

# 航空液压泵出口管路流固耦合固有频率计算分析与改进

刘玉柱<sup>1,2</sup>,陆永华<sup>2</sup>

(1. 国营芜湖机械厂,安徽 芜湖 241007; 2. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:** 液压油流动的压力作用到管路结构上,结构产生变形,而结构的变形又影响液压油的流道,形成流固耦合现象。对具有高压、大流量特点的航空液压泵出口管路建立模型,进行流固耦合分析研究。应用 ANSYS 软件分别研究压力、温度、流量 3 个变量条件对管路振动特性的影响。分析结果表明:在其他条件不变的情况下,管路流固耦合的固有频率随压力和流量的提高而提高,但压力的变化对其影响作用远大于流量;此外随温度的提高而降低,且其影响较大。

**关键词:** 液压泵;出口管路;流固耦合;固有频率;分析

**中图分类号:** TH122 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2023)05-0164-03

## Analysis and Improvement of Fluid-structure Coupling Natural Frequency of Aviation Hydraulic Pump Outlet Pipeline

LIU Yuzhu<sup>1,2</sup>, LU Yonghua<sup>2</sup>

(1. State-run Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241007, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Hydraulic oil flow pressure on the pipeline structure tends to deform the structure, and structural deformation affects the flow channel of hydraulic oil, forming a fluid-structure coupling phenomenon. This paper introduces an aviation hydraulic pump outlet pipeline model of high pressure and large flow characteristic, and analyzes its fluid-structure coupling. ANSYS software was used to study the influence of pressure, temperature and flow on pipeline vibration characteristic. The analysis results indicate that the natural frequency of fluid-structure coupling, under the other conditions remaining unchanged, increases with the increase of pressure and flow rate, but the influence of pressure change is much greater than that of flow rate, and in addition, it decreases with the increase of temperature and has greater influence.

**Keywords:** hydraulic pump; outlet pipeline; fluid solid coupling; natural frequency; analysis

## 0 引言

飞机液压系统通常用来收放起落架、襟翼、减速板和操作机轮刹车及操作舵面的偏转等<sup>[1]</sup>,所以液压系统在现代飞机设计中被广泛应用。飞机液压系统的压力级别主要有 21 MPa、28 MPa 和 34 MPa 这 3 个级别<sup>[2]</sup>。随着飞机研制水平的提高,对液压系统的质量和体积要求越来越高,使得液压系统向高压化发展。提高液压系统压力能有效降低系统质量,减小体积,提高系统响应<sup>[3]</sup>。但随着飞机液压系统向高压和大功效方向发展,会增加系统的无效功率。液压系统无效功率的增加主要体现在管路系统发热温度更高,进而导致系统油液老化、部件的产品寿命降低及系统密封性变差等。同时高压化将加剧压力脉动和管路振动,过去已有的一些液压系统问题可能会更加凸显。桑勇等<sup>[4]</sup>建立大流量液压管路和流固耦合的数学模型,利用 ANSYS 软件研究不同支撑间距和壁厚条件下管路振动特性。本文以 28 MPa 压力级别的某型飞机为研究对象,针对液压泵出口管路的高压、大流量、易破坏等特点进行仿真计算分析,提出设计、维修阶段的改进思路。

## 1 泵、管路、液压油简介及相关参数

### 1.1 航空液压泵

飞机液压能源系统主要由液压泵、油滤、蓄压器、油箱及其连接的管路组成。某型飞机采用变流量柱塞式航空液压泵,其液压能源系统及泵的内部结构原理如图 1 所示。在液压油箱增压压力的作用下,液压油进入液压泵的吸油管路,再进入液压泵的入口,液压泵在发动机的带动下高速旋转,将液压泵入口吸入的液压油压送到液压泵出口,进而给整个系统提供压力源。

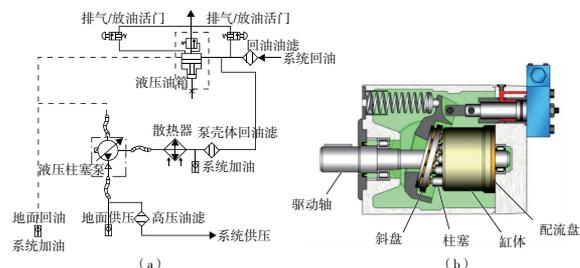


图 1 飞机液压能源系统及液压泵结构原理图

航空柱塞泵产生振动的根源,主要是其旋转运动过程中柱塞不连续的流量输出引起的几何脉动和油液压缩性引起的流量倒灌。液压泵产生的流量脉动受管路影响后,形成压力脉动现象,流体的振动通过管路传至系统<sup>[5]</sup>,引起液压系统的振动、噪声、工作精度降低等问题,影响液压系统的性能<sup>[6]</sup>。该液压泵的压力、流量等参数见表1,脉动频率可根据泵的结构和转速,使用式(1)进行计算。

$$f = \frac{nZ}{60} \quad (1)$$

式中: $n$ 为泵的转速, $r/min$ ; $Z$ 为泵室压力循环数,往复式柱塞泵即为其柱塞数。

表1 某型航空液压泵参数

额定压力/MPa	全流量压力/MPa	流量/(L/min)	额定转速/(r/min)	柱塞数
28 <sup>+1.5</sup> <sub>-1.0</sub>	26 <sup>0</sup> <sub>-0.5</sub>	≥215	4 200	9

根据航空发动机的工作状态及计算公式(1),得出泵出口管路内部的液压脉动频率及2倍频、3倍频,见表2。

表2 液压系统脉动频率 单位:Hz

状态	原始频率	2倍频	3倍频
慢车	441	882	1 323
75%	473	945	1 418
80%	504	1 008	1 512
85%	536	1 071	1 607
90%	567	1 134	1 701
95%	599	1 197	1 796
最大	630	1 260	1 890

### 1.2 航空液压泵出口管路

液压泵出口管路主要承担从液压泵出口至油滤之间的油液传递,某型飞机管路连接及固定形式见图2,管路的材质为1Cr18Ni10Ti,其他规格参数见表3。



图2 液压泵出口管路

表3 航空液压管路参数

公称直径/mm	壁厚/mm	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
16.0	1.5	7 850	210	0.3

### 1.3 航空液压油

液压油作为液压系统传动的介质,主要实现能量的传递、转换和控制,同时还可以对系统进行润滑、防锈、冲洗等,其性能也随环境的变化而变化。液压系统性能的平稳性受液压油黏度的影响,当黏度过高时,液压泵吸油的阻力和能量损失增加,机械总效率降低;当黏度过低时,液压泵内泄漏增多,容积效率和控制性能下降,随之造成润滑性能降低,使磨损增加。以YH-15航空液压油为例,其运

动黏度随温度升高而降低<sup>[7]</sup>,设定5组工作温度,其密度、黏度的参数见表4。

表4 YH-15航空液压油参数

20℃密度/(kg/m <sup>3</sup> )	运动黏度/(mm <sup>2</sup> /s)				
	20℃	40℃	60℃	70℃	80℃
839.3	22.482	13.928	9.683	8.210	7.088

## 2 流体本身对管路固有频率的影响

管路内部流体压力作用于管壁上,产生流体和结构的相互影响,形成流固耦合现象,从而导致管路的固有频率发生改变。以实体管路为对象直接在Workbench平台的Model模块中进行模态计算,得出空管的前8阶固有频率,以典型工作状态(28MPa压力、215L/min流量、70℃)进行管路流固耦合计算,得出有流体的管路前8阶固有频率和振型,见表5和图3。

表5 有无流体管路的固有频率

状态	固有频率/Hz		相差比例/%
	空管	流体管路	
1阶	233.30	282.39	17.45
2阶	521.61	552.41	5.58
3阶	591.86	619.11	4.40
4阶	670.18	696.30	3.75
5阶	699.07	729.58	4.18
6阶	764.69	799.67	4.37
7阶	776.21	827.80	6.23
8阶	936.21	972.01	3.68

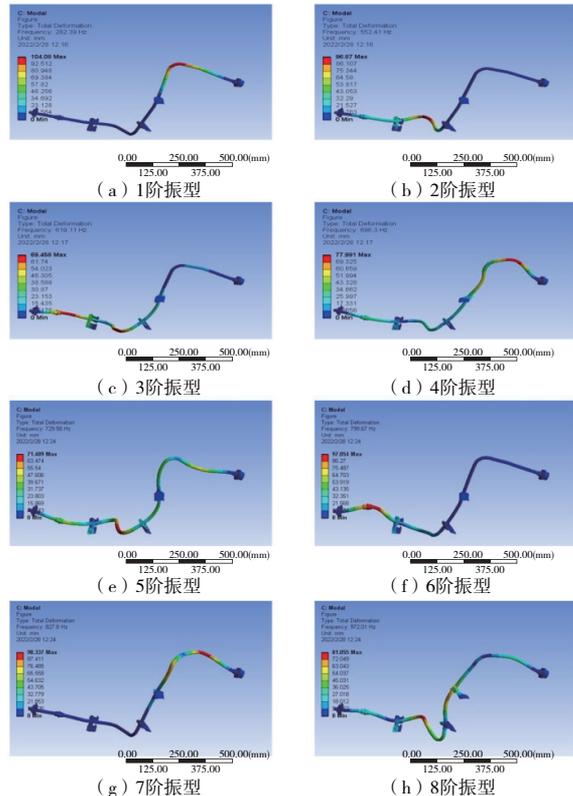


图3 流体管路的前8阶振型

由表 5 可以得出,在流体压力和本身作用下,管路的各阶固有频率相对于无流体有一定提高,除 1 阶固有频率差值在 17.45%外,其余均保持在 5%左右,在后续计算分析时要考虑流体作用,不能忽略其影响。

### 3 流体压力、温度、流量对管路固有频率的影响

#### 3.1 流体压力对管路固有频率的影响

设定管路内部油液和管路本身典型工作温度为 70℃,管路内部油液的流量为 215 L/min,根据液压泵的压力参数,将液压管路系统中的压力设置为 25.5~29.5 MPa 的范围,中间以 0.5 MPa 为梯度,另外加一组压力为 0.01 MPa 的数据做对比,总计 10 组试验数据。见表 6 和图 4(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

表 6 不同压力下管路的固有频率

压力/ MPa	固有频率/Hz							
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶
0.01	234.09	522.46	592.51	670.63	699.73	765.56	776.86	937.02
25.5	278.80	550.15	616.97	694.23	726.98	797.73	823.02	969.20
26.0	279.53	550.61	617.41	694.65	727.51	798.13	823.99	969.77
26.5	280.26	551.07	617.84	695.06	728.03	798.52	824.95	970.34
27.0	280.98	551.52	618.26	695.48	728.55	798.91	825.92	970.90
27.5	281.67	551.96	618.68	695.88	729.06	799.28	826.85	971.45
28.0	282.39	552.41	619.11	696.30	729.58	799.67	827.8	972.01
28.5	283.10	552.86	619.53	696.72	730.10	800.05	828.76	972.57
29.0	283.80	553.31	619.96	697.13	730.62	800.44	829.70	973.13
29.5	284.49	553.74	620.37	697.53	731.13	800.80	830.63	973.67

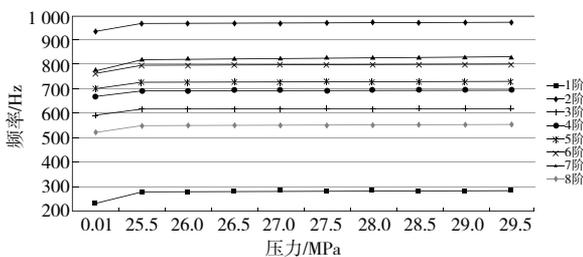


图 4 管路固有频率随压力的变化关系

由表 6 和图 4 可以得出,管路流固耦合的固有频率随压力的提高而提高,在工作压力范围内,频率的变化值控制在 3~8 Hz 之间,影响范围基本在 1%以内,可以忽略其影响;但相对无压力或小压力 0.01 MPa,其影响较大,不可忽略。

#### 3.2 流体温度对管路固有频率的影响

设定管路内部油液为额定压力 28 MPa,管路内部油液的流量为 215 L/min,根据环境温度和工作时极限温度,将液压管路系统中的温度设置从 20℃~80℃ 的范围,总计 5 组试验数据,见表 7 和图 5 所示。

表 7 不同温度下管路的固有频率

温度/ ℃	固有频率/Hz							
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶
20	329.03	611.96	709.40	730.41	822.51	882.12	892.07	1 043.40
40	314.16	597.77	678.70	719.49	790.46	856.17	871.45	1 024.00
60	305.90	588.61	662.75	713.78	773.92	842.28	860.06	1 012.50
70	282.39	552.41	619.11	696.30	729.58	799.67	827.80	972.01
80	264.48	521.72	585.87	682.99	695.81	767.21	803.23	941.17

由表 7 和图 5 可以得出,管路流固耦合的固有频率随温度的提高而降低,而且影响非常明显,主要考虑温度对液压油运动黏度的影响较大,从导致的连锁效应,在后续计算分析时要考虑温度作用,不能忽略其影响。

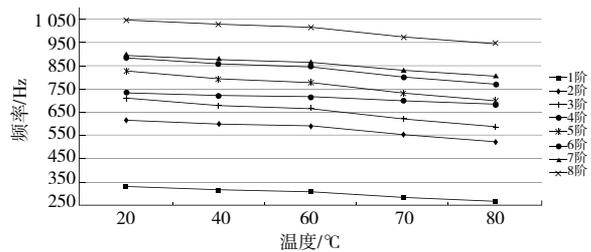


图 5 管路固有频率随温度的变化关系

#### 3.3 流体流量对管路固有频率的影响

设定管路内部油液为额定压力 28 MPa,管路内部油液和管路本身典型工作温度为 70℃,根据液压泵及液压系统的工作原理,当液压系统各舵面及系统子功能不需要能量时,液压泵进入零流量状态,此时液压泵的输出压力为额定压力,输出流量为 0,管路内部的液压油流速  $V$  为 0。根据流量的不同,分析流体流量对管路固有频率的影响,其中流速计算公式为

$$V = \frac{4Q}{\pi(D-2e)^2} \quad (2)$$

式中: $Q$  为泵输出(出口管路)的流量, L/min;  $D$  为泵出口管路的公称直径, mm;  $e$  为泵出口管路的壁厚, mm。

管路固有频率随流量的变化见图 6 和表 8。

由图 6 和表 8 可以得出,管路流固耦合的固有频率随流量的提高而提高,但是影响非常小,从 0 流量到全流量,变化值控制在 0.7 Hz 以内,基本可以忽略其影响。

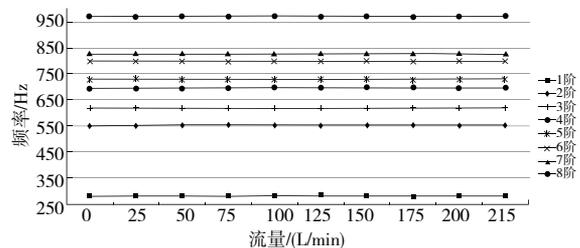


图 6 管路固有频率随流量的变化关系

(下转第 175 页)

## 5 结语

本文以新型两自由度非光滑塑性碰撞系统为分析对象,研究了塑性碰撞系统的“擦边”行为;建立了 Poincaré 映射,并研究了系统的周期运动及分岔;分析了系统在碰撞过程中发生的 3 种运动状态及对系统的影响。利用分岔图、相图轨迹、Poincaré 截面图发现了不同参数下系统发生 hopf 分岔的现象,并发现了此系统模型碰撞过程中的“擦边”现象。分析表明倍化序列和 hopf 分岔过程会因质量块与约束“擦边”而导致中断或不连续,“擦边”行为未能改变运动的最小周期,但在“擦边”前后质量块的 Poincaré 截面的次数都发生改变,通过 Matlab 数值仿真结果可以得出两自由度碰撞系统发生了“擦边”分岔行为,由系统 3 种不同参数下发生不同周期的运动进而验证了  $q=p/n$  周期运动的“擦边”行为通常导致系统的周期运动数不变,碰撞次数增加或减少一次。

### 参考文献:

- [1] DE SOUZA S L T, WIERCIGROCH M, CALDAS I L, et al. Suppressing grazing chaos in impacting system by structural nonlinearity[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2008, 38(3): 864-869.

- [2] PAVLOVSKAIA E, WIERCIGROCH M, GREBOGI C. Two-dimensional map for impact oscillator with drift[J]. Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2004, 70(2/3): 036201.
- [3] HU H Y. Detection of grazing orbits and incident bifurcations of a forced continuous, piecewise-linear oscillator[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 187(3): 485-493.
- [4] 罗冠炜, 谢建华. 碰撞振动系统的周期运动和分岔[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] 张惠, 丁旺才, 李飞. 两自由度含间隙和预紧弹簧碰撞振动系统动力学分析[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 209-217.
- [6] 伍帅, 徐洁琼, 王子汉, 等. 一类二自由度碰撞振动系统的余维二擦边分岔研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(20): 113-120.
- [7] 李松涛, 李群宏, 张文. 三自由度碰撞振动系统的余维二擦边分岔与混沌控制[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(4): 79-92.
- [8] 王文杰. 矿用带式输送机的非线性动力学建模研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(5): 131-134.
- [9] 罗冠炜, 谢建华, 孙训方. 单自由度塑性碰撞振动系统的周期运动及其分叉特点[J]. 中国机械工程, 2001, 12(11): 1297-1300.

收稿日期: 2022-04-12

(上接第 166 页)

表 8 不同流量下管路的固有频率

流量/ (L/min)	固有频率/Hz							
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶
0	281.84	551.83	618.58	695.92	728.95	799.16	827.13	971.37
25	281.85	551.84	618.59	695.93	728.97	799.17	827.14	971.38
50	281.87	551.87	618.61	695.94	728.99	799.19	827.17	971.40
75	281.91	551.92	618.66	695.97	729.04	799.23	827.22	971.46
100	281.97	551.98	618.71	696.01	729.11	799.29	827.29	971.53
125	282.03	552.05	618.77	696.05	729.18	799.35	827.36	971.60
150	282.07	552.11	618.84	696.09	729.25	799.41	827.41	971.67
175	282.21	552.23	618.94	696.18	729.38	799.51	827.59	971.81
200	282.28	552.30	619.01	696.23	729.46	799.57	827.67	971.89
215	282.39	552.41	619.11	696.30	729.58	799.67	827.80	972.01

## 4 结语

1) 管路内部流体压力作用于管壁上, 产生流体和结构的相互影响, 形成流固耦合现象, 在流体压力和本身作用下, 管路的各阶固有频率相对于无流体有一定提高, 在后续计算分析时要考虑流体作用, 不能忽略。

2) 管路流固耦合的固有频率随压力的提高而提高, 工作状态的高压力相对无压力或小压力, 其影响较大, 不能忽略其影响。

3) 管路流固耦合的固有频率随温度的提高而降低, 而且影响非常明显, 在后续计算分析时要考虑温度作用, 不能忽略其影响。

4) 管路流固耦合的固有频率随流量的提高而提高, 但是影响非常小, 基本可以忽略。

5) 液压系统管路的设计、维修阶段要考虑液压系统的脉动, 除满足最基本的设计标准外, 还要进行仿真计算, 使管路的固有频率尽量避开液压系统的脉动频率, 避免管路发生共振破坏。

### 参考文献:

- [1] 刘喆. T 型航空液压管路的流固耦合振动特性分析[J]. 机械设计, 2021, 38(9): 45-52.
- [2] 朴奎奎. 民用飞机液压系统压力级别选取论证研究[J]. 流体传动与控制, 2011(6): 22-24.
- [3] 权凌霄, 孙冰江, 赵劲松, 等. 航空弯曲液压管路流固耦合振动频响分析[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(3): 487-495.
- [4] 桑勇, 邵利来, 王旭东. 基于 ANSYS 大流量管路流固耦合振动分析[J]. 液压气动与密封, 2018, 38(7): 1-5.
- [5] 高峰. 飞机液压系统泵—管路振动特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [6] 胡峰波, 王朝晖, 左登勇, 等. 某型机液压系统压力脉动测量与仿真[J]. 测控技术, 2022, 41(2): 75-81.
- [7] 黄河, 毛阳, 孙永宾, 等. YH-15 航空液压油的黏温特性测试与分析[J]. 兵工自动化, 2015, 34(5): 42-43.

收稿日期: 2022-03-31