

# 电磁阀释放电流出现双波峰的机理分析

黄红耀, 何斌

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 由于某型号电磁阀批生产过程中, 其释放电流曲线时常出现双波峰现象, 于是分别从物理及结构方面分析了双波峰产生的机理和原因, 指出电磁阀吸合、释放电流曲线出现波峰都是由阀芯的运动引起, 主要的影响因素有三个: 线圈匝数、圆柱弹簧、碟簧, 通过调整线圈匝数、圆柱弹簧力及更换碟簧, 可以消除或改善双波峰现象。实际工作证明只要实际释放时间满足要求, 释放电流曲线上出现双波峰的电磁阀属于合格产品。

**关键词:** 电磁阀; 释放电流曲线; 双波峰

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2007) 05-0050-05

## Mechanism analysis of double-peak release current curve of solenoid valve

Huang Hongyao, He Bin

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The release current curve of a type of solenoid valve was checked having double peaks. The mechanism is discussed from physics and structure in this paper. The results indicated that the movement of the valve core causes peaks in current curve. The cause of deceleration is that force of the dish spring release rapidly in little distance and solenoid force blocks the movement of the core, so many factors can affect the attenuation rate of dish spring force or solenoid force causing double peaks. Main factors that create double peaks in release current curve were found to be circle number of windings, column spring and dish spring. The results proved that valves with double peaks appeared on the release current curve are qualified products.

**Key words:** solenoid valve; release current; double peaks

### 1 引言

某型号电磁阀在装配后需测量电磁阀的吸合

电压、释放电流并测定其吸合、释放时间。采用磁电式光线示波器测定, 用高压水银灯或碘钨灯作光源对电磁阀的吸合、释放电流曲线在记录纸上直接进行记录, 并由人工根据记录下的电流曲

收稿日期: 2007-01-26; 修回日期: 2007-06-20。

作者简介: 黄红耀 (1973—), 男, 工程师, 研究领域为姿控发动机生产工艺。

线判读其吸合释放的时间。电磁阀的吸合或释放过程的电流曲线通常只应该有一个峰值,对应其吸合时间或释放时间。但在该型号电磁阀的批产过程中,电磁阀在释放电流曲线上经常出现两个波峰的现象。于是分别从原理及结构方面对双波峰产生的机理和原因进行了分析,并针对电磁阀的具体结构讨论了影响双波峰的几种主要因素。

## 2 释放电流出现双波峰的机理

### 2.1 电流曲线上波峰的形成机理

电磁阀的铁芯线圈具有一定的电感值,当加上电压后,线圈电流从零上升,磁通 $\varphi$ 也随之增加。磁通的增长在线圈中要产生感应电动势,它总是阻止电流的增长,因此电流不可能在接通电源的一瞬间跃变至稳定值,而是按指数曲线的规律逐渐增长直至稳定值,如图1。

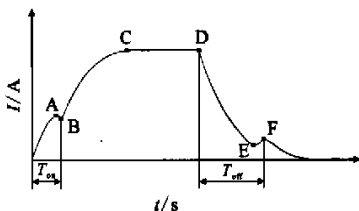


图1 电磁阀吸合、释放电流曲线  
Fig.1 On/off current curve of the valve

随着电流的增长,阀芯受到的电磁吸力也逐渐增加,当吸力增至与阻力相同大小时(A点),阀芯开始运动,由于阀芯运动引起电感变化,产生反电动势,这个反电动势阻止电流的上升,所以阀芯运动过程电流不但不继续上升,反而逐渐下降。直到阀芯到达吸合位置(B)。阀芯在到达吸合位置后停止运动,阀芯运动引起的反电动势消失,线圈电流又继续按指数曲线的规律上升至额定值(C点)。电磁阀的吸合时间 $T_m$ 为从电磁阀开始通电到电磁阀吸合为止的时间。阀芯的释放过程与吸合过程类似。释放时间 $T_r$ 从电磁阀开始断电到阀芯释放为止的时间,从图上看即为DF段的时间。在此主要分析电磁阀的释放过程。

当电磁阀断电后,电磁阀线圈相当于一个电

感元件,它具有阻碍电流下降的趋势。现假设线圈电阻为 $R$ ,电感为 $L$ ,因为断电后其电压为零,电流下降的规律应该满足公式:

$$iR + \frac{d\varphi}{dt} = 0 \quad (1)$$

$\varphi = iL$ , 为穿过线圈的磁通,由式(1)可得:

$$iR + L \frac{di}{dt} = 0 \quad (2)$$

图1中的DE段阀芯尚未动作,该过程线圈电感 $L$ 保持不变,即 $dL/dt=0$ ,DE段电流方程为:

$$iR + L \frac{di}{dt} = 0 \quad (3)$$

对(3)式积分后得到DE段电流与时间关系:

$$i = e^{-\frac{Rt}{L}} \quad (4)$$

这便是DE段电流随时间的变化关系,为一指数下降曲线。

因为电磁阀是一含铁芯线圈,当电流下降到E点附近时,阀芯开始动作,这时线圈电感 $L$ 不再是个常数,它随阀芯与挡铁之间的气隙变化而变化,设阀芯与挡铁之间的气隙为 $X$ ,沿阀芯释放方向为正方向。工作气隙的磁阻 $R$ 可表示为:

$$R = X / \mu_0 S \quad (5)$$

因为导磁体磁阻相比于工作气隙的磁阻来说很小,可以认为工作气隙的磁阻就是线圈磁阻 $R_m$ 。所以线圈电感随气隙变化的关系式为:

$$L = \frac{N^2}{R_m} \approx \frac{\mu_0 N^2 S}{X} \quad (6)$$

式中, $\mu_0$ 为真空磁导率,H/m; $N$ 为线圈匝数; $S$ 为阀芯横截面积, $m^2$ ; $X$ 为阀芯工作气隙,m。

由(2)、(6)式可得阀芯动作后的电流变化方程:

$$iR + L \frac{di}{dt} - \frac{Ki}{X^2} \frac{dX}{dt} = 0 \quad (7)$$

式中, $K = \mu_0 N^2 S$ 。

现假设可以使阀芯任意运动以维持电流不变,即 $di/dt=0$ ,根据(7)式,可得:

$$iR = \frac{Ki}{X^2} \frac{dX}{dt} \quad (8)$$

即阀芯运动状态如果能满足(8)式,那阀芯运动产生的反电动势可以维持电流不变。其实,这也是电流曲线出现极值(波峰)的条件。

式中  $dX/dt$  其实就是阀芯的运动速度  $v$ , 所以使电流维持不变的条件就是:

$$v = RX^2/K \quad (9)$$

根据上面推导出的关系式来分析释放电流曲线上出现双波峰的机理, 阀芯运动与电流变化的关系, 及电流曲线上各段对应的运动状态。

## 2.2 释放电流曲线双波峰的形成机理

不管是阀芯吸合还是释放过程, 电流曲线出现波峰都是因为阀芯的运动, 阀芯的运动通过电感变化产生反电动势以阻止电流的变化。如图 2, 电磁阀断电后, 电流由稳定状态的 D 点下降, 当电流减小到 E 点附近时, 吸力与反力相等, 阀芯开始动作, 阀芯动作就意味着阀芯速度由零变为一正数, 速度的改变打破了原来由电阻电压与自感电动势所建立的平衡。

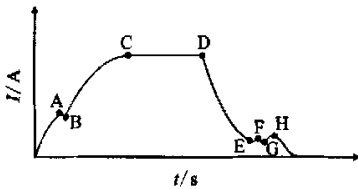


图 2 电磁阀出现双波峰的吸合、释放电流曲线

Fig.2 Current curve with double peaks

据 (7) 式, 电流的变化率的绝对值将变小, 从电流曲线上表现为下降变缓, 其程度决定于阀芯的运动状态。根据 (7) 式, 我们可得到:

$$i \left( R - \frac{K}{X^2} v \right) = -L \frac{di}{dt} \quad (10)$$

当  $v = RX^2/K$  时, 电流维持不变, 为一段水平线; 当  $v < RX^2/K$  时, 电流下降但比指数曲线平缓; 当  $v > RX^2/K$  时, 电流为一上升曲线。

放大后电流曲线如图 3 所示。电流曲线由 M 到 F 点 (不含 F 点) 的过程中, 电流受阀芯运动的影响而变化, 阀芯受弹力和电磁吸力的作用运动, 其变化均为连续的。所以认为电流在由 M 到 F 过程中对时间可导。根据 (9) 式, 电流变化出现极值的条件是  $v = RX^2/K$ 。也即是说, 在 E、G、H 点时, 阀芯速度应满足:

$$v = RX_i^2/K \quad (i = E, G, H) \quad (11)$$

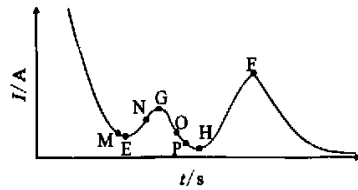


图 3 电磁阀出现双波峰部分的电流曲线

Fig.3 Current curve with the part of double peaks zoomed

电磁阀断电后, 电流从稳定值 (D 点) 逐渐减小, 到 M 点时阀芯开始动作, 但因速度太慢  $v = 0 < RX^2/K$ , 电流继续下降但比指数曲线平缓, 当到达 E 点时, 阀芯速度增至  $v_E = (R/K)X_E^2$ , 越过 E 点后, 阀芯速度继续增大, 使电流不降反升, 当到达 N 点时阀芯速度达到最大值, 越过 N 点后, 电磁吸力开始大于反力, 阀芯开始作减速运动。当到达 G 点时, 阀芯速度减至  $v_G = (R/K)X_G^2$ , 越过 G 点后, 阀芯继续做减速运动, 电流下降。到 P 点, 阀芯运动速度减至最小。这时电磁吸力减小到与反力相等, 在反力的作用下阀芯又开始作加速运动, 到 H 点时其速度为  $v_H = (R/K)X_H^2$ 。当越过 P 点后, 电磁吸力的减小一直快于反力的减小, 即反力一直大于电磁吸力, 阀芯一直作加速运动直到 F 点, 这时阀芯落在阀座上完成了电磁阀的释放过程, 其速度变化曲线如图 4 所示。在 F 点后因为阀芯处于静止状态电流曲线又按指数规律下降, 直到为零。因为 F 点落在阀座上属于外部强制条件, 电流曲线在 F 点不可导, 所以, F 点的阀芯速度不满足  $v_F = (R/K)X_F^2$ 。

阀芯在 GH 段的运动速度范围为  $0 < v \leq v_H = (R/K)X_H^2$ 。从理论上阀芯速度是有可能减小到零, 但不会停。如速度减小到零, 它只出现在速度最小的 P 点, 是个瞬间状态, 在 P 点前后其速度都不可能为零。假设在 P 点附近还有一个点 P' 的速度为零, 即阀芯在 P'P 段处于静止状态, 这样反力 (即碟簧和弹簧合力) 在 P'P 段保持不变, 而电磁吸力  $F = K/2X^2$  随着电流的减小而减小, 力的平衡状态随时可能被破坏。所以阀芯的减速过程可以因为剩余电磁吸力的作用趋于停止, 但不会停止。

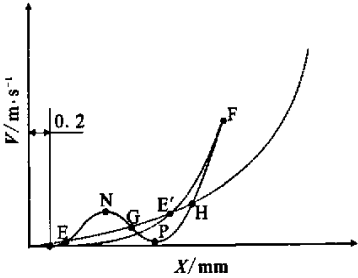


图 4 阀芯速度变化曲线  
Fig.4 Valve core speed variation

3 结构分析

电磁阀是一种同轴的整体结构电磁阀, 结构如图 5 所示。

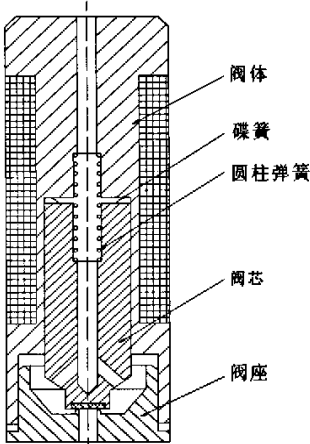


图 5 电磁阀结构示意图  
Fig.5 Schematic of the valve

释放电流曲线上出现双波峰是由阀芯运动引起的, 而阀芯做什么样的运动是由阀芯的受力情况决定的。在断电后阀芯所受的力有电磁吸力、碟簧力、圆柱弹簧力。电磁吸力与电流的平方成正比, 与阀芯位移的平方成反比。圆柱弹簧力因变化很小, 可近似看作恒力; 碟簧力随着阀芯位移而减小, 其特性曲线近似一条直线 (碟簧在力值试验中也表现为一曲线), 碟簧力与阀芯位移成反比。不管是力的大小还是力随形变的释放速度, 碟簧都比圆柱弹簧大, 它有可能是导致双波峰出现的主要因素。

要分析阀芯的受力情况, 就要先分析电磁阀

在吸合状态时碟簧是否被压平。假设碟簧在吸合状态下不是处于压平状态而是在小于  $h_0$  的某一形变位置, 这时电磁吸力与反力 (碟簧力与圆柱弹簧力的合力) 处于平衡状态, 在断电的瞬间, 电磁吸力开始下降的同时, 阀芯开始动作, 在电流曲线由稳态下降的瞬间应该表现出波峰, 但实际电流曲线是在电流下降到一定程度时才出现。所以电磁阀在吸合时碟簧处于压平状态。

因为电磁阀在吸合时碟簧处于压平状态, 电磁吸力大于反力的部分由阀体承担, 电磁阀断电后, 电磁吸力迅速减小, 由阀体承受的力首先释放, 因为阀体不发生形变, 这一阶段阀芯不运动。当电磁吸力下降到与反力相等时, 阀体承受的力释放完毕, 阀芯开始在反力推动下运动。在阀芯运动的过程中, 一方面较大的碟簧弹力在阀芯最初的约 0.1mm 的行程内就释放完毕, 反力减小的速度相当快; 另一方面, 由于阀芯动作产生反电动势以阻碍电流的下降, 导致电磁吸力的下降速度明显变慢, 这样有可能因为碟簧弹力的瞬间释放使得电磁吸力重又大于反力, 使得阀芯减速, 形成释放电流曲线上第一个波峰, 阀芯在经过一段时间的减速后, 当电磁吸力再一次下降到小于圆柱弹簧力的时候, 圆柱弹簧力最终将阀芯加速推向阀座, 就形成了两个波峰。

阀芯释放过程中反力与电磁吸力随时间 (中间变量为阀芯位移) 的变化情况如图 6 所示, 假设电磁吸力下降的曲线如图中 UV 所示, 反力如 DMOF 或 DMSF 所示。DM 段阀芯不运动, 碟簧和圆柱弹簧的弹力不变, MO 或 MS 为阀芯运动之初碟簧力的释放曲线, OF 为圆柱弹簧力的释放曲线。从图中可以看出, 曲线 DMOF 在碟簧力释放过程中 MN 段反力大于电磁吸力, 这段过程反力使得阀芯运动并加速; NOP 段电磁吸力大于反力, 使得阀芯减速, 当 PF 段反力再一次大于电磁吸力的时候, 阀芯在弹力的作用下加速运动直到关闭。所以反力 DMOF 使阀芯在释放过程中经历了一次减速过程, 导致释放电流曲线出现双波峰。而 DMSF 由于阀芯动作后反力一直大于电磁吸力, 阀芯一直作加速运动, 其对应的释放电流曲线上则不会出现双波峰。可以看出, 这两

种反力的区别主要在于碟簧部分的弹力释放速度。这也是为什么在实际生产中,只有一部分电磁阀有双波峰现象,而有双波峰现象的电磁阀可以通过更换碟簧予以改善的原因。

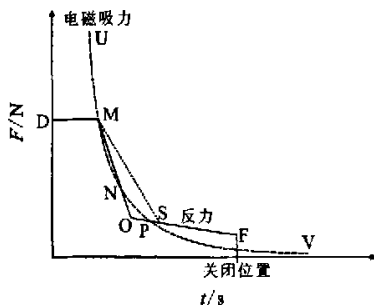


图6 阀芯释放过程反力与电磁吸力的变化示意图

Fig.6 Electromagnetic suction and reaction force variation

## 4 影响因素

影响释放电流曲线双波峰的因素很多。总的来说,所有影响反力衰减速度或电磁吸力衰减速度的因素都是影响双波峰出现的因素,主要的影响因素有三个:线圈匝数、圆柱弹簧、碟簧。

### 4.1 线圈匝数

线圈绕制的匝数是影响双波峰出现的一个因素。如前所述,双波峰出现的直接原因是碟簧弹力随时间的衰减速度比电磁吸力更快,那么,加快电磁吸力的衰减将有助于减少双波峰的出现。电磁阀在断电后,因为磁通的减少要在线圈中产生感应电动势,感应电动势越大,它阻止电流减小的作用越大,电流下降得越慢。感应电动势与线圈电感 $L$ 成正比,电感 $L$ 又与线圈的匝数平方成正比。所以,感应电动势的大小与线圈匝数的平方成正比。匝数越多,线圈电感越大,产生的感应电动势越大,电流下降得越慢。

### 4.2 圆柱弹簧

圆柱弹簧也是影响双波峰出现的一个因素,如果圆柱弹簧的弹力足够大,与碟簧弹力接近的话,即使碟簧弹力瞬间消失,圆柱弹簧也能立即接替碟簧继续推动阀芯运动,避免双波峰的出现。如图6,将圆柱弹簧的弹力曲线向上平移,超过N点后,原有的双波峰现象必将消失。

## 4.3 碟簧

碟簧是影响双波峰出现的最重要的一个因素。生产中我们主要控制碟簧在 $0.75h_0$ 变形时的弹力值,但使用中其变形量为 $h_0$ ,力值为 $F_c$ 。而且影响电磁阀双波峰的主要因素是其弹力值随形变的变化情况,但这种变化情况是存在差异的。一方面,有可能因碟簧的原材料厚度、炉批号、热处理批次等存在批次差异;另一方面,因为我们只要求测形变为 $0.75h_0$ 的弹力值,所以,合格的碟簧个体之间也有可能存在较大差异。按照设计要求,可以粗略算出碟簧力值随形变的变化率(即弹性系数)最大可达到 $19630\text{g/mm}$ ,最小只有 $4966\text{g/mm}$ 。差别很大。正因为如此,在历次电磁阀装配过程中释放电流曲线出现双波峰现象时,大多都通过更换碟簧得到改善。

## 5 结论

电磁阀释放电流曲线出现波峰是由阀芯的运动引起,如果在反力的作用下一直做加速运动时表现为单波峰,如不能一直做加速运动而经历了一次减速过程则表现为双波峰。该型号电磁阀由于碟簧弹力在微小行程内急剧减小导致阀芯受到剩余电磁吸力的阻滞作用而经历了一次减速过程,从而在释放电流曲线上形成双波峰。电磁阀释放电流曲线的作用是用来判读电磁阀的释放时间,释放电流曲线上的双波峰反映了阀芯释放过程中的具体运动状态,只要实际释放时间满足要求,不影响释放时间的可读性和真实性。释放电流曲线上出现双波峰的电磁阀属于合格产品。

## 参考文献:

- [1] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(下)[M]. 北京: 宇航出版社. 1993.
- [2] 林莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京: 机械工业出版社. 2002.
- [3] 蒋瑜. 姿控发动机试验阀门电流信号采集系统设计[J]. 火箭推进. 2006, 32(6): 56-59.

(编辑: 侯 早)