

## 火箭发动机控制活门动态特性模拟与测试\*

张军清 杨乐平

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

**摘要** 根据电动活门的工作原理和采样定律,通过活门等效器 DXQ-1 的设计,介绍了火箭发动机控制活门动态特性模拟与测试,分析了电路参数选取和设计的基本依据,并给出了有关的理论分析结果。

**关键词** 电动活门, 火箭发动机, 测试

**分类号** V 434

## The Simulation and Test for Dynamic Response of the Electric Valves in Rocket Propulsion System

Zhang Junqing Yang Leping

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** According to the working principles of electric valves and sampling theorem, with the introduction of an equivalent circuit DXQ-1, the dynamic characteristics of electric valves in rocket propulsion system are simulated and the test technique is provided in this paper. The important circuit parameters are analyzed. Some theoretical results are also given.

**Key words** electric valves, rocket engine, test

运载火箭动力系统采用的各种电动控制活门是完成系统要求的各种控制动作的主要执行部件,基本工作原理是利用电磁铁的吸力打开或切断控制回路。测试电动控制活门的主要方法是分析激磁线圈瞬态电流响应曲线,记录激磁线圈瞬态电流响应曲线的常规方法是利用光线示波器走纸排照、人工判读电动控制活门的吸合时间和释放时间。随着计算机硬件和软件技术的发展,采用计算机采样的方法,采集活门开启/关闭过程的电流信号并自动生成电流响应曲线完全可行。

## 1 电路设计与分析

### 1.1 工作原理

设计活门等效器的目的是在实验室条件下模拟实际活门的动态响应特性和测试过程,因此整个等效器包括活门模拟电路和测试电路两大部分。活门模拟是通过电磁继电器来实现的,通过电磁继电器在接到控制信号后开/关过程中工作电流变化来模拟活门的动态响应特性。为了采样方便首先需要把电流信号转换为电压信号输入 A/D 采样板。这是通过采样电阻  $R_0$  来实现的,引入采样电阻后等效电路如图1所示。

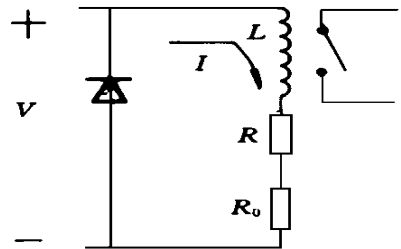


图1 引入采样电阻后的等效电路

图1中引入二极管形成闭合回路是为了测试等效活门断电后的动态特性,在测试开启特性时,由于二极管的单向工作特性,它本身不起作用。当断开活门的电源后,二极管就做为等效活门激磁线圈所存电流的泄放通路,通过此二极管提供的通路来测试活门断电后

\* 1997年11月27日收稿  
第一作者:张军清,男,1967年生,硕士生

电流的动态特性。

## 1.2 电路参数的设计

根据对电动控制活门等效电路的理论分析, 采样电阻  $R_0$ 、采样放大电路的通频带和采样速度是电路设计的基本参数, 下面介绍选取的依据和方法。

### 1.2.1 采样电阻 $R_0$ 选取

采样电阻的作用是把电流信号转换成电压信号。引入采样电阻后, 等效电路变成图1所示的形式(其中  $R_0$  为采样电阻)。这里要考虑的是取样电阻的阻值。

阻值选取的基本原则是在不显著影响活门的工作状态的情况下提供最大的电压。这就要求有一个选取标准的问题。通过对活门需要测试参数的分析, 把活门的开启时间做为选取  $R_0$  的依据。这里主要考虑的是  $R_0$  的引入不显著影响电路电流到达  $I_0$  的时间。依据此原则, 选取方法如下:

在没有引入取样电阻时, 电流到达  $I_0$  的时间为:

$$T_1 = -\tau \ln \left( 1 - \frac{I_0 R}{V} \right) \quad (1)$$

同理, 得到引入  $R_0$  时电流到达  $I_0$  的时间(  $\tau = \frac{L}{R + R_0}$  ):

$$T_2 = -\tau \ln \left( 1 - \frac{I_0 (R + R_0)}{V} \right) \quad (2)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{R + R_0}{R} \frac{\ln(V - I_0 R) - \ln V}{\ln(V - I_0 (R + R_0)) - \ln V} \quad (3)$$

活门选定之后,  $I_0$ 、 $V$  和  $R$  均可得到。选取适当的  $R_0$  保证  $T_1/T_2$  大于一选定的阈值即可认为不显著影响。 $T_1/T_2$  与  $R_0$  的关系曲线如图2所示。在设计中考虑到这种等效器主要用于教学实验, 因而认为阈值大于0.92即可, 实际选  $R_0$  为  $10\Omega$ 。

### 1.2.2 采样放大电路的通频带和 A/D 转换的速度

A/D 转换速度的选取依据为采样定律, 直接与被测信号的频谱有关; 同样地采样放大电路的通频带也是如此, 因而这里的问题实际上是确定被测信号频谱的上限。

对于活门的开启段:

$$f(t) = \frac{V}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (4)$$

其中:  $\tau$  为  $\tau$  或  $\tau$

频率特性为:

$$F(\omega) = \frac{V}{R} \left[ \frac{1}{j\omega} - \frac{1}{j\omega - \frac{1}{\tau}} \right] \quad (5)$$

幅频特性为:

$$F(\omega) = \frac{V}{R} \sqrt{\left[ \frac{\tau}{1 + (\tau\omega)^2} \right]^2 + \left[ \frac{\tau\omega}{1 + (\tau\omega)^2} - \frac{1}{\omega} \right]^2} \quad (6)$$

幅频特性曲线如图3所示。

从幅频特性曲线可以看出被测信号包含的频带很宽, 低频成分相对幅值较大, 相对幅值随频率的增高越来越小, 又因为采样速度不可能无限增大, 因而需选一频率为其上限。这里所选参考频率为  $1/\tau$ , 认为  $\omega \gg 1/\tau$  时可以忽略, 通过对所选等效活门进行分析,  $1/\tau$  在  $100\text{Hz}$  到  $500\text{Hz}$  的概率达0.95。选取  $1/\tau$  的适当倍数做为这两段的频率上限。

对于第二段, 由于其特性很复杂, 无法描绘其频谱特性, 这里的处理办法是用频率  $f = \frac{1}{\Delta t}$  (其中  $\Delta t$  为该段的持续时间的均值) 做为参考频率。选取  $f$  的适当倍数做为本段曲线的频率上限。这里之所以要用  $f$  做为该段的参考频率, 主要基于以下两点: 一是此段是单调函数, 等效活门选定后, 此段的电流变

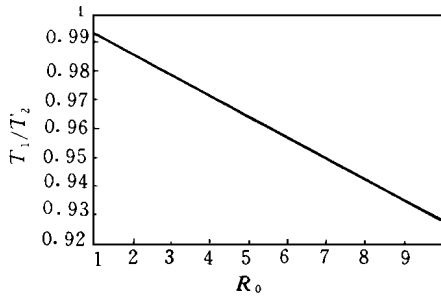
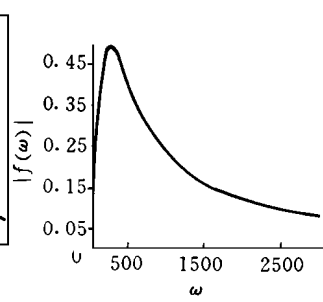
图2  $T_1/T_2$ 与 $R_0$ 的关系曲线

图3 被测信号的幅频特性

化范围就可以用正态分布描述,因此 $\Delta t$ 可以反应其变化的快慢,也就是说可以反应其所含高频成分的程度;二是由于 $\Delta t$ 是一个物理意义明确的量,便于分析。用这两个频率中高的一个为采样放大电路通频带的上限,同时以这个频率为基准根据采样定律选取A/D转换的速度。

在实际测试中用的是A/D转换板的放大电路,其特性可以满足实际测试的要求,A/D转换速度为20k。实际的测试结果表明这些选择是比较合适的。

## 2 实验结果

等效器DXQ-1设计完成后,我们又开发了相应的测试软件并对其进行了测试实验。图4给出了某路活门电流动态响应曲线的测试结果。

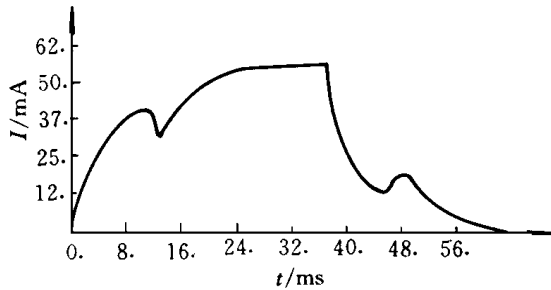


图4 实际的电流响应曲线

由此可见活门动态响应模拟测试结果与理论特性是完全一致的,这表明本文的理论分析是正确的,电路设计是合理和可行的。由于测试结果可以由计算机处理采样数据得到,这也证明了计算机采样方法测量活门响应特性的优越性。

## 3 结束语

从上面的分析可以看出,信号特性是电路设计或选取的基本依据,但同时要综合考虑基本电路的规范要求(如A/D转换的输入和位数)、任务的精度、使用的环境、工作电源等,并以此为依据进行单元电路的设计或选取。

## 参考文献

- 1 张冠生,陆俭国.电磁学与自动电磁元件.北京:机械工业出版社,1982
- 2 冉隆燧.运载火箭测试发控工程学.北京:宇航出版社,1989
- 3 张如洲.微型计算机数据采集与处理.北京:北京工业出版社,1987