

液压系统中的压力冲击研究

杨斌*

中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院, 上海 201210

摘要: 通过理论计算和仿真分析, 研究影响阀控液压系统压力冲击的关键因素, 得出阀控液压系统中的压力冲击与管路长度、阀开启时间的关系, 并进行试验验证。结果表明, 管路长度、阀开启时间直接影响着阀控液压系统中的压力冲击。缩短管路长度和适当延长阀开启时间, 都能有效减小阀控系统压力冲击。这为飞机液压系统中元部件的布局和设计提供了方向, 为飞机液压系统的完善和优化提供了依据。

关键词: 液压系统; 压力冲击; 管路长度; 开启时间

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2016) 10-0055-05

液压系统具有比功率大、响应速度快及抗负载刚性大等特点^[1], 广泛地应用于现代飞机的操纵中。液压系统作为现代飞机的重要组成部分, 为飞控系统、高升力系统、起落架系统、刹车系统以及反推力系统等液压用户系统提供动力源。

飞机液压系统中存在大量阀控装置/系统, 通过阀控制下游液压元件的动作, 如控制作动器、液压马达等执行元件启停。阀工作时, 经常导致液压系统压力出现波动, 严重时甚至造成局部液压系统出现压力冲击。久而久之, 液压设备、管路等将由于疲劳而损坏。这不但增加了飞机运营成本, 而且直接影响飞机的飞行安全。因此, 消除飞机液压系统中的压力冲击, 使液压系统的压力波动保持在合理范围内有着非常重要的意义。本文提出了一种基于液压水锤理论与仿真分析的液压控制系统优化设计方法, 即先通过理论计算与仿真分析得出影响液压系统压力冲击的关键因素: 控

制阀开启时间和管路长度。进而分析消除压力冲击所需的控制阀最优打开时间以及阀距下游用户的最优管路长度, 然后用试验的方法加以验证。试验结果表明, 该方法能够明显改善压力冲击, 为民用飞机液压系统的优化设计提供了依据。

1 理论计算

1.1 研究模型

飞机液压系统中的控制阀包括优先阀、电磁阀、伺服阀等, 在控制阀打开瞬间, 液压油的流速突然变化, 易引起压力急剧升高和降低的交替变化, 该现象即为水锤现象。图1为某型飞机液压控制系统原理图及简化图。其中, p 为阀下游压力; p_s 为阀入口压力 (液压源压力); v 为液体流速; x 为导管轴向坐标; l 为导管长度。

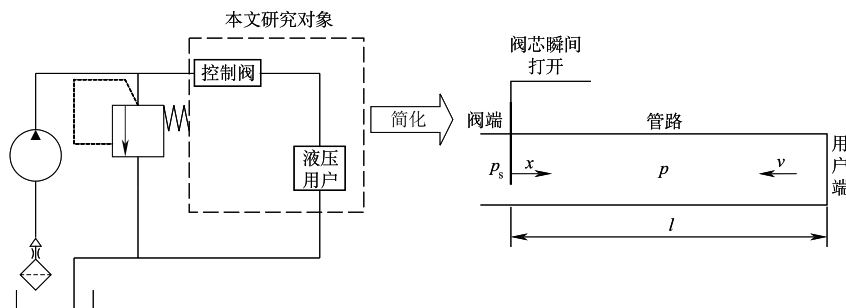


图1 控制阀打开瞬间的阀控系统简化图

Fig.1 Simplified diagram of valve control system when valve opening instantly

收稿日期: 2016-08-08; 退修日期: 2016-08-11; 录用日期: 2016-08-12

* 通讯作者: Tel.: 021-20864562 E-mail: yangbin4@comac.cc

引用格式: YANG Bin. Research on pressure shock in hydraulic system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (10): 55-59. 杨斌. 液压系统中的压力冲击研究 [J]. 航空科学技术, 2016, 27 (10): 55-59.

在该系统中,考虑到控制阀打开瞬间下游液压用户往往由于惯性或者信号延迟而未启动。因此,在该瞬间,可将控制阀下游简化成盲端管。

1.2 最大压力冲击理论计算^[2,3]

对于理想流体,忽略摩擦阻力,线性化后得到水锤微分方程如下:

$$\begin{aligned} \text{运动方程 } \frac{\partial p}{\partial x} &= \rho \frac{\partial v}{\partial t} \\ \text{连续方程 } \frac{\partial v}{\partial x} &= \beta_e \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ρ 为液体密度; β_e 为流体当量压缩系数。

将方程组 (1) 用达朗贝尔法解出得到水锤方程组:

$$\begin{cases} p - p_0 = \rho w [\phi(x-wt) + \psi(x+wt)] \\ v - v_0 = -\phi(x-wt) + \psi(x+wt) \end{cases} \quad (2)$$

式中: w 为压力波波速,

$$w = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + (K/E)(D/e)}} \quad (3)$$

$\phi(x-wt)$ 是沿 $x-t$ 平面上的直线 $x-wt=\text{const}$ 向前传播的正向压力波, $\psi(x+wt)$ 是沿 $x-t$ 平面上的直线 $x+wt=\text{const}$ 负向传播的反向压力波。直线 $x-wt=\text{const}$ 和直线 $x+wt=\text{const}$ 为水锤方程的特征线。压力波在封闭端发生正发射,在打开的阀处发生负反射,阀的下游到封闭端任意一点的压力都是各种压力波、反射波的叠加。

假设阀在 $t=0$ 时刻瞬时打开,则有: 初始条件 ($t < 0$) $p=0, v=0$; 边界条件 ($t \geq 0$) $x=0$ 处: $p=p_s$; $x=l$ 处: $v=0$ 。

将初始条件和边界条件代入式 (2), 可得:

(1) $0 \leq t < l/w$ 时, 压力波向封闭端传播, 则有 $p_1=p_s, v_1=-p_s/\rho w$;

(2) $l/w \leq t < 2l/w$ 时, 压力波在封闭端发生正发射, 反射波与正向波叠加, 则有 $p_2=2p_s, v_2=0$;

(3) $2l/w \leq t < 3l/w$ 时, 反射波到达开启的阀处发生负反射, 与管路中的反射波、正向波叠加, 则有 $p_3=p_s, v_3=p_s/\rho w$;

(4) $3l/w \leq t < 4l/w$ 时, 反射波再次到达封闭端时, 又发生正反射, 与管路中的反射波、正向波叠加, 则有 $p_4=0, v_4=0$;

阀下游管路中这种周期变化的压力即为水锤波,

水锤波的周期 $T=4l/w$ 。因此, 若忽略油液摩擦阻力、压力沿程损失, 阀瞬时打开时下游产生的最大压力冲击为 $2p_s$ 。

1.3 压力冲击修正计算^[4-8]

由于阀实际打开需要一定的时间, 且油液黏度不为零导致压力沿程损失, 因此, 阀打开造成的压力冲击要小于 $2p_s$ 。

对于盲端管, 根据 Joukowsky 的经典水锤计算公式, 可得:

$$\Delta p = \rho \cdot w \cdot \Delta v = \rho \cdot w \cdot v \quad (4)$$

式中: Δp 为压力变化量, Δv 为速度变化量。

压力波反射周期为:

$$T_R = 2l/w \quad (5)$$

当阀开启时间 $T_O > T_R$, 此时的水锤现象属于“缓慢事件”, 式 (4) 修正为:

$$\Delta P = \rho \cdot w \cdot v \cdot \frac{T_R}{T_O} \quad (6)$$

由式 (4) 和式 (6) 可知, 当阀开启时间 T_O 小于反射波周期 T_R 时, 压力冲击最大, 其大小与阀开启时间和反射波周期无关; 当阀开启时间大于反射波周期时, 反射波周期越长, 压力冲击越大; 阀开启时间越短, 压力冲击越大。因此, 为减小阀控系统压力冲击, 可以延长阀的开启时间, 使之远大于反射波周期; 或者缩短反射波周期, 即让阀靠近下游液压元件布置。

2 仿真分析

在 AMESim 中建立典型阀控系统的仿真模型, 分析管路长度、阀开启时间对压力冲击的影响。其中, 液压源为恒压液压源 (20.7MPa), 油液模型选取考虑压缩性、黏度及惯性, 管路模型选取考虑弹性等。

管路长度取 10m, 反射波周期 T_R 约为 20ms。阀开启时间 T_O 分别取 5ms, 10ms, 20ms, 30ms, 50ms, 110ms, 阀下游产生的压力冲击如图 2 和表 1 所示。由仿真数据可知, 当阀开启时间小于反射波周期时, 最大压力冲击基本一致, 约为液压源压力的 1.39 倍。当阀开启时间大于反射波周期时, 最大压力冲击随着阀开启时间的增大而减小。

阀开启时间取 20ms, 管长分别取 1m, 3m, 5m, 8m, 10m ($T_R \leq T_O$), 阀下游产生的压力冲击如图 3 和表 2 所示。由仿真数据可知, 当阀开启时间大于反射波周期时, 管路越长压力冲击越大。

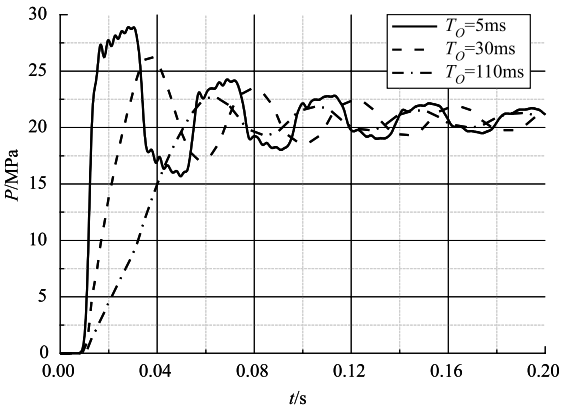


图2 管长恒定时阀开启时间对压力冲击的影响
Fig.2 Influence of valve open-time on the pressure shock when tube length is constant

表1 不同阀开启时间产生的最大压力冲击
Table 1 Max pressure shock with different valve open-time

开启时间 /ms	5	10	20	30	50	110
最大压力冲击 /MPa	28.8	28.8	28.4	26.3	24.5	22.7

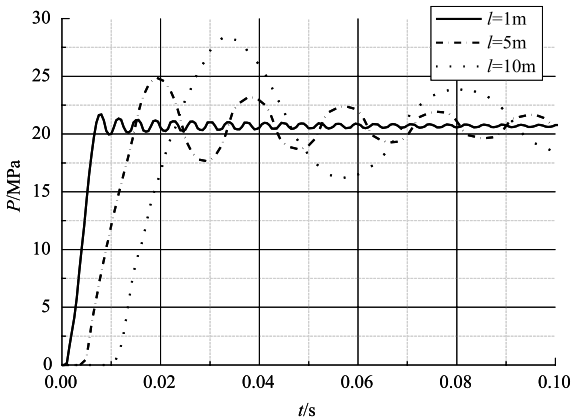


图3 $T_R \leq T_O$ 时管长对压力冲击的影响
Fig.3 Influence of tube length on the pressure shock when $T_R \leq T_O$

表2 $T_R \leq T_O$ 不同管长产生的最大压力冲击
Table 2 Max pressure shock with different tube length when $T_R \leq T_O$

管路长度 /m	1	3	5	8	10
最大压力冲击 /MPa	21.7	23.5	24.9	26.8	28.4

阀开启时间取 5ms,管长分别取 5m, 10m, 15m, 20m, 25m ($T_R \geq T_O$),阀下游产生的压力冲击如图 4 和表 3 所示。由仿真数据可知,当阀开启时间小于反射波周期时,管路中的最大压力冲击与管长无关,约为液压源压力的 1.4 倍。仿

真数据显示,随着管长递增,最大压力冲击存在微小的递减。这是由于管长递增时,管路压力沿程损失递增,导致最大压力冲击略有减小。

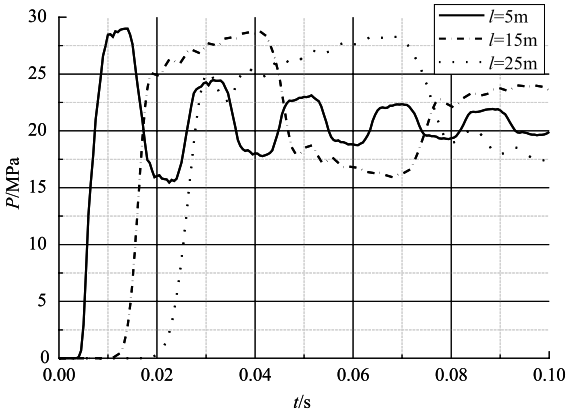


图4 $T_R \geq T_O$ 时管长对压力冲击的影响
Fig.4 Influence of tube length on the pressure shock when $T_R \geq T_O$

表3 $T_R \geq T_O$ 不同管长产生的最大压力冲击
Table 3 Max pressure shock with different tube length when $T_R \geq T_O$

管路长度 /m	5	10	15	20	25
最大压力冲击 /MPa	29.0	29.0	28.7	28.5	28.3

由仿真分析和理论分析可知,阀开启瞬间其下游产生的压力冲击与阀的开启时间、管路长度密切相关,适当延长阀开启时间、缩短阀距下游用户的管路长度有利于减小压力冲击。

3 试验验证

由于理论分析和仿真分析过程存在不同程度的简化,为验证理论分析和仿真分析结果的正确性,对飞机典型阀控系统在不同管路长度和不同阀开启时间产生的压力冲击进行测试。具体方法是:在某型飞机液压系统集成试验时,将开启时间为 20ms, 110ms 的优先阀(开启压力约为 16.5MPa)安装于管长为 1m, 11m 的液压系统中,测试阀开启瞬间下游的压力冲击。结果如图 5 和图 6 所示。

试验结果显示,当管路长度从 11m 缩短到 1m 时,最大压力冲击从 29.0MPa 减小到 17.2MPa。当阀开启时间从 20ms 延长到 110ms 时,最大压力冲击从 29.0MPa 减小到 20.0MPa。

试验结果表明,缩短阀距下游用户的管路长度和延长阀开启时间都能显著减小压力冲击,验证了理论分析和仿真分析的正确性。同时,根据飞机液压系统设计经验,控制

阀应尽量靠近液压用户,管长控制在 1m 之内压力冲击最小;若两个或多个液压用户相距较远,应避免仅使用一个控制阀同时控制两个或多个液压用户,防止控制阀距其中一个液压用户的管路过长,控制阀的开启时间应尽量控制在 100~150ms 之间,既能保证下游液压用户按时响应,也能把压力冲击减小到合理范围内。

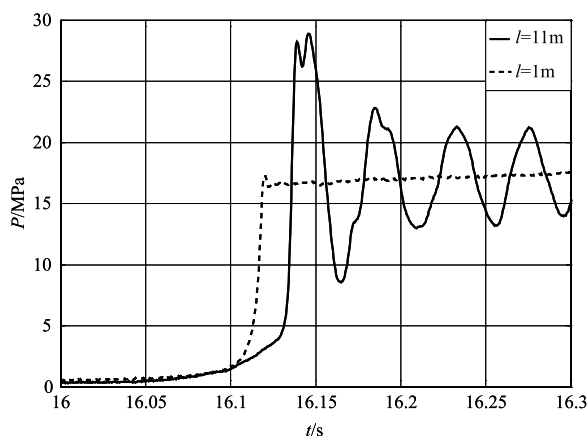


图 5 开启时间约为 20ms 的优先阀在管长不同时产生的压力冲击
Fig.5 Pressure shock with different tube length when valve open-time is about 20ms

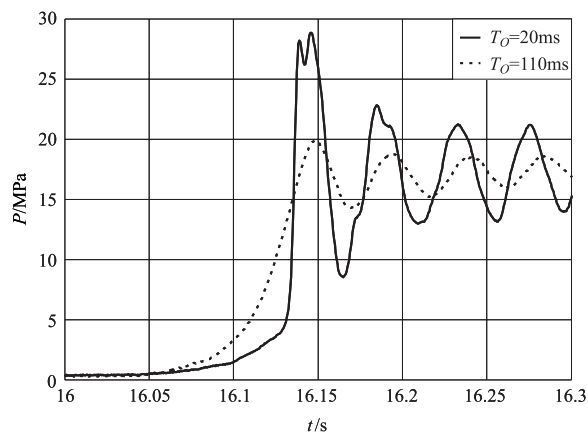


图 6 管长为 11m 时不同优先阀开启时间产生的压力冲击
Fig.6 Pressure shock with different valve open-time when tube length is 11m

4 结论

通过对飞机典型阀控系统内的压力冲击进行理论分析和仿真分析,得到了压力冲击与阀距下游用户管路长度、阀开启时间的关系,并通过试验进行验证。结果表明,缩短阀距下游用户的管路长度、延长阀开启时间都能有效减小压力冲击。这为飞机液压系统中元部件的布局和设计提供了方向,为液压系统的完善和优化提供了依据。同时,作者根据

经验,也给出了确保阀控系统压力冲击在合理范围内的管路长度和阀开启时间建议值。

AST

参考文献

- [1] 王占林. 飞机高压液压能源系统 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 2-5.
WANG Zhanlin. Aircraft high pressure hydraulic power system [M]. Beijing: Beihang University Press, 2004: 2-5. (in Chinese)
- [2] 王永熙, 张忠孝, 朱序忠, 等. 飞机控制系统和液压系统设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2003: 655-667.
WANG Yongxi, ZHANG Zhongxiao, ZHU Xuzhong, et al. Flight control system and hydraulic system design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003: 655-667. (in Chinese)
- [3] 李艳军. 飞机液压传动与控制 [M]. 科学出版社, 2009: 19-27.
LI Yanjun. Aircraft hydraulic transmission and control [M]. Science Press, 2009: 19-27. (in Chinese)
- [4] 郭玉明, 吴娟, 杨佳强. 飞机液压能源系统回路反压力的研究 [J]. 机械与电子, 2012 (6): 21-24.
GUO Yuming, WU Juan, YANG Jiaqiang. Research of anti-pressure in aircraft hydraulic energy systems circuit [J]. Machinery & Electronics, 2012 (6): 21-24. (in Chinese)
- [5] Bergant A, Simpson A R, Tijsseling A S. Water hammer with column separation: a historical review [J]. Journal of Fluids and Structures, 2006 (22): 135-171.
- [6] 周瑞祥, 李娜, 苏新兵. 飞机复杂燃油管路压力动态研究 [J]. 液压与气动, 2006 (10): 23-25.
ZHOU Ruixiang, LI Na, SU Xinbing. Research on pressure dynamic characteristic of airplane complex fueling pipelines [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2006 (10): 23-25. (in Chinese)
- [7] 孙玉东, 刘忠族, 刘建湖, 等. 水锤冲击时管路系统流固耦合响应的特征线分析方法研究 [J]. 船舶力学, 2005, 9 (4): 130-137.
SUN Yudong, LIU Zhongzu, LIU Jianhu, et al. Application of MOC to calculation of fluid-structural coupling response of piping system under impact of waterhammer [J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9 (4): 130-137. (in Chinese)
- [8] 王廷军, 阎质英, 王平. 液压水锤及其噪声的机理与控制的研究 [J]. 辽宁工学院学报, 1997, 17 (2): 12-15.

WANG Tingjun, YAN Zhiying, WANG Ping. A research for the mechanism of noise and its control about hydraulic water-hammer [J]. Journal of Liaoning Institute of Technology, 1997, 17 (2): 12-15. (in Chinese)

作者简介

杨斌 (1986—) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机液压系统设计与研究。

Tel: 021-20864562

E-mail: yangbin4@comac.cc

Research on Pressure Shock in Hydraulic System

YANG Bin*

COMAC Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China

Abstract: Based on theoretical calculation and simulation analysis, this paper got the key factor which affect the pressure shock in valve-control hydraulic system. Then concluded how the tube length and valve open-time affect pressure shock in hydraulic system. And the conclusions were verified based on test. It showed that tube length and valve open-time affect pressure shock in hydraulic system directly. The research also showed that shortening tube length and increasing valve open-time properly can reduce pressure shock effectively. All above provide the direction for the layout and design of hydraulic system part/product, and also provide theoretical basis for optimizing hydraulic system.

Key Words: hydraulic system; pressure shock; tube length; open-time

Received: 2016-08-08; Revised: 2016-08-11; Accepted: 2016-08-12

*Corresponding author. Tel. : 021-20864562 E-mail: yangbin4@comac.cc