

文章编号: 1674-8190(2023)02-121-08

## 充气式蓄能器参数选型方法研究

朱海龙<sup>1</sup>, 张倩<sup>2</sup>, 肖晓蕾<sup>1</sup>, 张朋<sup>1</sup>

(1. 中航西飞民用飞机有限责任公司 工程技术中心, 西安 710089)

(2. 航空工业庆安集团有限公司 航空设备研究所, 西安 710077)

**摘要:** 容积和预充气压力是充气式蓄能器的关键参数, 对其动态性能(工作状态下, 其压力与流量的输出性能)有较大影响。以某型飞机舵面应急型充气式蓄能器计算选型为例, 基于Hypneu仿真软件中的液压元件库, 结合该型飞机液压系统的主要设计参数以及应急型蓄能器的工作原理, 建立蓄能器作动仿真模型; 在Hypneu中设置测试点记录仿真曲线, 通过仿真曲线分析充气式蓄能器的关键参数对其动态性能的影响; 结合理论计算与仿真分析, 提出一套蓄能器参数选型方法, 并对该选型方法进行试验验证。结果表明: 蓄能器的预充气压力越大, 初始蓄能器输出的有效容积越小, 减少预充气压力增加有效容积的同时会降低蓄能器的输出压力, 试验结果与仿真结果接近, 使用该方法选型的蓄能器能够满足作动要求。

**关键词:** 飞机; 液压仿真; 预充气量; 充气式蓄能器; 应急型充气式蓄能器; 蓄能器容积; Hypneu

**中图分类号:** V245.1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.02.14

## Research on parameter selection method of gas-charged accumulator

ZHU Hailong<sup>1</sup>, ZHANG Qian<sup>2</sup>, XIAO Xiaolei<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>

(1. Engineering Technology Center, AVIC XAC Commercial Aircraft Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

(2. Institute of Aeronautical Equipment, AVIC Qing'an Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Volume and pre-charge gas pressure are the key parameters of the gas-charged accumulator, which are of great influence on its dynamic performance (the output performance of pressure and flow under working conditions). The calculation and selection of a certain type of aircraft rudder surface emergency gas accumulator is taken as an example, based on the hydraulic component library in the Hypneu simulation software, combined with the main design parameters of this type of aircraft hydraulic system and the working principle of the emergency accumulator, the simulation model of the actuation of the accumulator is established. The test points are set in Hypneu to record the simulation curve, and the influence of the key parameters of the gas-filled accumulator on its dynamic performance is explored by analyzing the simulation curve. The theoretical calculation and simulation analysis are combined to propose a set of accumulator parameter selection method, and the selection method is verified by experiments. The results show that the greater of the pre-charge gas pressure of the accumulator is, the smaller the effective volume output by the initial accumulator is, and the reduction of the pre-charge gas pressure can increase the effective volume, and reduce the output pressure of the accumulator at the same time. The experimental results are close to the simulation results, and the accumulator selected by this method can meet the actuation requirements.

**Key words:** aircraft; hydraulic simulation; pre-charge gas volume; gas-charged accumulator; emergency gas-charged accumulator; accumulator volume; Hypneu

收稿日期: 2022-06-16; 修回日期: 2022-09-01

通信作者: 朱海龙, abchinaman@163.com

引用格式: 朱海龙, 张倩, 肖晓蕾, 等. 充气式蓄能器参数选型方法研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(2): 121-128.

ZHU Hailong, ZHANG Qian, XIAO Xiaolei, et al. Research on parameter selection method of gas-charged accumulator[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(2): 121-128. (in Chinese)

## 0 引言

充气式蓄能器相对于重锤式蓄能器以及弹簧式蓄能器具有尺寸小、反应灵敏、充气方便的优势,因此广泛应用于飞机液压系统中,具有提供应急能源、吸收压力冲击、减少压力脉动及弥补泵输出流量等功能<sup>[1]</sup>。

美国 SAE ARP4752B 航空航天民用运输类飞机液压系统的设计和安装要求<sup>[2]</sup>是国内外民用飞机液压系统设计的指导性规范,其中规定蓄能器应该按照 ARP4378<sup>[3]</sup>、ARP4379<sup>[4]</sup>或 ARP4553<sup>[5]</sup>要求以及其中所列标准图纸进行设计,上述标准中仅规定了蓄能器设计的基本要求,未能给出蓄能器容积以及预充气压力的计算或选用方法。

郑占君<sup>[6]</sup>、刘仁志等<sup>[7]</sup>均采用基于理想气体状态方程的方法对蓄能器的容积进行计算分析,前者使用的理论计算方法未考虑温度影响,后者未对其推算出的容积计算方法进行验证,此外二者均未考虑预充气压力对蓄能器的影响,也未对蓄能器的参数进行进一步的优化设计;李新德等<sup>[8]</sup>依据蓄能器的不同用途给出相应的预充气压力与系统最低工作压力比,然而预充气压力的大小并不能根据使用用途一概而论;危书涛等<sup>[9]</sup>建立了充气式蓄能器预充气压力数学模型,对不同预充气压力下的蓄能器开启压力进行了分析总结,但对于不同预充气压力对蓄能器动态性能的影响未进行具体论述。

本文依据国内外充气式蓄能器参数计算选型相关文献,总结不同条件下预充气压力与容积的理论计算方法,以某型飞机舵面应急型充气式蓄能器计算选型为例,依据该型飞机液压系统的主要设计参数以及蓄能器容积、预充气压力的理论计算结果,在 Hypneu 仿真软件中建立蓄能器仿真模型;依据蓄能器流量与压力的输出曲线,对蓄能器容积以及预充气压力大小进行逐步优化;提出一套理论计算与仿真分析相结合的蓄能器关键参数选型方法,并通过某型飞机应急型蓄能器舵面作动试验,验证该方法的有效性。

## 1 蓄能器容积计算方法

### 1.1 充气蓄能器的 3 种状态

充气式蓄能器在系统中的 3 个不同阶段如图 1

所示,其中  $D$  为舵面作动筒截面直径,  $s$  为舵面作动器行程。

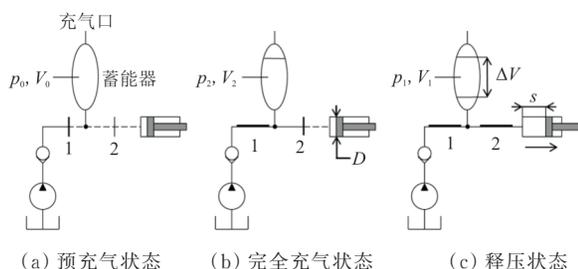


图 1 充气式蓄能器在系统中的不同状态<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Air-charged accumulators in different status<sup>[10]</sup>

#### 1.1.1 预充气状态

蓄能器处于预充气状态,预充气压力  $p_0 = \beta \times p_1$  ( $p_1$  为系统最小工作压力),  $V_0$  为蓄能器总容积。

此处预充气压力值依据用途不同选用的百分比  $\beta$  不同,依据文献[11],用于压力脉动吸收时  $\beta$  为 50%~80%,用于应急蓄能时  $\beta$  为 80%~90%,当预充气压力接近最小工作压力时,系统的有效容积最大<sup>[12]</sup>。

#### 1.1.2 完全充气状态

蓄能器处于完全充气状态,阀门 1 打开,阀门 2 处于关闭阶段,  $p_2$  为系统额定工作压力,  $V_2$  为系统额定工作压力下蓄能器的容积。

#### 1.1.3 释压状态

蓄能器处于释压状态,阀门 1、阀门 2 均处于打开状态,  $p_1$  为蓄能器释放后的压力,即系统最低工作压力,  $V_1$  为蓄能器释放后的体积,此时蓄能器作用于作动器的油液体积为  $V_1 - V_2$ 。

## 1.2 蓄能器容积计算公式

### 1.2.1 等温条件下计算公式

在等温条件下,不考虑温度变化的影响,基于玻意耳—马利奥特定律可推导出蓄能器容积  $V_0$  的计算方法<sup>[12]</sup>。

由  $p_0 \times V_0 = p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2$  可推导出:

$$V_1 - V_2 = [(p_0 \times V_0) / p_1] - [(p_0 \times V_0) / p_2] = V_0 [(p_0 / p_1) - (p_0 / p_2)]$$

因此在等温条件下蓄能器的容积:

$$V_0 = (V_1 - V_2) / [(p_0 / p_1) - (p_0 / p_2)] \quad (1)$$

式中:  $V_1 - V_2$  为作动器全行程所需要的体积,  $V_1 - V_2 = D \times s$ 。

### 1.2.2 绝热条件下的计算公式

考虑温度变化对气体的影响时,依据范德瓦

斯方程式  $pV^n=C^{[13]}$ , 其中  $n$  为气体充放压指数,  $C$  为常量, 此时的容积估算公式相对式(1)增加了参数  $n$ , 依据上述方程可以推导出容积的计算结果。

快充快放条件下(绝热状态)蓄能器容积计算公式<sup>[14]</sup>为

$$V_0=(V_1-V_2)/[(p_0/p_1)^{1/n}-(p_0/p_2)^{1/n}] \quad (2)$$

慢充快放条件下蓄能器容积计算公式<sup>[14]</sup>为

$$V_0=(V_1-V_2)/\{(p_0/p_1)^{1/n}-[(p_2/p_1)^{1/n}-1]\} \quad (3)$$

式中:  $V_0$  为蓄能器总容积;  $p_0$  为充气压力;  $p_2$  为系统额定工作压力;  $p_1$  为系统最低工作压力;  $n$  为充放压指数。

充放压指数与气体的压缩、膨胀过程有关, 等温过程(即变化过程非常缓慢, 气体温度保持恒定)则取 1, 绝热过程(即变化过程非常迅速, 气体与外界无热交换)则取 1.4<sup>[14]</sup>。蓄能器的实际充放压过程不是绝对的等温或绝热过程, 而是一种介于二者之间的多变过程, 充放压指数实际上是一个不确定的值。

式(1)~式(3)的计算结果可以作为蓄能器初始仿真阶段的参考值。

### 1.2.3 温度变化对蓄能器的影响

对充气式蓄能器而言, 气腔与液腔通常是相互隔离的两个腔体, 环境温度的不同使封闭在气腔内的气体体积发生变化, 继而因气体的膨胀或收缩产生气体压力变化, 因此蓄能器必须依据不同的环境温度设置不同的预充气压力, 使得气腔内的压力适应环境温度的变化。

依据克拉伯龙理想气体方程式<sup>[13]</sup>:

$$pV=NRT \quad (4)$$

式中:  $p$  为气体压力;  $V$  为气腔体积;  $N$  为气体数量;  $R$  为气体常数;  $T$  为绝对温度。

假设气体温度由  $T_1$  升高或降低到  $T_2$ , 压力由  $p_1$  变化为  $p_2$ , 蓄能器中气腔内的气体数量  $N$  不变, 气腔体积  $V$  不变, 依据上述方程式推导出气腔内压力变化公式如下:

$$p_2=p_1T_2/T_1 \quad (5)$$

## 2 某舵面应急型充气式蓄能器参数初步估算

以某型飞机舵面应急型充气式蓄能器容积估

算为例, 该蓄能器在泵源失效后, 为舵面作动器提供一定的应急能源, 驱动舵面完成必要的应急动作。

应急作动要求作动器可在 2 s 内完成 1 次往复作动, 飞机液压系统及舵面作动器的主要设计参数如表 1 所示。

表 1 液压系统及舵面主要设计参数  
Table 1 Main design parameters of hydraulic system and rudder surface

参数	数值	备注
系统额定工作压力 $p_2$ /psi	3 000	1 psi=0.006 9 MPa
系统最低工作压力 $p_1$ /psi	2 200	—
蓄能器充气压力 $p_0$ /psi	1 980	依据经验选取 (0.5~0.9)× $p_1$
舵面作动筒直径 $D_t$ /m	0.08	—
舵面作动杆直径 $D_w$ /m	0.02	—
舵面作动筒横截面积 $S$ /m <sup>2</sup>	0.005	—
舵面作动器行程 $s$ /m	0.1	—
蓄能器的有效容积 $\Delta V$ /m <sup>3</sup>	0.000 5	$V_1-V_2=\Delta V$ , $\Delta V=D \times s$
舵面作动器负载/N	20 100	—
舵面作动器阻尼/ [(N·s)·m <sup>-1</sup> ]	78	最大地面阵风载荷
恒压变量泵最大输出流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	65	额定压力 3 000 psi
泵额定工作压力/psi	3 000±50	—
泵额定排量/(cm <sup>3</sup> ·r <sup>-1</sup> )	39.688	—
泵额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	5 300	—

在 2 s 内完成 1 次往复作动, 即每秒完成 1 个作动行程, 作动器行程  $s$  为 0.1 m, 作动筒作动速度应不小于  $v=0.1$  m/s, 故设定蓄能器输出流量为  $v \times S=0.1 \times 0.005=30$  L/min。

### 2.1 蓄能器容积估算

该舵面蓄能器为应急型蓄能器, 预充气压力  $p_0$  选取 0.9 倍的系统最低工作压力  $p_1$ , 即  $p_0=1 980$  psi, 取充放压指数  $n$  为 1.4, 分别用式(1)、式(2)、式(3)对其容积结果进行计算, 计算结果如表 2 所示。

表2 容积估算结果  
Table 2 Volume estimation results

公式编号及条件	计算公式	计算结果/L
公式 1(等温条件)	$V_0 = (V_1 - V_2) / (p_0/p_1 - p_0/p_2)$	2.0
公式 2(快充快放)	$V_0 = (V_1 - V_2) / [(p_0/p_1)^{1/n} - (p_0/p_2)^{1/n}]$	2.7
公式 3(慢充快放)	$V_0 = (V_1 - V_2) / \{ (p_0/p_1)^{1/n} - [(p_2/p_1)^{1/n} - 1] \}$	1.0

## 2.2 蓄能器充气时间估算

假设泵输出流量恒定,依据蓄能器容积以及输入流量可以粗略估算充压时间,若蓄能器容积为 2.7 L,其充压时间为 2.5 s,依据文献[15],蓄能器实际所需的最短充压时间为理论计算值的 2 倍。

2.7 L 容积的蓄能器在充压阶段的流量压力曲线如图 2 所示,由于气体压缩的反作用力,蓄能器的输入流量呈逐步下降的趋势<sup>[16]</sup>,当蓄能器输入流量降至 0 时,蓄能器完成充压,压力达到系统额定 3 000 psi 至少需要 6 s 时间,故蓄能器充气时间选取 6 s。

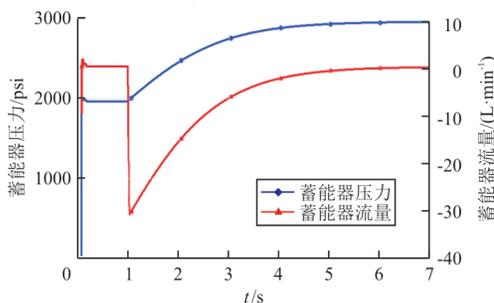


图2 2.7 L 蓄能器充压流量压力曲线  
Fig. 2 Compression flow and pressure curve of 2.7 L accumulator

## 2.3 蓄能器出口处节流阀设定

为避免蓄能器输出流量时,过早过急地将储存油液排出,蓄能器的出口通常设置有节流阀,用以控制蓄能器的流量输出。

参考作动器流量需求,蓄能器节流阀设定为额定流量  $q=30$  L/min,最大压差  $\Delta p=120$  psi, Hypneu 中节流阀需设定  $K_v$  流量系数值,  $K_v = q/\sqrt{\Delta p}$ ,经调整计算  $K_v$  值可选取 0.2。

## 2.4 蓄能器参数初步设定

基于理论计算方法的蓄能器初步估算参数汇

总如表 3 所示。

表3 蓄能器初步估算参数  
Table 3 Preliminary estimated parameters of the accumulator

参数	数值
蓄能器容积/L	2.7、2、1
蓄能器充气压力值/psi	1 980
蓄能器充气时间/s	6
蓄能器节流阀流量参数 $K_v$	0.2
蓄能器充放压指数 $n$	1.4

## 3 基于 Hypneu 的建模仿真

正常状况下,系统中恒压变量泵开启后,泵持续输出流量至舵面应急型蓄能器的液压腔,直至蓄能器液端入口流量为 0,蓄能器完成充压,此后应急型蓄能器处于备份状态,当恒压变量泵失效后,应急型蓄能器为舵面作动器提供压力流量。

基于以上工作原理,建立仿真模型如图 3 所示,通过 Hypneu 中的信号模拟模块控制泵的启停以及三位换向阀。通过控制换向阀中位的开闭实现蓄能器充压和释压,通过切换换向阀的左右位控制作动器作动杆的伸出与收回。

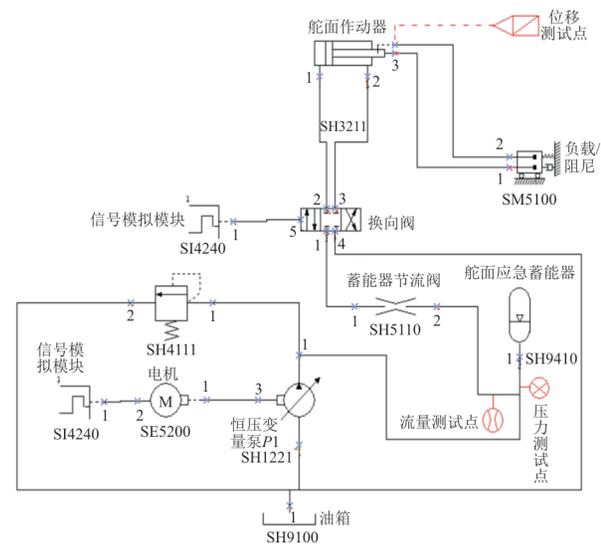


图3 蓄能器仿真模型图  
Fig. 3 Accumulator simulation model diagram

### 3.1 基于理论计算值的初步仿真

依照表 3 设定仿真模型中蓄能器容积为 2.7 L,蓄能器预充气压力为 1 980 psi,充气指数  $n$  为 1.4。

设定仿真环境温度为 23 ℃,执行仿真动作流程如表 4 所示,分析 6~8 s 间的相关动作,判断蓄能器能否驱动舵面作动器完成一次往复运动。

表 4 仿真时间动作表  
Table 4 Simulation time action table

仿真时间/s	操作	备注
0~6	换向阀处于关闭状态,恒压变量泵持续对蓄能器进行充压	6 s 结束时蓄能器完成充压
6~7	关闭恒压变量泵控制换向阀至左位	蓄能器持续输出流量作动器作动杆伸出
7~8	控制换向阀至右位	蓄能器持续输出流量作动器作动杆收回
9	控制换向阀关闭	—

作动器在 6~8 s 处的伸出长度仿真曲线如图 4 所示,在收回过程中,作动器于 7.5 s 停止在 4 cm 处。

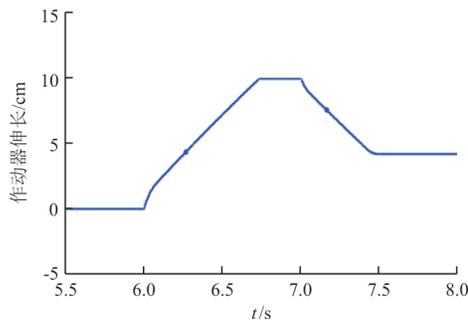


图 4 6~8 s 作动器伸出长度仿真曲线  
Fig. 4 Simulation curve of the extension length of 6~8 s actuator

蓄能器在 6~8 s 处的输出流量/压力仿真曲线图如图 5 所示,在 7.5 s 前,蓄能器内的油液已全部输出,输出流量和压力均降到 0,故初始蓄能器的参数配置不能满足作动要求。

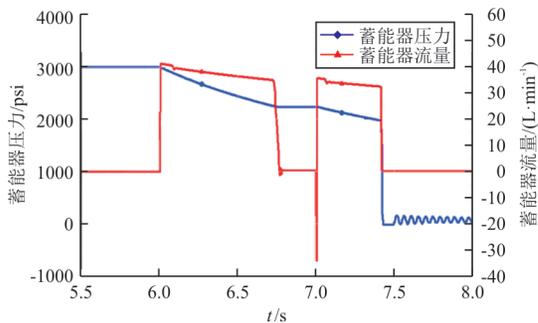
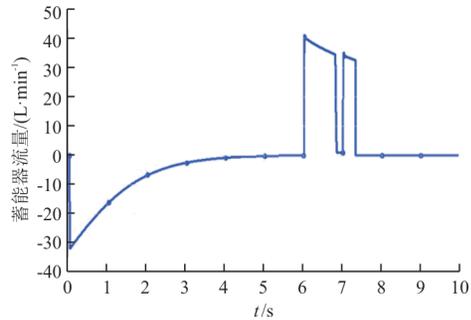


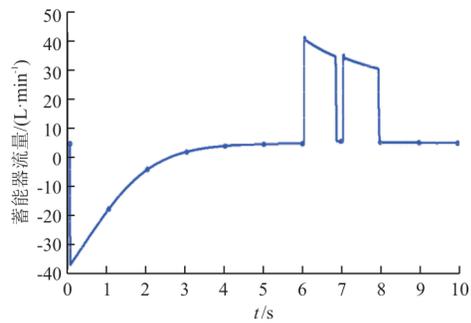
图 5 6~8 s 蓄能器输出流量/压力仿真曲线  
Fig. 5 6~8 s accumulator output flow/pressure simulation curve

### 3.2 预充气压力值的优化

蓄能器初始充入流量对比如图 6 所示,预充气压力值分别为 1 980、1 540 psi 时,蓄能器初始充入流量大小分别为 31 和 48 L/min,充入流量的归零时间均为 6 s 左右,因此选用较小预充气压力的蓄能器可以增加蓄能器的初始充入流量。



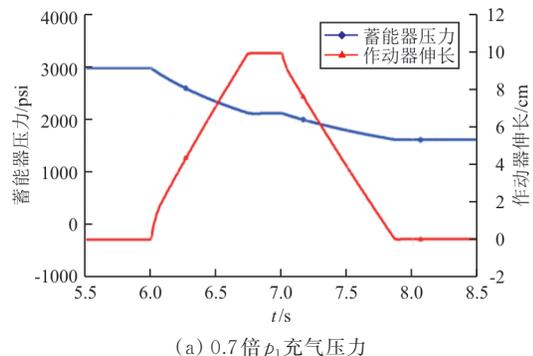
(a) 预充气压力 1 980 psi



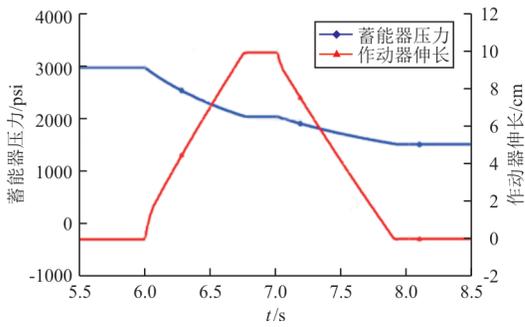
(b) 预充气压力 1 540 psi

图 6 蓄能器初始充入流量对比  
Fig. 6 Comparison of the initial charging flow of the accumulator

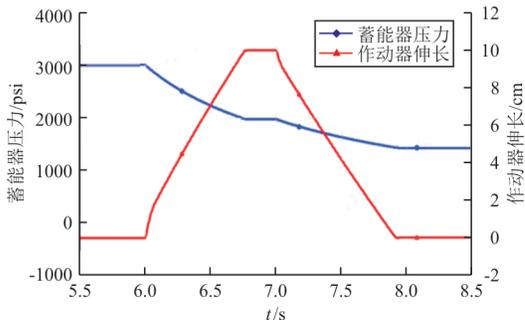
不同预充气压力下(分别取 0.7、0.6、0.5、0.4 倍的  $p_1$ )的蓄能器仿真结果如图 7 所示,可以看出:所有作动器均可完成 1 次往复作动,但随着预充气压力的降低蓄能器输出压力逐步降低,作动器速度逐步变慢,取 0.4 倍的  $p_1$  时,作动器已不能在 2 s 内完成 1 次往复作动。



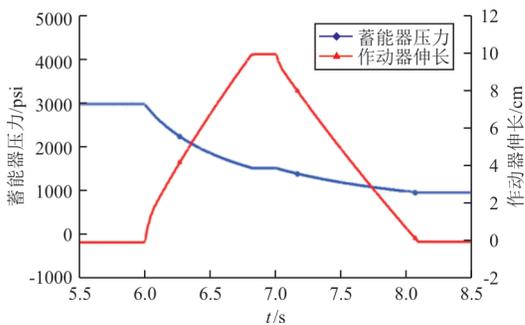
(a) 0.7 倍  $p_1$  充气压力



(b) 0.6 倍  $p_1$  充气压力



(c) 0.5 倍  $p_1$  充气压力



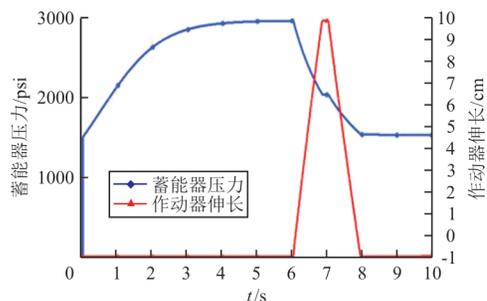
(d) 0.4 倍  $p_1$  充气压力

图 7 不同充气压力下蓄能器仿真结果

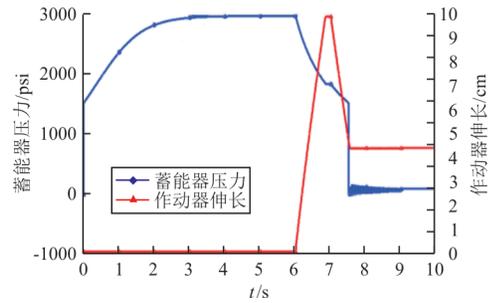
Fig. 7 Simulation results of accumulator under different charging pressures

### 3.3 容积的优化

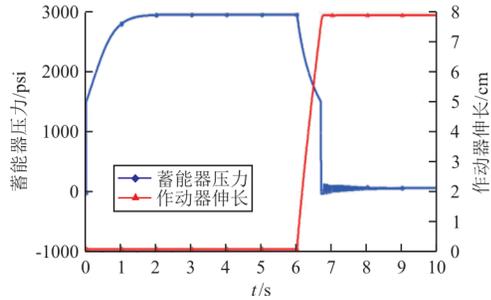
为满足机上蓄能器轻量化要求,应尽量选用较小的容积值,选取 0.7 倍的  $p_1$  (系统最低工作压力) 作为预充气压力值,分别选用容积 2.7、2、1 L 进行仿真,仿真结果如图 8 所示。



(a) 2.7 L 容积仿真结果



(b) 2 L 容积仿真结果



(c) 1 L 容积仿真结果

图 8 不同容积下蓄能器仿真结果

Fig. 8 Simulation results under different volumes

从图 8 可以看出:1、2 L 容积的蓄能器均不能满足作动要求。

对 2 L 容积的蓄能器,逐步降低其预充气压力,直到其可以完成一次往复作动,经多次仿真测试,当蓄能器预充气压力降为 1 200 psi 时,可以完成一次往复作动,仿真结果如图 9 所示。

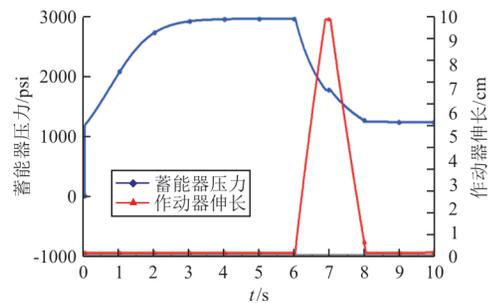


图 9 2 L 容积 1 200 psi 预充气压力仿真结果

Fig. 9 Simulation results for volume 2 L/pre-charge pressure 1 200 psi

为进一步减少蓄能器容积,继续降低蓄能器容积至 1.9 L,预充气压力为 1 200 psi,仿真结果如图 10 所示,可以看出:作动器无法完成收回动作。降低蓄能器预充气压力到 1 100 psi,仿真结果如图 11 所示,可以看出:作动器可以完成往复作动,但作动时间大于 2 s,不能满足作动时间要求。

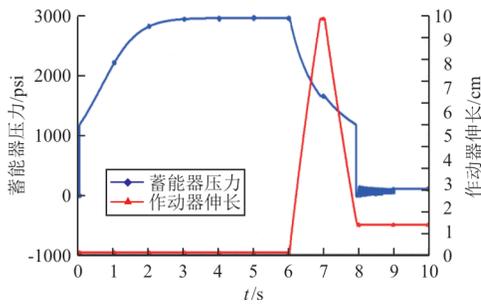


图 10 容积为 1.9 L/预充气压力 1 200 psi 仿真结果  
Fig. 10 Simulation results for 1.9 L/pre-charge pressure 1 200 psi

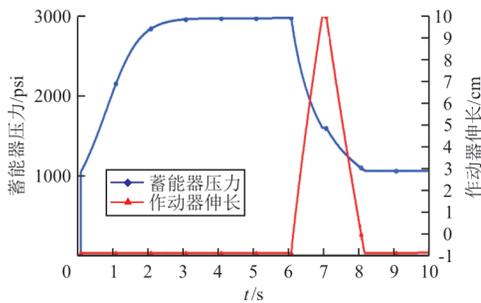


图 11 容积为 1.9 L/预充气压力 1 100 psi 仿真结果  
Fig. 11 Simulation results for 1.9 L/pre-charge pressure 1 100 psi

综上所述,环境温度 23 °C,容积 2 L,预充气压力 1 200 psi,为该型蓄能器的最优仿真参数。

依据式(5)可推算出蓄能器在飞机环境温度范围下(-40 °C~60 °C)的预充气压力,本例蓄能器预充气压力如表 5 所示,表中的环境温度与预充气压力取一定的公差范围便于外场维护。

表 5 蓄能器预充气压力表

Table 5 Hydraulic accumulator pre-charge pressure

环境温度/°C	预充气压力/psi
-40~-28	900~1 000
-28~-15	950~1 050
-15~-3	1 000~1 100
-3~10	1 050~1 150
10~23	1 100~1 200
23~35	1 150~1 250
35~48	1 200~1 300
48~60	1 250~1 350

#### 4 蓄能器关键参数选型方法

本文提出的充气式蓄能器关键参数的选型方法如图 12 所示。蓄能器参数的优化是一个迭代优化过程,第一次仿真时,蓄能器容积值应取理论计

算容积值的最大值,依据仿真曲线能否满足作动要求,逐步优化蓄能器容积,调整预充气压力。每一次优化,蓄能器的容积以及预充气压力都会有所降低,优化至蓄能器参数无法满足作动要求时,记录上一次的容积和预充气压力值即为本次参数选型的最优值。

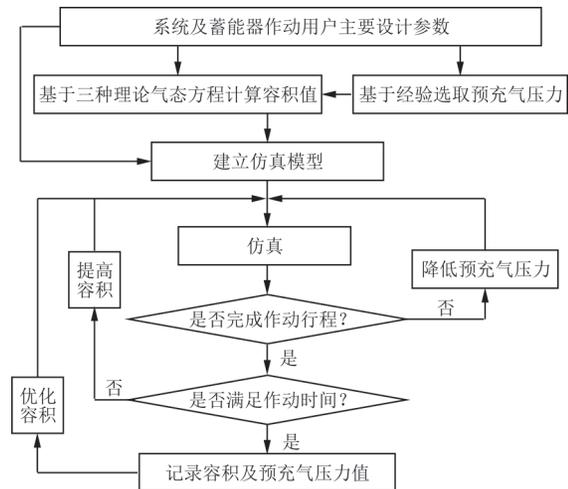


图 12 充气式蓄能器关键参数的选型方法

Fig. 12 Accumulator key parameter selection method

#### 5 机上地面试验记录结果分析

选用某型额定预充气压力 1 200 psi,额定容积 2 L 的充气式蓄能器作为该型飞机舵面应急型蓄能器,进行舵面作动试验。

采集记录的蓄能器输出流量/压力以及舵面作动器位移曲线如图 13 所示。

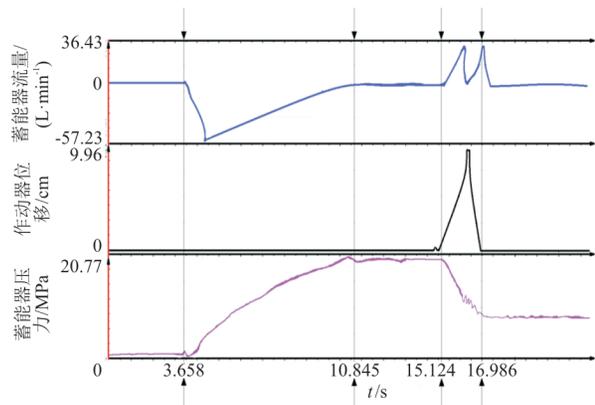


图 13 机上地面试验数据采集曲线

Fig. 13 3-channel data collection results

从图 13 可以看出:恒压变量泵约在 3.685 s 时开启,蓄能器开始充压,在 10.845 s 处蓄能器出口流量接近 0,充压时间约 7.2 s,与 2.2 节仿真结果

预计的充压时间 6 s 接近;蓄能器在 15.124 s 时开始输出压力,与此同时操纵作动器进行伸出收回的往复动作,作动器于 16.986 s 时完成一次往复动作。

应急作动要求在 2 s 以内完成一次往复动作,本次试验中的往复动作耗时约 1.8 s,因此该蓄能器满足舵面应急作动要求。

## 6 结 论

(1) 本文蓄能器仿真以及试验所验证的最优预充气压力与预充气压力经验值存在接近 700 psi 的偏差,依据蓄能器用途选取的预充气压力仅能作为初始仿真阶段的参考值。

(2) 适当降低预充气压力可以增加蓄能器的有效容积,延长输出流量的时间,但会降低蓄能器的输出压力,继而降低作动器的运动速度,应选择合适的预充气压力,在蓄能器输出流量和输出压力间找到平衡点。

(3) 蓄能器的最优容积与理论计算容积存在一定偏差,但仍在 3 个理论计算容积结果的范围内,3 个理论计算容积可作为初始仿真阶段的参考值。

(4) 本方法已成功应用于某型机舵面应急型充气式蓄能器选型,试验结果表明经本方法选型的蓄能器可以满足作动用户要求,能够为类似充气式蓄能器设计选型工作提供参考。

### 参考文献

- [1] 史纪定. 胶囊式蓄能器充气压力与容量选择[J]. 装备维修技术, 2000, 96(2): 34-37.  
SHI Jiding. Inflation pressure and capacity selection of capsule accumulator [J]. Equipment Technology, 2000, 96(2): 34-37. (in Chinese)
- [2] Society of Automotive Engineers. Aerospace-design and installation of commercial transport aircraft hydraulic systems: ARP4752B [S]. US: Society of Automotive Engineers, 2013. (in Chinese)
- [3] Society of Automotive Engineers. Accumulators, hydraulic, cylindrical, aircraft, maintenance free, factory precharged: ARP4378[S]. US: Society of Automotive Engineers, 2002.
- [4] Society of Automotive Engineers. Aerospace-accumulator, hydraulic, cylindrical, piston separated: ARP4379 [S]. US: Society of Automotive Engineers, 2016.
- [5] Society of Automotive Engineers. Accumulator, hydraulic, cylindrical aircraft, self-displacing: ARP4553[S]. US: Society of Automotive Engineers, 2002.
- [6] 郑占君. 某民用飞机应急刹车系统蓄压器性能仿真计算分析[J]. 科技资讯, 2011(27): 62-63.  
ZHENG Zhanjun. Simulation calculation and analysis of accumulator performance of emergency braking system of a civil aircraft [J]. Science & Technology Information, 2011(27): 62-63. (in Chinese)
- [7] 刘仁志, 吴海荣, 王岩. 液压蓄能器的改进[J]. 飞机设计, 2017, 37(5): 38-41.  
LIU Renzhi, WU Hairong, WANG Yan. Brief introduction of hydraulic accumulator [J]. Aircraft Design, 2017, 37(5): 38-41. (in Chinese)
- [8] 李新德, 董学勤. 谈谈蓄能器的充气[J]. 液压气动与密封, 2012, 32(11): 55-57.  
LI Xinde, DONG Xueqin. Talk about accumulator inflation [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012, 32(11): 55-57. (in Chinese)
- [9] 危书涛, 汪睿. 隔膜式蓄能器预充气压力试验研究[J]. 液压气动与密封, 2017, 37(7): 34-36.  
WEI Shutao, WANG Rui. Experimental study on pre-charged gas pressure of diaphragm accumulator [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2017, 37(7): 34-36. (in Chinese)
- [10] JOJI P. Design of industrial hydraulic systems [M]. US: Amazon Digital Services LLC-KDP Print, 2020.
- [11] JOJI P. Industrial hydraulic systems and circuits: basic level [M]. US: Amazon Digital Services LLC-KDP Print, 2020.
- [12] 董蒙, 栾希亭, 梁俊龙, 等. 气囊式蓄能器吸收脉动的动态特性分析[J]. 液压与气动, 2019(5): 109-116.  
DONG Meng, LUAN Xiting, LIANG Junlong, et al. Dynamic characteristics analysis of absorbing pulsation for bladder accumulator [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019(5): 109-116. (in Chinese)
- [13] 成大先. 机械设计手册: 液压控制 [M]. 单行本. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.  
CHENG Daxian. Mechanical design manual: hydraulic transmission [M]. Single Page. 5th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [14] 陈慧慧, 吴楠, 陈星, 等. 防喷器控制装置用蓄能器的液量计算的优化[J]. 液压与气动, 2020(4): 136-139.  
CHEN Huihui, WU Nan, CHEN Xing, et al. Optimization of the calculation of accumulator liquid volume for BOP control system [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(4): 136-139. (in Chinese)
- [15] FITCH E C, HONG I T. Hydraulic system modeling and simulation [M]. 2nd ed. US: BarDyne, 2004.
- [16] PETER C. Principles of hydraulic systems design [M]. 2nd ed. US: Momentum Press, 2014.

### 作者简介:

朱海龙(1989—),男,学士,中级工程师。主要研究方向:民用飞机液压系统设计。

张倩(1987—),女,硕士,中级工程师。主要研究方向:电液伺服作动系统设计。

肖晓蕾(1993—),女,硕士,中级工程师。主要研究方向:民用飞机液压系统设计。

张朋(1993—),男,学士,中级工程师。主要研究方向:民用飞机液压系统设计。

(编辑:丛艳娟)