

# 电磁铆接放电过程仿真技术研究\*

## Research on Technology of Electromagnetism Riveting Emulation in Discharge Process

中航工业北京航空制造工程研究所 冯 贞 许国康 高明辉 周万勇

**[摘要]** 通过 MATLAB/SIMULINK 构建电磁铆接放电回路的电路模型和数学模型,仿真得到了完整的电磁铆接放电电流及应力波形成过程波形。仿真结果验证了理论分析的正确性,为电磁铆接设备的研制建立了一定的基础。

**关键词:** 电磁铆接 仿真分析 应力波

**[ABSTRACT]** Circuit model and mathematical model of electromagnetic riveting equipment discharge circuit is built by MATLAB/SIMULINK, a complete discharge current and stress waveform is obtained by simulation of electromagnetic riveting. Simulation results verify the correction of theoretical analysis and establish foundation for electromagnetic riveting equipment.

**Keywords:** Electromagnetic riveting Simulation analysis Stress waveform

电磁铆接技术<sup>[1]</sup>是20世纪70年代初开始发展起来的一种新的铆接技术,它利用电能-磁场能-机械能的转换,应用冲击大电流技术获得瞬时冲击载荷作用于铆钉,铆钉在应力波作用下遵照金属材料的动力学特性成形。电磁铆接可以应用于各种材料铆钉的铆接成形,可以实现比较理想的、均匀的干涉配合,形成长寿命、高可靠性的连接。

### 1 理论分析

电磁铆接工作过程是由高压脉冲电源对铆接器线圈放电,在线圈中产生冲击大电流,并形成一强脉冲磁场,进而在次级线圈中感应发生涡电流,涡流磁场与原脉冲磁场方向相反,两个磁场的相互作用产生强大的机械力,使应力波调节器的输入端获得一个高强度、历时短的应力波脉冲。此应力波最后输给铆钉而使其成形。

铆接设备原理如图1。首先380V交流电经升压变压器F升压,经整流器D整流后对电容器C充电,将电能 $W_e$ 储存在电容器中。

$$W_e = \frac{1}{2}CU_0^2 \quad (1)$$

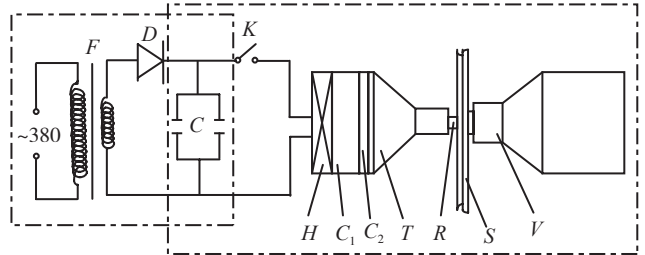


图1 电磁铆接设备

Fig.1 Theory diagram of electromagnetic riveting equipment

铆接时,开关K导通,电容器对铆枪线圈 $C_1$ 放电,电能转换为磁场能 $W_m$ :

$$W_m = \frac{1}{2}Li^2 \quad (2)$$

线圈 $C_2$ 感应发生反向磁场,使应力波<sup>[2]</sup>调节器T的输入端获得应力波:

$$\sigma(t) = \frac{\mu_0 \omega M n^2}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} i_0^2 e^{-2\alpha t} \sin^2 \omega t \quad (3)$$

从以上各式可以看出,通过改变电容量C和充电电压 $U_0$ ,可以调整应力波强度。

### 2 仿真模型构建

#### 2.1 电磁铆接放电电路模型

根据原理分析,整个系统被脉冲变压器和铆枪分为3个回路,对应电流分别为 $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$ 。假设铆枪里的驱动

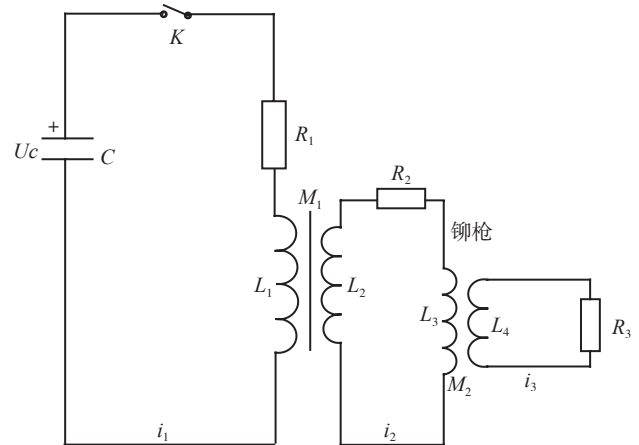


图2 电磁铆接放电电路图

Fig.2 Electromagnetic riveting discharge circuit diagram

\* 国家科技重大专项(2010ZX04007-052)资助。

片不产生移动。因此,仿真的结果仅关心第一个周期。

图中变量及参数定义与实测值如下:

$U_c$  为电源两端电压,初始值为 950V。

$C$  为电容器。在放电开始前,电容原先已充满电,

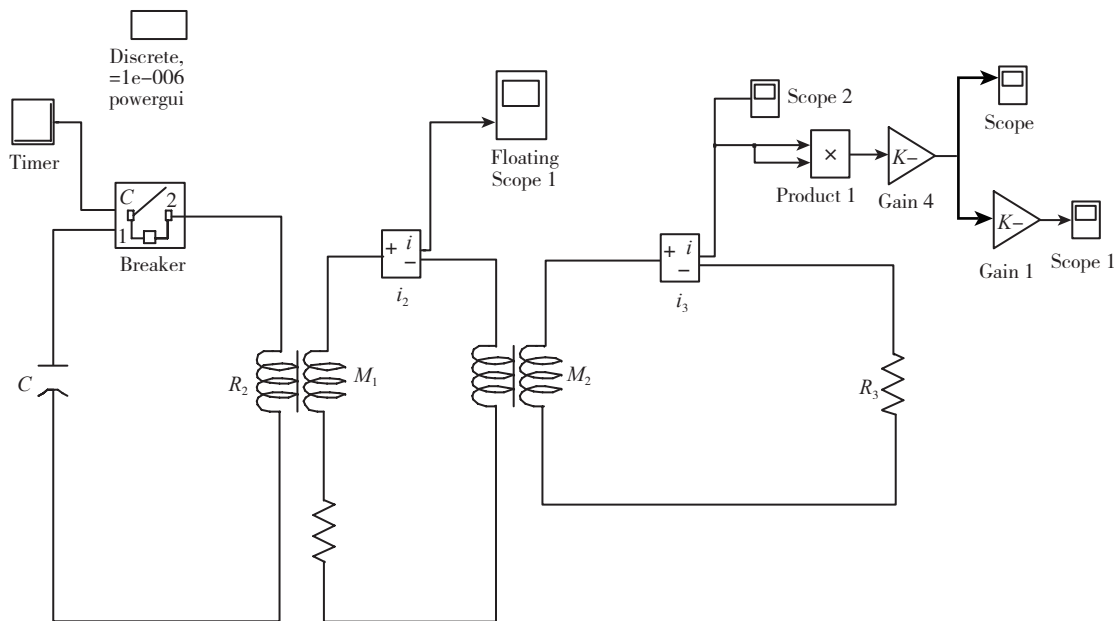


图3 电磁铆接放电电路模型

Fig.3 Electromagnetic riveting discharge circuit model

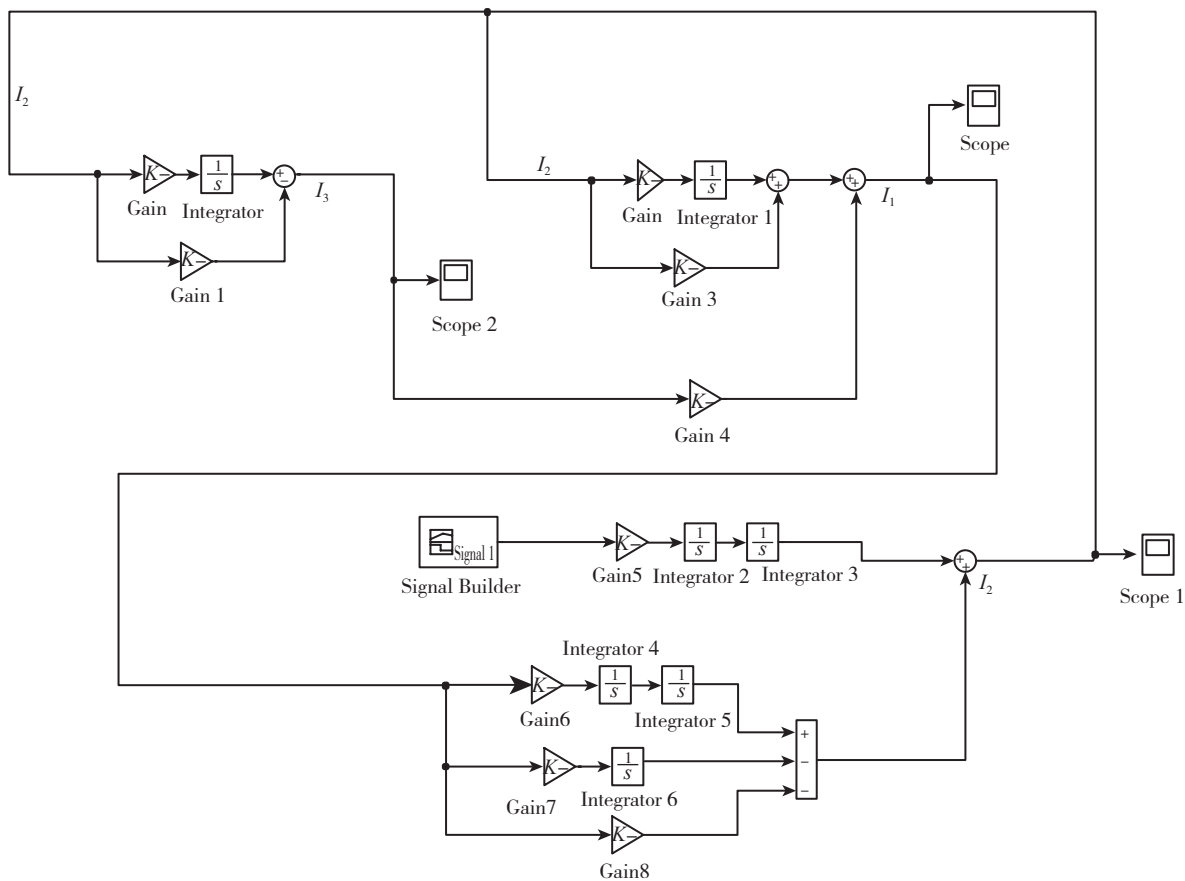


图4 Matlab电磁铆接放电数学模型

Fig.4 Electromagnetic riveting discharge mathematics model

$C=15000\mu\text{f}$ 。

$L_1$  为脉冲变压器的初级自感系数,  $L_1=20\mu\text{H}$ 。

$L_2$  为脉冲变压器的次级自感系数,  $L_2=10\mu\text{H}$ 。

$M_1$  为脉冲变压器的互感系数,  $M_1=12.35\mu\text{H}$ 。

$R_1$  为第一回路中的总电阻,  $R_1=1.35\text{m}\Omega$ 。

$R_2$  为第二回路中的总电阻,  $R_2=11.7\text{m}\Omega$ 。

$L_3$  为铆枪感应器的自感系数,  $L_3=0.1411\mu\text{H}$ 。

$L_4$  为铆枪次级(驱动片)的自感系数,  $L_4=0.08\mu\text{H}$ 。

$M_2$  为铆枪感应器和驱动片的互感系数,  $M_2=0.076\mu\text{H}$ 。

$R_3$  为铆枪驱动片内电阻,  $R_3=0.06\mu\Omega$ 。

根据前述电磁铆接放电电路和实测参数,采用 MATLAB/SIMULINK 构建电磁铆接仿真电路模型<sup>[3]</sup>,如图 3 所示。

### 2.2 电磁铆接放电数学模型

根据前述电磁铆接放电电路图,建立各变量之间的数学关系式如下:

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_1 dt + U_c(0_-) \quad (4)$$

$$u_c = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_1 \frac{di_2}{dt} \quad (5)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M_1 \frac{di_1}{dt} = R_2 i_2 + L_3 \frac{di_2}{dt} + M_2 \frac{di_3}{dt} \quad (6)$$

$$L_4 \frac{di_3}{dt} + M_2 \frac{di_2}{dt} = R_3 i_3 \quad (7)$$

将公式(5)拉氏变换,得:

$$\frac{I_1(s)}{CS} + \frac{U_c(0_-)}{S} = R_1 I_1(s) + L_1 S I_1(s) + M_1 S I_2(s) \quad (8)$$

将公式(6)拉氏变换,得:

$$L_2 S I_2(s) + M_1 S I_1(s) = R_2 I_2(s) + L_3 S I_2(s) + M_2 S I_3(s) \quad (9)$$

将公式(7)拉氏变换,得:

$$L_4 S I_3(s) + M_2 S I_2(s) = R_3 I_3(s) \quad (10)$$

根据公式(8)~(10),采用 MATLAB/SIMULINK 建立电磁铆接数学模型,如图 4 所示。

### 3 仿真结果分析

根据建立的电磁铆接放电电路模型和数学模型,按照实测值设置相关参数后的仿真结果如下:

(1) 电磁铆枪放电电流过程。

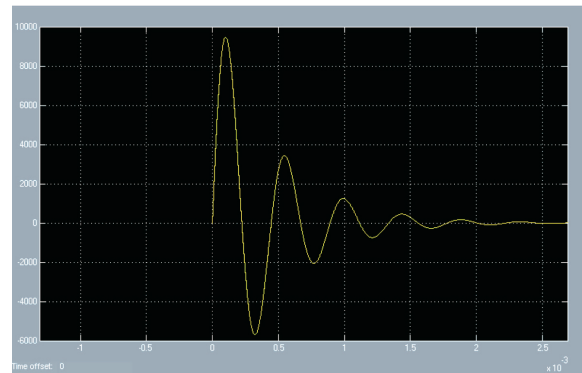
电磁铆枪放电电流呈衰减震荡过程,如图 5 所示。

由仿真结果可知,电容充电电压由 750V 上升至 1180V,放电电流首半波幅值由 7400A 上升至约 11800A;放电电流周波周期基本一致,约 0.46ms;放电电流波形衰减震荡波形持续时间基本保持不变,约 3.5ms(见表 1)。仿真总体结果与理论分析吻合。

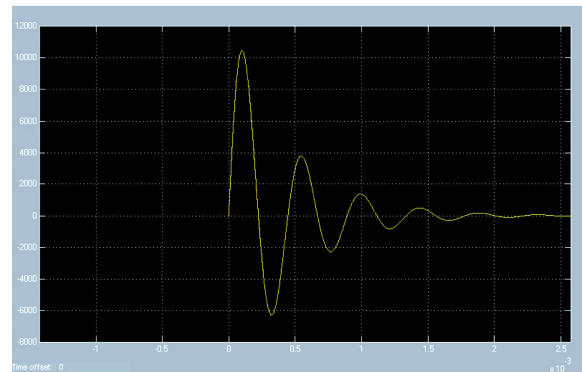
为验证仿真的精度,与实测数据进行了对比分析。



(a) 充电电压 750V



(b) 充电电压 950V



(c) 充电电压 1050V

图5 电磁铆枪放电电流

Fig.5 Electromagnetic riveting discharge electric current

表1 电磁铆枪放电电流首半波峰值、周期及持续时间

充电电压 / V	放电电流首半波峰值 / A	周波周期 / ms	衰减震荡持续时间 / ms
750	7400	0.46	3.5
850	8500	0.46	3.5
950	9500	0.46	3.5
1000	10000	0.46	3.5
1050	10400	0.46	3.5
1180	11800	0.46	3.5

用脉冲电源参数测试仪检测脉冲变压器输出端电流周波周期,该周期与铆枪放电电流<sup>[4]</sup>周期一致。每组电容充电电压测量3次,3次记录值以 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 表示,3次测量的平均值 $T$ 作为放电过程电流周期实测值。

由实测放电电流周期可知,电容充电电压由750V上升至1180V,仅充电电压850V时实测周期偏差较大,其他放电过程电流周期基本在 $470\mu\text{s}$ 左右,电容充电电压750~1180V的放电电流周期平均值为 $466\mu\text{s}$ (见表2),与仿真结果的相对误差为1.3%,仿真精度可以满足要求。

表2 放电电流实测周期

充电电压 / V	第1次测量 $T_1/\mu\text{s}$	第2次测量 $T_2/\mu\text{s}$	第3次测量 $T_3/\mu\text{s}$	放电电流实测周期 $T/\mu\text{s}$
750	467	470	471	469
850	443	438	452	444
950	469	470	468	469
1000	470	469	469	469
1050	471	470	470	470
1180	469	479	480	476

表3 电磁铆枪应力波首半波峰值、周期及持续时间

充电电压 / V	应力波首半波峰值 / N	波形周期 / ms	应力波持续时间 / ms
750	24700	0.23	3.5
850	31900	0.23	3.5
950	39800	0.23	3.5
1000	43800	0.23	3.5
1050	48300	0.23	3.5
1180	62000	0.23	3.5

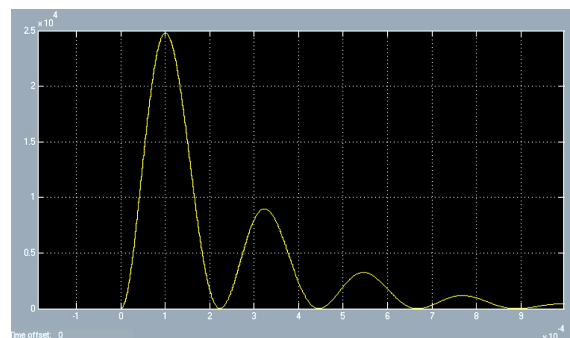
## (2) 电磁铆枪应力波。

电磁铆枪应力波呈全波整流衰减波形,如图6所示。

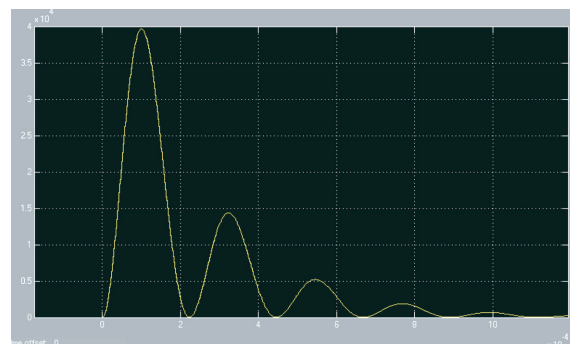
由仿真结果可知,电容充电电压由750V上升至1180V,铆枪应力波首半波幅值由24700N上升至62000N;应力波波形周期为铆枪放电电流周期的一半,约0.23ms,应力波持续时间与放电电流波形一致(见表3)。仿真结果与理论分析吻合。

## 4 结束语

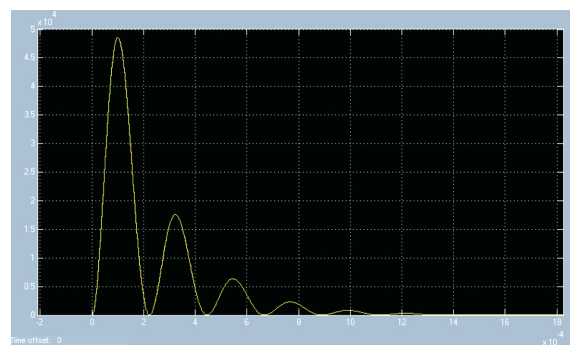
通过本仿真研究,得到了电磁铆接放电电流波形和应力波波形,验证了电磁铆接的原理和应用技术,检验了实测电磁铆接设备参数的准确度,为电磁铆接技术的



(a) 充电电压 750V



(b) 充电电压 950V



(c) 充电电压 1050V

图6 电磁铆枪应力波

Fig.6 Electromagnetic riveting stress waveform

研究和制订相应的电磁铆接设备参数测量标准建立了一定的基础,并为电磁铆接设备的研制优化及工程应用推广提供了技术储备。

## 参考文献

- [1] 曹增强. 国外电磁铆接技术发展状况. 航空科学技术, 1997, (4):46-48.
- [2] 邓将华, 赵志衡, 李春峰. 管件长度对电磁成形线圈放电电流的影响. 材料科学与工艺, 2008, 16 (2):192-195.
- [3] 曹增强, 陶华, 余公藩. 大直径铆钉的应力波铆接. 航空工艺技术, 1996 (2):27-28.
- [4] Brown T, Hartmann J, Zieve P B. Qualification of the EMR for Swaging Collars on the 787. SAE Technical Paper Series, 2005(1):3299.

(责编 亦非)