间断 $\pi/4$ 的梯形波之间相隔 $\pi/2$ 相位差的运动规划运行,双作用直线电机驱动柱塞泵理论上能输出恒定流量。

2.2 三曲线单元以一定相位差组合的方案

通过定义模型的输入曲线 $g(\theta)$,调节连续时滞块的参数 $\tau, f_1 = f_2 = 1, f_3 = 0$ 。经计算得到单作用或双作用曲线以一定相位差组合得到常量的方案,如图 4 ~ 图 6 所示。

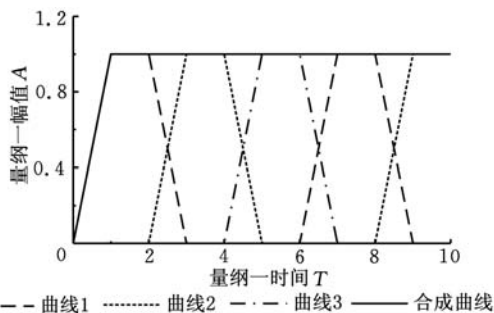


图 4 三单作用梯形波曲线间隔 $2\pi/3$ 相位差组合

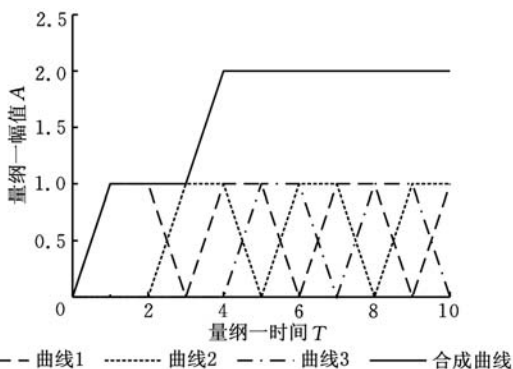


图 5 三双作用连续梯形波曲线间隔 $2\pi/3$ 相位差组合

由图 4 ~ 图 6 所示的曲线组合方案可知,3 个直线电机驱动单作用柱塞以梯形波、间隔 $2\pi/3$ 相位差的运动规划工作时,柱塞泵理论上能实现恒流量输出;3 个直线电机驱动双作用柱塞以梯形波、间隔 $\pi/3$ 或 $2\pi/3$ 相位差的运动规划工作时,柱塞泵理论上能实现恒流量输出,并且双作用柱塞泵输出流量是同样梯形波单作用柱塞泵的 2 倍。

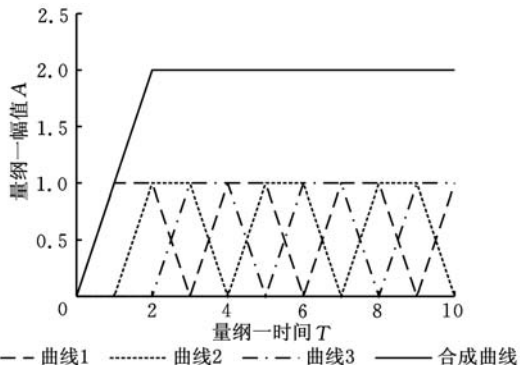


图 6 三双作用连续梯形波曲线间隔 $\pi/3$ 相位差组合

2.3 四曲线单元以一定相位差组合的方案

定义输入曲线 $g(\theta)$ 为三角波或梯形波,调节连续时滞块参数 $\tau, f_1 = f_2 = f_3 = 1$ 。经计算得到多种组合值为常量的方案,如图 7 ~ 图 9 所示。

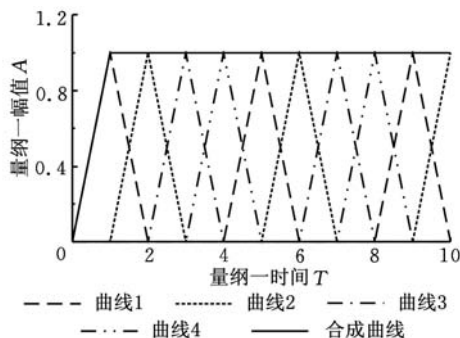


图 7 四单作用三角波曲线间隔 $\pi/2$ 相位差组合

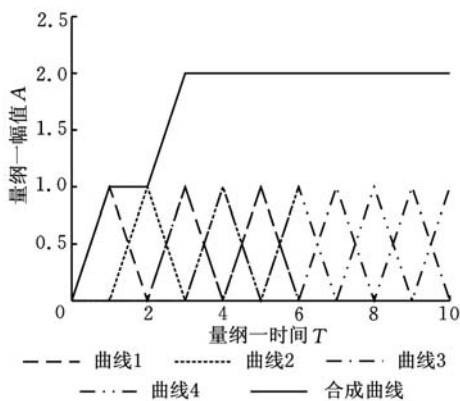


图 8 四双作用三角波曲线间隔 $\pi/4$ 相位差组合

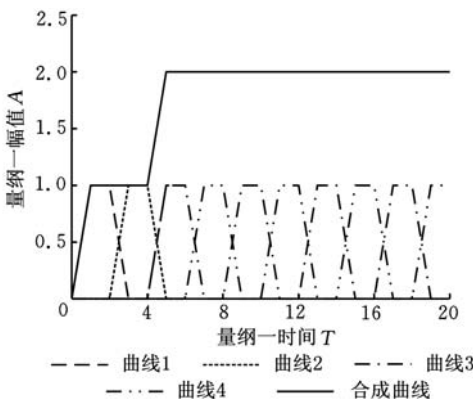


图 9 四双作用间断梯形波曲线间隔 $\pi/2$ 相位差组合

由图 7~图 9 所示方案可以得到,4 个直线电机驱动的单作用柱塞泵以三角波、间隔 $\pi/2$ 相位差的运动规划工作时,柱塞泵理论上能输出恒流量;4 个直线电机双作用柱塞泵在以连续三角波形之间隔 $\pi/2$ 相位差的运动规划,或以间断 $\pi/4$ 的梯形波之间 $\pi/2$ 相位差的运动规划时,双作用柱塞泵理论上能输出恒定流量。

实际上,四曲线组合模型可以看成是两组双曲线组合模型的叠加。因此,双曲线组合模型的组合值为常量的可行方案,适用于四曲线组合模型。推而广之,曲线组合模型的曲线数目是图 2~图 9 所示曲线组合模型曲线数的整数倍时,相应的可行方案同样适用。

基于上述研究,笔者所在课题组提出一种直线电机驱动柱塞泵,并已申请国家发明专利。当 1 个或 2 个直线电机单元发生故障,采用图 2、图 3、图 5、图 6 所示的方案为运动规划时,仍然能使该柱塞泵输出稳定的流量,因此该直线电机驱动柱塞泵具有冗余功能。

3 直线电机柱塞泵仿真试验

应用 AMESim 构建四组双作用直线电机驱动柱塞泵的系统仿真模型,并对每个双作用直线电机驱动柱塞泵建立超级元件,进行封装。该柱塞泵的可行运动规划如图 8、图 9 所示。

由于协调控制各直线电机单元的控制系統存在精度误差,速度规划曲线间不可避免会存在相位超前或滞后,故该柱塞泵的实际输出流量仍存在一定程度的脉动。采用三角波间隔 $\pi/2$ 相位差的运动规划,并且设置相位超前或滞后 $\pi/50$ ($T/100$),该直线电机驱动柱塞泵的流量组合曲线如图 10 所示。图 11 所示为柱塞泵采用梯形波间 $\pi/2$ 相位差的运动规划,并且具有 $\pi/50$ 超前和滞后下的流量组合曲线。

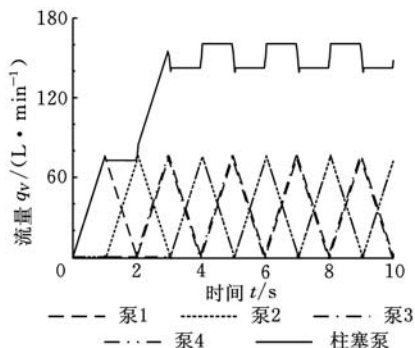


图 10 三角波间隔 $\pi/2$ 相位差的运动规划的流量组合曲线

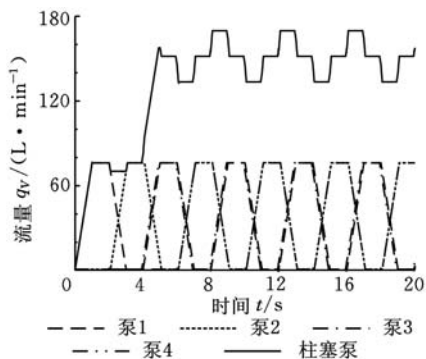


图 11 梯形波间隔 $\pi/2$ 相位差的运动规划的流量组合曲线

比较发现,在其他条件相同的情形下,图 11 所示柱塞泵的流量脉动率在间断梯形波间隔 $\pi/2$ 相位差的运动规划下达到 26.7%,是图 10 所示连续三角波间隔 $\pi/4$ 相位差的运动规划下的 2 倍,因此三角波曲线间隔 $\pi/2$ 相位差的运动规划具有冗余功能,是实际工作时流量脉动较小的优选方案。

此外,当某个直线电机柱塞泵单元发生故障或需要变量输出时,可以按上述可行方案调节直线电机间的运动规划,实现柱塞泵理论上的恒流量输出或变量调节。

4 结语

本文系统研究了多条典型曲线以一定相位差组合得到常量的多种可行方案。在此基础上,提出了一种具有冗余功能,理论上能输出恒流量的直线电机驱动柱塞泵。三角波间隔 $\pi/2$ 相位差的方案,是该柱塞泵实际输出流量脉动较小的优选运动规划。

直线电机驱动柱塞泵是机电液多场耦合的技术难题,协调多台直线电机精确按照确定的运动规划工作,对该柱塞泵的控制系統提出了很高的要求。控制系统的控制策略、响应时间、柱塞腔余隙容积和配流阀迟滞等不可避免地造成该柱塞泵的实际流量组合曲线与理论情况存在误差。协调直线电机间的相位差以消除柱塞腔余隙容积和配流阀的迟滞效应的影响,是减小该柱塞泵的实际流量脉动的可行方案,这些工作有待笔者进一步研究。

参考文献:

[1] 侯勇俊,刘金生,文进. 直线电动机驱动技术在石油机械中的应用及展望[J]. 石油机械,2005,33(增刊):182-184.
Hou Yongjun, Liu Jinsheng, Wen Jin. Application and Prospect of Linear Motor Technology in Petroleum Machine[J]. China Petroleum Machine,2005,

- 33(S):182-184.
- [2] 姜民政,王建萍,郑雪锋,等. 直线电机驱动抽油机的研究[J]. 石油矿场机械,2006,35(1):38-41.
Jiang Minzheng, Wang Jianpin, Zheng Xuefeng, et al. Study of Linear Electric Motor Driving Pumping Unit[J]. Oil Field Equipment, 2006, 35(1): 38-41.
- [3] 魏秦文,刘健,侯勇俊,等. 直线电机在采油设备中的应用[J]. 石油矿场机械,2007,36(8):54-57.
Wei Qinwen, Liu Jian, Hou Yongjun, et al. The Application of Linear Motors in Oil Production Equipment[J]. Oil Field Equipment, 2007, 36(8): 54-57.
- [4] 曲海,梁政. 直线电机抽油泵流场数值研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2010,32(2):164-168.
Qu Hai, Liang Zheng. Numerical Simulation of Flow Field within Hydraulic End of Oil Pump Driven by Linear Motor[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2010, 32(2): 164-168.
- [5] 侯勇俊,李蓓蓓,张培志,等. 单作用直线电机三缸往复泵运动特性研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(5):163-166.
Hou Yongjun, Li Beibei, Zhang Peizhi, et al. The Research on Motion Characteristics of Triplex Single-function Reciprocating Pump Driven by Linear Motors[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(5): 163-166.
- [6] 侯勇俊,蔡科涛,张培志. 双作用三直线电机往复泵运动特性研究[J]. 石油矿场机械,2009,38(8):12-16.
Hou Yongjun, Cai Ketao, Zhang Peizhi. Research on Motion Characteristics of Double-action Tri-linear Motor Reciprocating Pump [J]. Oil Field Equipment, 2009, 38(8): 12-16.
- [7] 刘金生. 直线电机三缸往复泵机理研究[D]. 成都:西南石油大学,2007.
- [8] 李蓓蓓. 三直线电机往复泵控制系统研究[D]. 成都:西南石油大学,2009.
- [9] 杨铁宁. 直线电机往复泵的性能研究[D]. 青岛:中国石油大学,2009.
- [10] 张云霞. 直线电机往复泵工作理论研究及结构设计[D]. 青岛:中国石油大学,2007.
- [11] 戴晓兰. 气压与伺服电机驱动的柱塞压力泵的创新设计[D]. 苏州:苏州大学,2009.
- [12] 戴晓兰,钟康民. 直线伺服电机驱动的数控双作用恒流量柱塞泵[J]. 液压与气动,2009(4):66-68.
Dai Xiaolan, Zhong Kangmin. The Double Role NC Constant Flow Piston Pump Driven by Linear Servo Motor[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2009(4): 66-68.
- [13] 聂松林,张铁华,李壮云. 水压传动及柱塞泵(马达)的现状和发展[J]. 机械工程师,2000(1):8-11.
Nie Songlin, Zhang Tiehua, Li Zhuangyun. The Development of Water Hydraulic Transmission and Water Hydraulic Axial Piston Pump(motor) [J]. Mechanical Engineer, 2000(1): 8-11.
- [14] 杨华勇,周华,路甬祥. 水液压技术的研究现状与发展趋势[J]. 中国机械工程,2000,11(12):120-123.
Yang Huayong, Zhou Hua, Lu Yongxiang. Research Achievements and Developing Trends of Water Hydraulics[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(12): 120-123.
- [15] 聂松林,石学园,李晓晖,等. 水压传动技术及其在农业机械中的应用[J]. 农业机械学报,2006,37(9):193-198.
Nie Songlin, Shi Xueyuan, Li Xiaohui, et al. Water Hydraulics and Its Applications in the Agricultural Machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 193-198.
- [16] 余祖耀,李壮云,聂松林,等. 水压柱塞泵中柱塞与缸孔接触比压的分析与探讨[J]. 中国机械工程,2002,13(3):252-255.
Yu Zuyao, Li Zhungyun, Nie Songlin, et al. Comprehensive Analysis of Contact Stress between Piston and Cylinder in Water Hydraulic Piston Pump [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(3): 252-255.
- [17] 杨正新,陈志华,涂阳虎,等. 直接驱动的发展与未来[J]. 中国机械工程,2000,11(10):109-111.
Yang Zhengxin, Chen Zhihua, Tu Yanghu, et al. State-of-the-Art about Direct Drive [J]. 2000, 11(10): 109-111.
- [18] 张春良,陈子辰,梅德庆. 直线电机驱动技术的研究现状与发展[J]. 农业机械学报,2002,33(5):119-123.
Zhang Chunliang, Chen Zichen, Mei Deqing. Present Status and Developing Trend of Linear Motor Direct Drives[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5): 119-123.
- [19] Tau D. DELTA TAU CHINA. (2012-12-19) [2012-12-15]. <http://www.deltatau-china.com/>

(编辑 张 洋)

作者简介:董武涛,男,1986年生。北京工业大学机电学院博士研究生。主要研究方向为直线电机驱动水压技术。发表论文3篇。聂松林,男,1967年生。北京工业大学机电学院教授、博士研究生导师。