

低温贮箱多路管道增压的一种模糊算法研究

王赞社¹, 顾兆林², 赵红轩³, 王广飏³

(1 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049; 2 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049; 3 西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 火箭发动机地面试验中, 低温推进剂贮箱增压过程的传热、传质以及湍流流动过程十分复杂。贮箱增压系统具有非线性、时间滞后、参数变化不确定等特点, 对增压系统难以建立精确的数学模型。因此, 以低温推进剂贮箱内压力稳定为目的, 提出了采用多路、不同直径管道增压的模糊控制方案; 应用模糊控制算法中的最大隶属度法进行解模糊化, 制定增压管路的模糊控制表, 建立了以压力为控制变量的模糊控制器。分别对预增压过程和保持增压过程的两种工况进行了仿真。仿真结果表明: 模糊控制算法能有效提高推进剂贮箱中压力调节的控制精度和响应速度, 使得离开贮箱的推进剂压力稳定地满足发动机泵入口的压力和净吸程要求。

关键词: 贮箱增压; 模糊控制算法; 最大隶属度

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2008) 02-0007-07

Research on fuzzy control algorithm of cryogenic propellant-tank pressurization

Wang Zanshe¹, Gu Zhaolin², Zhao Hongxuan³, Wang Guangbiao³

(1 School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2 School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3 Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: In the rocket engine ground experiments, the cryogenic propellant tank ressurization is associated with complex heat transfer, mass transfer and turbulent flow. Characterized by the nonlinear and real-time system with considerable uncertainty, the accurate mathematic model of the control system of tank pressurization is quite difficult to be established. Based on steady pressure in

收稿日期: 2007-09-30; 修回日期: 2007-12-16。

作者简介: 王赞社 (1980—), 男, 博士研究生, 研究领域为制冷与低温工程。

the tank, the pressure in the air cushion is set as the control target parameter in the system of tank pressurization with multi-pipes of different sizes. Using the algorithm of maximum degree of membership, the fuzzy control table of multi-pipes pressurization is set up; the fuzzy controller of pressure parameter is built. Furthermore, two work condition of prep-pressurization and retain pressurization were simulated, the new fuzzy control system of tank pressurization can improve the control precision and the response speed significantly, and therefore, satisfy the strict demands on the pressure and net suction head in the entrance of the rocket engine.

Key words: tank pressurization; fuzzy control algorithm; maximum degree of membership

1 引言

火箭发动机地面试验中,为了确保发动机入口压力和流量的稳定性,需要给低温推进剂贮箱进行增压,然而,增压气体一般为高压常温的氮气,在增压过程中低温推进剂贮箱内气体处于强湍流流动过程和复杂换热过程,其传热、传质过程十分复杂,要获得低温推进剂贮箱增压过程的精确数学模型是十分困难的。尽管有文献对贮箱的增压过程进行了不同角度的研究,建立了各种模型^[1,2],但基本上是建立在较大简化和假设基础之上。因此,增压气体流量的控制一般需要在实际应用中依靠实验来确定。

模糊控制是以模糊数学为基础。模糊控制的核心是在于它用具有模糊性的语言条件语句,作为控制规则去执行控制,控制规则往往来源于对被控过程十分熟悉的专业人员^[3]。在增压过程的实际过程中,操作人员往往是根据现场观察到的贮箱压力来决定所实施的增压策略。而模糊控制的实质是将基于专家知识的控制策略转换为自动控制的策略。在一些复杂系统,特别是系统存在定性的、不精确和不确定信息的情况下,模糊控制的效果常优于常规的控制^[4]。

因此,运用模糊控制中最大隶属度法建立模糊控制查询表。并通过对两种增压过程的模拟对模糊控制算法进行了仿真验证。仿真结果表明,

模糊控制算法能有效的提高贮箱压力的控制精度和响应速度。

2 贮箱增压过程分析

影响推进剂贮箱内压力变化的主要因素有供液流量、增压气体的温度和流量、贮箱增压系统的热量传递以及质量传递^[5]。在气相空间内,热量传递包括增压气体和气相空间内气体的混合及热交换;气相气体与推进剂液体表面之间的热交换;气相气体与贮箱壁之间的热交换。质量传递主要是指气相气体与推进剂液体表面的传质。传质速率取决于气液界面中液相和气相之间的压力差或浓度差、传质表面积和传质系数^[6],其中压力差就是液相表面的饱和蒸气压与气相中的气体分压之差,传质系数取决于液相表面的流速、表面积和 Schmidt 数^[7]。

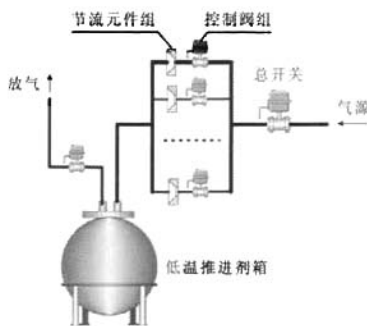


图 1 增压系统原理图

Fig.1 Schematic of tank pressurization process

图 1 所示为增压系统原理图, 通过总管路后的高压增压气源被分为若干个不同管径的支路。其中每个支路都安装有不同尺寸的节流元件, 通过每个节流元件的增压气体流量不同。对这些不同尺寸的节流元件进行组合可以得到贮箱气相空间的增压流量需求, 通过建立模糊控制算法和控制策略就可以选择所需的增压气体流量。

3 模糊控制器设计

3.1 模糊控制器的组成

模糊控制器包括 3 部分: 模糊化, 模糊推理, 解模糊化。图 2 所示为运用模糊控制策略建立的二维模糊控制器, 属于双输入单输出系统。其中 K_u 为模糊控制器的比例因子, K_e 和 K_{e_c} 为量化因子。在实际控制中, 由于采样时间一般很短, 很难在如此短时间内完成模糊推理, 解模糊化等工作。因此, 采用离线设计模糊控制器, 得到一个由输入论域到输出论域的模糊控制查询表。



图 2 模糊控制器的组成

Fig.2 Schematic of fuzzy controller

贮箱的压力值与设定值进行对比计算, 产生误差 e 和误差变化率 e_c , 经过限幅和量化处理后进行模糊化处理, 经过基于 Mamdani 的 Max-Min 复合运算的模糊推理后产生控制变量 U , 然后采用最大隶属度法进行解模糊处理, 产生实际的控制参数 u 。

目前解模糊的方法常用有四种, 即最大隶属度法、加权平均法、中位数判决法、平均最大隶属度法^[9]。最大隶属度法这种方法比较简单, 只要在推理结论的模糊集合中取隶属度最大的那个元素作为输出量即可, 并且要求这种情况下其隶属函数曲线一定是正规凸模糊集合 (即其曲线只能是单峰曲线)。

3.2 确定输入输出变量

输入变量分别为误差 e 和误差变化率 e_c , 输出变量为 u , 模糊语言变量分别为 E (压力偏差)、 E_c (压差变化率) 和 U (增压气体流量)。

$$e(k) = y(k) - r(k)$$

$$e_c(k) = e(k) - e(k-1)$$

式中: $r(k)$ 为贮箱压力设定值; $y(k)$ 为贮箱压力实际值。

3.3 确定模糊控制规则

取 E 和 E_c 的论域为 $[-6, 6]$, U 的论域为 $[0, 12]$ 。分别划分为 7 个等级, 模糊子集分别如下:

$$E = \{N_B, N_M, N_S, Z_0, P_S, P_M, P_B\}$$

$$E_c = \{N_B, N_M, N_S, Z_0, P_S, P_M, P_B\}$$

$$U = \{N_B, N_M, N_S, Z_0, P_S, P_M, P_B\}$$

模糊语言变量为: N_B (负大), N_M (负中), N_S (负小), Z_0 (零), P_S (正小), P_M (正中), P_B (正大)。

常用的隶属函数形式有三角形、梯形、高斯形、指数形等。三角形和梯形隶属函数容易建立, 计算速度快; 高斯形和指数形更符合一些特征的实际分布, 但方程参数多, 建立困难且计算速度较差^[9]。输入变量 E 和 E_c 以及输出变量 U 的隶属函数均选用三角形函数 (见图 3、图 4)。其中在压力误差较大时采用了较低分辨率的隶属函数, 而在压力误差较小比如取 Z_0 (零) 时, 采用较高分辨率的隶属函数。隶属函数这样选取的目的是使得模糊控制对于对象参数变化的适应性较强, 即鲁棒性好。

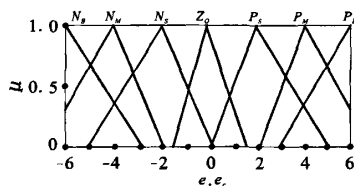


图 3 偏差 E 、变化率 E_c 的隶属函数

Fig.3 Degree of membership of E and E_c

基于手动控制策略的总结, 由双输入单输出的模糊条件语句得出 $7 \times 7 = 49$ 条模糊控制规则语句。如:

if $E=N_B$ and $E_C=N_B$ then $U=P_B$

... ..

if $E=P_B$ and $E_C=P_B$ then $U=N_B$

得到的模糊控制规则如表 1 所示。

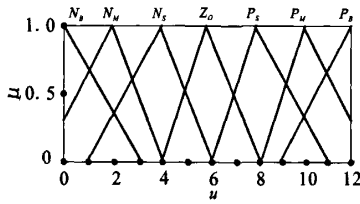


图 4 控制变量 U 的隶属度函数

Fig.4 Degree of membership of U

表 1 模糊控制规则表

Tab.1 Fuzzy control rules

E_c	E						
	N_B	N_M	N_S	Z_0	P_S	P_M	P_B
N_B	P_B	P_B	P_B	P_M	P_S	Z_0	N_S
N_M	P_B	P_B	P_M	P_S	Z_0	Z_0	N_S
N_S	P_B	P_M	P_M	Z_0	Z_0	N_S	N_M
Z_0	P_B	P_M	P_S	Z_0	N_S	N_M	N_M
P_S	P_M	P_S	Z_0	N_S	N_S	N_M	N_B
P_M	P_S	Z_0	Z_0	N_S	N_M	N_B	N_B
P_B	Z_0	Z_0	N_S	N_M	N_B	N_B	N_B

3.4 限幅及量化处理

确定每个变量的论域后，必须先经过限幅处理，再经过量化处理就得到偏差量 e 、偏差变化率 e_c 、控制参数 u 的比例因子 K_e 、 K_{e_c} 、 K_u 以及其控制量 E 、 E_c 、 U 的值^[10]。

$$K_e = \frac{6 - (-6)}{e_{\max} - e_{\min}}$$

$$K_{e_c} = \frac{6 - (-6)}{e_{c,\max} - e_{c,\min}}$$

$$K_u = \frac{12 - 0}{u_{\max} - u_{\min}}$$

$$E(k) = \text{INT} \left[K_e \times \left(e(k) - \frac{e_{\max} + e_{\min}}{2.0} \right) \pm 0.5 \right]$$

$$E_c(k) = \text{INT} \left[K_{e_c} \times \left(e_c(k) - \frac{e_{c,\max} + e_{c,\min}}{2.0} \right) \pm 0.5 \right]$$

$$U(k) = \text{INT} \left[K_u \times \left(u(k) - \frac{u_{\max} + u_{\min}}{2.0} \right) \pm 0.5 \right]$$

其中： e_{\max} 、 e_{\min} 分别为压力的最大偏差和最小偏差； $e_{c,\max}$ 、 $e_{c,\min}$ 分别为压力的最大偏差变化率和最小偏差变化率； u_{\max} 、 u_{\min} 分别为增压流量的最大值和最小值。

4 模糊控制查询表的建立

4.1 建立模糊关系

采用直接求取法从控制规则和推理语句中求取控制量。对于 49 条控制规则语句的任意一条：

if $E=A_i$ and $E_C=B_j$ then $U=C_{ij}$

对模糊量求内积，有模糊关系：

$$R_{ij} = U A_i \times B_j \times C_{ij}$$

$$i=7, j=7$$

$$\mu_R(a, b, c) = \bigvee_{i=1, j=1} \mu_{A_i}(a) \wedge \mu_{B_j}(b) \wedge \mu_{C_{ij}}(c)$$

$$\forall a \in A, \forall b \in B, \forall c \in C$$

其中： $i=1, 2, \dots, 7$ ； $j=1, 2, \dots, 7$ ； A_i 、 B_j 、 C_{ij} 分别是偏差，偏差变化率，控制量的语言变量值； a 、 b 、 c 分别是偏差，偏差变化率，控制量的论域； μ 为隶属度函数值。

$$i=7, j=7$$

$$\text{总的模糊关系为 } R = \bigvee_{i=1, j=1} U R_{ij}$$

4.2 控制量模糊集合的计算

将 E 和 E_c 量化为其论域中的某个等级，如 E 量化为第 i 级 A_i ， E_c 量化为第 j 级 B_j ，即

$A_i = [0, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]$ 第 i 个元素为 1，其余为 0

$B_j = [0, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]$ 第 j 个元素为 1，其余为 0

控制量输出 C_{ij} 为：

$$C_{ij}^* = (A_i^* \times B_j^*) \circ R_{ij}$$

其中，“ \circ ” 为 max-min 合成运算。

$$i=7, j=7$$

$$\mu_{C_{ij}} = \bigwedge_{i=1, j=1} (\mu_{A_i}(a), \mu_{B_j}(b), \mu_{C_{ij}})$$

总的控制输出量为：

$$\dot{C} = \bigcup_{i=1, j=1}^{i=7, j=7} C_{ij}$$

$$\mu_C = \bigcup_{i=1, j=1}^{i=7, j=7} \mu_{C_i}$$

4.3 解模糊计算精确量

对于控制输出量 \dot{C} , 求出其最大隶属度对应

的元素, 就是所需的精确控制量。这个精确控制量就是输入为 A^* 和 B^* 时的控制量。

通过离线编程计算上面的步骤, 可以求得模糊控制查询表, 即由 $E(k)$, $E_c(k)$ 直接查询“查询表”就获得了控制量的量化值。程序计算得到的查询表如表 2 所示。

表 2 模糊控制器查询表
Tab.2 Fuzzy controller polling list

E_c	E												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	12	12	12	12	12	12	10	9	8	9	6	4	4
-5	12	12	12	12	12	12	11	9	9	9	6	4	4
-4	12	12	12	12	10	11	8	7	6	6	6	4	4
-3	12	12	11	12	11	11	6	7	6	6	4	2	2
-2	12	12	10	12	10	11	6	7	6	6	4	2	2
-1	12	12	11	12	11	11	7	7	7	7	5	3	3
0	12	12	10	12	8	9	6	5	4	4	2	2	2
1	11	11	9	11	4	4	5	5	5	5	2	1	1
2	10	11	8	10	6	7	4	5	4	4	2	1	0
3	11	11	9	11	6	7	4	5	4	4	2	0	0
4	8	9	6	8	6	7	4	3	2	2	0	0	0
5	6	6	6	6	4	5	2	1	0	0	0	0	0
6	6	6	6	6	4	5	2	1	0	0	0	0	0

表 2 中得到的控制量 U 是偏差 E 和偏差变化 E_c 处于不同状态时增压气体流量的值, 这些增压气体流量是由不同直径管道或多路不同直径管道组合后获得的。控制量 U 经过模糊控制器来控制相应的增压管路阀门的开启或关闭。

根据表 3 所示的贮箱参数, 粗略估算贮箱增压时需要的流量, 增压管路选用 4 路不同管径的增压管道, 节流元件采用递增尺寸的节流元件。尺寸分别为: $\Phi 8.0$, $\Phi 13.0$, $\Phi 20.0$, $\Phi 20.0\text{mm}$, 可以组合成具有不同增压流量的增压管路, 满足系统的调节要求。

间内的增压过程建立了简易数学模型。鉴于篇幅的限制, 只列出了气相空间的三个基本方程。

5.1.1 连续性方程

$$\frac{dm}{d\tau} = \frac{dm_1}{d\tau} + \frac{dm_2}{d\tau} \tag{1}$$

式中, m_1 为气相中氮气质量; m_2 为气相中氧气质量。

5.1.2 实际气体的状态方程

$$p = Zp(R/M)T \tag{2}$$

5.1.3 能量守恒方程

$$\Delta E = \sum h_{in} \cdot \Delta m_{in} - \Delta Q \tag{3}$$

气相空间内能的变化量等于流入到气相空间的能量减去向容器壁面和液氧表面的传热量。

5.2 数学模型求解

对式 (1) ~ (3) 进行整理简化, 得到关于

5 仿真计算及讨论

5.1 仿真数学模型

为了模拟气相空间内的压力变化, 对气相空

时间、增压气体流量、气相温度、气相压力的微分方程组，采用四阶 Runge-Kutta 算法进行求解计算，得到气垫内的温度、压力、增压流量等参数随时间的变化值。

模型所需的相关参数如表 3 所示。以计算出的气相压力值作为贮箱压力值，与设定压力值进行比较，得到压力偏差 E 和压力偏差变化 E_c ，以模糊控制算法得出的控制量 U 作为贮箱增压流量的选择量。

表 3 贮箱相关参数
Tab.3 Tank parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
贮箱体积/ m^3	50	气热初始温度/K	90.19
气垫初始体积/ m^3	21	容器初始壁温/K	90.19
贮箱液氧流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	200	增压气体压力/MPa	1.6
气垫初始压力/MPa	0.1	增压气体温度/K	290
气热设定压力/MPa	0.6		

5.3 仿真过程

选取两种增压过程进行模糊控制算法的验证，增压过程为：处于 0.1MPa 压力下的贮箱，先进行预增压，经过一定时间后，贮箱有推进剂流出，此时进行保持增压阶段。增压过程参数见表 4。在预增压过程中，推进剂贮箱没有液氧流出。在保持增压阶段，贮箱底部有恒定流量的推进剂流出。

表 4 仿真时间
Tab.4 Simulation time

	仿真时间/s	
	预增压过程	保持增压过程
仿真过程 1	53	173
仿真过程 2	153	303

5.4 讨论

图 5 所示的仿真过程 1 为：0-53s 为预增压阶段，54-173s 为保持增压阶段。53s 后贮箱底部才有额定流量的液氧流出。可以看出。在初始阶段，贮箱内的压力与设定压力相比偏差 e 和偏

差变化 e_c 相差很大，根据模糊控制规则，此时增压流量应该很大，从图中可以看出，在短短 20s 左右贮箱内压力由 0.1MPa 迅速达到设定压力 0.6MPa，预增压结束。此时贮箱内的压力变化主要是由于液氧的挥发引起。到 53s 后，贮箱底部开始有额定流量的液氧流出，造成贮箱内的压力变化，从图中可以看出，模糊控制算法能使得贮箱内的压力保持平稳。

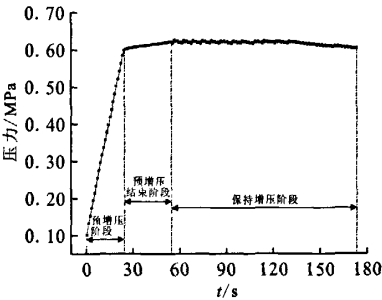


图 5 仿真过程 1：贮箱压力动态仿真曲线
Fig.5 Process 1: Dynamic curve of tank pressure

图 6 所示为仿真过程 2：0-153s 为预增压阶段，154-306s 为保持增压阶段；在贮箱压力处于初始状态的 0.1MPa 下，增压流量很大，增压速度也很快，在达到设定压力 0.6MPa 后，由于贮箱并没有液氧流出，因此，增压处于停止状态，此时贮箱内的压力变化完全是由于液氧的挥发引起；在 153s 时，贮箱底部有额定流量的液氧流出时，模糊控制算法能作出快速反应调整增压流量，使得贮箱压力保持在设定压力 0.6MPa 左右。由此可以看出，模糊控制算法有着较好的控制精度和响应速度。

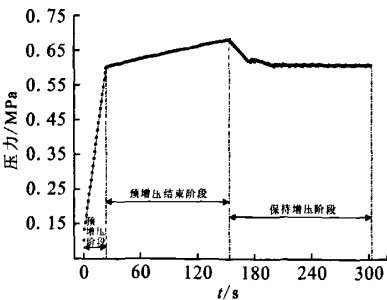


图 6 仿真过程 2：贮箱压力动态仿真曲线
Fig.6 Process 2: Dynamic curve of tank pressure

(下转第 23 页)

过大、过小都会使响应特性变差;阻尼孔面积和控制腔入口面积越大,响应特性越好;控制腔体积越大、阻尼腔体积越小,响应特性越好;出口腔体积越大,响应时间长,但压力超调量小。

参考文献:

- [1] 陈晓琴. 减压阀充填过程动态特性仿真. 导弹与航天运载技术[J]. 2006, (5): 48-52.
- [2] 张雪梅, 张黎辉, 金广明, 等. 减压器动态过程的数值仿真[J]. 航空动力学报, 2004, 19(4): 110-114.

- [3] 陈阳, 高芳, 张黎辉, 等. 减压器动态仿真的有限体积模型[J]. 推进技术, 2006, 27(1): 11-16.
- [4] 陈阳, 高芳, 张振鹏, 等. 气动薄膜调节阀控制系统工作过程的动态仿真[J]. 火箭推进, 2006, 32(6): 32-38.
- [5] 李永堂, 雷步芳, 高雨茁. 液压系统建模与仿真[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [6] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验 [M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [7] 常战民. 高压大流量减压器特性试验台的研制[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [8] 曹泰岳. 火箭发动机动力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004.

(编辑: 陈红霞)

(上接第12页)

6 结论

运用模糊控制理论对低温推进剂贮箱的增压过程进行了模糊控制的算法研究, 采用基于Mamdani的Max-Min复合运算的模糊推理产生控制变量, 进而采用最大隶属度法进行解模糊运算, 建立了以贮箱压力为控制目标模糊控制查询表; 提出了基于模糊控制查询表的多路管道组合增压的新型增压系统, 来满足贮箱压力的稳定。并选取了两种增压过程工况对模糊控制算法进行了动态仿真, 仿真结果表明, 运用模糊控制算法具有较好的控制精度和响应速度, 增压过程中气相压力比较平稳, 压力波动较小。

参考文献:

- [1] 李强, 胡忠军, 李青, 等. 低温液体推进剂增压过程计算

模型 [C]. 陈晓屏主编. 第四届制冷低温大会论文集. 北京: 兵器工业出版社, 2005: 274-277.

- [2] 代予东, 赵红轩. 运用数学方法模拟推进剂贮箱增压[J]. 火箭推进, 2003, 29(6): 34-40.
- [3] 余永权, 曾碧. 单片机模糊逻辑控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.
- [4] 李人厚. 智能控制理论和方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [5] 张超, 鲁雪生, 田丽亭. 火箭低温液体推进剂增压系统数学模型[J]. 低温与超导, 2005, 36(5): 35-38.
- [6] E L柯斯乐[美]. 扩散-流体系统中的传质[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [7] Crowl D A, Louvar J F. Chemical Process Safety-Fundamentals with Applications, 2Ed [M]. New Jersey: Prentice-hall 2001.
- [8] 李士勇. 模糊控制. 神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [9] 吉小军, 李世中, 李霆. 基于组合特征的声目标模糊模式识别方法研究[J]. 探测与控制学报, 2000, 22(1): 35-39.
- [10] 罗艳蕾. 一种模糊控制系统算法模型及查询表的设计[J]. 现代机械, 2003, (2): 37-43.

(编辑: 侯 早)