

引文格式: 邓将华, 姚钰杰, 林雍锋, 等. 电磁铆接驱动力计算及可视化系统设计[J]. 航空制造技术, 2023, 66(23/24): 20-27.

DENG Jianghua, YAO Yujie, LIN Yongfeng, et al. Calculation of riveting driving force and visualization system design in electromagnetic riveting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(23/24): 20-27.

# 电磁铆接驱动力计算及可视化系统设计\*

邓将华, 姚钰杰, 林雍锋, 范治松

(福州大学, 福州 350108)

[摘要] 电磁铆接是一种电磁力驱动加载的铆接技术, 其铆接驱动力是影响铆钉成形质量的关键因素。为了掌握电磁铆接驱动力的变化规律, 运用数学建模方法, 简化电磁铆接驱动力求解过程, 建立感应式与自激励式电磁铆接驱动力数值计算模型, 并通过试验验证了模型建立的可靠性。同时利用 MATLAB App Designer 对电磁铆接驱动力计算进行了可视化系统的设计, 实现了对电磁铆接驱动力的简便计算。基于该系统, 以自激励式电磁铆接为例, 分析了电参数对铆接驱动力的影响规律。研究表明, 放电电压和电容的增加以及回路电阻和回路电感的减少, 有利于提高自激励式铆接驱动力的峰值和变化速率。

关键词: 电磁铆接; 铆接驱动力; 感应式; 自激励式; 数值计算模型; 可视化系统

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.23/24.020



邓将华

教授, 博士生导师, 研究方向为电磁成形、微成形理论与工艺。

电磁成形 (Electromagnetic forming, EMF) 是 20 世纪 60 年代作为金属零件成形和装配技术而发

展起来的一种成形方法, 利用电容器放电时在线圈与工件之间产生的脉冲磁场力使工件发生塑性变形, 因此亦称为磁脉冲成形, 比爆炸成形安全, 较电液成形方便, 是目前应用广泛的高能率成形 (High energy rate forming, HERF) 方法之一。目前, 电磁成形技术已被广泛用于冲孔、胀形、翻边、校形、机械连接和焊接等, 电磁铆接就是电磁成形技术在连接领域典型的应用之一<sup>[1]</sup>。

目前, 新型飞行器朝着轻量化、整体化和大型化方向发展, 长寿命、高可靠性以及高承载能力已成为其重要发展目标<sup>[2-4]</sup>。由于技术限制, 目前还无法完全实现飞行器结构的整体化成形, 因而在飞行器制造中采用了许多连接工艺。铆接具有工艺简单、质量轻、连接可靠以及成本低等优点, 被广泛地应用于飞行器制造, 是一种应用广泛的连接工艺<sup>[5-8]</sup>。为满足现代飞行器轻量化、高可靠性

的需求, 钛合金以及复合材料等新型材料逐渐成为现代飞行器设计的首选材料, 在飞行器制造中的用量逐年递增<sup>[9-12]</sup>。同时为提高现代飞行器的承载能力, 高强度大直径铆钉也被大量采用<sup>[13]</sup>。随着新型结构材料与高强度大直径铆钉的应用, 传统铆接已难以满足现代飞行器设计中对连接质量的要求。研究表明, 电磁铆接技术铆接质量稳定、钉杆变形均匀, 在铆接过程中对连接板的冲击较小, 可有效避免对复合材料的安装损伤, 能够较好地满足新型结构材料的铆接质量要求, 已被应用到现代飞行器制造中<sup>[14-17]</sup>。

电磁铆接技术之所以能够被广泛采用, 解决普通铆接方法难以处理的问题, 其根本原因在于电磁铆接产生驱动力的方式与普通铆接不同。电磁铆接是一个电生磁→磁生力→力使铆钉发生变形的动态过程, 其铆接驱动力的产生源于电磁感应原理,

\* 基金项目: 国家自然科学基金 (51774097)。

产生的电磁驱动力加载速率快,是一种冲击载荷。因此电磁铆接实质上是一种冲击载荷作用下的连接方法,其铆接驱动力的产生和铆钉的变形方式与传统高压气体驱动的气铆和液压驱动的压铆不同。铆接驱动力的不同会导致铆钉的变形机理不同,电磁铆接铆钉以绝热剪切的方式变形,因而铆接驱动力是决定铆钉成形质量的关键因素。为掌握电磁铆接驱动力的变化规律,快速实现对铆接驱动力的分析比较,满足工程应用,本文通过数学建模的方式,简化电磁铆接驱动力的求解过程,建立可靠的电磁铆接驱动力数值计算模型,并对电磁铆接驱动力系统进行可视化设计。

## 1 电磁铆接原理

基于电磁感应原理,在电磁成形的基础上将靠近放电线圈的成形工件厚度增加,因此作用于工件上的电磁力难以使工件变形,工件起到传力作用,此时工件称为驱动片,将驱动片上受到的电磁力传递至放大器上,通过放大器上的铆模施加荷载使铆钉产生塑性变形,从而实现材料的连接,其原理如图1(a)所示。铆接驱动力来源于放电线圈与驱动片之间的相互作用,其铆接驱动力的产生本质上是基于“感应式”原理。

由感应式电磁铆接原理可知,由于驱动片涡流源于线圈电流与驱动片的电磁感应,因而线圈放电电流与

驱动片感应涡流之间不能实现完全耦合,导致设备能量利用率低。同时,相对于线圈电流,驱动片上涡流为“感应”产生与被控制,使得铆接的调节柔性低。为了提高设备的能量利用率和调节柔性,提出自激励式电磁铆接,其原理如图1(b)所示。线圈1与感应式原理的线圈相同,将驱动片用线圈2代替,两个线圈通过自身回路同时放电,通过两线圈上“自激励”放电电流的相互作用产生驱动铆钉变形的电磁力。自激励式电磁铆接可实现铆钉“成形-成性”一体化控制:(1)在“成形”方面,自激励式可实现两线圈放电电流之间的完全耦合,能量利用率高,在相同放电能量下,能有效提高铆接驱动力,实现低电压、小能量电磁铆接参数对高强度大直径铆钉的成形;(2)在“成性”方面,由于两线圈均可处于主动受控状态,可实现对铆接过程加载速率的主动、柔性控制,拓宽成形工艺窗口,有利于应变速率敏感材料铆钉的高质量成形,实现铆接成形质量的有效控制。

## 2 电磁铆接驱动力数值计算模型的建立

铆接是铆钉在驱动力作用下发生的变形,铆接驱动力是研究铆接技术首先要探讨的问题。电磁铆接驱动力来源于放电线圈与驱动片之间的相互作用,其中线圈是由截面为矩形的紫铜导线缠绕而成,呈现平板饼状,称为

平板线圈,而驱动片通常是一个紫铜圆盘。放电时,在线圈和驱动片中均会形成一环形流动的回路电流,该环向电流在径向上变化较小。为了便于数值计算,在忽略线圈的螺旋性以及电流的径向变化情况下,可将感应式与自激励式电磁铆接中的线圈和驱动片都等效简化成如图2所示的同轴多匝的线圈结构模型。

根据能量守恒定律,在回路放电过程中,电容器组中储存的能量会转化为3种不同形式的能量,分别是放电过程中回路损耗的热能、机构做功的机械能以及回路中所产生的磁场能量,可列出关系式为

$$dE = dE_m + dW + dQ \quad (1)$$

式中, $E$ 为电容器储存电能; $E_m$ 为磁场能量; $W$ 为机械能; $Q$ 为热能。

$$dE = u_1 i_1 dt + u_2 i_2 dt \quad (2)$$

其中电容器储存的电能可描述为  
式中, $u_1$ 为线圈1两端电压; $i_1$ 为流经线圈1的电流; $u_2$ 为线圈2或驱动铜片两端电压; $i_2$ 为流经线圈2或驱动片的电流; $t$ 为电容器放电的时间。

$$\begin{cases} u_1 = \frac{d\psi_1}{dt} + i_1 R_1 \\ \psi_1 = i_1 L_1 + i_2 M_{12} \\ u_2 = \frac{d\psi_2}{dt} + i_2 R_2 \\ \psi_2 = i_2 L_2 + i_1 M_{12} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\psi_1$ 为线圈1电流磁链; $R_1$ 为线圈1电阻; $L_1$ 为线圈1电感; $\psi_2$ 为线圈2或驱动片电流磁链; $R_2$ 为线圈2或驱动片电阻; $L_2$ 为线圈2或驱动

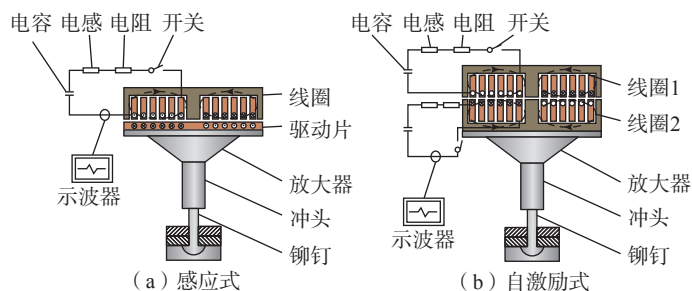


图1 电磁铆接原理  
Fig.1 Principle of electromagnetic riveting

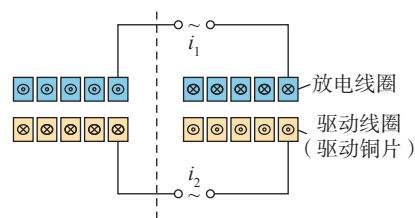


图2 同轴多匝线圈结构模型  
Fig.2 Coaxial multi-turn coil structure model

片电感;  $M_{12}$  为线圈 1 与线圈 2 或驱动片间互感。

将式(3)代入式(2)中可以得到

$$dE = i_1^2 R_1 dt + i_2^2 R_2 dt + i_1 L_1 di_1 + i_1 M_{12} di_2 + i_2 L_2 di_2 + i_2 M_{12} di_1 + 2i_1 i_2 dM_{12} \quad (4)$$

其中, 磁场能量与线圈 1 磁能、线圈 2 或驱动片的磁能以及二者间互感磁能的关系描述为

$$E_m = \frac{1}{2} i_1^2 L_1 + \frac{1}{2} i_2^2 L_2 + i_1 i_2 M_{12} \quad (5)$$

由于电感仅与机构本身的结构参数有关, 运动过程中电感近似不变, 对式(5)求微分得

$$dE_{em} = i_1 L_1 di_1 + i_2 L_2 di_2 + i_2 M_{12} di_1 + i_1 M_{12} di_2 + i_1 i_2 dM_{12} \quad (6)$$

回路中电阻产生的热能损耗描述为

$$dQ = i_1^2 R_1 dt + i_2^2 R_2 dt \quad (7)$$

放电过程中产生的电磁驱动力会对线圈 1 和线圈 2 或者驱动片做功, 使二者间距发生变化, 故可将机械能所做的功描述为

$$dW = F dh \quad (8)$$

式中,  $F$  为铆接驱动力;  $h$  为线圈 1 与线圈 2 或驱动片的等效间距。

将上述所有公式联立并整理, 最终可得电磁驱动力的表达式, 为

$$F = \frac{dW}{dh} = i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dh} \quad (9)$$

对于感应式电磁铆接, 在考虑线圈与驱动片间的互感作用下, 可将其放电回路等效如图 3(a) 所示。

根据基尔霍夫电压定律, 可以推导出感应式电磁铆接的放电回路微分方程, 为

$$\begin{cases} u_i = i_1 (R_{i1} + R_s) + (L_{i1} + L_s) \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ 0 = i_2 R_{i2} + L_{i2} \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \\ du_i = -\frac{(i_1 + i_d)}{C} dt \\ i_d = \begin{cases} 0 & u_i \geq 0 \\ \frac{u_i}{R_d} & u_i < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $u_i$  为电容器两端电压;  $R_{i1}$ 、 $R_{i2}$  为线圈 1 与驱动片电阻;  $L_{i1}$ 、 $L_{i2}$  为线圈 1 与驱动片电感;  $L_s$  为设备系统电感;  $R_s$  为设备系统电阻;  $R_d$  为续流电阻;  $D$  为续流二极管;  $i_d$  为流经续流支路电流;  $C$  为设备电容;  $M$  为线圈 1 与驱动片互感。

由于自激励式电磁铆接是由两条放电回路组成的, 故可将其放电回路等效如图 3(b) 所示。

同样的, 根据基尔霍夫电压定律, 可推导出自激励式电磁铆接放电回路的微分方程, 为

$$\begin{cases} u_{c1} = i_1 (R_{c1} + R_{s1}) + (L_{c1} + L_{s1}) \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ u_{c2} = i_2 (R_{c2} + R_{s2}) + (L_{c2} + L_{s2}) \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \\ du_{c1} = -\frac{(i_1 + i_{d1})}{C} dt \\ du_{c2} = -\frac{(i_2 + i_{d2})}{C} dt \\ i_{d1} = \begin{cases} 0 & u_{c1} \geq 0 \\ \frac{u_{c1}}{R_{d1}} & u_{c1} < 0 \end{cases} \\ i_{d2} = \begin{cases} 0 & u_{c2} \geq 0 \\ \frac{u_{c2}}{R_{d2}} & u_{c2} < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $u_{c1}$ 、 $u_{c2}$  为电容器 1 和电容器 2 两端电压;  $R_{c1}$ 、 $R_{c2}$  为线圈 1 和线圈 2 电阻;  $L_{c1}$ 、 $L_{c2}$  为线圈 1 和线圈 2 电感;  $L_{s1}$ 、 $L_{s2}$  为设备系统电感;  $R_{s1}$ 、 $R_{s2}$  为设备系统电阻;  $i_{d1}$ 、 $i_{d2}$  为流经续流支路电流;  $C_1$ 、 $C_2$  为设备电容;  $M$  为线圈间互感。

由式(9)~(11)可知, 在对铆接驱动力以及放电电流的求解过程中, 还涉及诸多电参数的求解, 包括线圈和驱动片的电感值、电阻值、互感值以及互感对间距的导数, 其中线圈和驱动片的电感、电阻等电参数均与其自身的结构参数相关。根据图 2 中线圈和驱动片等效简化得到的同轴多匝的线圈结构, 基于等效圆环法, 取其同轴单匝的线圈结构模型作为基本单元, 如图 4 所示, 建立线圈和驱动片相关电参数与其自身结构参数间的关系。

通过对各匝线圈的电阻值进行累加, 即可得到线圈的整体电阻值。

$$R_x = \sum_i^N \rho_{cu} \frac{2\pi r_i}{a \cdot b} \quad (12)$$

式中,  $\rho_{cu}$  为铜导线电阻率;  $N$  为线圈总匝数;  $r_i$  为第  $i$  匝线圈半径;  $a$  为导线宽度;  $b$  为导线高度。

线圈总电感包括任意两单匝线圈之间的互感以及各单匝线圈自身电感两部分, 其中任意两单匝线圈之间的互感可以通过同轴线圈匝与匝之间的互感计算公式得到, 互感计算公式为

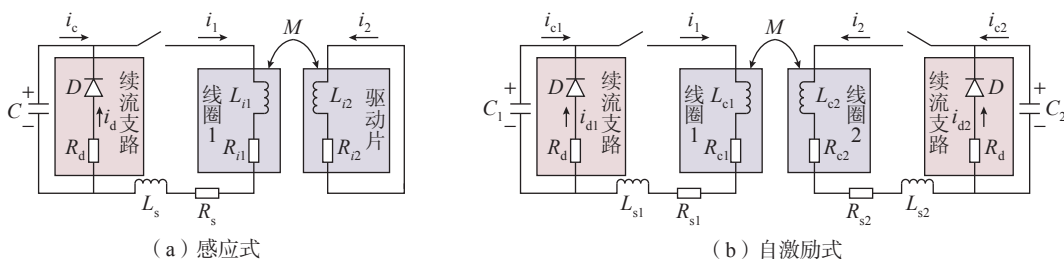


图 3 感应式和自激励式电磁铆接放电回路等效电路图

Fig.3 Equivalent diagram of induction and self-excited electromagnetic riveting discharge circuit

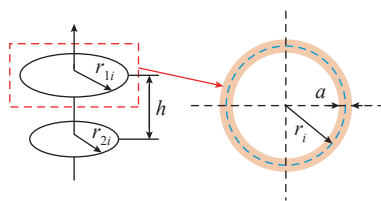


图4 同轴单匝圆环线圈结构模型  
Fig.4 Coaxial single-turn ring coil structure model

$$M(r_1, r_2, h) = \mu_0 \cdot \sqrt{r_1 \cdot r_2} \left[ \left( \frac{2}{k} - k \right) \cdot K(k) - \frac{2}{k} \cdot E(k) \right] \quad (13)$$

式中,  $\mu_0$  为铜的磁导率;  $r_1$ 、 $r_2$  为单匝圆环线圈半径;  $h$  为两圆环平面间的距离, 当两个同轴圆环位于同一平面时,  $h=0$ 。

$$k = \sqrt{\frac{4 \cdot r_1 \cdot r_2}{(r_1 + r_2)^2 + h^2}} \quad (14)$$

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \alpha}} d\alpha \quad (15)$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha} d\alpha \quad (16)$$

其中, 各单匝线圈自感公式为

$$L_{xi}(r_{xi}) = \mu_0 R_i \left( \ln \frac{8r_{xi}}{r_e} - \frac{7}{4} \right) \quad (17)$$

$$r_e = \sqrt{\frac{s}{\pi}} \quad (18)$$

式中,  $R_i$  为线圈半径;  $r_e$  为矩形截面导线等效半径。

线圈总电感计算公式为

$$L_x = \sum_{i=1}^{N_x} L_{xi}(r_{xi}) + 2 \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=i+1}^{N_x} M(r_{xi}, r_{xj}, 0) \quad (19)$$

线圈间整体互感值可以通过对同轴不同平面的线圈匝与匝之间的互感值进行累加计算得到

$$M'_{xc}(h) = \sum_{i=1}^{N_x} \left( \sum_{j=1}^{N_c} M_{xcij} \right) = \sum_{i=1}^{N_x} \left( \sum_{j=1}^{N_c} M(r_{xi}, r_{cj}, h) \right) \quad (20)$$

式中,  $M_{xcij}$  为线圈 1 中第  $i$  匝与线圈 2 或驱动片中第  $j$  匝的互感值;  $N_x$  为线圈 1 匝数;  $N_c$  为线圈 2 匝数或驱

动片等效匝数;  $r_{xi}$  为线圈 1 第  $i$  匝半径;  $r_{cj}$  为线圈 2 或驱动片第  $j$  匝半径。

根据式(9)可知, 在对电磁驱动力进行求解时, 还需要对互感数值进行计算, 互感数值同样可以通过对同轴单匝线圈结构进行累加得到, 其中同轴单匝线圈的互感数值公式描述为

$$M'(r_1, r_2, h) = \frac{dM}{dh} = \frac{2\mu_0 h r_1 r_2}{[h^2 + (r_1 + r_2)^2]^{\frac{3}{2}}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos 2\alpha}{(1 - k^2 \sin^2 \alpha)^{\frac{3}{2}}} d\alpha \quad (21)$$

最终累加得到的线圈整体互感数值为

$$M'_{xc}(h) = \sum_{i=1}^{N_x} \left( \sum_{j=1}^{N_c} M'_{xcij} \right) = \sum_{i=1}^{N_x} \left( \sum_{j=1}^{N_c} M'(r_{xi}, r_{cj}, h) \right) \quad (22)$$

### 3 数学模型的试验验证

本文通过图 5 所示的测试系统来验证建立电磁铆接驱动力数学模型的正确性。将线圈接入放电设备, 利用罗氏线圈与压电式力传感器对电磁铆

接的放电电流以及铆接驱动力进行测量。测量时, 需将罗氏线圈环向套在被测回路上, 同时由于压电式力传感器自身采集的信号较微弱, 因此还需接入电荷放大器对传感器测量信号进行放大。其中数值计算与工艺试验的放电设备的参数以及线圈和驱动片的结构参数分别如表 1 和 2 所示。

感应式电磁铆接不同电压下放电电流和电磁驱动力数值计算与试验测量结果如表 3 和图 6 所示; 自激励式电磁铆接不用电压下放电电流和电磁驱动力数值计算结果与试验测量结果如表 4 和图 7 所示。

结合表 3 和 4 以及图 6 和 7 可知, 感应式与自激励式电磁铆接数值计算得到的放电电流曲线和电磁驱动力曲线与实际工艺试验中测量得到的电流和驱动力曲线波形基本吻合, 放电电流峰值与电磁驱动力峰值的计算误差较小, 说明建立的感应式与自激励式电磁铆接放电电流和电磁驱动力数值计算模型是可靠的。同时, 从计算和测量结果均可知, 在相

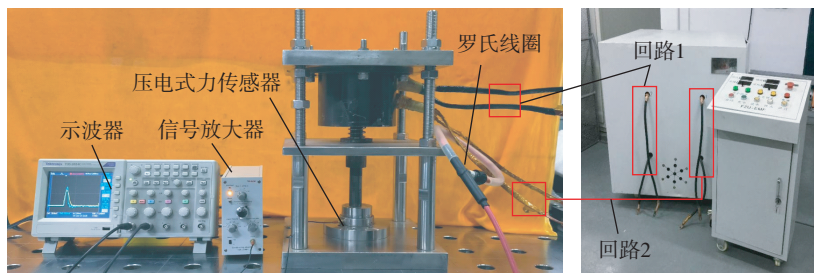


图5 放电电流与电磁驱动力测量装置

Fig.5 Measured equipment of discharge current and electromagnetic driving force

表 1 设备参数

Table 1 Equipment parameters

设备型号	最大放电电压 / V	电容个数 / 个	总电容值 / F	最大放电能量 / kJ
EMR400-II	400	16	0.192	15.36

表 2 线圈与驱动片结构参数

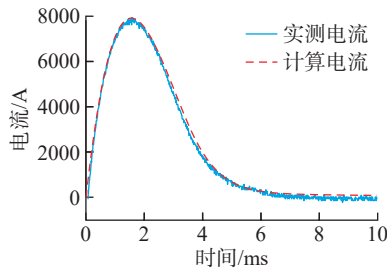
Table 2 Coil and driver structure parameters

线圈内径 / mm	线圈外径 / mm	导线匝数 / 匝	导线宽度 / mm	导线高度 / mm	驱动片内径 / mm	驱动片外径 / mm	驱动片厚度 / mm
20	60	18	1.5	10	20	60	10

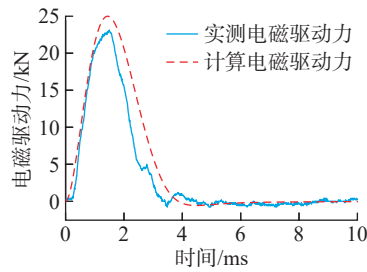
表3 感应式电磁铆接不同电压下放电电流与电磁驱动力的计算与测量结果

Table 3 Calculation and measurement results of electric current and electromagnetic driving force under different voltages of inductive electromagnetic riveting

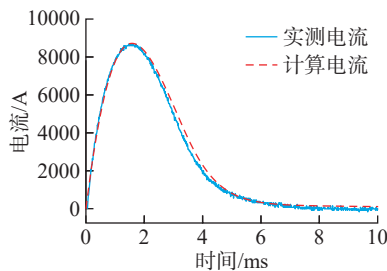
放电电压 / V	放电电流测量值 / A	放电电流计算值 / A	电流误差 / %	电磁驱动力测量值 / N	电磁驱动力计算值 / N	电磁驱动力误差 / %
200	7860	7920	0.8	23200	25000	7.8
220	8640	8720	0.9	28800	30300	5.2
240	9520	9560	0.4	34000	36000	5.9



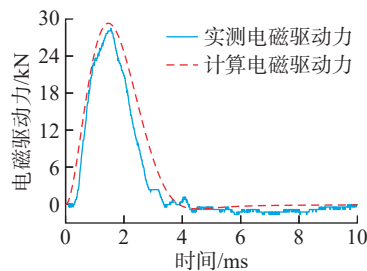
(a) 200 V感应式电压下放电电流曲线



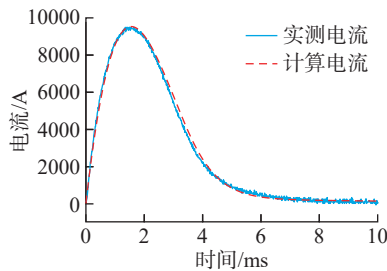
(b) 200 V感应式电压下电磁驱动力曲线



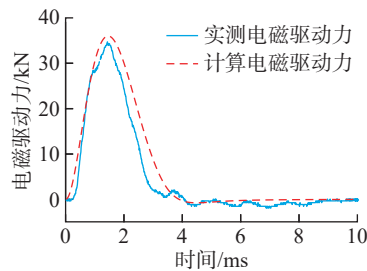
(c) 220 V感应式电压下放电电流曲线



(d) 220 V感应式电压下电磁驱动力曲线



(e) 240 V感应式电压下放电电流曲线



(f) 240 V感应式电压下电磁驱动力曲线

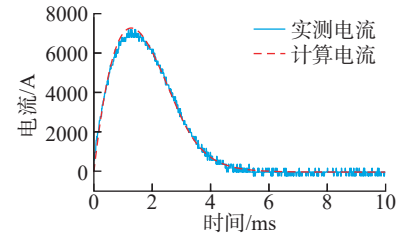
图6 感应式电磁铆接不同电压下放电电流与电磁驱动力曲线对比

Fig.6 Comparison of electric current and electromagnetic driving force curves under different voltages of inductive electromagnetic riveting

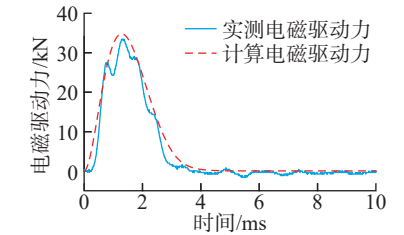
表4 自激励式电磁铆接不同电压下放电电流与电磁驱动力的计算与测量结果

Table 4 Calculation and measurement results of electric current and electromagnetic driving force under different voltages of self-excited electromagnetic riveting

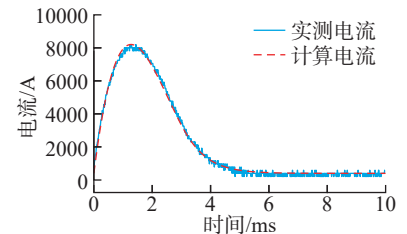
放电电压 / V	放电电流测量值 / A	放电电流计算值 / A	电流误差 / %	电磁驱动力测量值 / N	电磁驱动力计算值 / N	电磁驱动力误差 / %
160	7200	7190	0.1	33600	35100	4.5
180	8200	8204	0	42800	44400	3.7
200	9000	9150	1.6	52800	55100	4.4



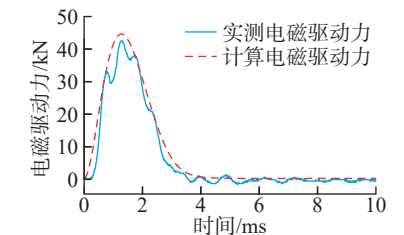
(a) 160 V自激励式电压下放电电流曲线



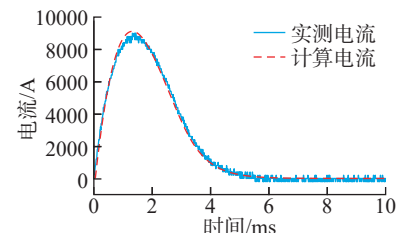
(b) 160 V自激励式电压下电磁驱动力曲线



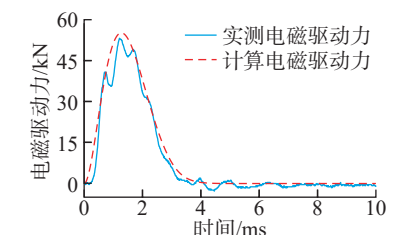
(c) 180 V自激励式电压下放电电流曲线



(d) 180 V自激励式电压下电磁驱动力曲线



(e) 200 V自激励式电压下放电电流曲线



(f) 200 V自激励式电压下电磁驱动力曲线

图7 自激励式电磁铆接不同电压下放电电流与电磁驱动力曲线对比

Fig.7 Comparison of electric current and electromagnetic driving force curves under different voltages of self-excited electromagnetic riveting

同放电能量下(放电电压 200 V, 放电电容相同), 自激励式电磁铆接驱动力要远远大于感应式电磁铆接, 说明自激励式电磁铆接能量利用率高, 铆接驱动力大, 是解决高强度大直径铆钉成形的一种有效方法。

#### 4 电磁驱动力计算可视化分析系统设计

由上述式(9)~(11)可知, 在铆接驱动力计算过程中涉及的参数众多, 且每一参数的计算公式均较为复杂, 同时各参数之间还存在耦合关系, 因此为了方便计算, 本文利用 MATLAB App Designer 开发了一款电磁铆接驱动力计算可视化分析系统, 其主要功能模块包括登录模块、电磁铆接驱动力计算分析模块、线圈参数整体优化模块及参数化模型 4 个模块, 系统功能模块结构示意图如图 8 所示。该系统可实现感应式与自激励式电磁铆接放电电流和驱动力的计算, 同时还能对放电线圈参数进行优化, 在优化的基础上可选择不同的铆钉材料, 可计算出冲头的加载速度和铆钉的变形量, 具有一定的工程应用价值。本文仅对驱动力的计算模块进行分析。

在该可视化系统中, 电磁铆接驱动力计算分析模块包括参数设置与数值计算两个部分, 其中设备参数设置部分的界面如图 9 所示, 在该界面中能够对设备相应的回路参数和状态进行修改设置。

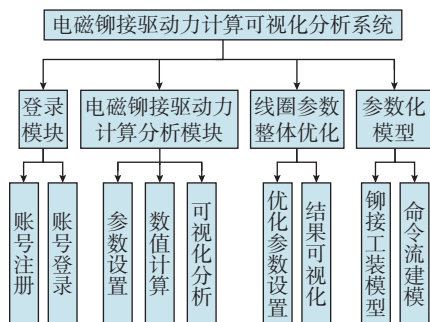


图 8 系统功能模块结构示意图

Fig.8 System function module structure diagram

而计算分析部分的界面如图 10 所示, 在计算分析选项中可以选对感应式电磁铆接或者自激励式电磁铆接进行计算, 参数计算结果图形可在图像选择框中进行改变, 在界面下方还设有图像清空、图像刷新、数据保存 3 个功能。基于该可视化系统, 能够实现对电磁铆接放电电流、电磁驱动力等参数的快速计算、分析对比及数据保存。

#### 5 回路参数对铆接驱动力的影响

电磁铆接过程中放电电压、电容、电阻、电感等回路中的电参数是影响电磁铆接放电电流与电磁驱动力的主要参数。基于开发的电磁铆接驱动力计算可视化系统, 可分析不同参数对感应式和自激励式电磁铆



图 9 设备参数设置界面

Fig.9 Device parameter setting interface

接放电电流和电磁驱动力的影响规律, 下面主要以自激励电磁铆接进行分析。由于各参数之间是相互影响的, 可根据不同的目标对多参数进行优化处理, 该系统采用鱼群算法进行优化, 在此不做进一步的讨论。

##### 5.1 放电电压

不同放电电压下的放电电流与电磁驱动力曲线如图 11 所示, 增加放电电压, 放电电流和电磁驱动力的峰值上升, 二者脉冲波形宽度不变。在其他参数固定不变的情况下, 放电电压的增加是提高电磁驱动力峰值和加载速率最直接有效的方式。

##### 5.2 设备电容

不同设备电容值下的放电电流与电磁驱动力曲线如图 12 所示, 随着回路电容值的增大, 放电电流和电磁驱动力的脉冲波形变宽, 二者峰值明显上升, 峰值增幅随着回路电容值的增大逐渐减小。对于电磁铆接设备, 在有限的设备空间内增加电容器组的个数, 从而增大回路的电容值, 提高设备的放电能量, 有利于提高放电电流和电磁驱动力的峰值。

##### 5.3 回路电感

不同回路电感值下的放电电流与电磁驱动力曲线如图 13 所示。随着回路电感值的增大, 放电电流和电磁驱动力的脉冲波形宽度变大, 峰值

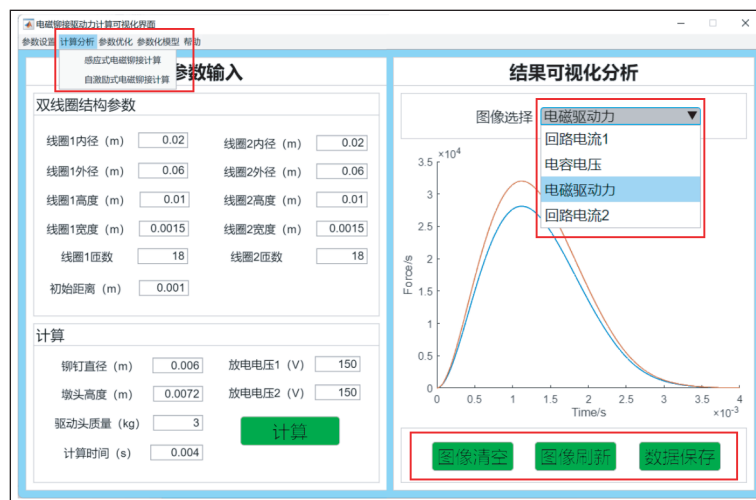


图 10 计算分析界面

Fig.10 Computational analysis interface

下降,这是因为在回路其他参数固定不变的情况下,回路电感值越大,其放电回路的状态就越趋近于过阻尼状态,放电电流和电磁驱动力的峰值就越小。回路电感值主要取决于线圈的电感,而电感与线圈匝数成正比。因此,可通过改变线圈的匝数来获得所需的放电电流和电磁驱动力。

#### 5.4 回路电阻

不同回路电阻值下的放电电流与电磁驱动力曲线如图 14 所示。随着回路电阻值的增大,放电电流以及电磁驱动力的脉冲波形宽度略微变大,峰值明显下降,原因在于回路电阻值的增大,使放电过程中能量的损耗增加,设备能量利用率降低,因而放电电流和电磁驱动力都出现了明显下降的现象。回路电阻主要来源于线圈的电阻和放电回路中电缆的电阻,电阻与导线的截面成反比,与导线的长度成正比。因此,可根据综合考虑来选择扁铜线的截面尺寸和电缆的截面尺寸,以获得所需的放电电流和电磁驱动力。

## 6 结论

(1)建立了感应式与自激励式电磁铆接放电电流以及电磁驱动力的数值计算模型,数值计算结果与试验测量的结果较为吻合、误差较小,验证了建立的数值计算模型的可靠性。

(2)利用 MATLAB App Designer 对电磁铆接电磁驱动力的计算进行了可视化系统的设计,大大提高了铆接驱动力计算的方便性。基于电磁铆接驱动力计算可视化系统,能够实现电磁铆接电磁驱动力的快速计算、对比分析及数据结果保存。

(3)使用电磁铆接驱动力计算可视化系统,可探究不同参数对感应式和自激励式电磁铆接放电电流以及电磁驱动力的影响规律,同时结合不同的模块,可实现参数优化和铆钉变形分析,具有一定的工程应用价值。

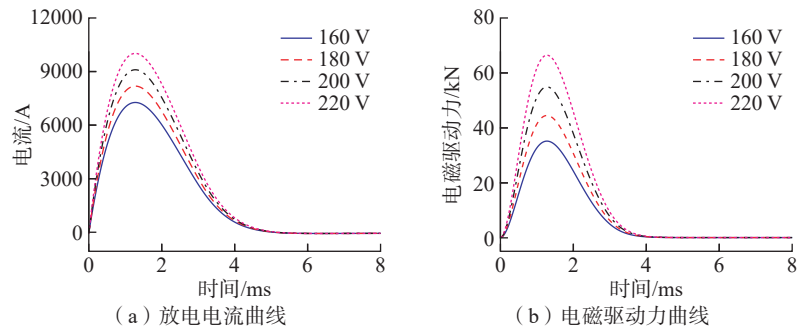


图 11 不同放电电压下的放电电流与电磁驱动力曲线

Fig.11 Discharge current and electromagnetic driving force curves under different discharge voltages

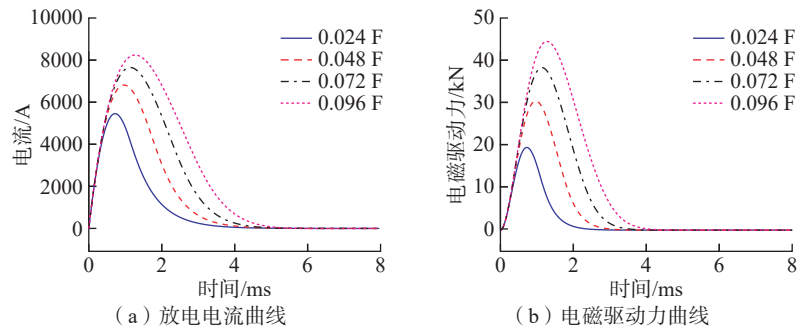


图 12 不同设备电容值下的放电电流与电磁驱动力曲线

Fig.12 Discharge current and electromagnetic driving force curves under different equipment capacitance

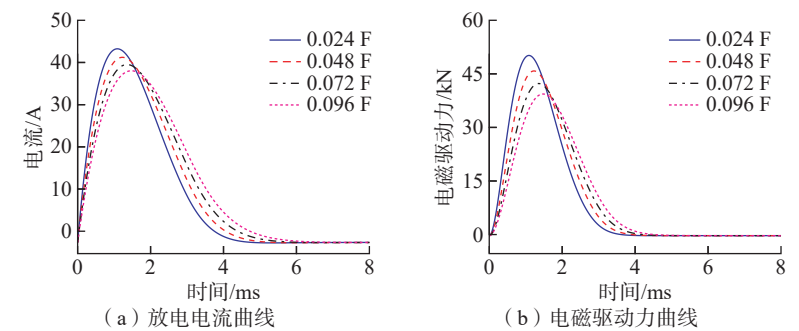


图 13 不同回路电感值下的放电电流与电磁驱动力曲线

Fig.13 Discharge current and electromagnetic driving force curves under different loop inductances

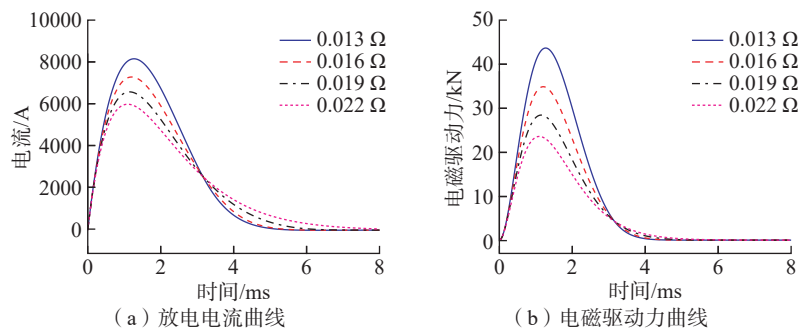


图 14 不同回路电阻下的放电电流与电磁驱动力曲线

Fig.14 Discharge current and electromagnetic driving force curves at different loop resistances

## 参考文献

[1] PSYK V, RISCH D, KINSEY B L,

et al. Electromagnetic forming—A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(5): 787–829.

- [2] CAO Z Q, ZUO Y J. Electromagnetic riveting technique and its applications[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(1): 5–15.
- [3] 张开富, 史越, 骆彬, 等. 大型飞机装配中的高精度测量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 52–69.
- ZHANG Kaifu, SHI Yue, LUO Bin, et al. Research progress of high precision measurement technology in large aircraft assembly[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 52–69.
- [4] LEPRETRE E, CHATAIGNER S, DIENG L, et al. Numerical and experimental investigations of hot driven riveting process on old metal structures[J]. Engineering Structures, 2016, 127: 583–593.
- [5] 刘登伟. 铝锂合金夹层的铆接均匀性[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(12): 74–80.
- LIU Dengwei. Riveting uniformity of Al–Li alloy sandwich[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(12): 74–80.
- [6] ZHANG D W, ZHANG Q, FAN X G, et al. Review on joining process of carbon fiber-reinforced polymer and metal: Methods and joining process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(12): 3686–3696.
- [7] 喻龙, 章易镰, 王宇晗, 等. 飞机自动钻铆技术研究现状及其关键技术[J]. 航空制造技术, 2017, 60(9): 16–25.
- YU Long, ZHANG Yilian, WANG Yuhan, et al. Research status of aircraft automatic drilling and riveting system and its key technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 16–25.
- [8] WU J L, CHEN C, OUYANG Y W, et al. Recent development of the novel riveting processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(1–2): 19–47.
- [9] BARILE C, CASAVOLA C, DE CILLIS F. Mechanical comparison of new composite materials for aerospace applications[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 162: 122–128.
- [10] WILLIAMS J C, BOYER R R. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components[J]. Metals, 2020, 10(6): 705.
- [11] 冯志海, 李俊宁, 田跃龙, 等. 航天先进复合材料研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(9): 4187–4195.
- FENG Zhihai, LI Junning, TIAN Yuelong, et al. Research progress of aerospace advanced composite materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4187–4195.
- [12] 曹增强, 张铭豪, 谭学才, 等. 航空复合材料结构铆接技术综述[J]. 航空制造技术, 2023, 66(1/2): 26–37.
- CAO Zengqiang, ZHANG Minghao, TAN Xuecai, et al. Overview of riveting technology for aviation composite structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(1/2): 26–37.
- [13] 于海平, 张旭, 章茂云, 等. 大直径铝合金铆钉以铆代螺可行性试验研究[J]. 航天制造技术, 2016(4): 1–4, 12.
- YU Haiping, ZHANG Xu, ZHANG Maoyun, et al. Experimental investigation on feasibility of substituting large diameter riveting for bolting[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016(4): 1–4, 12.
- [14] HU X, TANYA, DUAN C, et al. Study on mechanical properties of electromagnetic riveted joints with ML10 steel rivets[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(3): 92–97.
- [15] ZHANG X, JIANG H, LUO T, et al. Theoretical and experimental investigation on interference fit in electromagnetic riveting[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 156: 261–271.
- [16] HU S S, CHEN Y H, DENG J H, et al. Effect of electromagnetic riveting loading voltage on adiabatic shear deformation of TA1 rivet[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(12): 121–127.
- [17] JIANG H, LI G Y, ZHANG X, et al. Fatigue and failure mechanism in carbon fiber reinforced plastics/aluminum alloy single lap joint produced by electromagnetic riveting technique[J]. Composites Science and Technology, 2017, 152(10): 1–10.

## Calculation of Riveting Driving Force and Visualization System Design in Electromagnetic Riveting

DENG Jianghua, YAO Yujie, LIN Yongfeng, FAN Zhisong

(Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**[ABSTRACT]** Electromagnetic riveting is a riveting technology that is driven by electromagnetic force, and driving force is the most critical factor affecting the forming quality of rivets. In order to master the influence law of driving force in electromagnetic riveting, the mathematical modeling method is used to simplify the solution process of driving force in electromagnetic riveting process, and the numerical calculation model of driving force in inductive and self-excited electromagnetic riveting is established. And the reliability of the numerical calculation model was verified by the experiment. At the same time, the MATLAB App Designer is used to design the visualization system for the calculation of the driving force of electromagnetic riveting, and the simple and convenient calculation of the driving force of electromagnetic riveting is realized. Based on this system, the influence law of the electrical parameters of the self-excited electromagnetic riveting is analyzed. The results show that the increase of discharge voltage and capacitance, and the decrease of loop resistance and loop inductance are beneficial to improve the peak value and change rate of the electromagnetic driving force of electromagnetic riveting.

**Keywords:** Electromagnetic riveting; Electromagnetic driving force; Induction; Self-excitation; Numerical calculation model; Visualization system

(责编 古索)