

doi: 10.7690/bgzd.2018.01.002

某型号发动机级间分离试验电磁释放系统

岳永丰, 陈欣欣, 宋玉英

(内蒙航天动力机械测试所试车室, 呼和浩特 010076)

摘要: 为了提高级间分离试验的安全性、可靠性和效费比, 针对某型号固体火箭发动机级间分离的工作特性, 提出一种基于电磁原理和晶体管驱动的释放系统。从分离试验原理出发, 详细阐述了释放系统电磁器件和驱动电路的设计, 利用 Ansoft 软件建立释放系统的有限元模型, 根据受力工况和输入要求分析了其静态和瞬态工作过程, 并进行了试验验证。试验结果表明: 释放系统分离时间为 0.2~0.5 ms, 满足分离试验要求, 能够实现可靠吸合和快速释放功能。

关键词: 电磁释放; 结构设计; 动态特性; Ansoft; 时间测试

中图分类号: TJ760.3⁺31 **文献标志码:** A

Electromagnetic Release System for Inter-stage Separation Test of Certain Type Rocket Motor

Yue Yongfeng, Chen Xinxin, Song Yuying

(Running Department of Inner Mongolia Aerospace Machinery Power Testing Institute, Hohhot 010076, China)

Abstract: In order to improve the safety, reliability and efficiency-cost ratio, according to working characteristics of certain type solid rocket motor inter-stage separation test, a release system based on electromagnetic principle and transistor drive was proposed. From the separation test principle, the designs for the electromagnetic device and the drive circuit of the release system were described in detail. The finite element model of the release system was established by Ansoft, the static and transient working processes were analyzed according to the force conditions and input requirements. The experimental results show that the separation time of the release system is 0.2~0.5 ms, which meets the requirements of separation test. The system can realize reliable pull-in and quick release functions.

Keywords: electromagnetic release; structural design; dynamic characteristics; Ansoft; time test

0 引言

某型固体发动机由主发动机和发射发动机两级构成, 地面热试车的级间分离采用雷管爆炸切断钢丝、重物拽离发射发动机的方式实现。但利用雷管爆破碎片切断钢丝本身存在概率风险, 而且极有可能对现场的测试设备和信号传输线缆造成损坏, 导致试验失败。另外, 雷管为火工耗材, 不可重复利用, 试验成本高, 且运输、存储和安装等过程均存在安全隐患。

文献[1]论述了电磁悬吊释放在微重力落塔上应用的关键技术及特性分析; 文献[2]通过建立磁路模型分析了直流电磁铁的动态特性; 文献[3]应用有限元法研究了电磁铁的恒力特性。笔者重点借鉴上述文献中的应用原理和分析方法, 尝试设计开发电磁释放装置替代传统的“琴弦”释放方式。经仿真分析和试验验证可知: 该电磁释放装置的性能符合试验技术指标要求, 具有操作方便、自动化程度高、可重复利用等优点。

1 试验原理

发射发动机的功能是将主发动机和战斗部弹出发射筒, 之后主发动机点火、发射发动机分离, 主发动机将战斗部运送到预定区域, 级间分离试验的发动机安装示意图 1。

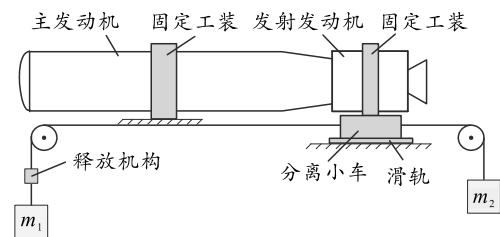


图 1 发动机级间分离试验安装

利用工装将主发动机固定在试验台上, 发射发动机固定在分离小车上, 分离小车放置在台体的滑轨上, 为小车提供轴向运动自由度。通过钢丝牵引、滑轮导向, 分别在小车的头尾端悬挂质量为 m_1 、 m_2 的标准质量块, 且 $m_1 > m_2$ 。在重力差的作用下, 发射发动机的头部与主发动机的尾部可靠压紧。级间

收稿日期: 2017-10-12; 修回日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(61203189, 61374054)

作者简介: 岳永丰(1987—), 男, 内蒙古人, 硕士, 工程师, 从事固体火箭发动机试验与测试研究。

分离试验时，设置在质量块 m_1 近端的释放机构将 m_1 瞬间释放，质量块 m_2 将小车连同发射发动机一起拽离试验台，然后主发动机点火。

级间分离试验对释放机构的技术要求：1) 在试验准备过程中，释放机构在 $m_1=40$ kg 的重力作用下能够可靠锁紧；2) 释放机构的分离动作在 3 ms 内完成。

2 电磁铁结构设计

由于 E 型螺线管电磁铁具有结构对称、体积小和工艺成熟等特点，选用该型电磁铁作为电磁释放装置的核心部件，其结构如图 2 所示。在驱动电压一定的情况下，直流电磁铁的结构参数直接决定电磁力的大小。而电磁力过小会造成电磁铁与衔铁吸合不可靠，易产生误动作；电磁力过大会造成断电后电磁铁的剩磁过大，延长衔铁释放分离时间。因此，合理选取内外磁极、磁轭和励磁线圈的结构参数，使电磁铁输出持续稳定、大小适当的电磁力是设计的关键。

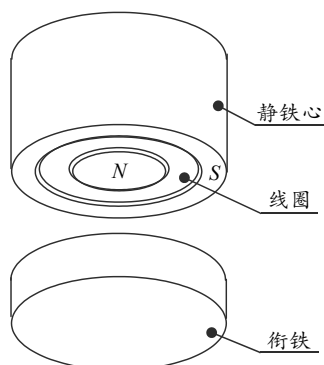


图 2 电磁铁的结构形式

参考同类电磁产品，结合技术要求和试验条件，对电磁铁提出性能设计参数如表 1 所示。

表 1 电磁铁性能参数

性能参数	数值
电压 U/V	DC 24
提升电流、维持电流 I/A	1.2, 0.4
最大气隙 δ/mm	0.1
环境温度、工作温度 $T/^\circ C$	20, 40
工作吸力 F/N	600

铁心和衔铁选用工业纯铁 DT4，根据铁心材料的磁化曲线，选择工作磁感应强度 $B=1.0$ T。

根据下面的电磁力方程可计算得到电磁力作用面积，电磁力作用面积是铁心端面在衔铁端面的轴向投影面积^[4]。

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中： F 为电磁作用力； B 为工作气隙的磁感强度； S 为电磁力作用面积； μ_0 为真空磁导率。

为了保证内、外磁极的磁化程度一致及磁通传递，选取内磁极面积 $S_1=800$ mm²，外磁极面积 $S_2=590$ mm²，由圆面积公式可得内磁极半径 $r_1=15.96$ mm。

根据以下磁势方程计算可得电磁铁的安匝数^[4]：

$$NI = \frac{2B\delta}{\mu_0} + 8r_1 \quad (2)$$

式中： N 为线圈匝数； I 为励磁电流。

将已知相关参数代入方程(2)可得 $NI=321$ A。

根据以下线圈温升方程可计算励磁线圈的截面高度^[4]：

$$\theta_f = \frac{qr}{2kf(r_2 - r_1)} \left(\frac{NI}{h} \right)^2 \quad (3)$$

式中： θ_f 为线圈温升； q 为电磁铁的通电率； k 为线圈的散热系数； f 为线圈的填充系数； r_2 为线圈外径； h 为线圈截面高度。

通过查阅相关图表和计算公式，将已知参数代入式(3)，计算得到线圈截面高度 $h=47$ mm。

根据几何关系和磁通优化原则，可计算得到电磁铁的其他结构参数，经规范化后的参数如图 3。

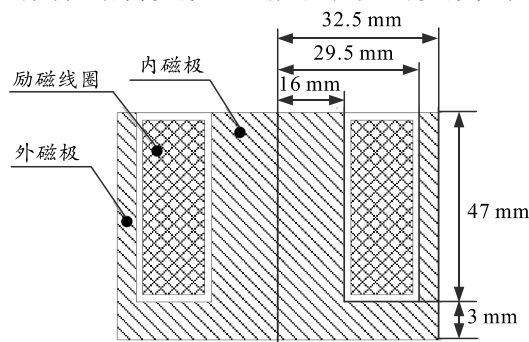


图 3 电磁铁结构及参数

3 快速释放电路设计

级间分离试验对发射发动机的分离时间有严格要求，必须在任务书要求的时间内完成分离动作。为了尽量缩短分离时间，根据衔铁的受力特点和电磁动态特性，笔者设计了电磁分离装置的快速释放驱动电路^[5]。

3.1 电磁释放的动态特性分析

3.1.1 力学特性方程

释放分离瞬间，衔铁在质量块重力的作用下，开始向下作加速运动。当衔铁离开电磁铁一定距离，

所受的电磁力为零时，由于衔铁与质量块之间为柔性连接，且运动速度相等，二者以相等的初速向下作加速运动。对衔铁分离瞬间建立动力学方程

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + f_g = f. \quad (4)$$

式中： m 为衔铁质量； x 为衔铁位移； c 为动力学系统的阻尼系数； f_g 为质量块的重力； f 为电磁铁吸力。

$$f = \frac{i^2}{2} \times \frac{dL}{dx}, \quad L = \frac{N^2}{R} \quad [2] \text{ 可得}$$

$$f = \frac{i^2 N^2}{2} \times \frac{d\left(\frac{1}{R}\right)}{dx}. \quad (5)$$

式中： L 为线圈等效电感； R 为磁路等效磁阻。

将式(5)对时间 t 求导可得

$$\frac{df}{dt} = 2f \frac{d(\ln i)}{dt} + f \frac{d^2\left(\frac{1}{R}\right)}{dx^2} \times \frac{dx}{d\left(\frac{1}{R}\right)} \dot{x}. \quad (6)$$

由式(6)可知，在释放过程中电流逐渐减小，衔铁速度方向向下， $\frac{d(\ln i)}{dt}$ 、 \dot{x} 与吸合过程反向， f 方向不变。由于电磁铁吸力衰减率 $\frac{df}{dt} < 0$ ， $\frac{df}{dt}$ 与 $\frac{d(\ln i)}{dt}$ 、 \dot{x} 成线性关系，而与 f 成反向线性关系；因此，只要采用合适的磁路结构并得到合适的结构函数 R 、 $d\left(\frac{1}{R}\right)$ 和 $d^2\left(\frac{1}{R}\right)/dx^2$ ，就能令释放过程的吸力随着 i 和 \dot{x} 的变化而迅速减小。

3.1.2 电磁释放过程分析

电磁释放过渡过程实质上是一个电磁系统的通断过渡过程，其电磁回路可等效为 $R-L-C$ 电路^[1]。

为分析电磁铁的动态特性，建立回路电压方程：

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = U. \quad (7)$$

式中 C 是电路系统总电容。

$R-L-C$ 回路是阻尼 2 阶振荡系统， RC 为时间常数， $R/2L$ 为阻尼系数，电路的阻尼系数和时间常数决定了释放过程中电压、电流的变化情况；因此，电路的时间常数决定了输入响应衰减的快慢，时间常数越小，衰减越快，放电时间越短。

3.2 驱动电路设计

通过分析电磁释放过程的动态特性可知：由于磁性材料的磁滞性，断电后线圈中残余的电流使铁

心产生的剩磁是影响分离时间的一个重要因素。为了使感应电势形成的电流快速释放，采用在续流回路上引入晶体管驱动电路，使电磁铁的磁场能快速消耗^[6]。图 4 为驱动电路。

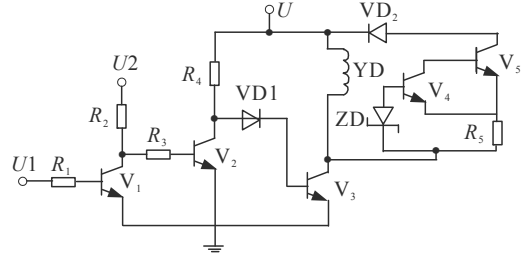


图 4 晶体管驱动电路

输入信号 U_1 来自计算机， YD 是直流电磁铁的绕组， V_1 和 V_2 组成两级反相器， V_3 为功率级放大， V_4 和 V_5 组成达林顿管。 U_1 通过反相器控制 V_3 的导通和截止，驱动直流电磁铁的吸合和释放。

设计时适当选择 ZD ，可使 V_3 集电极和射极间的电压小于允许的压降。在 V_3 由导通转为截止瞬间， YD 的电流绝大部分流经 R_5 ，只有极小部分流经 ZD 。串入 R_5 的目的在于降低达林顿管导通时的压降，从而降低其功耗。 V_3 导通期间， U 几乎全部降在 VD_2 上，从而使 V_4 、 V_5 的发射极免受很大的反向电压，这是串入 VD_2 的作用。只要 ZD 管的稳压值选得尽量大， YD 中的电流能够很快下降到零。

4 有限元仿真分析

为了准确预示电磁铁的吸力特性和结构合理性，充分提高电磁释放装置在试验过程中的可靠性，利用 Ansoft 有限元计算软件，依据结构设计参数、部件选材和实际边界等条件，构建直流电磁铁的 3 维几何模型进行静磁场和瞬态磁场的数值分析。

4.1 静磁场仿真分析

图 5 为电磁铁的 3 维模型，上面黑色部分是衔铁，中间灰色部分是激磁线圈，下面半透明部分是定子铁心。

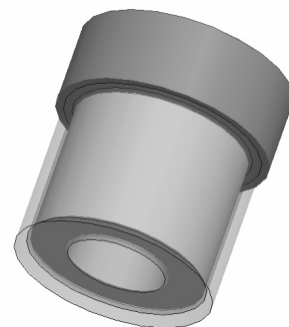


图 5 电磁铁 3 维模型

4.1.1 软件输入设置

1) 电磁铁材料选取：铁心和衔铁材料选用工业纯铁 Steel_1010，励磁线圈材料为铜 Copper，求解域几何模型和气隙几何模型材料属性为真空 Vacuum。

2) 励磁电流：加载励磁线圈上的激励 Excitation 为电流，总安匝数为 320 A。

3) 边界条件：施加气球边界条件，建立包围整个模型区域的真空求解域。

4) 网格划分：衔铁的网格单元最大边长设置为 8 mm，铁心和线圈的网格最大边长为 12 mm，气隙和求解域的网格最大边长为 15 mm。

5) 电磁力：在衔铁上设置 Force 参数，取 Z 轴的正方向为正。

6) 计算设置：最大迭代步数为 10，收敛误差为 30%，其他采用默认设置。

4.1.2 结算结果分析

经计算，衔铁所受电磁力为 -603.11 N，与设计值的误差为 0.52%，说明电磁力的仿真结果与理论设计值吻合良好，满足电磁释放分离装置的要求。

图 6 为磁场强度矢量分布，可以看出进入稳态后，内磁极的磁密较大，磁轭内侧颜色较深且分布较为集中，而外磁极则磁密分布较小。这是由于内、外磁极体积不等所造成的，而该结构平衡了内外侧的磁密分布，提高了铁心的利用率。

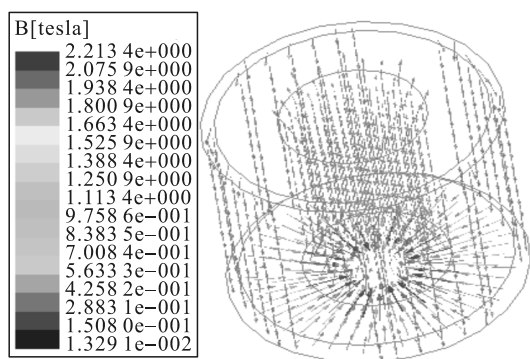


图 6 磁密 B 矢量分布

4.2 瞬态磁场仿真分析

分离过程中电磁铁的磁场是瞬态变化的。为了得到衔铁的位移和所受电磁力随时间的变化关系，笔者运用 Ansoft 软件对电磁铁进行瞬态仿真分析，并在软件中添加快速释放电路进行驱动控制^[7]。

4.2.1 软件输入设置

1) 电磁铁的 3 维建模、材料选取和网格划分同

4.1 节，添加运动部件衔铁的运动求解域 Band。

2) 在 Maxwell Circuit Editor 中绘制驱动电路，分别用有限元电感器件 Winding 和电阻器件 Resistor 模拟激磁绕组的电感和电阻。分段线性电压源 VPWL 在 0~5 ms 时供 24 V 直流电，5 ms 时电压降为 0。

4) 绕组线圈匝数设置为 800。

5) 在绕组激励选项中，线圈类型选择绞线型 Stranded，初始电流 Initial Current 设置为 0.4 A。

6) 仿真时长 $T=0.01$ s，步长 $\Delta T=0.000\ 02$ s，计算并存储 500 个计算结果。

7) 运动域 Band 的机械属性设置：选择直线运动方式 Translation，沿 Z 轴正方向为运动的参考正方向。由于软件不允许计算衔铁和铁心碰撞，建模时二者之间预留 0.01 mm 的距离。正向运动范围设置为 0~5 mm。Load Force 设置为 400，即沿 Z 正方向施加 400 N 的拉力。

4.2.2 计算结果分析

从图 7 可以看出：吸合过程中衔铁所受的电磁力迅速升高至 725 N，此时线圈的提升电流大于额定电流；当吸合稳定后，衔铁所受的电磁力也趋于稳定值 606 N，与设计值吻合良好；当电磁铁断电后，衔铁所受的电磁力迅速下降，最终降为零。

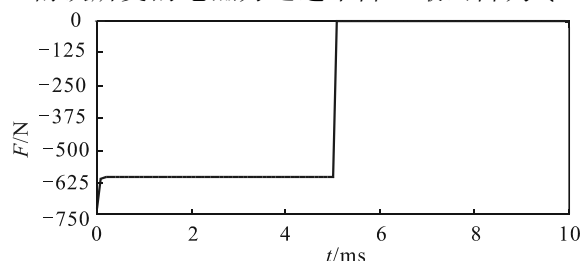


图 7 Z 轴电磁力随时间的变化曲线

从图 8 可以看出：0~5 ms 时衔铁所受的电磁力大于质量块拉力，电磁铁与衔铁处于稳定吸合状态，衔铁的位移为零；5 ms 时电磁铁断电，衔铁所受的电磁力迅速下降，衔铁开始向下作加速运动，直到位移范围的上限值；在电磁铁断电后 0.5 ms 时，衔铁的位移为 0.3 mm。

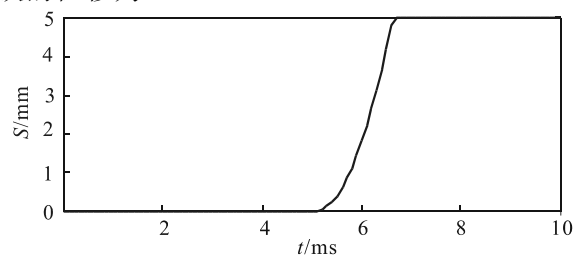


图 8 衔铁位移随时间的变化曲线

5 试验验证

5.1 试验原理

根据某型号固体发动机的试验程序，制定电磁释放装置的试验流程如图 9 所示。

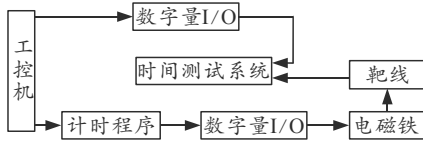


图 9 试验流程

总控台发出点火指令后，研华 610H 工控机板卡的数字量 I/O 向时间测试系统发出时统零点信号，与此同时 DOS 计时器程序开始计时，计时停止时间为两级发动机分离信号时间 79 ms。当计时完成，板卡上另一数字量 I/O 切断电磁铁电源，在质量块拉力的作用下，电磁铁与衔铁间的靶线被拉断，时间测试系统记录时间 t ，从 79 ms 到 t 之间的时间即为电磁释放装置的分离时间。

5.2 试验系统组成

试验设备组成见表 2，搭建完成的试验系统见图 10。

表 2 试验设备配置

序号	名称	型号规格	技术指标
1	直流电磁铁	YSD651-63 Ω	供电电压: DC24 V 电磁吸力: 60 kg
2	双路跟踪稳压 稳流电源	DH1718D-2	输入电压: 220 V 输出电压: 0~32 V 输出电流: 0~2 A
3	时间测试系统	东华 DH1520	采样频率: 10 k/s
4	工控机	研华 610H	24 通道



图 10 试验系统

5.3 试验结果分析

图 11 是分离时间的测试，当时间测试系统采集到时统零点信号，点火信号产生阶跃变化，记录时间零点；当电磁铁断电、靶线被拉断，分离信号产生阶跃变化，记录分离动作完成时间，2 个时间的差值为包含分离过程的两级发动机分离信号时间。

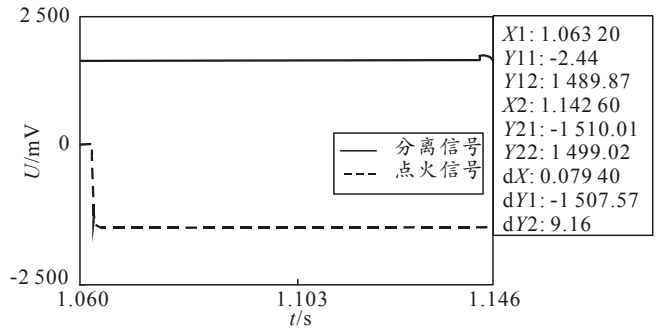


图 11 分离时间测试

重复进行 5 次分离试验，经数据处理，得到表 3 所列试验结果。

表 3 分离时间数据 ms

序号	分离信号时间	分离时间
1	79.5	0.5
2	79.3	0.3
3	79.4	0.4
4	79.2	0.2
5	79.4	0.4

从表 3 可知：电磁释放装置的分离时间均能满足(0~3) ms 的技术要求，且分离时间的极值差为 0.3 ms，说明试验数据的分布较为均匀，进一步验证了释放分离方案的合理性和可行性。

6 结束语

固体发动机级间分离试验的电磁分离方式既消除了质量、安全隐患，又降低了试验成本，是未来发动机级间分离技术的主要发展方向之一。通过理论设计、静态仿真和试验验证，电磁释放装置能够满足某型号发动机的技术要求，电磁力较为准确地控制在 600 N，分离时间为 0.2 ~ 0.5 ms 且重复性良好。通过对衔铁位移曲线和分离时间分析，还可知靶线在最大拉伸变形为 0.3 mm 时即可断裂。

参考文献：

- [1] 夏成明, 董威, 王思明, 等. 微重力落塔电磁悬吊、释放技术研究[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(3): 143-154.
- [2] 史秋明. 直流电磁铁的动特性研究[J]. 自动化仪表, 2007, 28(5): 20-23.
- [3] 付文智, 李明哲, 崔相吉. 准恒力电磁铁的吸力特性研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7): 119-122.
- [4] 李扬. 高速强力电磁铁的设计与仿真[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [5] 袁兴鹏. 基于作战想定的战场电磁环境仿真技术研究[J]. 兵工自动化, 2017, 36(1): 55-58.
- [6] 戴建华, 徐承忠. 直流电磁铁的快速释放电路[J]. 电世界, 1994, 35(7): 13-13.
- [7] 赵博, 张洪亮. Ansoft12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 349-375.