

数字型液压变压器结构与压变特性研究

张祝新^{1,2} 李伟建^{1,2} 刘涛^{1,2} 赵丁选^{1,2} 孙仁福^{1,3} 韩炎^{1,3}

(1.燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2.燕山大学河北省特种运载装备重点实验室, 秦皇岛 066004;
3.燕山大学河北省重型机械流体动力传输与控制实验室, 秦皇岛 066004)

摘要: 通过采用多个齿轮泵/马达单元和控制阀组等基础元件,设计了一种数字型液压变压器。数字型液压变压器具有数字元件的离散、简单和易控等特性,将多个不同排量的齿轮泵/马达单元进行组合,各个齿轮泵/马达之间同轴连接,每个齿轮泵/马达单元的进口、出口分别安装有电磁开关阀,采用节流阀模拟数字型液压变压器负载,通过控制齿轮泵/马达单元进口、出口控制阀组的得失电状态,实现数字型液压变压器变压比根据二进制数字控制而变化的目标。利用 AMESim 仿真软件对数字型液压变压器的变压过程进行仿真分析,基于试验平台对数字型液压变压器进行了验证。结果表明,所提出的数字型液压变压器可以通过数字控制进行变压,验证了其变压原理的可行性。

关键词: 液压变压器; 数字液压; 流量控制; 二次调节; 恒压网络

中图分类号: TH137 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)03-0402-08

OSID:



Structural Design and Pressure Change Characteristics of Digital Hydraulic Transformer

ZHANG Zhuxin^{1,2} LI Weijian^{1,2} LIU Tao^{1,2} ZHAO Dingxuan^{1,2} SUN Renfu^{1,3} HAN Yan^{1,3}

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China
2. Hebei Key Laboratory of Special Delivery Equipment, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China
3. Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A new type of digital hydraulic transformer was designed by using several basic components such as gear pump/motor units and control valve groups. The digital hydraulic transformer combined the discrete, simple and easy to control characteristics of digital components, and was grouped by a plurality of gear pump/motor units with different displacements. Rigid connection was made between the drive gear shaft of each gear pump/motor to achieve the purpose of synchronous rotation. Solenoid switch valves were installed respectively through the integrated valve blocks at the inlet and outlet of each gear pump/motor unit, throttle valve was installed in the output port of the digital hydraulic transformer to simulate the load of the whole hydraulic system, the low pressure ports of the inlet and outlet control valve groups were connected together to access the oil tank. According to the binary digital control by changing the power on/off state of the inlet and outlet valve groups, the digital hydraulic transformer can realize the change of output flow due to the existence of low pressure oil port, and then realized the change of output pressure. The AMESim simulation software was used to analyze the pressure change process of the digital hydraulic transformer, and the digital hydraulic transformer was verified by using the test platform. The results showed that the proposed digital hydraulic transformer can change the output pressure by digital control, and the feasibility of the pressure change principle was determined.

Key words: hydraulic transformer; digital hydraulic; flow control; secondary regulation; common pressure rail

收稿日期: 2019-07-26 修回日期: 2019-10-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802900)和河北省自然科学基金-钢铁联合研究基金项目(E2017203079)

作者简介: 张祝新(1963—),男,教授,主要从事工程机器人研究,E-mail: zzx-cc@163.com

通信作者: 刘涛(1973—),男,副教授,主要从事机电液系统、冶金自动化和工业过程数据研究,E-mail: liutao@ysu.edu.cn

0 引言

近些年发展起来的恒压网络 (Common pressure rail, CPR) 二次调节技术有效提高了液压系统的功能和效率, 其中关键在于液压变压器技术^[1-3]。液压变压器是一种可把液压能和机械能相互转换的液压元件, 在液压传动中理论上可以将恒压网络系统的压力无节流损失地调整为负载所需要的压力^[4-6]。

现有液压变压器分为直线式和旋转式两种。直线式液压变压器即增压缸, 是采用 2 单出杆液压缸并将活塞杆刚性连接的结构, 其变压比是固定值。BISHOP^[7]提出了一种基于缸式的数字液压变压器, 该液压变压器是将一个多级液压缸各级活塞的面积比依次按照 2 的指数规律配置, 通过对各级活塞不同形式的组合实现压力的变化, 但由于其自身结构的限制, 尚不能实现连续控制变压, 只能应用在流量较小的场合。旋转式液压变压器目前分为柱塞式和叶片式两种。柱塞式液压变压器是 KOUNS^[8]提出的一种采用轴向柱塞泵和轴向柱塞马达、通过转子机械连接形式的液压变压器, 被称为传统型液压变压器, 但其结构复杂, 摩擦和泄漏较大, 国内外已很少研究; 新型液压变压器已由 ACHTEN 等^[9-11]研究到了第三代, 是一种柱塞泵/马达复合结构的液压变压器, 其衍变过程主要是从柱塞数目、缸体结构的改变到配流盘结构的优化, 目的是降噪和提高工作效率。刘成强等^[12-13]研制出电液伺服控制的斜盘式新型液压变压器, 并对其进行了降噪研究。沈伟^[14]研究了液压变压器在混合动力挖掘机中的应用。石陆军^[15]研制了一种双变量对称式液压变压器。石茂顺等^[16]将液压变压器应用于海流发电液压传动系统中。目前, 国内关于柱塞式液压变压器调压范围过窄的问题已解决, 但对其降低噪声的研究还基本处于空白。

相较于上述两种液压变压器, 本文提出一种数字型液压变压器 (Digital hydraulic transformer, DHT)^[17], 其噪声较小, 具有较大的变压比范围, 并能采用二进制数字对变压比进行精确控制, 以期实现液压系统压力/流量的转换。

1 DHT 结构组成

DHT 主体包括由 n 个齿轮泵/马达单元组成的分流集流系统^[18-19]和两组分别由 n 个二位三通电磁开关阀组成的控制阀组^[20-21]。 n 个齿轮泵/马达单元通过通体螺丝和紧固螺母并排固定, 其排量依次按照 2 的指数规律配置, n 为大于 2 的整数。齿轮泵/马达单元是由壳体、主动齿轮、从动齿轮、左端

盖、左端盖密封环、右端盖、右端盖密封环、浮动侧板和轴套轴瓦等组成, 主动齿轮和从动齿轮相互啮合, 在壳体上对应啮合区两侧分别开有一个输入油口和一个输出油口, 相邻齿轮泵/马达单元的主动齿轮轴刚性连接, 使各齿轮泵/马达单元同步转动。5 个齿轮泵/马达单元组成的分流集流系统如图 1 所示。

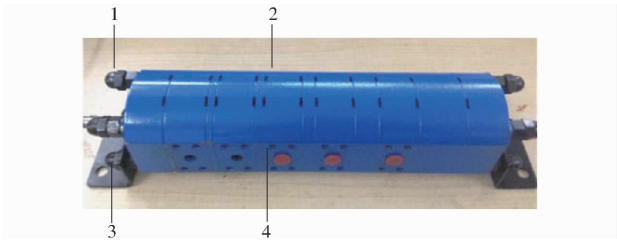


图 1 五联齿轮泵/马达分流集流系统实物图

Fig. 1 Flow dividers and combiner system object diagram of five gear pumps/motors

1. 通体螺丝 2. 齿轮泵/马达单元 3. 连接底座 4. 齿轮泵/马达单元入口

控制阀组包括入口控制阀组和出口控制阀组。入口控制阀组包括 n 个二位三通电磁开关阀, 其分别控制各齿轮泵/马达单元的输入油口在油源压力和低压油之间切换。每个二位三通电磁开关阀的工作状态采用二进制数 0 和 1 表示, 状态为“0”时, 电磁铁失电, 对应齿轮泵/马达单元的输入油口接入低压油口; 状态为“1”时, 电磁铁得电, 对应齿轮泵/马达单元的输入油口接入油源口。

出口控制阀组也包括 n 个二位三通电磁开关阀, 分别控制各齿轮泵/马达单元的输出油口在负载压力油和低压油之间切换。二位三通电磁开关阀状态为“0”时, 电磁铁失电, 对应的齿轮泵/马达单元的输出口接入低压油口; 状态为“1”时, 电磁铁得电, 对应的齿轮泵/马达单元的输出口接入负载油口。5 个齿轮泵/马达单元对应控制阀组的阀块如图 2 所示。

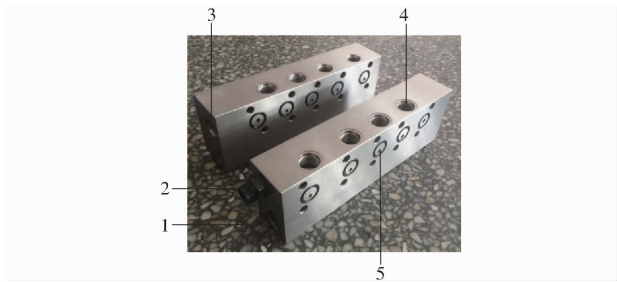


图 2 安装控制阀组的阀块实物图

Fig. 2 Install valve blocks diagram of control valve groups

1. T 口 2. P 口 3, 4. 电磁开关阀安装口 5. 齿轮泵/马达单元进口/出口连接口

将入口控制阀组的 n 个二位三通电磁开关阀工作状态对应一个 n 位二进制数 N_i , 出口控制阀组的

n 个二位三通电磁开关阀工作状态对应一个 n 位二进制数 N_o 。通过对入口控制阀组和出口控制阀组进行二进制数字控制,实现对 DHT 负载油口的压力控制。5 个齿轮泵/马达单元构成的 DHT 如图 3 所示。

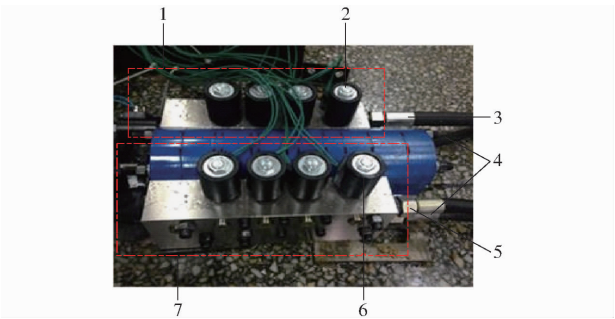


图 3 DHT 实物图

Fig. 3 DHT object

1. 出口控制阀组 2. 出口电磁开关阀 3. A 口 4. T 口 5. P 口
6. 入口电磁开关阀 7. 入口控制阀组

2 DHT 工作原理

以 5 个齿轮泵/马达单元组成的 DHT 为例描述,其排量比为 $2^0:2^0:2^1:2^2:2^3$ 。将 5 个齿轮泵/马达单元的进口、出口分别安装一个控制阀组,即入口控制阀组和出口控制阀组。入口控制阀组各电磁开关阀的供油压力口通过阀块连接在一起,并汇总为外接油口 P,出口控制阀组各电磁开关阀的负载油口通过阀块连接在一起,并汇总为外接油口 A,DHT 两侧电磁开关阀的低压油口通过阀块连接在一起,并汇总为外接油口 T。其工作原理图如图 4 所示。

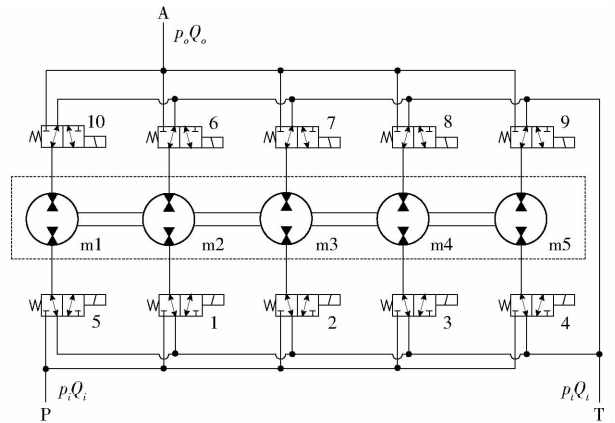


图 4 DHT 工作原理图

Fig. 4 Working principle diagram of DHT

根据能量守恒定律,理想情况下分析 DHT 的变压原理,采用定量泵作为 DHT 的动力元件,且以油源输出压力、流量为基准值。当 DHT 入口侧和出口侧控制阀组全部得电时,有

$$p_i Q_i = p_o \frac{1}{16} Q_i + p_o \frac{1}{16} Q_i + p_o \frac{2}{16} Q_i + p_o \frac{4}{16} Q_i + p_o \frac{8}{16} Q_i$$

(1)

式中 p_i ——油源压力油压力
 p_o ——负载压力油压力
 Q_i ——外接油源压力油流量

由式(1)可知,此时 DHT 的输出压力等于输入压力,DHT 表现功能为既不升压也不降压。

当 DHT 入口侧控制阀组全部得电,出口侧电磁开关阀 6 得电,电磁开关阀 7、8、9、10 失电时,电磁开关阀 7、8、9、10 输出流量回油箱,输出压力默认为 0,电磁开关阀 6 输出的压力/流量进入系统。此时齿轮泵/马达 m1、m3、m4、m5 处于马达工况,输出扭矩给齿轮泵/马达 m2,齿轮泵/马达 m2 处于泵工况。由此可知

$$p_i Q_i = p_o \frac{1}{16} Q_i$$

(2)

由式(2)可知,此时 DHT 的输出压力等于 16 倍输入压力,DHT 表现功能为升压。

当 DHT 入口侧电磁开关阀 1 得电,电磁开关阀 2、3、4、5 失电,出口侧控制阀组全部得电时,电磁开关阀 2、3、4、5 从油箱中吸油进入对应的齿轮泵/马达单元。此时齿轮泵/马达 m2 处于马达工况,且输出扭矩给齿轮泵/马达 m1、m3、m4、m5,齿轮泵/马达 m1、m3、m4、m5 处于泵工况。由此可知

$$p_i Q_i = p_o Q_i + p_o Q_i + p_o \times 2 Q_i + p_o \times 4 Q_i + p_o \times 8 Q_i$$

(3)

由式(3)可知,此时 DHT 的输出压力等于 1/16 倍输入压力,DHT 表现功能为降压。

上述是 DHT 的部分变压过程,现对其入口侧和出口侧控制阀组进行状态组合,归纳总结其全部转换关系。令入口侧控制阀组中的电磁开关阀 5 的状态对应一个 1 位二进制数 N_{i1} ,电磁开关阀 1、2、3、4 的状态对应一个 4 位二进制数 N_{i2} ;出口侧控制阀组中的电磁开关阀 10 的状态对应一个 1 位二进制数 N_{o1} ,电磁开关阀 6、7、8、9 的状态对应一个 4 位二进制数 N_{o2} ,则其转换关系为

$$\begin{cases} p_o = \frac{N_{i1} + N_{i2}}{N_{o1} + N_{o2}} p_i \\ Q_o = \frac{N_{o1} + N_{o2}}{N_{i1} + N_{i2}} Q_i \end{cases}$$

(4)

式中 Q_o ——负载压力油流量

由式(4)可知,DHT 的变压比范围理论上可达到 1/16 ~ 16。

3 DHT 仿真建模

利用 AMESim 软件构建 DHT 机液系统的仿真模型,为研究 DHT 在变压过程中系统压力、流量的变化情况,根据所搭建的 DHT 仿真模型,采用数字逻辑组合的控制方式对 DHT 进口、出口控制阀组进

行编码控制,其中 DHT 入口处的 5 个开关阀编号为 1~5,出口处编号为 6~10。仿真期间共切换 7 次,间隔 40 s 进行一次电磁开关阀得失电切换,步长为 0.01 s,如图 5 所示。

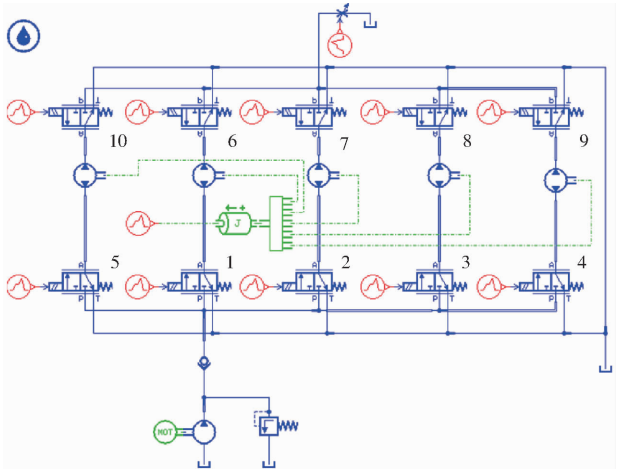


图 5 DHT 传动系统仿真模型

Fig. 5 Transmission system simulation model of DHT

为了描述 DHT 的升降压状态,本文对其变压过程进行了定义与分析。在对 DHT 压力调节时,以油源输入系统中的压力为基准值,DHT 输出的压力可分为升压、保压和降压 3 个阶段。升压阶段,当 DHT 输出压力呈上升趋势、不变、下降趋势时,此时将 DHT 的变压过程分别称为升升压、升保压和升降压调节;保压阶段,DHT 入口侧和出口侧控制阀组全部得电,此时 DHT 的运行状态处于保压阶段;降压阶段,当 DHT 输出压力呈上升趋势、不变、下降趋势时,此时将 DHT 的变压过程分别称为降升压、降保压和降降压调节。

图 5 中,液压系统仿真模型是以节流阀模拟的负载,可得

$$q = C_d A_T \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \tag{5}$$

式中 C_d ——节流阀阀口流量系数
 A_T ——节流阀阀口面积
 ρ ——油液密度
 q ——节流阀阀口流量
 p_1 ——节流阀入口压力
 p_2 ——节流阀出口压力

由式(5)知,当节流阀阀口流量系数、阀口面积、油液密度和节流阀出口压力一定时,流经节流阀的流量与节流阀的输入压力呈正相关。节流阀的输入压力即为系统的模拟负载压力,其过流流量发生变化时,负载压力发生变化,可以有效模拟在变负载情况下数字化控制 DHT 输出压力的变化情况。

3.1 升压阶段

设定 DHT 升压阶段入口控制阀组中各电磁开

关阀全部处于得电状态,DHT 升升压、升降压调节时,其出口控制阀组处于得失电数字控制状态,控制矩阵分别为

$$D_{o1} = \begin{bmatrix} D_6 \\ D_7 \\ D_8 \\ D_9 \\ D_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$D_{o2} = \begin{bmatrix} D_6 \\ D_7 \\ D_8 \\ D_9 \\ D_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

DHT 升升压、升降压调节状态下输出压力与输入压力之比分别为

$$\lambda_1 = \frac{p_o}{p_i} \in \left\{ \frac{16}{16}, \frac{16}{15}, \frac{16}{14}, \frac{16}{13}, \frac{16}{12}, \frac{16}{11}, \frac{16}{10}, \frac{16}{9} \right\} \tag{8}$$

$$\lambda_2 = \frac{p_o}{p_i} \in \left\{ \frac{16}{9}, \frac{16}{10}, \frac{16}{11}, \frac{16}{12}, \frac{16}{13}, \frac{16}{14}, \frac{16}{15}, \frac{16}{16} \right\} \tag{9}$$

液压系统中 DHT 的压力、流量及齿轮泵/马达转速变化情况如图 6 所示。由图 6a 可知,油源输出压力恒定,DHT 输出压力呈阶梯状上升状态,实现了升升压调节功能,但 DHT 出口侧控制阀组得失电切换时,A 口输出压力出现了负向冲击现象,主要原因是各齿轮泵/马达对应的控制阀组为降排量切换,切换瞬间有流量 ΔL_i 流入低压端,导致进入液压缸无杆腔的流量骤减,出现了负向冲击。齿轮泵/马达转速呈阶梯状上升状态,主要原因是 DHT 出口控制阀组得失电切换时,其中部分齿轮泵/马达由泵工况转为马达工况,将液压能部分转变为机械能,提高了齿轮泵/马达的转速。DHT 的 P 口和 A 口之间的流量差值为 T 口输出流量。图 6b 为升降压调节特性曲线,其压力、流量和转速的特性曲线变化与升升压调节相反,输出压力与流量均出现了不同程度的正向冲击。

3.2 保压阶段

设定 DHT 保压阶段入口侧控制阀组全部处于得电状态,出口侧阀组控制矩阵为

$$D_{o3} = \begin{bmatrix} D_6 \\ D_7 \\ D_8 \\ D_9 \\ D_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

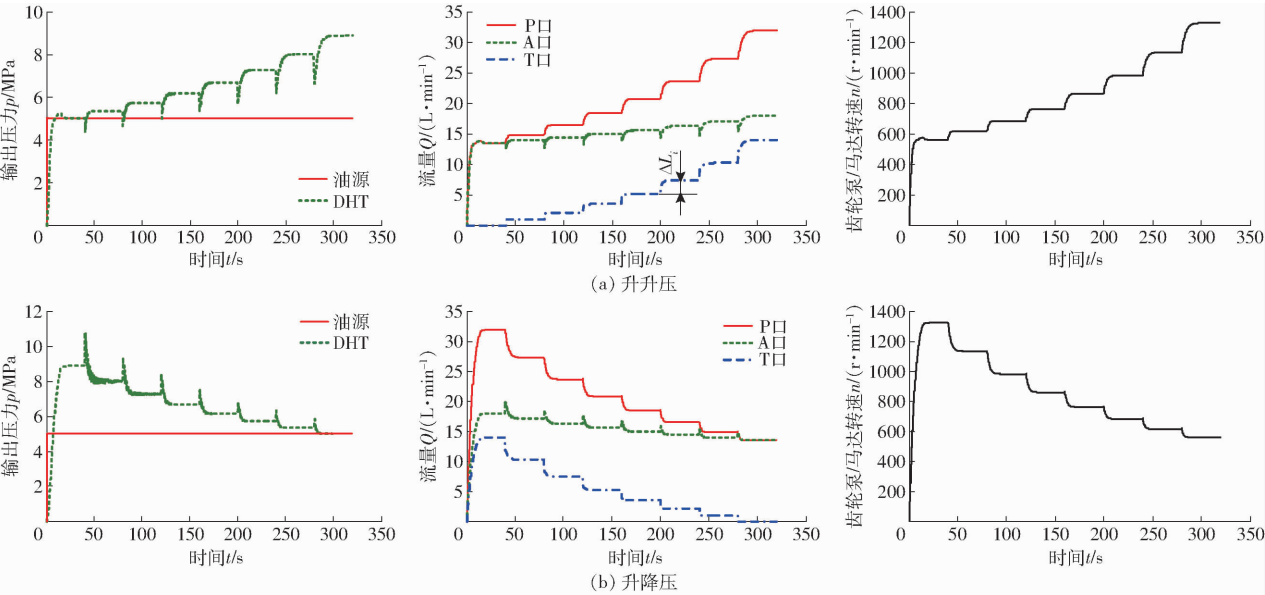


图 6 升压阶段 DHT 调节特性曲线

Fig. 6 Regulation characteristic curves of DHT in pressure boosting stage

由式(10)可以看出,DHT 进口、出口各电磁开关阀全部得电,理论变压比为 1。如图 7 所示,在忽略能量损失的情况下,DHT 的输出压力恒等于输入压力,输出流量等于油源输入系统的流量,且也为定值,低压口不参与工作,齿轮泵/马达的转速为定值。

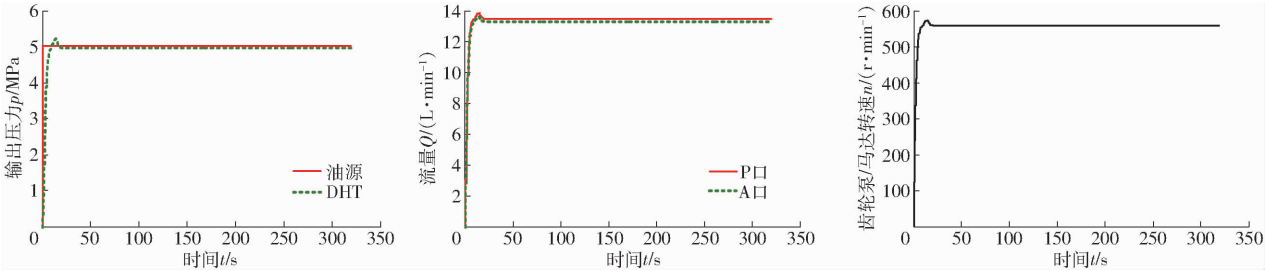


图 7 保压阶段 DHT 调节特性曲线

Fig. 7 Regulation characteristic curves of DHT in pressure holding stage

3.3 降压阶段

设定 DHT 降压阶段出口侧控制阀组全部处于得电状态,DHT 降降压、降升压调节入口控制阀组的控制矩阵分别为

$$D_{i4} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$D_{i5} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

DHT 降降压、降升压调节状态下输出压力与输入压力之比分别为

$$\lambda_3 = \frac{p_o}{p_i} \in \left\{ \frac{16}{16}, \frac{14}{16}, \frac{12}{16}, \frac{10}{16}, \frac{8}{16}, \frac{6}{16}, \frac{4}{16}, \frac{2}{16} \right\} \quad (13)$$

$$\lambda_4 = \frac{p_o}{p_i} \in \left\{ \frac{2}{16}, \frac{4}{16}, \frac{6}{16}, \frac{8}{16}, \frac{10}{16}, \frac{12}{16}, \frac{14}{16}, \frac{16}{16} \right\} \quad (14)$$

液压系统中 DHT 的压力、流量及齿轮泵/马达转速的变化情况如图 8 所示。图 8a 为降降压调节特性曲线,系统油源输出压力恒定,DHT 输出压力呈阶梯状下降状态,实现了降降压调节功能,其中阶段*i*表示降保压状态。降降压调节时,DHT 的输出压力没有出现冲击现象,主要原因是变压过程中 DHT 进口侧控制阀组进行得失电状态切换,出口侧控制阀组一直处于得电状态,在入口侧控制阀组切换瞬时,齿轮泵/马达的转速未发生变化,DHT 的输出流量也就未发生变化,所以冲击现象没有出现。齿轮泵/马达转速呈阶梯状下降状态,主要原因是 DHT 入口侧控制阀组得失电切换组合时,其中部分齿轮泵/马达由马达工况转为泵工况,将机械能部分转变为液压能,降低了齿轮泵/马达的转速。DHT

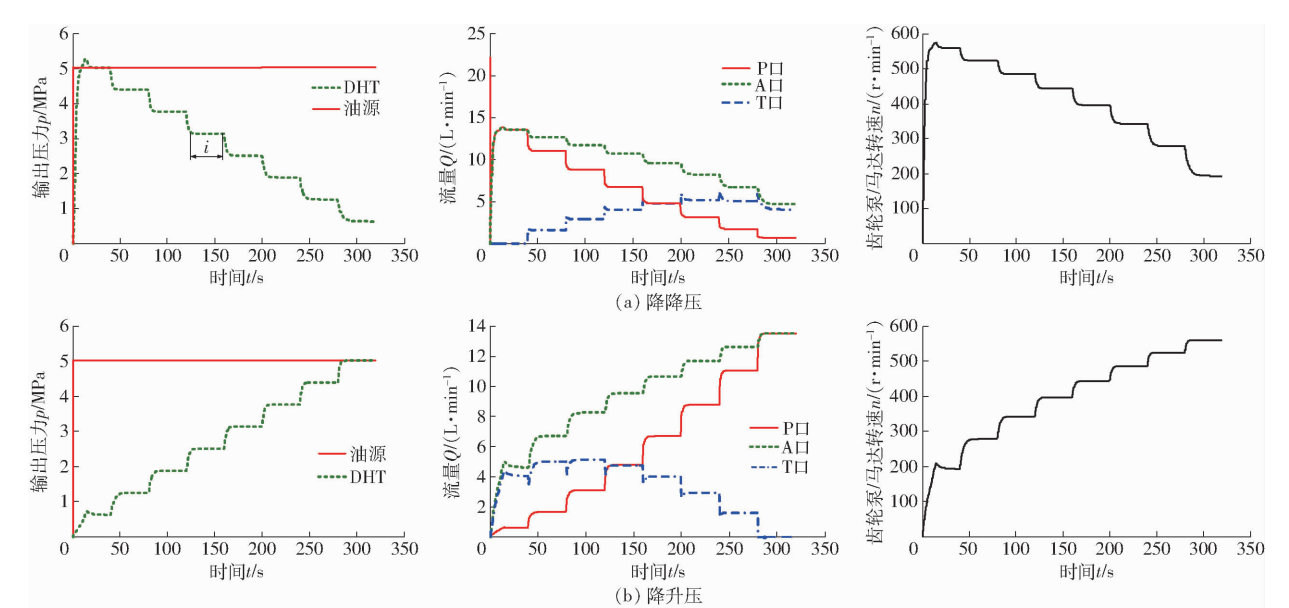


图 8 降压阶段 DHT 调节特性曲线

Fig. 8 Regulation characteristic curves of DHT in pressure reducing stage

的 P 口和 A 口之间的流量差值为 T 口输入流量。图 8b 为降升压调节特性曲线,其压力、流量和转速的特性曲线变化与降降压调节相反。

4 试验

利用 DHT 试验平台(图 9),对所设计的 DHT 变压状态进行试验研究。该试验平台由液压二次元件 DHT、液压传动系统和控制系统等部分组成,通过对 DHT 进出口各电磁开关阀的得失电数字控制完成其升压、保压和降压功能的试验。

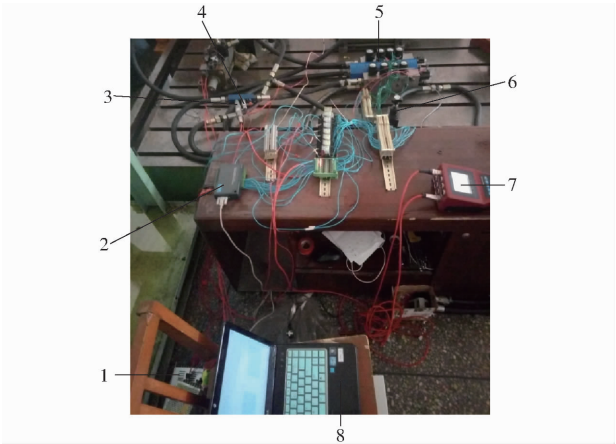


图 9 DHT 试验平台

Fig. 9 Test platform of DHT

1. 24 V 电源 2. 数据采集卡 3. 压力传感器 4. 流量传感器
5. DHT 6. 节流阀 7. 5060 型液压万用表 8. 计算机

如图 10、11 所示,在压力调节特性方面,试验曲线与仿真曲线变化趋势基本吻合,实现了 DHT 压力调节功能,但 DHT 工作时存在部分能量损失,由保压阶段可以看出,导致实际输出压力略小于理论输出压力。同时升升压调节时,DHT 出口侧

控制阀组得失电为降排量控制,各电磁开关阀切换瞬时,DHT 输出流量瞬间减小,以节流阀为模拟负载的入口压力瞬间减小,导致 DHT 输入/输出压力出现不同程度的负向冲击。升降压调节出现的压力冲击与升升压调节现象相反。降降压调节时,DHT 入口侧控制阀组进行得失电数字控制,各电磁开关阀降排量切换瞬时,齿轮泵/马达转速一定,入口控制阀组需要的 P 口流量减小,但此时泵输入系统的流量不变,导致泵出口压力出现不同程度的正向冲击。降升压调节出现的压力冲击与降降压调节现象相反。

在流量调节特性方面,试验曲线与仿真曲线变化趋势较为吻合,DHT 实现了通过调节流量而改变输出压力的目的。但在流量调节时,DHT 的输入/输出流量发生冲击现象,上述对试验的压力调节特性上已经叙述,在此不再赘述。另外,由图 10、11 中保压阶段流量特性曲线可以看出,由于齿轮泵/马达存在卸油口,DHT 实际的输出流量略低于理论输出流量。

在转速调节特性方面,试验曲线与仿真曲线变化趋势较为吻合,转速呈阶梯状上升/下降状态;但降压阶段试验曲线的变化过程与仿真曲线存在一定偏差,原因主要是试验过程中处于不同工况配合下的齿轮泵/马达单元在进出口压差作用下产生不同的动力矩和阻力矩,二者相互叠加导致实际转速曲线与理想转速曲线发生偏差。

5 结论

(1) 针对恒压网络二次调节系统,提出了一种数字型液压变压器,DHT 将不同排量齿轮泵/马达

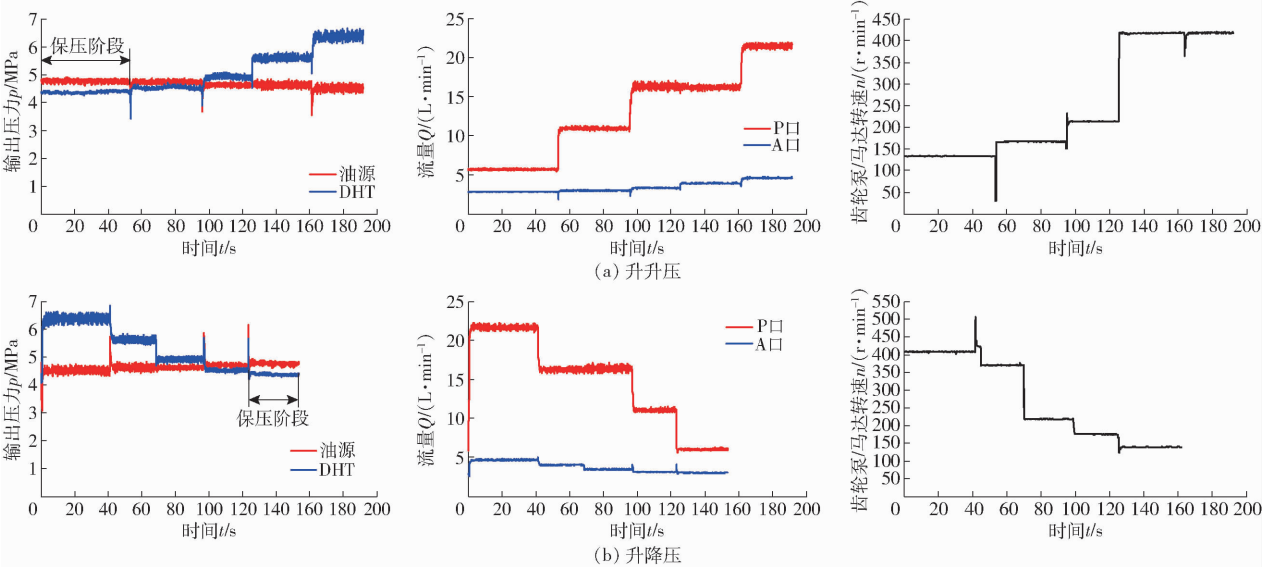


图 10 保压、升压阶段 DHT 调节特性试验曲线

Fig. 10 Regulation characteristic test curves of DHT in pressure holding and boosting stage

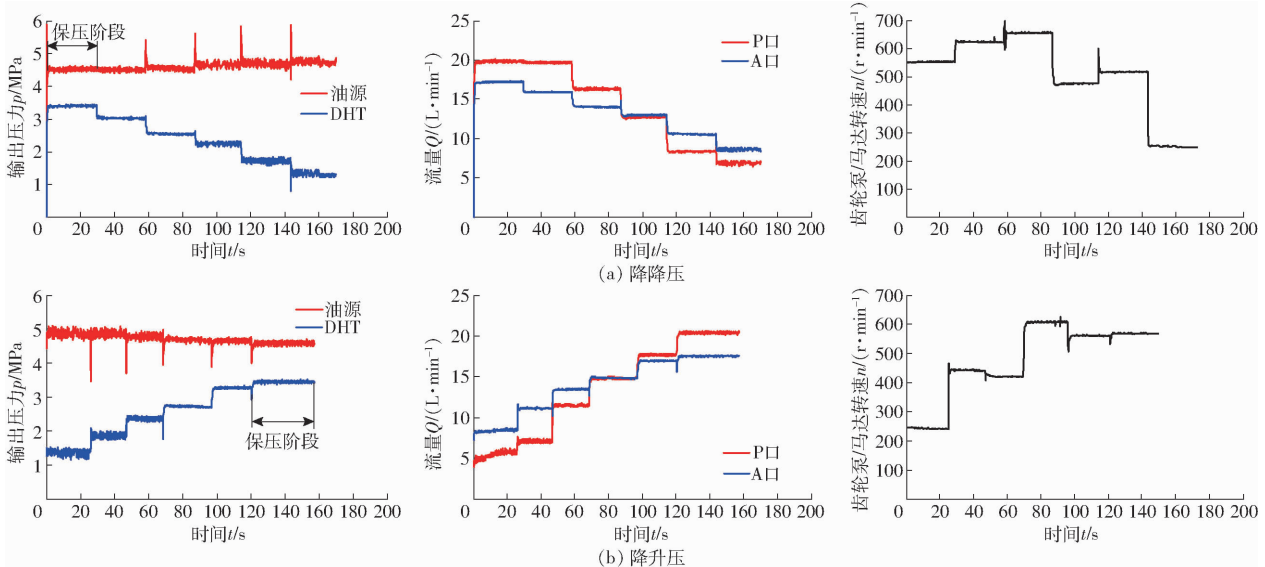


图 11 保压、降压阶段 DHT 调节特性试验曲线

Fig. 11 Regulation characteristic test curves of DHT in pressure holding and reducing stage

输出轴进行刚性连接,在各齿轮泵/马达的进出口分别安装有电磁开关阀,通过对 DHT 进口、出口控制阀组的得失电控制,实现 DHT 低压口流量的吸入、释放,进而达到通过改变 DHT 输出流量而改变输出压力的目的。

(2) 基于 DHT 搭建了 AMESim 传动系统仿真模

拟平台,对 DHT 的输入压力、输出压力、流量及齿轮泵/马达的转速进行了仿真,验证了其变压原理的有效性。最后,依托试验测试平台,对 DHT 的变压效果进行了试验,验证了通过对 DHT 进口、出口控制阀组的数字控制,可以在实际系统中进行变压的可行性。

参 考 文 献

[1] 姜继海,杨冠中. 液压系统中液压变压器的发展及研究现状[J]. 长安大学学报(自然科学版),2016,36(6):119-126. JIANG Jihai,YANG Guanzhong. Development and research status of hydraulic transformer in hydraulic system[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2016, 36(6):119-126. (in Chinese)

[2] 杨华勇,欧阳小平,许兵. 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 status of hydraulic transformers [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(5):1-5. (in Chinese)

[3] 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 Jihai, LU Hongying, ZHOU Ruiyan, et al. Development of hydraulic transformers in constant pressure rail system[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2006, 36(5):869–874. (in Chinese)
- [4] 卢红影, 姜继海, 张维官, 等. 基于液压恒压网络系统的液压变压器控制液压缸系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(4):885–890.
- LU Hongying, JIANG Jihai, ZHANG Weiguan, et al. Hydraulic transformer driving hydraulic cylinder based on constant pressure hydraulic rail system[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2009, 39(4):885–890. (in Chinese)
- [5] 欧阳小平. 液压变压器研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
- OUYANG Xiaoping. Research on the hydraulic transformer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [6] 卢红影. 电控斜盘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 Hongying. Theoretical analysis and experiment of electric control bent axial piston hydraulic transformer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [7] BISHOP E. Digital hydraulic transformer-efficiency of natural design[C]//7th International Fluid Power Conference. Aachen: Linkoping University, 2010:861–866.
- [8] KOUNS H H. Hydraulic transformer;US, 3627451[P]. 1971–12–14.
- [9] ACHTEN P A J. Pressure transformer;US, WO97/31185[P]. 1997–08–28.
- [10] ACHTEN P A J, BRINK T V D, OEVER J V D, et al. Dedicated design of the hydraulic transformer[C]//Proceedings of the 3rd International Fluid Power Conference. Berlin:Shaker Verlag, 2002:233–248.
- [11] ACHTEN P A J, BRINK T V D. A hydraulic transformer with a swash block control around three axis of rotation[C]//Proceedings of the 8th International Fluid Power Conference. Berlin:Shaker Verlag, 2012:134–148.
- [12] 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 Chengqiang. Electro-hydraulic servo swashplate piston hydraulic transformer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [13] 刘成强, 姜继海. 斜盘柱塞式液压变压器的扭矩特性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(6):24–28.
- LIU Chengqiang, JIANG Jihai. Torque characteristics of swashplate piston hydraulic transformer [J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2011, 39(6):24–28. (in Chinese)
- [14] 沈伟. 基于CPR的混合动力挖掘机液压节能系统及其控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- SHEN Wei. Energy-saving and control performance research of the hydraulic hybrid excavator based on CPR[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [15] 石陆军. 双变量对称式液压变压器的特性研究[D]. 长春:吉林大学, 2017.
- SHI Lujun. The characteristic analyses of bivariate symmetric-type structure hydraulic transformer[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [16] 石茂顺, 刘宏伟, 李伟, 等. 基于液压变压器原理的海流发电液压传动系统[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(6):764–783.
- SHI Maoshun, LIU Hongwei, LI Wei, et al. Tidal current turbine hydraulic transmission system based on hydraulic transformer [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2014, 48(6):764–783. (in Chinese)
- [17] 刘涛, 李伟建, 张鑫宇. 数字型液压变压器:CN 106958546 B[P]. 2018–04–06.
- [18] 常雅莉. 多联齿轮式分流器[J]. 煤矿机电, 1998(4):38–39.
- CHANG Yali. Multiple gear pump/motor flow splitter[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 1998(4):38–39. (in Chinese)
- [19] 许宏. 齿轮分流增压器及其在工程机械上的应用[J]. 工程机械, 1992(6):29–31.
- XU Hong. Gear splitter supercharger and its application in construction machinery [J]. Construction Machinery and Equipment, 1992(6):29–31. (in Chinese)
- [20] 杨华勇, 王双, 张斌, 等. 数字液压阀及其阀控系统发展和展望[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(5):1494–1505.
- YANG Huayong, WANG Shuang, ZHANG Bin, et al. Development and prospect of digital hydraulic valve and valve control system[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2016, 46(5):1494–1505. (in Chinese)
- [21] 许仰曾, 李达平, 陈国贤. 液压数字阀的发展及其工程应用[J]. 流体传动与控制, 2010(2):5–9.
- XU Yangzeng, LI Daping, CHEN Guoxian. Development of hydraulic digital valve and its engineering application[J]. Fluid Power Transmission and Control, 2010(2):5–9. (in Chinese)