

双泵并联供压液压系统频域仿真研究

北京航空学院 王文杰

西安飞机公司发展部 牛三道 郑金生

一、前言

在飞机和一般工业中,多泵并联供压液压系统是很常见的。研究动态仿真,对提高它们的动态品质是至关重要的。

泵源的脉动流量输入到液压系统中,在遇到负载阻抗后形成压力脉动。在泵源和负载的阻抗匹配后,可产生谐振现象,形成强烈的压力流量脉动,并引起液压系统的机械振动,严重者将造成元、部件的破坏。研究谐振问题的最方便的方法是频率法。在这方面国内外已经做了大量的工作。而在频域仿真研究上当首推美国 MD 飞机公司,他们的大量工作具有很大的实用价值^(1,2),其中对液压管路模型采用了分布参数下的频率相关摩擦模型。对泵源考虑了内阻,采用了一种源流量和源阻抗并联模型。其中单泵供压液压系统频域仿真程序计算结果与实际情况比较接近,谐振峰值误差最小可达30%左右。但是对于源阻抗 Z_s ,没有提供理论计算值,也没提供测试值,而是一种试凑值。当初值及可调参数选择不合适时,就不会收敛。即便收敛了,可调参数选用不同时,结果亦有差别。造成精度低,压力谐振峰值误差很大,理论计算值可达实验值的几倍,这就很难作为设计的参考。同时花费机时多。由于计算的复杂性,这种试凑模型用于多泵并联供压系统计算,是不可能的,即便有结果,误差之大也很难令人接受。因而,为了对双泵并联供压系统进行仿真,首先要解决泵模型的问题。为此,我们研究了将容积泵等效成源流量 Q_s 和源阻抗 Z_s 并联模型的合理性,以及等效模型参数辨识问题,取得了初步成果。在辨识模型的基础上,建立了双泵并联供压液压系统模型,导出了计算压力脉动的公式,编制了程序,为某液压系统进行了计算。并用某液压系统典型工作状态进行了验证实验。理论计算结果和实验结果是相当吻合的。从整个结果看,计算机时少,计算结果精度高。说明上述理论公式和程序是可行的。

二、关于容积泵模型的研究

关于容积泵模型,有人将它简化为一个理论正弦流量源,而忽略泵的内阻抗,无法研究液压系统中泵内阻抗与负载阻抗匹配问题,这显然与实际情况不符。又有人将泵看作一个压力脉动放大器⁽⁴⁾,这与容积泵的实际出入也较大。因为泵输出的流量脉动主要

1986年9月19日收到。

是由于泵结构不均匀性造成的,即便泵入口压力脉动为零,而其泵出口流量和压力脉动仍然存在。在实验中,对容积泵入口和出口测得的压力进行频谱分析时,二者的压力脉动频率是不相同的。作相关性分析,基本上是不相关的。因而,将容积泵看作一个放大器式的模型是不合适的。在这里我们采用了将容积泵等效成为源流量 Q_s 和源阻抗 Z_s 并联模型。从70年代开始,许多人便采用这种模型,利用双负载实验法测试泵参数 Q_s (输入向量参数)和 Z_s (特性参数),取得了一定成功^[9]。但还有不能令人满意的问题。例如:

1. 没有解决不同时刻测量到的泵输出压力向量的相位问题,而是采用试凑法求解方程,造成计算机时多和计算收敛问题;
2. 没有考虑到泵的不同稳定工作状态(稳定泵出口流量 \bar{Q}_L 和稳定泵出口压力 \bar{P}_L)所引起的泵等效模型参数的变化。为了利用上述模型,我们首先研究了这种等效模型的合理性,在集中和时不变参数以及泵内部元件线性特性假设条件下,详细推导了轴向柱塞泵的源流量 Q_s 和源阻抗 Z_s 的等效模型。并揭示了泵的等效模型参数与泵内各参数和理论源流量的关系。这说明了这种等效模型在理论上是有根据的,是合理的。在本文第六节中将上述等效模型用于实际系统计算,理论计算结果与实际系统实验结果是吻合的,更进一步说明了这种等效模型的合理性。在等效泵模型参数测试方法上开发了一种两种负载恒稳定工作状态法,有效地解决了前面提到的两个问题。从某种意义上讲,上述利用实验测试出的输出压力数据,经过一定计算求出泵等效参数的方法,是一种简单的原始模型辨识方法。但它们很难解决辨识中所遇到的一系列理论问题。为此,将辨识概念引入泵频域等效模型研究中,建立了复量线性模型。并建立了定解和超定解复量线性回归函数,在一定误差函数下对参数进行最优估计。

综上所述,将容积泵等效成为源流量 Q_s 和源阻抗 Z_s 并联模型,从理论上讲是合理的,在实际上是可以通过辨识方法确定等效参数 Q_s 和 Z_s 的。因而这种模型是具有它的实用价值的。在容积泵上述等效模型基础上,本文建立起有源并联网路数学模型。

三、有源并联网路负载压力公式推导

在有源并联网路中,将容积泵模型等效成为源流量 Q_s 和源阻抗 Z_s 并联后,其原理图如图1所示。

对于该系统的压力脉动计算可采用两种方法,第一种方法称为叠加法。由于系统是线性的,那么,多个泵源作用在一个系统上的响应等于各泵单独作用在系统上所产生的响应之和。当一个泵源作用时,即它的源流量 Q_s 作为系统的输入加到系统上时,其他泵源的源流量不起作用,即 $Q_s=0$,该支路断路,但源阻抗 Z_s 保留。这时计算出对应的响应,即系统各点的压力脉动。然后将每个泵源加入到系统上所产生的压力脉动求和,即为系统对多泵共同作用时的压力脉动值。但这种办法会大大增加机时。为了节省机时,我们采用第二种办法,即各泵同时作用,一次计算出系统各点的压力脉动来。在图1中,泵源的源流量为 Q_{si} ,源阻抗为 Z_{si} ,泵出口压力为 P_{sij} ,源阻抗上的流量为 Q_{zsi} ,压降为 P_{zsi} ,连接阻抗矩阵为 G_{si} ,其输入输出压力流量为 P_{sij} , Q_{sij} , P_{sjo} , Q_{sjo} ,流入负载阻抗 Z_L 的流量为 Q_L ,负载压力为 P_L 。

在结点C处可得方程

$$Q_{si} = Q_{zsi} + Q_{sij} \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

$$P_{si} = P_{sij} \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$P_{Si} = P_{ZSi} \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

在泵源阻抗 Z_{Si} 上可得方程

$$Q_{ZSi} = P_{ZSi} / Z_{Si} \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

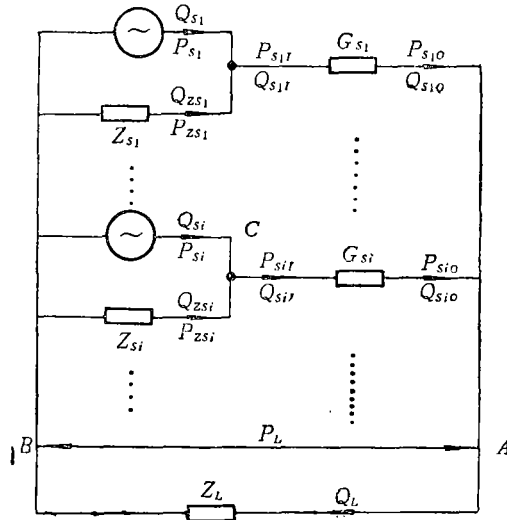


图 1 有源并联网路原理图

在连接阻抗 G_{Si} 上可得方程

$$Q_{SiO} = G(1, 1, i)Q_{SiI} + G(1, 2, i)P_{SiI} \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$P_{SiO} = G(2, 1, i)Q_{SiI} + G(2, 2, i)P_{SiI} \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

在结点 A 处可得方程

$$P_{SiO} = P_L \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$Q_L = \sum_{i=1}^n Q_{SiO} \quad (8)$$

在负载 Z_L 上可得方程

$$Q_L = P_L / Z_L \quad (9)$$

上述方程组共 $7n + 2$ 个，未知数亦为 $7n + 2$ 个，故该方程组是可解的。经变换后可求得泵出口压力 P_{Si} 为

$$P_{Si} = \frac{P_L - G(2, 1, i)Q_{Si}}{G(2, 2, i) - G(2, 1, i)/Z_{Si}} \quad (10)$$

而负载压力 P_L 为

$$P_L = \frac{Z_L \sum_{i=1}^n \left\{ G(1, 1, i) - \frac{G(2, 1, i)[G(1, 2, i) - G(1, 1, i)/Z_{Si}]}{G(2, 2, i) - G(2, 1, i)/Z_{Si}} \right\} Q_{Si}}{1 - Z_L \sum_{i=1}^n \frac{G(1, 2, i) - G(1, 1, i)/Z_{Si}}{G(2, 2, i) - G(2, 1, i)/Z_{Si}}} \quad (11)$$

四、程 序 设 计

根据上述公式，设计出双泵并联供压液压系统频域仿真程序DPPHSFR，它的流程图如图 2 所示。

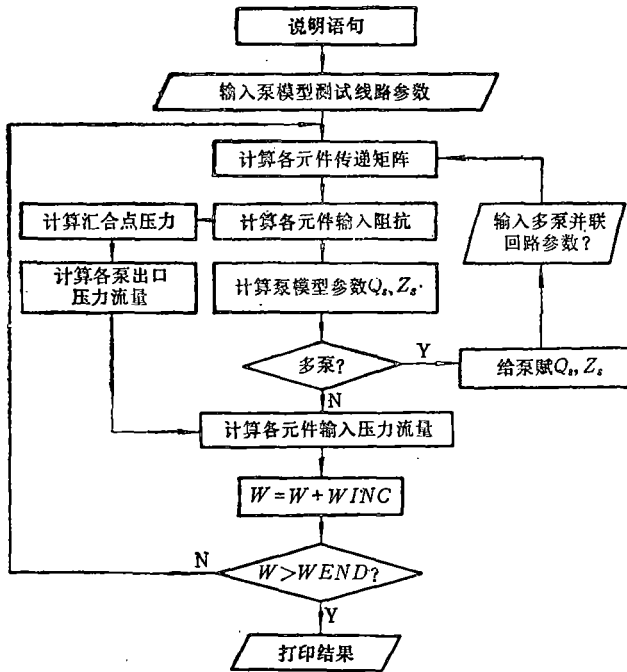


图 2 双泵并联供压系统频域仿真程序流程图

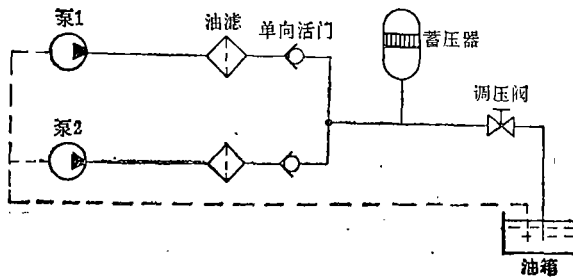


图 3 实验原理图

五、辨识和验证实验

为了对泵模型进行辨识并验证程序DPPHSFR的可用性，设计了下列实验，原理图见图 3。

首先对单泵泵模型参数 Q_s 和 Z_s 进行辨识实验。实验时将一个泵源支路堵死，测得实验泵出口的压力，再经处理后得到泵的 Q_s 和 Z_s 的辨识结果。将 Q_s 和 Z_s 以及系统参数、流体参数值代入DPPHSFR程序中，可得到压力脉动理论计算值 P_c 。然后由图 3 所示回路

实验测得压力脉动实验值 P_T 。这里仅取泵 1 出口的压力理论计算值 P_{1c} 和实验值 P_{1r} 进行比较。由图 4 可以看出，二者是十分吻合的。尤其是在谐振峰值处，谐振频率一致，谐振峰值误差小于10%。因而说明容积泵等效成源流量 Q_s 和源阻抗 Z_s 并联模型是合理的， Q_s 和 Z_s 的辨识方法是可行的，双泵并联供压系统压力脉动计算公式和程序DPPHSFR是正确的。

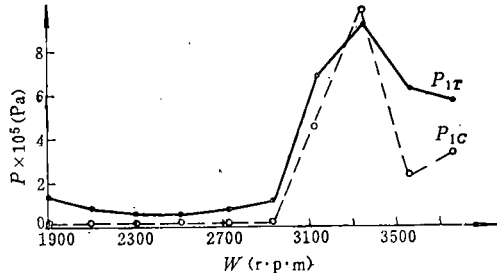


图 4 泵 1 出口压力理论计算值和实验值

六、两个泵源流量相角差对计算结果产生的影响

图 4 所示计算结果是指泵在某一转速 W 时，两个泵源流量相角差 Φ 为某一固定值时的值。但实际上由于两个泵起动时间不一致，起动过程也有差异，当两个泵调至同一转速时，两泵源流量相角差 Φ 是一个在 $+180^\circ$ 和 -180° 之间变化的随机量。这个随机量的概率密度分布函数是很难取得的。即便取得了，对于概率很少的 Φ 值，如果会造成系统严重情况时，那也得研究。故必须在 $(+180^\circ, -180^\circ)$ 范围内取不同值，计算系统各点的压力脉动情况，找出最严重者作为设计的依据。这里将泵 1 出口压力 P_{1c} ，泵 2 出口压力 P_{2c} 和汇交点压力 P_s 计算值示于图 5。由图 5 可以看出，泵 1 出口压力 P_1 值的最大值不是 $9.9 \times 10^5 \text{Pa}$ ，而是 $15.3 \times 10^5 \text{Pa}$ ，最小值是 $7.6 \times 10^5 \text{Pa}$ 。泵 2 出口压力 P_2 最大值为 $12.7 \times 10^5 \text{Pa}$ ，最小值为 $9.7 \times 10^5 \text{Pa}$ 。汇交点压力 P_s 的最大值为 $5.5 \times 10^5 \text{Pa}$ ，最小值为 $0.4 \times 10^5 \text{Pa}$ 。但上述最大压力脉动值 $15.3 \times 10^5 \text{Pa}$ 不是系统中的最大值，最大值在其他点处，最大值可达 $27.1 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

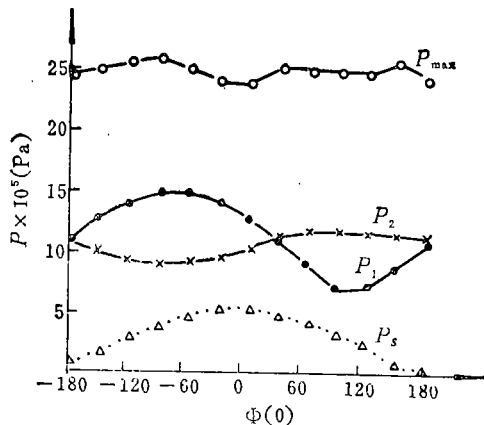


图 5 双泵供压系统各点压力随 Φ 变化图

参 考 文 献

- [1] Aimes, G. E. and Greene, J. B., Hydraulic System Dynamic Analysis-Frequency Response(HSFR) Computer Program Technical Description, AD/A 038884 (1977).
- [2] Degarcia, H., Greene, J. B., Levek, R. J. and Pierce, N. J., Advanced Fluid System Simulation-Final Report, AFAPL-TR-80-2039, (1980).
- [3] Stevens, F. A., Pump Flow Variation Relationship to Fluidborne Noise, P. 33rd. N. C. F. P(1977).
- [4] Wylie, E. B. and Streeter, V. L., Fluid Transients, McGraw-Hill, (1978), U. S. A., pp 222.

**FREQUENCY DOMAIN SIMULATION OF A HYDRAULIC SYSTEM
SUPPLIED BY PARALLEL DOUBLE PUMPS**

Wang Wenjie

(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

Niu Sandao and Zheng Jinsheng

(Development Department of Xian Aircraft Company)

Abstract

In this paper, frequency domain equivalent model of hydraulic positive displacement pump is presented. Its equivalent parameters (a source flow Q_s and a source impedance Z_s) have been obtained by identification method. With these parameters, a mathematical model of a hydraulic system supplied by parallel double pumps is established. A pressure ripple equation is derived, and a computer program is designed. An aircraft hydraulic system is computed with this program. The computed result is in accord with the experimental result. This proves the usefulness of the theoretical equation and the computer program.