

文章编号:1671-8879(2016)06-0118-09

液压系统中液压变压器的发展及研究现状

姜继海,杨冠中

(哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要:液压变压器是液压系统中的新兴元件,可被用来改变系统压力和回收系统能量。目前,在世界节能减排大环境下,液压技术也有了新的突破,出现了能回收系统多余能量的 CPR 系统。液压变压器是 CPR 系统的核心元件,它的性能是推广具有环保性质的 CPR 系统的关键,液压变压器成为研究热点之一。回顾了国外液压变压器的研究进展和概述中国研究情况,将液压变压器分成直线式和旋转式 2 种类型。通过引用专利,讲述了传统型旋转式液压变压器的出现和发展,评价了它的特征,指出不适合用于 CPR 系统的原因。以专利为基础,介绍了新型旋转液压变压器的出现,评价了它相对于传统型旋转液压变压器的优点,指出它更适合于 CPR 系统。分别详细介绍了新型液压变压器的 3 代发展史和最新进展。对比节流和变压 2 种压力调节方式,揭示液压变压器的一般性变压原理。在液压变压器分类的基础上,推导各液压变压器的工作原理。阐述液压变压器的特点,并用实例说明在工程机械中应用新型液压变压器能带来显著的节能效果,验证新型液压变压器适合于 CPR 系统。总结新型液压变压器目前存在的关键问题及其产生原因。最后,指出流量控制问题的解决使得新型液压变压器从变压元件进化为变功率元件,新型液压变压器未来还有诸多需研究和改进的地方。

关键词:机械工程;液压变压器;节能;CPR;工程机械;变压

中图分类号:TH137.5

文献标志码:A

Development and research status of hydraulic transformer in hydraulic system

JIANG Ji-hai, YANG Guan-zhong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: In the hydraulic system, the hydraulic transformer is a newly developing component, which can be used to convert fluid pressure and recover energy in the system. Currently, hydraulic techniques make a new breakthrough in developing a common pressure rail (CPR) system that can recover the extra energy in the environment where energy saving and emission reduction is needed in the world. The hydraulic transformer is the core of CPR system and its performance is a key to promote the CPR system that embodies environment protection. It has become a research focus. In this paper, research development of hydraulic transformer was reviewed at home and abroad. The transformer was classified as linear one and rotary one.

收稿日期:2016-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50875054,51275123);国家科技支撑计划项目(2014BAF08B06);流体传动及控制国家重点实验室开放基金项目(GZKF-2008003)

作者简介:姜继海(1957-),男,黑龙江嫩江人,教授,博士研究生导师,E-mail:jjhlxw@hit.edu.cn。

Invention and development of the classic rotary hydraulic transformer were described and its attributes were analyzed by referring patents. And why it is not appropriate for the CPR system was pointed. Invention of the new rotary hydraulic transformer was introduced and its advantages compared to classic rotary one were evaluated based on the patents. It was pointed why the new one is appropriate for the CPR system. Its three generations and new progress were introduced in detail. The two pressure adjusting ways including throttling and transforming were contrasted to the present general transformation principle of hydraulic transformer. The different working principles of hydraulic transformers based on the classification of hydraulic transformer were derived. The characteristics of new hydraulic transformer were elaborated. The case shows that the new transformer can bring a remarkable energy-saving effect in engineering machinery. So, it is very appropriate for the CPR system. Besides, current key problems and their causes of the new transformer are concluded. At last, it is pointed that the solution of the flow control issue makes the new hydraulic transformer evolve from pressure transducer into power transducer, and there are many spots to research and improve in future. 8 figs, 33 refs.

Key words: mechanical engineering; hydraulic transformer; energy-saving; CPR; engineering machinery; transformation

0 引 言

1905 年威廉姆斯和詹尼第一次使用油来做液压系统的工作介质时,液压系统开始推广^[1]。到二战结束,在战车、战舰和战机等军事领域里,液压系统已普及。二战后,液压系统在民用领域得到迅速推广,尤其在工程机械中,90%以上传动系统被替换为液压系统。与机械系统相比,液压系统具有更好的空间布置灵活性和控制性,故能取代机械系统。与电力系统相比,液压系统具有高功率密度特性,在大功率场合占据统治地位。但目前在全球环保意识增强和电力系统技术不断革新的背景下,液压系统在传统市场上的地位不断受到电力系统的侵袭。CPR(common pressure rail, CPR)系统是应对环保及节能减排需求的新液压系统平台,可应用于工程机械、汽车和试验设备等领域。该平台结构上类似于电网,可独立控制系统中的多个执行元件,且能回收能量,提升系统效率,进一步精简系统结构和降低成本。尽管 CPR 系统拥有传统液压系统无法替代的优点和广阔的市场前景,但至今尚未大面积推广,原因在于缺少实用的关键元件,即液压变压器。

经低损耗能量转换后,连接电力系统的电变压器能提供给各个负载所需的电压,负载电压是多样的甚至是变化的。同理,CPR 系统也需要液压变压器调节负载压力,使各个执行机构获得所需的不同压力。只有性能卓越的液压变压器才能使 CPR 系统作为高可靠高效率的液压系统平台来满足日益严

格的节能减排要求。液压变压器在 CPR 系统中不仅能回收旋转负载能量,也能回收直线负载能量,甚至能回收低压负载油路的能量,这使得 CPR 系统能回收系统中几乎所有的无用能量,令液压系统在效率方面超越电力系统成为可能。液压变压器是 CPR 系统与电力系统抗衡的关键,也是 CPR 系统比以往液压系统效率更高的根本所在。

近年来,随着各国政府对大气环境日益恶化及不可再生资源日益减少的忧虑增加,液压变压器成为新兴研究热点,美国、欧盟、日本、韩国和中国等相继开展了研究工作。在中国,哈尔滨工业大学最早研究液压变压器,浙江大学最早研究新型液压变压器,吉林大学和北京理工大学也对新型液压变压器开展了研究工作。从已公开的文献看,哈尔滨工业大学在液压变压器方面投入时间最长,投入精力最大,多名博士课题和多名硕士课题围绕液压变压器展开,已研制多台液压变压器。

本文梳理液压变压器在国内外的发展历程,首先论述液压变压器的变压原理和各种液压变压器的工作原理,然后归纳液压变压器现有的特点和问题,最后展望液压变压器的未来趋势,指出液压变压器还在不断完善中,今后相当长一段时间将持续以研究热点的方式存在。

1 液压变压器在国外的发展历程

液压变压器有直线式和旋转式 2 种类型。结构简单的直线式液压变压器——增压缸,压力比固定,

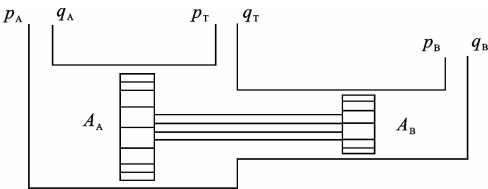
很早就为人们所用,如图 1(a)所示。图中参数表示见式(4)、式(5)和式(9)。旋转式液压变压器出现的晚一些,可追溯到 1962 年 Tyler 申请的专利——液压增压器,如图 1(b)所示,该液压变压器通过切口(88)面积大小调节输出排量来改变输出压力,压力比固定。它由 1 个柱塞基体构成,有两排柱塞和配流槽 70、71、72 和 74,结构复杂,安装制造困难,同时该液压变压器单向增压,泄漏和损失很大,故未能推广^[2]。1970 年 Kouns 申请了双向液压变压器专利,把 2 个柱塞基体的转子机械连接在一起,通过调节柱塞基体排量来改变输出压力,压力比任意。这种结构形式被认为是传统型液压变压器,旋转液压变压器由 1 个柱塞基体发展为 2 个^[3]。20 世纪 80 年代,液压变压器在结构上没有大的改变,常用的结构如图 1(c)所示。Kordak 等对液压变压器在 CPR 系统及液压缸中的应用进行了研究^[4-8]。传统型液压变压器体积大,结构复杂,泄漏和摩擦较大,效率不高。由于 CPR 系统采用传统液压变压器,不能很好地发挥自身优势,所以 CPR 系统无法大面积推广。为了满足 CPR 系统需求,液压变压器迫切需要创新。

1997 年荷兰 Innas 公司的 Achten 在专利 WO97/31185 中阐述了一种新型液压变压器的独特结构,如图 1(d)所示^[9]。相比于传统型液压变压器,它用配流盘的 A 槽替代起液压马达作用的液压泵/马达基体,用配流盘的 B 槽替代起液压泵作用的液压泵/马达基体,泵基体回归到 1 个。用配流盘的 T 槽替代起流量补偿作用的 2 个液压泵/马达基体配流盘的低压槽。所以,配流盘上共计 3 个腰形槽^[9]。与早期 1 个泵基体相比,它实现了压力比可调。这种配流盘上有 3 个槽的液压变压器被称为新型液压变压器。

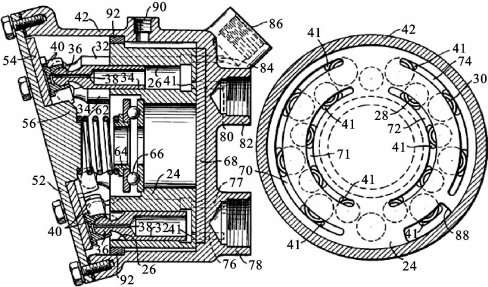
与以往液压变压器相比,新型液压变压器具有体积小,重量轻,结构简单,控制好,效率高等优点,能胜任 CPR 系统的工作需要。由于这些优点,目前各国主要研究新型液压变压器。

1998 年 Vael 等对新型液压变压器在叉车中的应用进行论述,给出新型液压变压器在叉车行走系统和工作系统中的布局图,探讨了总车辆控制策略。指出基于 IFPE(Innas 公司自由活塞发动机)和新型液压变压器的行走系统具有可观的成本低、质量轻和控制性好等特点^[10]。

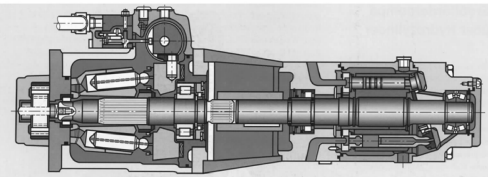
2000 年 Achten 等对液压泵与新型液压变压器旋转配流盘时的槽口过渡区现象进行对比,得出新



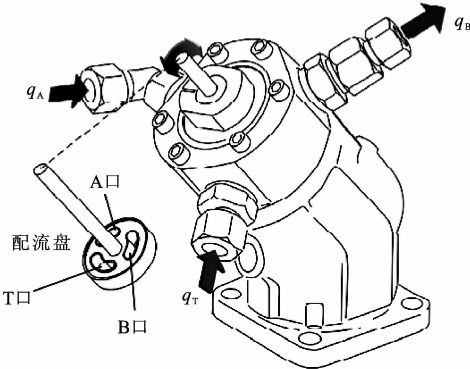
(a) 液压缸式液压变压器



(b) 液压泵/马达式液压变压器



(c) 传统型液压变压器



(d) 新型液压变压器

图 1 液压变压器的发展

Fig. 1 Development of hydraulic transformer

型液压变压器的槽口过渡区现象较弱的结论^[11]。Vael 等论述了四象限新型液压变压器的设计和 3 个腰形槽对缸体的转矩作用。

2001 年 Werndin 等建立了液压变压器的半经验损失模型,认为液压变压器的低速运行是最大挑战,讨论了液压变压器的控制策略^[12]。Achten 等提出采用“梭”来消除新型液压变压器的噪声问题^[13]。

2002 年 Malsen 等提到试验证明“梭”有良好的减噪效果^[14]。Achten 等认为第 1 代样机使用现有的液压泵/马达作基体是对新型液压变压器工作原理的快速验证,未能完全体现其优点。他们在新的新型液压变压器设计中,将柱塞增加到 18 个,缸体

采用浮杯式结构且由 1 个增加到 2 个。经过改进,不仅减小了柱塞和缸体间的摩擦损失,还减小了启动扭矩。该浮杯式液压变压器被认为是第 2 代新型液压变压器,见图 2^[15]。

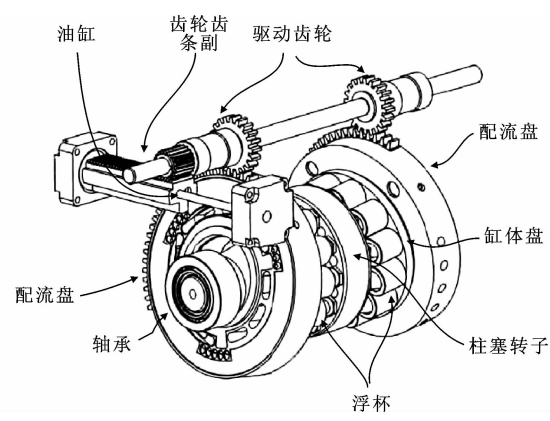


图 2 第 2 代新型液压变压器

Fig. 2 Second generation new type hydraulic transformer

2003 年 Vael 等将浮杯式液压变压器的柱塞从 18 个增加到 24 个,指出当浮杯式液压变压器排量增大时,槽口过渡区现象更严重^[16]。

2009 年 Achten 等解释了四象限新型液压变压器的工作模式。与以往液压变压器不同的是,四象限新型液压变压器中的配流盘不旋转。通过旋转与浮杯缸体相接触的斜盘使柱塞运动轨迹的上下死点连线发生旋转,从而调节新型液压变压器的控制角,见图 3^[17]。

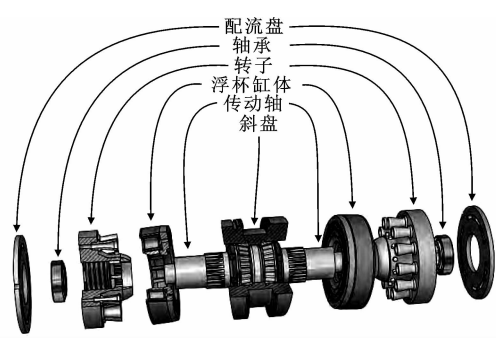


图 3 四象限液压变压器

Fig. 3 Four quadrant hydraulic transformer

2012 年 Achten 等在新型液压变压器的基础上提出新的设计思想,将依据新设计思想的液压变压器命名为 Oiler 变压器,Oiler 变压器可被认为是第 3 代新型液压变压器。Oiler 变压器的配流盘背面使用球面支撑,配流盘有 3 个旋转自由度(此前配流盘只有 1 个旋转自由度),控制起来较为复杂,要利用欧拉公式计算。Oiler 变压器拥有大的控制角范围,在工作中油液流通面积保持不变。利用浮杯式

基体的高效性,Oiler 变压器的研发目标之一是将效率提高到 93%,见图 4^[18]。

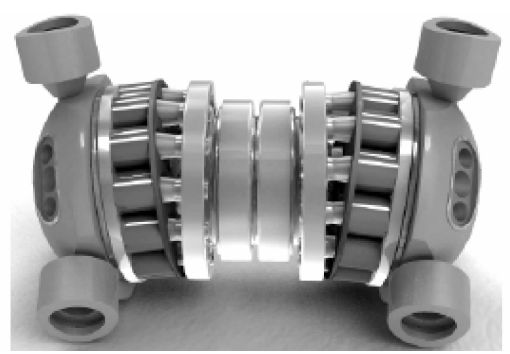


图 4 Oiler 液压变压器

Fig. 4 Oiler hydraulic transformer

总体来说,新型液压变压器刚出现时,结构创新较多,这可以从 3 代新型液压变压器的快速演变看出来。为降低新型液压变压器的噪声,在缸体上采用“梭”结构或在配流盘上采用与缸体配流窗口形状相匹配的槽。近年来,新型液压变压器在工程机械、汽车等领域的应用是研究热点。

2 液压变压器在中国的发展历程

2002 年哈尔滨工业大学董宏林等用 2 个液压泵/马达元件组成传统型液压变压器,完成传统型液压变压器的理论和试验研究^[19-20]。

2003 年浙江大学欧阳小平等基于传统型液压变压器的工作原理,提出一种装机功率为普通系统装机功率 1/3 的液压电梯节能控制系统,2005 年进一步研究了国外新型液压变压器的优缺点,研制完成中国第 1 台新型液压变压器样机(样机为手动控制的斜轴式新型液压变压器)^[21-22]。在配流盘和后端盖上设计特殊的油液通道解决调压范围过窄的问题,因通流截面保持恒定,故不存在调压范围过窄时产生的油液过热问题。

哈尔滨工业大学开展新型液压变压器研究,不仅研究了新型液压变压器本身,也研究了其应用^[23]。2008 年卢红影研制完成电动伺服控制的斜轴式新型液压变压器,使新型液压变压器的控制方式从手动发展到电控;建立了平衡角概念,对新型液压变压器驱动直线负载系统进行建模,研究新型液压变压器的控制策略^[24]。刘成强研制出电液伺服控制的斜盘式新型液压变压器,采用斜盘柱塞泵作为新型液压变压器样机的基体,同时采用伺服摆动液压马达控制配流盘,使得液压变压器结构紧凑,动态响应快,变压范围大;并在理论上分析了该液压变

压器的流量和转矩特性及控制策略;另外,初步研究了降噪问题^[25]。沈伟等对液压变压器在挖掘机中的应用进行了研究^[26]。目前,杨冠中等正在进行变量电液伺服液压变压器的研究工作^[27]。

吉林大学姚永明在采用双配流盘配流的液压变压器基础上,对液压变压器在装载机中的应用进行了研究^[28]。陈延礼对液压变压器在液驱混合动力车辆中的应用进行了研究^[29]。北京理工大学胡纪滨等通过理论和试验分析了液压变压器的变压比特性^[30]。吴维等研制了双缸体液压变压器^[31]。山东交通学院臧发业在叶片式液压变压器方面申请了几十项专利。其他科研机构也陆续有研究成果出现。

目前,中国已把调压范围过窄和过热问题解决,不再拘泥于国外初期的结构形式,出现了多种控制结构,缸体个数不再限于 1 个,出现了双缸体双配流盘和单缸体双配流盘配流方式,且配流盘和斜盘控制角均可变的双变量形式,但对降低液压变压器噪声的研究基本处于空白。与泵相比,液压变压器的噪声问题更严重也更复杂,需大量研究。大部分科研院所对控制液压变压器有所研究,主要是在应用中研究控制问题。

3 液压变压器的工作原理

3.1 液压变压器的变压原理

图 5 表示系统压力从 p_A 调节到 p_B 的 2 种流量-压力曲线,线路 1 是利用阀通过节流方式得到 p_B ;线路 2 是利用液压变压器通过变压方式得到 p_B 。

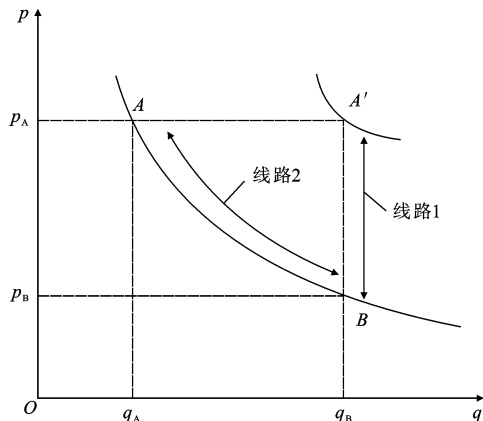


图 5 液压变压器的流量 q 与压力 p 的曲线

Fig. 5 Flow-pressure curves of hydraulic transformer

节流方式带来的能量损失大,且不能回收能量和升压,系统效率低。节流方式的原理是:提供多余负载所需的能量,通过损耗多余能量来达到调压目的,即液压系统提供的能量高于负载所需能量(这等

效于串联电路增加串联电阻阻值来降低负载电压)。节流过程中产生的功率损失 P_{loss} 为

$$P_{\text{loss}} = q_B (p_A - p_B) \quad (1)$$

式中: q_B 为 B 点流量(m^3/s); p_A 为 A 点压力(Pa); p_B 为 B 点压力(Pa)。

电变压器的原理是提供负载所需能量,通过恒功率转换的方式得到负载所需的电压,即电力系统提供能量等于负载所需能量,理想条件下电力系统效率为 100%。同样,液压系统中液压变压器提供的能量等于负载所需能量,通过恒功率转换的方式得到负载所需的压力,理想条件下液压系统效率为 100%。变压过程中没有能量损失,遵循功率守恒(即能量守恒),有

$$p_A q_A = p_B q_B \quad (2)$$

式中: q_A 为 A 点流量(m^3/s)。

得压力比为

$$\frac{p_B}{p_A} = \frac{q_A}{q_B} \quad (3)$$

式(3)表明改变流量比能改变压力比。

另外由图 5 中可看出,通过变压调节得到所需压力 p_B 时,变压前后的 2 个工作点的流量不相等,那么配流盘上设置低压口(T 槽)能补偿这 2 个工作点的流量差。

3.2 液压缸式液压变压器工作原理

2 个单杆液压缸通过活塞杆固接构成液压缸式液压变压器,见图 1(a)。尽管油液对两活塞产生的作用力大小相等,但两活塞的有效作用面积不等使两侧油腔内的压力不等,其公式为

$$\frac{p_B}{p_A} = \frac{q'_A}{q'_B} = \frac{A_A}{A_B} \quad (4)$$

式中: p_A 为高压油路压力(Pa); p_B 为负载油路压力(Pa); q'_A 为高压油路流量(m^3/s); q'_B 为负载油路流量(m^3/s); A_A 为液压缸 A 无杆腔活塞面积(m^2); A_B 为液压缸 B 无杆腔活塞面积(m^2)。

3.3 液压泵/马达式液压变压器工作原理

3.3.1 传统型液压变压器工作原理

传统型液压变压器结构见图 1(c),由 2 个基体构成,一般 1 个是定量基体,1 个是变量基体,其工作原理见下页图 6。

假设基体中的摩擦损失和泄漏为 0,则变量基体产生的力矩为

$$T_v = \frac{V_v}{2\pi} (p_A - p_T) = \frac{V_{v,\max}}{2\pi} \frac{\tan(\beta)}{\tan(\beta_{\max})} (p_A - p_T) \quad (5)$$

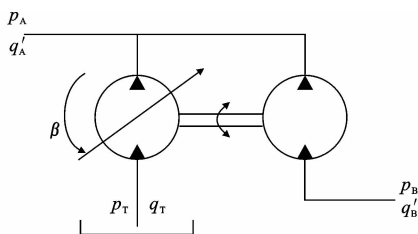


图 6 传统型液压变压器工作原理

Fig. 6 Working principle of traditional hydraulic transformer

式中: V_v 为变量基体的排量 (m^3/r); $V_{v,\max}$ 为变量基体的最大排量 (m^3/r); β 为变量基体的斜盘倾角 ($^\circ$); β_{\max} 为变量基体的最大斜盘倾角 ($^\circ$); p_T 为低压油路压力 (Pa), 一般情况下 $p_T=0$ 。

定量基体产生的力矩为

$$T_f = \frac{V_f}{2\pi} (p_A - p_B) \quad (6)$$

式中: V_f 为定量基体的排量 (m^3/r)。

2 个基体产生的力矩平衡时, 有

$$T_v = T_f \quad (7)$$

可得变压比为

$$\Pi = \frac{p_B}{p_A} = 1 + \frac{V_{v,\max}}{V_f} \frac{\tan(\beta)}{\tan(\beta_{\max})} \quad (8)$$

调节变量基体的斜盘倾角 β 就可调节变压比。

3.3.2 新型液压变压器工作原理

Innas 公司试制的第 1 个样机见图 1(d), 其职能符号及配流盘工作原理见图 7。

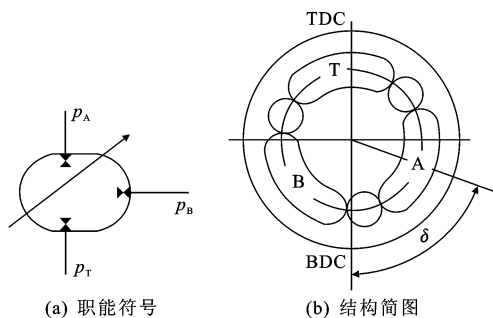


图 7 新型液压变压器职能符号及配流盘结构

Fig. 7 Functional sign and port plate of new type hydraulic transformer

图 1(d) 中新型液压变压器的基体是斜轴式轴向柱塞基体 (基体是提供液压变压器实现功能的载体, 基体不限于斜轴式轴向柱塞基体形式)。在新型液压变压器中, 实现变压功能的部件是配流盘, 其与液压泵/马达配流盘有 2 个区别 (图 1(d)):

(1) 液压泵/马达配流盘有 2 个腰形槽, 新型液压变压器配流盘有 3 个腰形槽;

(2) 液压泵/马达配流盘不可旋转, 新型液压变压器正是通过配流盘旋转来实现变压功能。

图 7 中, TDC、BDC 分别为柱塞运动轨迹上死点和下死点, A 腰形槽是高压口, B 腰形槽是负载口, T 腰形槽是低压口。系统提供的高压油液从 A 腰形槽进入, 作用于与该腰形槽连通的柱塞, 柱塞作用于斜盘, 斜盘反作用于柱塞, 其在垂直于缸体轴线方向上的分力推动柱塞旋转, 柱塞推动缸体旋转, 液压能转换为机械能, A 腰形槽完成液压马达作用。缸体推动其他柱塞旋转, 与 B 腰形槽连通的柱塞作用于斜盘, 斜盘反作用柱塞, 其在缸体轴线方向上的分力推动柱塞作相对于缸体的直线运动, 柱塞把油液压入 B 腰形槽, 油液内部产生一定压力, 机械能又转化为液压能, B 腰形槽完成泵作用。从 B 腰形槽输出负载需要的压力油液。压力能以柱塞和缸体作为媒介, 通过压力能-机械能-压力能的能量形态变换, 从 A 腰形槽传递到 B 腰形槽, 油液压力大小发生变化。

通过调节配流盘控制角 δ 大小调节 A 腰形槽和 B 腰形槽间的流量比, 进而调节两槽间压力比, 获得期望负载压力。由能量守恒定律得液压变压器在平衡状态 (缸体转速为恒定值) 下的功率守恒方程为

$$p_A q_A' + p_T q_T + p_B q_B' + W_1 = 0 \quad (9)$$

从而, 液压变压器的变压比为

$$\Pi = \frac{p_B}{p_A} = - \left[\frac{\sin(\delta)}{\sin(2\alpha_A + \delta)} + \frac{\sin(\alpha_A + \delta) p_T}{\sin(2\alpha_A + \delta) p_A} + \frac{W_1}{2nS_A R z \tan(\beta') \sin(\alpha_A/2) \sin(2\alpha_A + \delta) p_A} \right] \quad (10)$$

式中: q_T 为低压油路流量 (m^3/s); n 为缸体转速 (r/s); z 为柱塞数; β' 为柱塞基体的斜盘倾角或斜轴倾角 (为斜轴倾角时, $\tan(\beta')$ 改为 $\sin(\beta')$); α_A 为腰形槽的吸排油角 ($^\circ$); W_1 为液压变压器的功率损失, 包括粘性摩擦、滑动摩擦和泄漏功率损失 (W); δ 为配流盘控制角, 定义为 A 腰形槽中点和柱塞旋转下死点位置 BDC 间的夹角 ($^\circ$)。

假设 T 腰形槽中压力为 0, 忽略摩擦力和泄漏的影响, 式 (10) 中配流盘控制角 δ 是唯一的变量, 故可认为配流盘控制角 δ 能调节压力比。

4 液压变压器的特点和应用

4.1 液压变压器的特点

(1) 可将油源压力低损耗地变换到所需负载压力, 提高系统效率, 既能实现减压也能实现增压。

(2) 可回收负载能量, 尤其是能回收以低压形式存在的液压能量, 从而理想情况下能实现 100% 的

系统效率。

(3)降低系统的装机功率,降低系统成本。

(4)使得 1 个油源同时提供不同压力给多个负载成为可能,既能驱动直线负载也能驱动旋转负载,简化系统结构。

(5)新型液压变压器结构简单,体积小,效率高,控制性能好。

(6)新型液压变压器能将定量执行机构转变为变量执行机构,使得油缸变排量成为可能。

4.2 液压变压器的应用

尽管液压变压器有待进一步改进,但其广阔的应用前景吸引了学术界和工业界广泛的注意力,目前主要集中在工程机械和汽车领域。例如,Innas 公司的 Achten 和 Volvo CE 公司的 Heybroek 于 2011 年 5 月在“车辆传动”德国工程师协会国际会议上,阐述了 33 t 轮式装载机的传统系统和新 CPR 系统的对比,新 CPR 系统的核心是新型液压变压器。研究表明,在分析的工作循环里,新 CPR 系统能减少大约 50% 的燃料消耗,同时极大地降低了传动链和液压系统的冷却需求,见图 8^[32]。

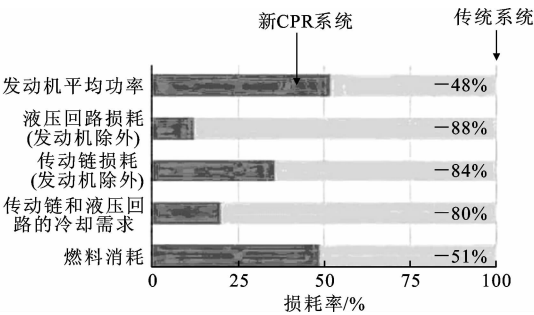


图 8 新型液压变压器的应用

Fig. 8 Application of new type hydraulic transformer

5 液压变压器的关键问题

由于新型液压变压器是柱塞元件,所以在制造工艺上存在的问题与柱塞泵一致,此处不再赘述。新型液压变压器目前存在的关键问题如下所述。

(1)噪声与振动问题。新型液压变压器的流量特性较为特殊,流量曲线存在跳跃点和流量脉动系数趋于无穷大,引起噪声和振动较大。相对于泵,新型液压变压器的噪声特性更为复杂,需大量研究。

(2)控制问题。新型液压变压器在工作时受到多种因素影响,是个非线性系统,精确控制是个难点。

(3)应用问题。目前主要研究新型液压变压器在一些工程机械和车辆中的应用,其他场合如航天、

船舶等尚未开展大量研究。

(4)流量问题。目前主要关注新型液压变压器的压力控制问题,流量控制问题关注不多。斜盘倾角是固定的,故新型液压变压器的负载压力与负载流量是一一对应的,即无法满足固定负载压力下的流量可控。

(5)结构问题。问题主要存在于中国,由于加工和设计能力不如国外,所以采用的液压变压器结构方案均是对泵做一定的修改,未能充分从液压变压器角度全新设计结构,造成的后果是效率不高、体积大、重量大。

6 结 语

(1)液压变压器的出现,使 CPR 系统推广有了坚实的理论基础,使其同电力系统一样,具有更大的灵活性和效率,简化了系统结构,降低了系统成本。新型液压变压器的出现使 CPR 系统的推广有了实际的意义。

(2)目前,国内外对液压变压器的负载压力变化和控制进行了大量研究,但对其负载流量控制问题关注的较少。目前的新型液压变压器无法满足要求负载流量和负载压力同时有变化规律的工况。解决这个问题的关键是需要出现流量(排量)能变化或者能伺服控制的液压变压器。变量液压变压器能同时控制负载压力和负载流量,即实现功率控制^[27,33]。它使得液压变压器从变压元件进化为变功率元件,能灵活地满足各种工况要求。

(3)新型液压变压器出现才十几年,已表现出强大的生命力,不断涌现的新成果表明仍存在大量需要探讨的问题,它的应用领域也远远不止在 CPR 系统中,需要作更深入的研究。

参考文献:

References:

[1] LVANTYSYN J, LVANTYSYNOVA M. Hydrostatic pumps and motors [M]. New Delhi: Akademia Books International, 2001.

[2] TYLER H P. Fluid intensifier; US, 3188963[P]. 1965-06-15.

[3] KOUNS H H. Hydraulic transformer; US, 3627451 [P]. 1971-12-14.

[4] KORDAK R. Praktische auslegung sekundärgeregelter antriebssysteme [J]. Ölhydraulik und Pneumatik, 1982, 26(11): 795-800.

[5] DLUZIK K, SHIH M C. Geschwindigkeitssteuerrung

- eines zylinders am konstant drucknetz durch einen hydro transformator[J]. *Ölhydraulik und Pneumatik*, 1985, 29(4): 281-286.
- [6] DLUZIK K, AACHEN L. Zylinderansteuerungen am drucknetz durch hydro-transformatoren[J]. *Ölhydraulik und Pneumatik*, 1987, 31(3): 248-255.
- [7] DLUZIK K. Energiesparende schaltungskonzepte für hydro-zylinder am drucknetz [J]. *Ölhydraulik und Pneumatik*, 1989, 33(5): 444-450.
- [8] KORDAK R. Verlustarme zylindersteuerung mit sekundärregelung[J]. *Ölhydraulik und Pneumatik*, 1996, 40(10): 696-703.
- [9] ACHTEN P A J. Pressure transformer; US, WO97/31185[P]. 1997-08-28.
- [10] VAEL G E M, ACHTEN P A J. The Innas fork lift truck working under constant pressure[C]//Shaker Verlag. Proceedings of the 1st International Fluid Power Conference. Berlin; Shaker Verlag, 1998: 112-126.
- [11] ACHTEN P A J, ZHAO F. Valving land phenomena of the Innas hydraulic transformer[J]. *International Journal of Fluid Power*, 2000(1): 39-47.
- [12] WERNDIN R, PALMBERG J O. Controller design for a hydraulic transformer[C]//International Academic. Proceedings of the 5th International Conference on Fluid Power Transmission and Control. Hangzhou; International Academic, 2001: 131-136.
- [13] ACHTEN P A J, VAEL G E M, OEVER J V D, et al. 'Shuttle' technology for noise reduction and efficiency improvement of hydrostatic machines[C]//Shaker Verlag. Proceedings of the Seventh Scandinavian International Conference on Fluid Power. Berlin; Shaker Verlag, 2001: 1023-1053.
- [14] MALSEN R A H V, ACHTEN P A J, VAEL G E M. Design of dynamic and efficient hydraulic systems around a simple hydraulic grid[J]. *SAE Paper* 2002-01-1432.
- [15] ACHTEN P A J, BRINK T V D, OEVER J V D, et al. Dedicated design of the hydraulic transformer [C]//Shaker Verlag. Proceedings of the 3rd International Fluid Power Conference. Berlin; Shaker Verlag, 2002: 233-248.
- [16] VAEL G E M, BRINK T L V D, PAARDENKOOPEER T, et al. Some design aspects of the floating cup hydraulic transformer[C]//University of Bath. Proceedings of Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control. Bath; University of Bath, 2003: 35-52.
- [17] ACHTEN P A J, POTMA J, BRINK T V D, et al. A four-quadrant hydraulic transformer for hybrid vehicles[C]//Shaker Verlag. Proceedings of the Eleventh Scandinavian International Conference on Fluid Power. Berlin; Shaker Verlag, 2009: 324-339.
- [18] ACHTEN P A J, BRINK T V D. A hydraulic transformer with a swash block control around three axis of rotation [C]//Shaker Verlag. Proceedings of the 8th International Fluid Power Conference. Berlin; Shaker Verlag, 2012: 134-148.
- [19] 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, 2002.
DONG Hong-lin. Research on saving energy and control of hydraulic lifting apparatus powered by secondary controlled system[D]. Harbin; Harbin Institute of Technology, 2002. (in Chinese)
- [20] 董宏林, 姜继海, 吴盛林. 液压变压器与液压蓄能器串联使用的优化条件及能量回收研究[J]. *中国机械工程*, 2003, 14(3): 192-195.
DONG Hong-lin, JIANG Ji-hai, WU Sheng-lin. Research on the optimum conditions and energy recuperating of hydraulic accumulators in series to hydraulic transformer[J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(3): 192-195. (in Chinese)
- [21] 欧阳小平. 液压变压器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
OUYANG Xiao-ping. Research on the hydraulic transformer [D]. Hangzhou; Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [22] 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 Hua-yong, OUYANG Xiao-ping, XU Bing. Development of hydraulic transformer [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(5): 1-5. (in Chinese)
- [23] 姜继海, 卢红影, 周瑞艳, 等. 液压恒压网络系统中液压变压器的发展历程[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2006, 36(5): 869-874.
JIANG Ji-hai, LU Hong-ying, ZHOU Rui-yan, et al. Development of hydraulic transformer in constant pressure rail system[J]. *Journal of Southeast University; Natural Science Edition*, 2006, 36(5): 869-874. (in Chinese)
- [24] 卢红影. 电控斜轴柱塞式液压变压器的理论分析与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
LU Hong-ying. Theoretical analysis and experiment of electric control bent axial piston hydraulic transformer[D]. Harbin; Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)

- [25] 刘成强. 电液伺服斜盘柱塞式液压变压器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LIU Cheng-qiang. Electro-hydraulic servo swashplate hydraulic transformer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [26] 沈伟, 姜继海, 王克龙. 液压变压器控制挖掘机动臂油缸动态分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 27-32.
SHEN Wei, JIANG Ji-hai, WANG Ke-long. Dynamic analysis of boom system based on hydraulic transformer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 27-32. (in Chinese)
- [27] 姜继海, 杨冠中. 一种变量电液伺服液压变压器: 中国, 201310106143. 6[P]. 2013-03-29.
JIANG Ji-hai, YANG Guan-zhong. A kind of variable electro-hydraulic servo hydraulic transformer: China, 201310106143. 6[P]. 2013-03-29. (in Chinese)
- [28] 姚永明. 基于液压变压器的装载机节能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
YAO Yong-ming. Energy-saving research for loaders based on hydraulic transformer[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [29] 陈延礼. 基于液压变压器的液驱混合动力车辆系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
CHEN Yan-li. Research on the hydraulic hybrid vehicle system based on hydraulic transformer [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [30] 胡纪滨, 李小金, 魏超. 液压变压器变压比特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(2): 166-170.
HU Ji-bin, LI Xiao-jin, WEI Chao. A study on the transformation ratio characteristics of the hydraulic transformer[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(2): 166-170. (in Chinese)
- [31] 吴维, 荆崇波, 胡纪滨, 等. 双缸体旋转斜盘式液压变压器特性分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 144-149.
WU Wei, JING Chong-bo, HU Ji-bin, et al. Characteristics of dual-cylinder hydraulic transformer with rotatable wash plate[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 144-149. (in Chinese)
- [32] ACHTEN P A J, VAEL G E M, HEYBROEK K. Efficient hydraulic pumps, motors and transformers for hydraulic hybrid systems in mobile machinery[C]// VDI PLATZ. Proceedings of the Verein Deutscher Ingenieure Conference. Dusseldorf: VDI PLATZ, 2011: 1506-1514.
- [33] YANG G Z, JIANG J H. Displacement characteristics of variable hydraulic transformer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 543/547: 741-746.

(上接第 117 页)

- [15] ZUO W J. Bi-level optimization for cross-sectional shape of a thin-walled car body frame constrained with static and dynamic frequency stiffness constraints[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2015, 229(8): 1046-1059.
- [16] TORSTENFELT B, KLARBRING A. Structural optimization of modular product families with application to car space frame structures[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2006, 32(2): 133-140.
- [17] 高云凯. 汽车车身结构分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
GAO Yun-kai. Automotive body structural analysis [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [18] 林程, 王文伟, 陈潇凯. 汽车车身结构与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
LIN Cheng, WANG Wen-wei, CHEN Xiao-kai. Automotive body structure and design [M]. Beijing: China Machine Press, 2014. (in Chinese)
- [19] ZUO W J, LI W W, XU T, et al. A complete development process of finite element software for body-in-white structure with semi-rigid beams in. NET framework[J]. Advances in Engineering Software, 2012, 45(1): 261-271.
- [20] ZUO W J. An object-oriented graphics interface design and optimization software for cross-sectional shape of automobile body[J]. Advances in Engineering Software, 2013, 64: 1-10.