

# 基于流体逻辑理论的某活塞泵逻辑特性分析

朱建国, 曾维亮, 董万峰

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 针对某活塞泵研制过程中出现的自锁故障模式, 应用流体逻辑理论建立活塞泵气动控制回路工作时间和工作状态卡诺图, 通过逻辑推演分析了活塞泵控制回路的逻辑特性。分析结果表明, 双滑阀控制方式中出现两个滑阀位置状态相同时即会导致自锁故障。从理论上明确了该双滑阀控制方式出现自锁故障的原因, 并据此提出了单滑阀控制方式, 可有效避免逻辑冒险问题。

**关键词:** 活塞泵; 自锁; 逻辑特性

**中图分类号:** V432-34      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9374 (2013) 03-0079-04

## Analysis on logic behaviour of a piston pump based on fluid logic theory

ZHU Jian-guo, ZENG Wei-liang, DONG Wan-feng

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In allusion to the self-lock failure mode existing in the development of a certain piston pump, the operating sequential table and state K-map of the pump's pneumatic control circuit are built with the fluid logic theory. The logic behaviour of the pneumatic control circuit is analyzed by logical deduction. The analysis results indicate that the self-lock failure will happen when two slide valve position state are the same. The reason why the self-lock failure occurs in two slide valve control mode is demonstrated in theory. Then a method to control the pump by single slide valve is put forward and it can avoid logical hazard.

**Keywords:** piston pump; self-lock; logic behaviour

## 0 引言

随着航天技术的发展, 航天器总体对推进动

力系统的性能指标要求也越来越高, 如要求推进系统具有重量轻、贮箱压力低、推力室室压高及易多次起动等; 从系统重量、结构尺寸、安全性及可靠性等角度考虑, 采用常规的挤压式或泵压

收稿日期: 2012-07-04; 修回日期: 2012-09-26

基金项目: 总装备部预研项目(2009AA702051)

作者简介: 朱建国 (1985—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门设计与仿真技术

式推进系统都难以满足相应的指标要求。

活塞泵增压推进系统是介于常规挤压式与泵压式推进系统之间的一种新型推进系统。与涡轮泵增压系统相比,其重量轻、结构简单、工作可靠及无起动次数限制;与挤压式系统相比,在 40 kN 推力以下,由于贮箱压力低、推力室室压高,且不需要高压气瓶等装置,在系统质量方面占有一定优势。活塞泵作为该新型推进系统的核心部件之一,其研制工作即成为该型系统研制的关键环节。目前,世界上仅有美国<sup>[1-4]</sup>和乌克兰<sup>[5]</sup>成功研制了液体火箭发动机活塞泵,并达到了应用阶段。由于该系统具有高性能、轻质化、小型化等潜在优点,针对我国当前航天技术发展与应用需求,急需开展液体火箭发动机活塞泵的探索研究工作。

活塞泵是采用全气动机械闭环控制来实现多缸连续交替动作的,其工作可靠性取决于全气动机械闭环控制回路的可靠性。在前期探索研制中出现了自锁的故障模式,即活塞泵多缸互锁,为了分析原因、提出改进,本文将对活塞泵控制气路进行逻辑特性分析。

## 1 活塞泵工作原理

活塞泵主要由液缸、止回阀、气缸、控制阀及导管连接件等组成,如图 1 所示。其工作原理如下:活塞泵工作前,在液路入口压力的作用下,进液止回阀打开,推进剂填满 4 个液缸。气路供以高压气体并打开下游排液控制阀后,活塞泵便逐步循环工作。由于换向阀 A 和 C 为常开结构,故与其相连的气缸 A 和 C 首先进气,高压气体推动活塞 A 和 C 进入排液冲程,液缸 A 和 C 排出高压液体。同时,一部分气体经滑阀 C 进入换向阀 B 和 D 的控制腔室,使其进气阀口关闭。当活塞 A 和 C 运动至行程端部时,滑阀 C 换向,换向阀 B 和 D 控制腔室内的气体从滑阀口排出,换向阀 B 和 D 换向,其进气阀口打开,高压气体进入气缸 B 和 D,即而推动活塞 B 和 D 进入排液冲程。同时,一部分气体经滑阀 D 进入换向阀 A 和 C 的控制腔室,阀芯换向,进气阀口关闭、

排气阀口打开,气缸 A 和 C 开始排气,当气缸 A 和 C 中的压力降低至一定值时,在液体进口压力作用下进入充液回程。当活塞 B 和 D 运动至行程端部时,又会进入同样的换向过程,如此交替工作,实现连续排液。

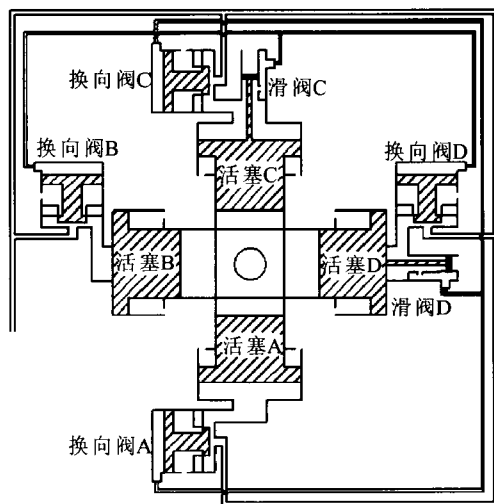


图 1 活塞泵原理图

Fig. 1 Schematic diagram of piston pump

## 2 流体逻辑理论简介

流体逻辑理论<sup>[6]</sup>是研究如何将流体控制元件相互连接起来以满足给定的逻辑要求,达到自动控制各种机械结构的目的,这就是所谓的流体逻辑设计;另外,也可以用于流体元件的功能识别<sup>[7]</sup>和验证已设计出的流体控制系统方案的可行性。它的基础理论体系来源于逻辑数学,因此流体逻辑就是利用逻辑函数有规则地表示逻辑要求的一种方法,流体逻辑问题的解决主要依赖于布尔代数。

### 2.1 流体逻辑描述

逻辑设计和分析首先要提出预期的机器操作程序,清晰地描述在激发每个输出之前的条件。由于涉及回路的复杂性,用来描述逻辑系统要求的格式可能会有些变化。然而,在各种情况下,无论哪种描述方法都必须建立输出信号逻辑程序。对于组合逻辑回路来说,其描述格式可能要比时序型系统简单的多,目前主要描述方法有:真值表、时间表(线状图表)、综合工序表、原

始流动表、状态矩阵、综合表及逻辑要求表等。

## 2.2 流体逻辑设计

为了形成满足预定要求的系统网络而选择和连接逻辑元件的过程称为逻辑设计。对于组合逻辑网络, 一般采用真值表或卡诺图就足够了, 因为它们可以提供相对于各种输入组合的输出唯一描述, 得出网络的简化输出方程 (范式), 就可以选择相应的逻辑元件来搭建逻辑网络; 而时序逻辑网络, 因为网络中需要引入了“记忆元件”, 这样网络就出现了“状态”, 也就引入了状态流动、状态等价及状态替换等问题, 故设计过程要复杂得多。目前, 流体逻辑设计的主要方法有: 一般解法、最小化方法 (无关项的利用、求补简化法、公因子提取法及全能逻辑元件的利用)、经典综合法 (状态等价、状态替换、运动流动表、激励表及激励图) 及非经典综合法 (变信号法、全信号法、状态矩阵法、转换表法及状态图法) 等。

## 2.3 流体逻辑分析

在很多情况下, 流体控制回路的设计采用直观推理的方法, 依靠设计者的经验来完成。但这样做缺乏逻辑综合的基础, 一旦流体控制回路设计出来, 离开了设计者要想寻找故障、改良系统就可能很难下手。流体逻辑分析的目的就在于区分并研究回路的各个元件, 确定元件的函数关系式和系统的整套关系式是否有能力满足所描述的逻辑要求, 可以验证逻辑系统的正确性, 也可以揭示故障的原因。

## 3 活塞泵控制回路逻辑特性分析

活塞泵的逻辑特性主要是研究其气动控制回路的逻辑特性, 它是实现活塞泵多缸协调和匹配工作的关键结构。该活塞泵方案在工作中会出现自锁的故障模式, 而未明确其机理, 故有必要应用流体逻辑理论对控制回路的逻辑特性加以分析。

### 3.1 逻辑描述

活塞泵气动控制回路简图如图 2 所示。图中各符号均为逻辑变量, 定义如下:

$c$  和  $d$  分别为滑阀位置信号, 当滑阀 C 或 D

运动至排液行程的端部并越过换向点时,  $c=1$  或  $d=1$ ; 否则,  $c=0$  或  $d=0$ 。 $Kc$  和  $Kd$  分别为滑阀出口压力控制信号, 有压力输出时,  $Kc=1$  或  $Kd=1$ ; 否则,  $Kc=0$  或  $Kd=0$ 。 $p$  为供气压力信号, 当系统供气时,  $p=1$ ; 否则,  $p=0$ 。 $A$ 、 $B$ 、 $C$  及  $D$  分别为 A 缸、B 缸、C 缸及 D 缸的压力信号, 当缸内有驱动压力时,  $A=1$  或  $B=1$  或  $C=1$  或  $D=1$ ; 否则,  $A=0$  或  $B=0$  或  $C=0$  或  $D=0$ 。

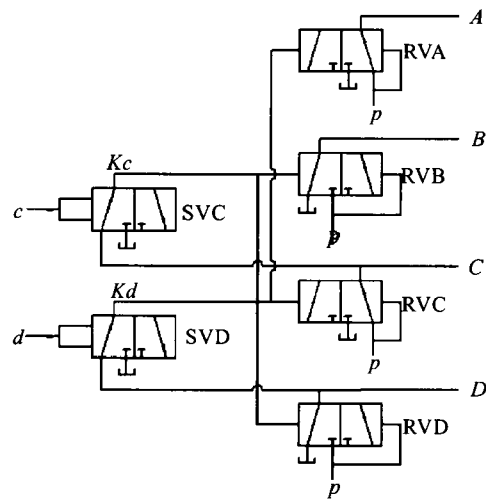


图 2 活塞泵气动控制回路示意图

Fig. 2 Schematic for pneumatic control circuit of piston pump

以上赋予了气动控制回路中各变量状态或位置含义, 为了有效地描述整个回路的逻辑特点, 首先建立各组件布尔表达式。

滑阀 C (SVC):

$$Kc = C \cdot \bar{c} \quad (1)$$

滑阀 D (SVD):

$$Kd = D \cdot \bar{d} \quad (2)$$

换向阀 A (RVA):

$$A = p \cdot \bar{Kd} \quad (3)$$

换向阀 B (RVB):

$$B = p \cdot \bar{Kc} \quad (4)$$

换向阀 C (RVC):

$$C = p \cdot \bar{Kd} \quad (5)$$

换向阀 D (RVD):

$$D = p \cdot \bar{Kc} \quad (6)$$

因此, 可得各缸压力信号逻辑表达式:

$$A = \overline{p \cdot D \cdot d} = p \cdot (\overline{D} + d) \quad (7)$$

$$B = \overline{p \cdot C \cdot c} = p \cdot (\overline{C} + c) \quad (8)$$

$$C = \overline{p \cdot D \cdot d} = p \cdot (\overline{D} + d) \quad (9)$$

$$D = \overline{p \cdot C \cdot c} = p \cdot (\overline{C} + c) \quad (10)$$

### 3.2 工作时序分析

就活塞泵控制回路本身来说属于组合逻辑回路,但活塞泵的工作方式为各缸交替工作,具有阶段性,包含了时间因素,可以用时间表来描述问题。工作时序中用二进制数“1”表示“触发”或“有压力信号”,可以时刻跟踪每个组件动作状态。这里的“时间”表示活塞泵循环的相对时间,在表格中每一列给定一个阶段,每一行则给定一个特定的逻辑状态变量。

采用如下规则制成时间表(如表1,▲列为换向阶段):

- 1) 假设循环的初始状态为A和C有压力值,即A和C缸排液;
- 2) 按照活塞的位移状态记下输入信号c和d的状态;
- 3) 根据公式(7)~公式(10)确定相应的输出;
- 4) 重复上述步骤2)和3),循环到事先确定的初始状态为止。

表1 活塞泵工作时序表

Tab. 1 Operating sequence table of piston pump

信号	时间间隔状态				
	1	2(▲)	3	4(▲)	1
输入	c	0	1	1	0
	d	1	0	0	1
输出	A	1	0	0	1
	B	0	1	1	0
	C	1	0	0	1
	D	0	1	1	0

由表1可知,在2~3阶段气缸B和D同时有压力信号,在4~1阶段气缸A和C同时有压力信号,所以活塞泵控制回路满足驱动活塞泵实现“对缸同步、邻缸异步”工作的逻辑要求。

### 3.3 逻辑冒险分析

回路逻辑冒险可以定义为逻辑回路所要求的响应在两种状态过渡阶段产生的非预料动作。一般来说,冒险是由实际条件不理想造成的,因为实际的动力系统或元件远不是理想的,它们的响应时间是不可预料的,这种不可预料性是产生冒险问题的重要原因。

通常,逻辑网络的冒险问题可通过卡诺图来分析,表现为相邻项间过渡的问题。图3为活塞泵控制回路工作状态卡诺图,正常工作情况下,逻辑网络的输入有2种,即 $cd=01$ 或 $cd=10$ ,输出在 $ABCD=1010$ 和 $ABCD=0101$ 2种状态之间转换。但是,若活塞D回程速度过慢,使得输入变为 $cd=11$ ,则输出变为 $ABCD=1111$ ,即4缸全部充满高压气体,出现如图4所示的自锁故障模式,故活塞泵控制回路存在冒险问题,工作不可靠。

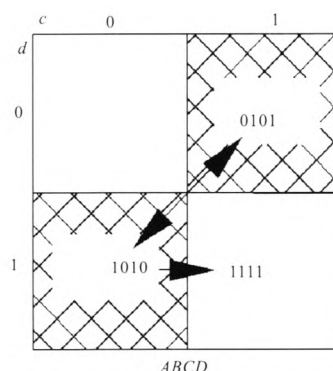


图3 活塞泵工作状态卡诺图

Fig. 3 Operating state K-map of piston pump

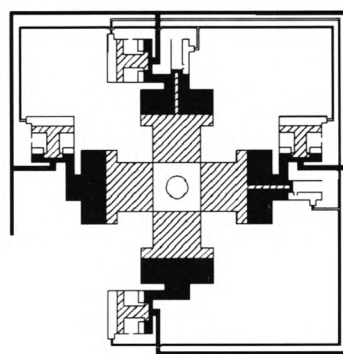


图4 活塞泵自锁故障模式

Fig. 4 Self-lock failure mode of piston pump

(下转第92页)

要求,仍需要进行配方改进,并进行物化性能、稳定性、材料相容性、安全性能以及发动机试验等方面的测试工作。

#### 参考文献:

- [1] 周军. 双组元四氧化二氮/肼类推进剂空间点火特性[J]. 火箭推进, 1998(3): 3-21.
- [2] 张广科, 山世华, 樊超. 卫星推进剂技术发展趋势概述[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2012, 10(1): 71-74.
- [3] 刘昌国, 张中光, 韩宏印, 等. 高比冲双组元液体远地点火箭发动机研究[J]. 上海航天, 2003 (4): 30-33.
- [4] 王宇, 王宏年. 从“东 3 平台”到“HS702 平台”看卫星双组元统一推进系统的发展 [J]. 火箭推进, 2003, 29(1): 13-17.
- [5] 焦继革, 张为华, 夏智勋, 等. 高能含硼贫氧推进剂工艺

性能改善研究[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(5): 524-526.

- [6] 贺芳, 方涛, 李亚裕, 等. 新型绿色液体推进剂研究进展 [J]. 火炸药学报, 2006, 29(4): 54-57.
- [7] 李来才, 蔡皖飞, 张姝. 多氮含能材料的研究概述[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2011, 34(5): 729-739.
- [8] 杜宗罡, 史雪梅, 符全军. 高能液体推进剂研究现状和应用前景[J]. 火箭推进, 2005, 31(3): 30-34, 49.
- [9] 吕少一, 邵自强, 张振玲, 等. 新型含能纤维素基凝胶推进剂的流变性能研究[J]. 化学学报, 2012, 70(2): 200-206.
- [10] 符全军, 杜宗罡, 兰海平, 等. UDMH/NTO 双组元凝胶推进剂的制备及性能研究 [J]. 火箭推进, 2006, 32(1): 48-53.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 2430-2008 航空燃料冰点测定法[S]. 北京: 标准出版社, 2008.
- [12] 贺芳, 孙海云, 方涛. 电磁喷射法着火延迟期测定影响因素分析[C]. 中国化学会第五届全国化学推进剂学术会议, 2011: 105-109.

(编辑: 张永秀)

(上接第 82 页)

由以上分析可知, 出现自锁故障的主要原因是控制回路输入信号  $c$  和  $d$  同时为“1”, 即两滑阀出现了处于相同位置的状态, 故可以采用单个滑阀来保证控制回路两个输入信号的互异性, 使输出仅在  $ABCD=1010$  和  $ABCD=0101$  2 种状态之间转换, 避免自锁故障。

## 4 结束语

本文在介绍某活塞泵工作原理的基础上, 基于流体逻辑理论建立了活塞泵气动控制回路工作时间表和工作状态卡诺图, 通过逻辑推演分析获得了其逻辑特性。在工作时序上, 该控制回路能够驱动活塞泵实现“对缸同步、邻缸异步”的工作方式; 而在回路完备性方面, 双滑阀控制方式中出现两个滑阀位置状态相同时即会导致自锁故障发生, 控制回路不能有效地克服逻辑冒险问题, 这也是该活塞泵控制方式出现自锁故障模式的原因, 据此提出可采用单滑阀来保证控制回路两个输入信号的互异性, 从而避免逻辑冒险问题。本文在分析、解决工程研制问题的同时, 也

探讨了流体逻辑理论在复杂流体控制回路特性分析中的应用。

#### 参考文献:

- [1] WHITEHEAD J C. Bipropellant propulsion with reciprocating pumps, AIAA 93-2121[R]. USA: AIAA, 1993.
- [2] WHITEHEAD J C, PITTENGER L C, COLELLA N J. Design and flight testing of a reciprocating pump fed rocket, AIAA 1994-3031[R]. USA: AIAA, 1994.
- [3] WHITEHEAD J C. Reciprocating Pump Systems for Space Propulsion, AIAA 2004-3836[R]. USA: AIAA, 2004.
- [4] WHITEHEAD J C. Performance of a New Lightweight Reciprocating Pump, AIAA 2005-3921 [R]. USA: AIAA, 2005.
- [5] 马海涛. 气动增压器的仿真与研究[C]. 中国航天第三专业信息网第 27 届年会, 航天动力技术发展与应用学术会议论文集: 171-178.
- [6] 菲奇 E C, 苏尔佳特马扎 J B. 流体逻辑导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [7] 陈海泉, 曲宏飞, 孙玉清. 基于流体逻辑理论的船用插装阀机能研究[J]. 大连海事大学学报, 2004, 30(3): 34-37.

(编辑: (马 杰)