

# 液压恒压网络系统中液压变压器的发展历程

姜继海 卢红影 周瑞艳 于庆涛 郭娜

(哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 介绍了液压变压器的产生背景, 综述了传统型和新型液压变压器的发展历程, 对2种液压变压器的工作原理进行了对比分析, 推导出传统型和新型液压变压器变压比的表达式, 并得出传统型液压变压器的变压比与2个组成元件的排量成反比规律变化, 而新型液压变压器则是通过控制配流盘的摆角来控制流入和流出液压变压器的流量来实现变压的结论. 归纳总结了液压变压器的特性, 列举了液压变压器在工程中的应用实例, 指出了目前液压变压器研究中尚未完善之处, 并对液压变压器的发展前景进行了展望.

**关键词:** 液压变压器; 二次调节; 恒压网络; 节能

**中图分类号:** TH137.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0505(2006)05-0869-06

## Development of hydraulic transformer in constant pressure rail system

Jiang Jihai Lu Hongying Zhou Ruiyan Yu Qingtao Guo Na

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The background of the hydraulic transformer is introduced, and the developing process of the traditional type and new type of hydraulic transformer are summarized. The working principles of the two types of hydraulic transformer are also compared and the expressions of the two types of the hydraulic transformer are deduced. It is concluded that the pressure ratio of the traditional hydraulic transformer varies with the displacement of the two components of the traditional hydraulic transformer and the pressure ratio of the new type of hydraulic transformer changes with the control angle of the valve plate which controls the input and output flow of the hydraulic transformer. This research also provides the characters of the hydraulic transformer and enumerates its applications. Finally some aspects not yet perfect in the hydraulic transformer study are pointed out, and the development of the hydraulic transformer in the future is prospected.

**Key words:** hydraulic transformer; secondary regulation; constant pressure rail; energy-saving

液压变压器是指在液压传动中能够实现压力转换的一种液压元件. 它相当于压力转换器, 可以从液压恒压网络系统中无节流损失地获取能量. 液压变压器早在1965年就有美国专利对其进行描述, 直到20世纪80年代, 液压变压器在结构上一直都没有很大改进, 基本上都是采用轴向柱塞泵和轴向柱塞马达通过刚性轴机械地连接在一起的结构形式, 通常称为传统型液压变压器. 1997年荷兰的Innas和Noax公司联合提出新型液压变压器的

设计概念.

与传统型液压变压器相比, 新型液压变压器将液压泵和液压马达的功能集为一身, 组成一个独立的液压元件, 简化了其结构形式<sup>[1]</sup>. 新型液压变压器主要是采用定量轴向柱塞泵或轴向柱塞马达结构经过必要的改造而得到的, 还有一些是基于径向柱塞元件、叶片马达以及摆线或差动齿轮泵/马达等改造而成<sup>[2]</sup>. 新型液压变压器以其结构简化、效率高以及可靠性高等优点赢得研究者的普遍关注.

## 1 液压变压器的产生

液压变压器的出现扩大了二次调节静液传动系统的应用领域. 二次调节静液传动技术是对液压

收稿日期: 2006-03-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375033).

作者简介: 姜继海(1957—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, jjhlxw@hope.hit.edu.cn.

能与机械能互相转换的液压元件进行调节来实现能量转换和传递的技术. 如果把液压系统中机械能转化成液压能的元件(液压泵)称为一次元件或初级元件,则把液压能和机械能可以互相转换的元件(液压马达/泵)称为二次元件或次级元件<sup>[3]</sup>. 二次调节静液传动技术以其突出的能量回收和再利用的优点而在多个行业中得到了成功的应用,可归纳为以下几个方面<sup>[4-7]</sup>:车辆的液压驱动系统;工程机械的液压传动系统(起重机、行走机械);冶金机械(精轧机组液压传动系统);石油机械(液压抽油机液压传动系统)等. 尽管二次调节静液传动系统在多个行业中得到应用,但其工作原理决定了负载端是变量执行元件,这对于液压马达是容易实现的. 但对于液压缸而言,其活塞面积难以变化,所以常采用液压阀控制液压缸,这种控制方法引入了节流损失且不能回收能量,效率低,从而使二次调节静液传动系统的应用受到限制. 解决该问题比较合适的方案是采用液压变压器作为控制元件驱动液压缸,即没有理论上的节流损失,又能够进行能量的回收和利用. 因此对它的研究目前已成为二次调节静液传动技术研发的主要热点之一.

## 2 液压变压器的发展历程

液压变压器的发展经历了从传统型液压变压器到新型液压变压器的演变过程.

### 2.1 传统型液压变压器的工作原理

传统型液压变压器通常是由液压泵/马达和液压马达/泵同轴刚性连接所构成<sup>[8]</sup>,其工作原理如图 1 所示.

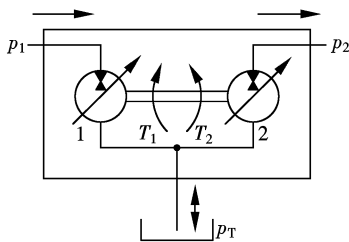


图 1 传统型液压变压器工作原理图

对刚性轴进行受力分析,首先作如下假设:

- 1) 传统型液压变压器中没有任何功率损失,包括容积损失和机械损失;
- 2) 油箱处的压力为零.

动力转矩、阻力转矩分别为

$$T_1 = \frac{\Delta p_1 V_1}{2\pi}, T_2 = \frac{\Delta p_2 V_2}{2\pi} \quad (1)$$

转矩差  $\Delta T = T_1 - T_2$ . 当  $\Delta T = 0$  时,液压变

压器处于平衡状态. 由  $T_1 = T_2$ ,可知

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (2)$$

若设变压比为  $\lambda$ ,则理想情况下变压比公式为

$$\lambda = \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (3)$$

式中, $V_1, V_2$  分别为 1,2 两元件的实际排量; $p_1, p_2$  分别为液压变压器进、出端的压力; $\Delta p_1, \Delta p_2$  分别为液压变压器进、出油端相对油箱处的压差,且  $\Delta p_1 = p_1 - p_T, \Delta p_2 = p_2 - p_T$ ,其中  $p_T$  为油箱处的压力, $p_T = 0$ .

### 2.2 传统型液压变压器的发展历程

传统型液压变压器分为定变压比的液压缸式液压变压器和变压比可调的液压马达/泵式液压变压器两类<sup>[8]</sup>. 前者采用 2 个单杆液压缸并将其活塞杆刚性地联接在一起的结构,由于两侧活塞的有效作用面积不同,因此两侧腔室内的压力不同,这样便实现了变压. 其特点是变压比为固定值,一般作为增压装置. 而后者才是通常意义上所指的传统型液压变压器,对它的研究较为深入,国外主要体现在欧洲对其的研究与应用,如德国、瑞典、荷兰等都有卓著的研究成果,而日本研究进度也很迅速.

1982 年,力士乐公司的 Kordak 对非变量执行元件与液压恒压网络系统相连的方式进行了理论分析<sup>[9]</sup>. 以定量泵/马达为例,通过三位四通比例阀将其与液压恒压网络系统连接,另有一变量泵依次经过节流阀、方向控制阀为比例阀提供控制信号,从而确定定量泵/马达的转向和转速. 液压缸的连接方式与定量泵/马达同理. 由于节流阀处产生了能量损失,因此考虑通过能量回收来减少能量消耗,从而提出用液压变压器将液压缸连接在液压恒压网络系统的方案. 1985 年, Dluzik 等利用液压变压器对液压缸进行速度控制的研究<sup>[10]</sup>. 研究内容包括负载、结构及系统参数变化时液压变压器的动态特性. 1987 年, Dluzik 等不仅对液压变压器与液压缸的各种连接方式和转速控制进行研究<sup>[11]</sup>,而且把单闭环与双闭环 2 种情况以及两者在负载压力呈矩形波信号输入时液压变压器的工作特性进行对比,并对组成液压变压器的 2 个泵/马达均可变量的方案以及速度控制原理进行了理论分析与试验研究. 1989 年, Dluzik 研究了大负载时液压变压器对差动液压缸进行位置控制的动态特性以及多种节能方案的节能效果进行了比较<sup>[12]</sup>. 1996 年, Kordak 分析了二次调节系统的损失情况<sup>[13]</sup>,指出采用液压变压器控制液压缸的系统,其损失只

取决于液压变压器的损失。

国内对传统型液压变压器的研究以哈尔滨工业大学和浙江大学起步较早。2002年,哈尔滨工业大学董宏林在实验室搭建了一个基于二次调节静液传动技术的模拟提升机试验系统<sup>[14]</sup>,已经初步地验证了液压变压器的变压原理。

2003年,浙江大学欧阳小平等对液压变压器在液压电梯系统中的节能应用进行了研究<sup>[15]</sup>,根据传统型液压变压器的工作原理,提出一种新型液压电梯节能控制系统,该系统的装机功率仅为普通系统装机功率1/3左右。

2004年,哈尔滨工业大学的周瑞艳又对传统型液压变压器的变压原理进行了更为深入的理论分析和试验研究<sup>[16]</sup>,为进一步开展对新型液压变压器的研究奠定了基础。

直到此时,所做研究工作被称为对传统型液压变压器的研究。这种类型的液压变压器性价比不高,因此并没有使得液压恒压网络系统或者说二次调节静液传动系统得到更广泛的应用。但是它实现了从液压恒压网络系统到负载端变压的目的。

### 2.3 新型液压变压器的工作原理

液压变压器的压力-流量曲线如图2所示<sup>[1]</sup>,将液压恒压网络系统压力 $p_A$ 调节到负载压力 $p_B$ ,若采用节流控制方式,则按曲线1进行调压,由此产生的能量损失为

$$P_{\text{loss}} = q_B(p_A - p_B) \quad (4)$$

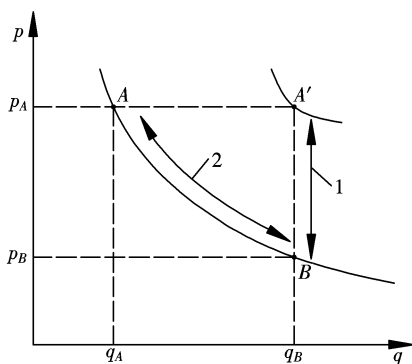


图2 液压变压器的压力-流量曲线

若采用液压变压器则按曲线2进行调压,忽略内部损失以及与油箱连接处的液压能,则应该遵循如下的能量守恒方程:

$$p_A q_A = p_B q_B \quad (5)$$

式中, $p_A$ 为A点压力; $p_B$ 为B点压力; $q_A$ 为A点流量; $q_B$ 为B点流量。

从方程(5)中可以得到负载流量和油源流量之比的关系:

$$\frac{q_B}{q_A} = \frac{p_A}{p_B} = \frac{1}{\Pi} \quad (6)$$

式(6)是液压变压比 $\Pi$ 的倒数。通过改变A、B两点的流量可以控制油源和负载之间的压力比,也就控制了液压变压器的变压比。

从图2中还可以看出:按曲线2进行调压时,由于A、B两点的流量不同,若忽略液压变压器内部的流量损失,则液压变压器流入的流量应与流出液压变压器的流量相等,因此必须增加第3个油路T来补偿A、B点流量的差值 $q_T = q_B - q_A$ ,这也正是采用定量轴向柱塞泵或马达结构改造的液压变压器的配流盘有3个端口的原因。

### 2.4 新型液压变压器的发展历程

对新型液压变压器的研究主要包括结构优化和控制策略的探索,特别是低速控制性能的改善、降低噪声问题以及拓宽液压变压器的变压比等方面。

1997年,荷兰Innas公司制造出了第1台新型液压变压器的样机,如图3(a)所示,并与NOAX公司在1997年的国际流体动力会议(SICFP'97)上正式提出了新型液压变压器的工作原理,这种液压变压器被称为Innas液压变压器<sup>[1]</sup>(Innas hydraulic transformer, IHT)。它的出现可称为液压变压器在结构上的突破,将传统型液压变压器中的泵/马达功能集为一身,在斜轴式定量轴向柱塞泵/马达结构的基础上,去掉输出轴,将配流盘由原来2个肾形配流口改造成3个肾形配流口,通过手动控制配流盘摆角来改变负载和液压恒压网络系统之间的流量比和压力比。新型液压变压器的简化符号如图3(b)所示。新型液压变压器的结构简单,动态性能好,可用来驱动直线和旋转负载,因此展示了广阔的应用前景。

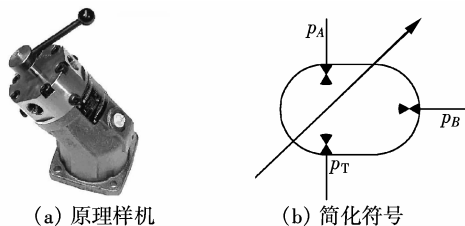


图3 第1台新型液压变压器

1998年,Achten等对IHT的产生背景和工作原理进行了论述<sup>[17]</sup>,推导了液压变压器的各个端口的流量和转矩的理论公式,进行了仿真研究,并列举了其应用实例。

1999年,Achten在第六届国际流体动力会议(SICFP'99)上,阐述了IHT的设计原则、IHT与定

量马达共同使用在四象限内的工作原理,及其控制双作用液压缸等执行机构较传统型液压变压器的优势<sup>[2]</sup>,同时分析了 IHT 的引入对系统技术上和经济上的价值。

2000 年, Achten 等对液压变压器的配流盘开口结构进行了优化<sup>[18]</sup>, 目的在于使配流盘受力均衡, 改善其控制特性。

2001 年, Achten 等在第七届国际流体动力会议(SICFP'01)会议上, 提出采用“梭”来消除 IHT 的噪声问题<sup>[19]</sup>。由于优化配流盘的配流口及与其相对应的缸体端口尺寸在实际加工过程中比较难以实现, 因此在结构设计中引入“梭”来减小由“阀空”现象引起的噪声问题。

同年, Rexroth 公司在液压变压器的研究上也有新突破, 制造出与 IHT 结构类似的液压变压器<sup>[20-21]</sup>。其独特之处在于与传统型液压变压器的 4 个接口相对应, 在配流盘上加工 4 个肾形口, 分别与恒压网络、执行机构的 2 个端口以及油箱相连, 这种结构需要的辅助装置少, 能够自适应负载的变化, 而且能对恶劣的工作条件达到快速匹配。

2002 年, 在德国召开的第三届国际流体传动会议上, Achten 等对 Innas 液压变压器又进行了改造<sup>[22]</sup>。将液压变压器由原来的 7 个柱塞改为 18 个柱塞, 缸体形式由集成式结构改为可以自由移动的浮杯式结构, 同时将缸体由 1 个变成 2 个。柱塞数的增加, 减小了液压变压器内流量和扭矩的波动, 降低了噪声, 提高了效率。但该类型的液压变压器的节能效果以及运行特性有待进一步验证。

同年, Rexroth 公司的 Jörg 申请了有关减小配流盘和壳体之间及配流盘和缸体之间摩擦力及摩擦损失方案的专利<sup>[23]</sup>。它的创新之处是在配流盘和壳体之间放置球形或者圆锥形滚动体, 通过减小接触面积来减小摩擦力以及摩擦损失, 从而降低液压变压器的起动力矩。

与此同时, Rudolf 又对配流机构进行了优化<sup>[24-25]</sup>, 提出通过改变在转子柱塞腔内径向安装的两个控制窗口有效长度的方法, 即改变转子与控制部件之间的轴向距离实现变压。

2003 年, Vael 等在第八届国际流体动力会议(SICFP'03)会议上, 提出 4 种将差动液压缸通过液压变压器连接到液压恒压网络系统中的方案<sup>[26]</sup>, 并对比分析了 4 种方案的可行性。

2001 年, 哈尔滨工业大学董宏林等对液压变压器的变压原理和结构特点等进行了分析<sup>[27]</sup>。

2003 年, 浙江大学杨华勇等对国内外液压变

压器的研究状况进行了剖析, 指出了液压变压器研发中亟待解决的关键问题<sup>[28]</sup>。

2004 年, 欧阳小平等分析了导致液压变压器调压范围过窄的原因是配流盘的肾形口与后端盖油槽形状和位置不匹配造成的。为拓宽其调压范围, 对其结构进行了优化。但经过优化得到的结构使得液压变压器运行过程中摩擦损失很大, 致使启动时有较大死区<sup>[29-30]</sup>, 因此在今后液压变压器的设计过程中应克服这个缺陷。

国内的研究工作暂时还处于吸收和借鉴国外成果的层次上, 在理论、试验及应用上也还没有更新的突破。因此, 对液压变压器进行更为深入的理论和试验研究是使该元件国产化、系列化的基础, 也是推广液压恒压网络系统发展的关键。

### 3 液压变压器的特性

新型液压变压器作为能同时控制负载压力和流量的控制元件, 主要有以下几方面特性:

1) 液压变压器变压过程可逆, 能以无节流损失的方式将恒压网络压力调整为负载压力变化范围内的任一值;

2) 可调变压比的液压变压器和能量回收液压蓄能器串联组合使用, 能以最优化的方式利用液压蓄能器的储能能力;

3) 在液压恒压网络系统中, 液压变压器可以无节流地实现多种不同等级的压力回路, 既可满足不同负载用户的需要, 又大大提高了系统效率<sup>[27-28]</sup>;

4) 液压变压器的体积小、重量轻、转动惯量小, 动态响应快, 控制性能好。

### 4 液压变压器的应用

第 1 台样机是在力士乐公司的斜轴式定量轴向柱塞泵的结构上进行改造得到的<sup>[1]</sup>, 此样机被用在一个特定的叉式提升机上, 由液压变压器和液压缸相连驱动提升机工作, 通过试验验证了液压变压器的工作原理, 但没有对其效率和性能进行测试。

最能体现液压变压器价值的是其在工程机械中的应用, 其中一个应用实例如图 4 所示<sup>[8]</sup>。此结构与目前常用的阀控系统相比, 最显著的特点是避免了阀控系统带来的节流损失, 充分体现了液压恒压网络系统能够同时驱动多个负载的优势。

### 5 液压变压器尚待解决的问题

目前, 对新型液压变压器的相关研究中急需解

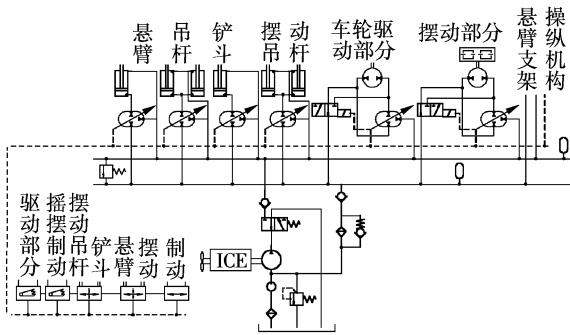


图4 液压变压器在工程机械中的应用

决问题:①对液压变压器的配流盘、柱塞、缸体等的受力和运动分析甚少,不便于对带有液压变压器的系统进行动力学分析及仿真研究;②配流盘和缸体以及端盖之间端口的匹配不够完善,造成压力波动及噪声,在结构设计中要力争克服此缺陷;③配流盘和端盖之间有相对运动,则两者之间的密封属于动密封,因此设计良好的密封结构是液压变压器结构设计中需要考虑的重要因素;④目前调节液压变压器的变压比是以手动控制为主,不利于系统实现自动化及远程控制,若在设计中引入伺服控制,不仅可以实现对随动信号的伺服跟踪,也易于实现精确控制。除此之外,液压变压器应用在液压恒压网络系统中同时驱动多个负载时,负载之间存在压力耦联现象,而压力耦联直接影响负载的工作性能。若能将这几个问题加以解决,也必将使得液压变压器的研究更加完善,并极大地推广其应用范围。

## 6 展望

液压变压器的发展历经了从传统型到新型,从理论研究到实际应用,实现了液压恒压网络系统中高效、无节能损失地驱动直线和旋转负载的工况,拓宽了二次调节静液传动技术的应用范围。经过不断提高改善液压变压器现有的结构,以及研发相应控制策略,液压变压器必将显示广阔的应用前景。

### 参考文献 (References)

[1] Achten P A J, Fu Zhao, Vael G E M. Transforming future hydraulics: a new design of a hydraulic transformer [C]//*The Fifth Scandinavian International Conference on Fluid Power*. Sweden: Linköping University, 1997: 1-23.

[2] Achten P A J. What a difference a hole makes-the commercial value of the Innas hydraulic transformer [C]//*The Sixth Scandinavian International Conference on Fluid Power*. Finland, 1999: 1-14.

[3] 姜继海. 二次调节静液传动系统及其控制技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 1998.

[4] Pawelski Zbigniew, Parisi Roberto, Teuteberg Michael. Installing Rexroth drive device on old type bus [J]. *Rexroth Information Quarterly*, 1997(1): 27-28.

[5] 凌学俭. 二次控制技术及其在精轧机组中的应用 [J]. *液压与气动*, 2000(1): 7-10.

Leng Xuejian. Secondary regulation technology and its application in finishing mill group [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2000(1): 7-10. (in Chinese)

[6] Parisi Roberto E. Gaining oil boom by hydraulic drive [J]. *Rexroth Information Quarterly*, 1998(1): 16-18.

[7] 路甬祥, 俞浙青, 吴根茂. 功率回收型液压抽油机的设计原理 [J]. *石油机械*, 1995, 23(2): 42-54.

Lu Yongxiang, Yu Zheqing, Wu Genmao. Design principle of power recovery type hydraulic pumping units [J]. *China Petroleum Machinery*, 1995, 23(2): 42-54. (in Chinese)

[8] Vael Georges E M, Achten Peter A J, Fu Zhao. The Innas hydraulic transformer: the key to the hydrostatic common pressure rail [J]. *SAE*, 2000, 21(1): 2561-2576.

[9] Kordak R. Praktische Auslegung sekundärgeregelter Antriebssysteme [J]. *Ölhydraulik und Pneumatik*, 1982, 26(11): 795-800.

[10] Dluzik K, Shih Aachen M C, Tai Wan. Geschwindigkeitssteuerung eines Zylinders am Konstant Drucknetz durch einen HydroTransformator [J]. *Ölhydraulik und Pneumatik*, 1985, 29(4): 281-286.

[11] Dluzik K, Aachen. Zylinderansteuerungen am Drucknetz durch hydro-transformatoren [J]. *Ölhydraulik und Pneumatik*, 1987, 31(3): 248-255.

[12] Dluzik K. Energiesparende schaltungskonzepte für hydro-zylinder am Drucknetz [J]. *Ölhydraulik und Pneumatik*, 1989, 33(5): 444-450.

[13] Kordak R. Verlustarme zylindersteuerung mit Sekundärregelung [J]. *Ölhydraulik und Pneumatik*, 1996, 40(10): 696-703.

[14] 董宏林. 基于二次调节原理的液压提升装置节能及控制技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2002.

[15] 欧阳小平, 徐兵, 杨华勇, 等. 液压变压器在液压电梯系统中的节能应用 [J]. *中国机械工程*, 2003, 14(19): 1660-1662.

Ouyang Xiaoping, Xu Bing, Yang Huayong, et al. Hydraulic transformer energy-saving applications in hydraulic elevator [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(19): 1660-1662. (in Chinese)

[16] 周瑞艳. 液压变压器变压原理的理论分析与试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2004.

[17] Potthäuser S, Achten P. Ein neuer alter bekannter-der hydrotransformator [J]. *Ölhydraulik und Pneumatik*,

- 1998, **42**(6): 374-377.
- [18] Achten P A J, Fu Zhao. Valving land phenomena of the Innas hydraulic transformer[J]. *International Journal of Fluid Power*, 2000, **1**(1): 1-15.
- [19] Achten P A J, Vael Georges E M, van den Oever Johan, et al. 'Shuttle' technology for noise reduction and efficiency improvement of hydrostatic machines [C]//*The Seventh Scandinavian International Conference on Fluid Power*. Sweden: Linköping, 2001: 1-30.
- [20] Jörg Dantlgraber. Hydrotransformator; Germany, DE10037114A1 [P]. 2001-07.
- [21] Jörg Dantlgraber. Hydrotransformator; Germany, DE10016954A1 [P]. 2001-10.
- [22] Achten P A J, van den Brink Titus, van den Oever Johan. Dedicated design of the hydraulic transformer [C]//*3rd International Fluid Power Conference*. Germany: Aachen, 2002, **2**: 233-248.
- [23] Jörg Dantlgraber. Hydrotransformator; Germany, DE10033285A1 [P]. 2002-02.
- [24] Rudolf Schäffer. Hydrotransformator; Germany, EP1172553A2 [P]. 2002-01.
- [25] Rudolf Schäffer. Hydrotransformator; Germany, DE10034238A1 [P]. 2002-01.
- [26] Vael Georges, Achten P, Potma Jeroen. Cylinder control with the floating cup hydraulic transformer [C]//*The Eighth Scandinavian International Conference on Fluid Power*. Tampere, Finland, 2003: 1-15.
- [27] 董宏林, 姜继海, 吴盛林. 液压变压器的原理及其在二次调节系统中的应用[J]. *液压与气动*, 2001(11): 30-32.
- Dong Honglin, Jiang Jihai, Wu Shenglin. The principle of hydraulic transformer and its applications in second controlled system[J]. *China Hydraulics & Pneumatics*, 2001(11): 30-32. (in Chinese)
- [28] 杨华勇, 欧阳小平, 徐兵. 液压变压器的发展现状[J]. *机械工程学报*, 2003, **39**(5): 1-5.
- Yang Huayong, Ouyang Xiaoping, Xu Bing. Development of hydraulic transformer[J]. *China Journal of Mechanical Engineering*, 2003, **39**(5): 1-5. (in Chinese)
- [29] 欧阳小平, 徐兵, 杨华勇. 拓宽液压变压器调压范围的新方法[J]. *机械工程学报*, 2004, **40**(9): 28-32.
- Ouyang Xiaoping, Xu Bing, Yang Huayong. Innovation method of widening adjustable pressure range of hydraulic transformers[J]. *China Journal of Mechanical Engineering*, 2004, **40**(9): 28-32. (in Chinese)
- [30] 欧阳小平. 液压变压器研究[D]. 浙江: 浙江大学机械与能源工程学院, 2005.