



船舶、土木工程

文章编号: 1000-8608(2013)04-0532-05

电磁力辅助水火弯板工艺电路设计研究

汪 骥^{*1,2}, 刘玉君¹, 石 兵³

- (1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 运载工程与力学学部 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024;
3. 船舶制造国家工程研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 介绍了电磁力辅助水火弯板工艺的原理. 在水火弯板过程中, 利用跟踪的电磁线圈在钢板内产生的电磁力来促进钢板变形, 不仅能够改善钢板高温加热条件, 提高钢板成形效率, 而且有利于加工控制和提高成形精度, 能够用于船体外板厚板和高强度钢板的成形加工. 对电磁力辅助水火弯板工艺的电路进行了设计和研究, 包括整流滤波电路、充电电路、放电电路和控制电路, 仿真分析结果对电路设计目标进行了验证.

关键词: 水火弯板; 电磁力; 曲面成形; 电路仿真

中图分类号: U671.3 **文献标志码:** A

0 引言

水火弯板工艺(即线加热无模成形工艺)由于具有适用范围广、成本低廉、操作灵活及适于各种复杂曲面形状的成形加工等优点, 是目前船体大型复杂曲面钢板主要成形加工方式, 又由于该项工艺变形影响因素多、成形规律难以掌握、加工精度难以控制和效率较低等问题, 一直都是国内外研究的热点. 日本、韩国等造船技术先进国家, 对该项工艺一直投入大量资金进行研究^[1-2], 通过研究不同热源形式下钢板的变形机理, 得到变形规律, 在此基础上研究工艺参数的预报方法和自动化加工设备^[3-4].

但是, 水火弯板工艺是利用钢板局部加热和冷却过程中内部产生的热应力来实现弯曲变形的, 因此不可避免地存在以下缺陷: (1) 在钢板较厚(厚度超过 30 mm)或者钢板曲率变化大的情况下成形困难, 这类钢板往往需要反复加工, 加工效率低, 成形精度不高, 这主要体现在船体艏部外板的成形加工上^[5]; (2) 钢板表面温度较高时容易破坏钢板材质, 这在高强度钢板上尤为突出, 高强度钢板的加工温度一般规定要控制在 500 °C 以内, 否则钢板材质会产生较大改变甚至产生裂纹, 但是温度低了往往又无法产生所需的变形.

正因为单纯靠水火弯板过程中钢板内部自身产生的热应力有时候难以达到成形要求, 本文提出在水火弯板过程中施加外力来辅助钢板成形的新技术, 并采用电磁力作为辅助力. 本文不仅介绍电磁力辅助水火弯板工艺的原理和过程, 而且还对电磁力辅助水火弯板工艺的装置进行研究, 对主要电路进行设计和仿真.

1 电磁力辅助水火弯板工艺的原理

电磁力辅助水火弯板工艺的基本原理是: 将电磁线圈置于钢板上方, 并使其在加工过程中始终处于相对于热源的合适位置, 当电磁线圈流过脉冲电流(低频, 10~200 Hz)时, 在线圈周围产生变化的磁场, 使钢板感生出涡流, 磁场作用于涡流, 会产生对加热线位置钢板进行挤压的径向电磁力和促进角变形的轴向磁压力, 依靠该电磁力在线加热过程中对应力应变的演变进行控制. 这种方法能够适用于各种热源形式. 图 1 为电磁力辅助水火弯板加工的示意图, 产生的径向电磁力能够作为钢板的膨胀约束力, 促进水火弯板过程的线变形, 而轴向电磁力则能够促进钢板的角变形.

与传统工艺相比较, 电磁力辅助水火弯板工艺有如下三方面的优点: (1) 外部施加的电磁辅助

收稿日期: 2012-04-05; 修回日期: 2013-04-02.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009025).
作者简介: 汪 骥*(1978-), 男, 博士, 副教授, E-mail: wangji@dlut.edu.cn.

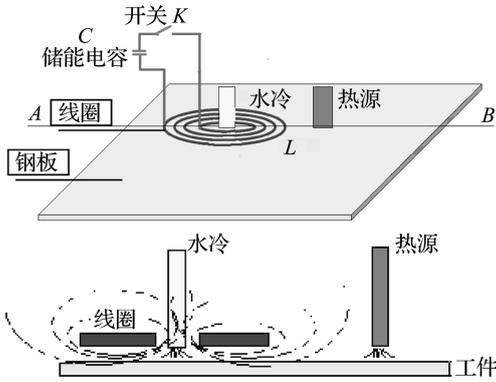


图1 电磁力辅助水火弯板工艺示意图

Fig.1 Schematic of electromagnetic force aided line-heating process

力,使得钢板在加热成形时于较低温度下就可以达到成形的目的,能够有效改善钢板高温加热条件,可应用于中厚板尤其是高强度板的成形加工;(2)电磁辅助力约束钢板加热的膨胀体积,在冷却后能够获得比传统工艺更大的变形,进而减少钢板成形的加工时间,在提高加工效率方面有重要的意义;(3)产生电磁力的电磁场是通过线圈中电流的变化控制的,所以线圈中的电流也能够控制水火弯板成形的过程,在提高钢板的加工控制和精度方面有重要的意义。

2 电磁力辅助水火弯板装置结构设计分析

电磁力辅助装置是实现连续脉冲电磁约束力的装置,装置设计参考了电磁成形系统的原理^[6-7],并根据水火弯板对电磁力的要求对电磁成形系统进行改进.本文根据电磁力辅助水火弯板的工艺原理,对电磁力辅助装置进行了反推设计,主要步骤是:线圈周围要获得脉冲电磁场←线圈中要流通脉冲电流←可控制的储能放电装置←可控制的充电装置←时序控制装置←稳定的直流电源供电装置。

电磁力辅助装置设计框图如图2所示,电路主体结构分为高压整流电路(包括变压器、整流桥、滤波电路、稳压电路等)、充电电路(包括充电开关、储能电容等)、放电电路(包括储能电容、放电开关、放电线圈、工件等)、控制电路(包括电压比较电路、信号发生电路、开关驱动电路等)等。

电磁力辅助装置能够产生连续的脉冲约束力,其基本过程是:220 V电压经过高压整流电路升压整流后获得直流高压,在初始时刻,电容电压为零,经过电压比较器反馈到控制电路,由控制电路的开关驱动电路实现充电开关的导通,使直流

高压对电容充电;当电容电压达到设定电压时,电容反馈电压和比较器基准电压在电压比较器中进行比较,并输出信号反馈到控制电路,由控制电路的开关驱动电路实现充电开关的关断和放电开关的导通。

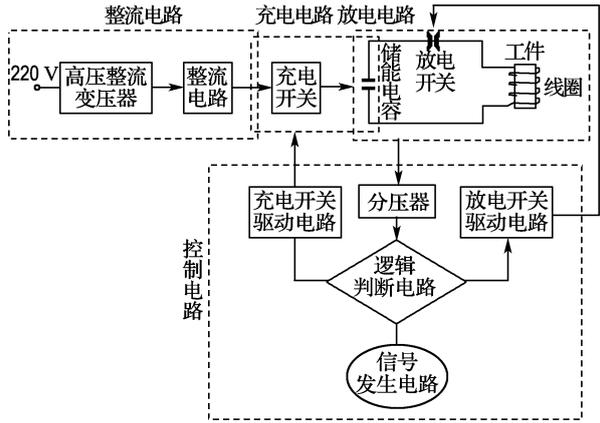


图2 电磁力辅助装置设计框图

Fig.2 Design diagram of the electromagnetic force device

3 电磁力辅助水火弯板装置电路设计及仿真分析

根据电磁力的特性,电磁力大小主要取决于涡流和电磁场的大小,涡流随放电电流峰值和变化率的增加而增加,电磁场的大小也主要是由放电电流的大小和频率决定的.在电容储能一定的情况下,改变储能电容的电压和电容可以改变放电电流峰值和变化率,而此时由于作用时间短,难以达到预想效果,所以需要同时调节脉冲频率或者占空比以调节放电频率来达到相对合适的作用时间.本文对电磁力辅助水火弯板装置电路设计的目标是实现10~100 Hz脉冲频率的可调节,以及在脉冲频率不变的情况下单独调节占空比,使其在10%~50%变化,从而实现冲击频率的调节。

电路设计软件(EDA)以计算机为工作平台,可以进行电子产品的自动设计和性能分析,因此,在电路设计中,通过EDA仿真,来对电路设计目标进行验证。

3.1 整流滤波电路

图3为本文设计的整流滤波电路,前部为交流变压器,其作用是将电网电压变换为符合整流电路所需的交流电压,本文采用的是功率为10 kW,输出端最高为1 200 V高压的变压装置;二级是整流桥,其规格要求最高电压达到1 600 V,电流达到100 A的整流桥装置;三级为滤波电容装置,是电容为1 500~2 000 μF ,耐压为1 400 V的滤

波电容组; R_x 为限流电阻, VD_z 为稳压器。

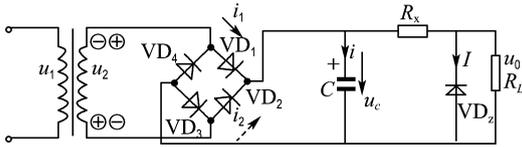


图 3 整流滤波电路

Fig. 3 The filtering rectification circuit

3.2 充电电路

充电电路主要是由充电电路开关和储能电容组构成的,其中充电电路和放电电路两部分电路共用储能电容组。

充电开关要采用高的能量转换效率、大功率的开关 IGBT,本文采用的是 1 700 V/400 A 的 IGBT 开关单元. 储能电容组是由 450 V/1 000 μ F 的电容串联然后并联构成的. 图 4、5 是对 200 V 电压、100 Ω 电阻、1 000 μ F 电容构成的充电电路进行电路仿真分析得到的电容的充电特性曲线。

3.3 放电电路

放电电路是电路的作用输出端,是整个装置仿真分析的重点研究部分,其主要由放电开关、回路电阻、储能电容和线圈构成. 其中放电开关选用的是 1 600 V/1 000 A 的晶闸管,线圈为自制的铜线圈. 放电电路可以等效于 RLC 放电电路,RLC 仿真分析不仅是在理论上对方程的解析,同时也是对试验参数的校对和描述. 用接近实际的参数对 RLC 串联电路的响应进行了分析和仿真. 图 6 是 $C=1$ mF, $U_c=200$ V, $R=30$ m Ω , $L=15$ mH 构成的电路及其电路仿真结果. 图中,电容电压曲线为一次闭合快关的 C_1 上的高电位的电位,电容在放电点处放电,放电点之后就是电容的放电电压波形,可以看出在由二极管作为回路与电感并联时,电容的放电电能主要集中在第一半波。

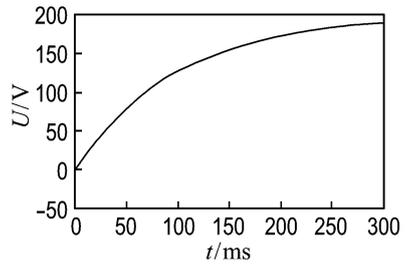


图 4 零状态响应电压曲线

Fig. 4 Zero state response voltage curve

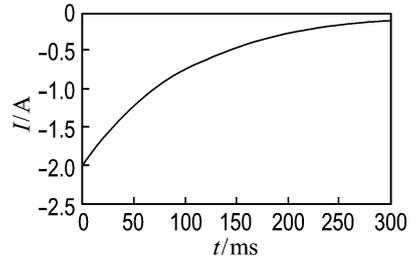


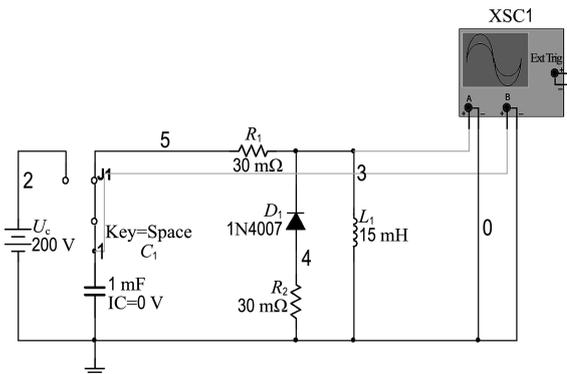
图 5 零状态响应电流曲线

Fig. 5 Zero state response current curve

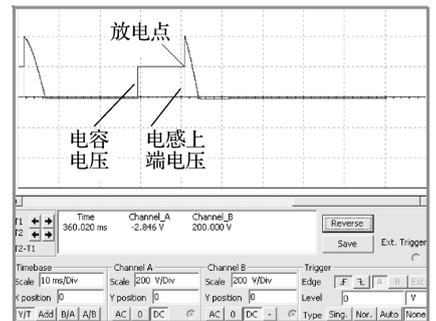
3.4 控制电路

电磁力辅助装置的控制系统的能够实现电路的自动化控制,其主要由信号发生电路、电压比较器、逻辑判断电路、驱动电路构成. 图 7 为电压比较器电路图及其仿真结果,图 8 为信号发生器电路图及其仿真结果,图 9 是晶闸管驱动电路图及其仿真结果. 信号发生器信号和电压比较器信号都是高电平或者都是低电平时,充电开关和放电开关才有机会闭合,电路实现充放电。

电路图的设计和仿真分析结果可以证明电路设计的正确性和控制电路的实际时序控制过程,为了仿真的方便,模型中信号源选用矩形波电压源. 上面的控制部分还缺少 IGBT 的驱动部分,本文 IGBT 驱动板采用的是 Concept 公司出产的 IGBT 驱动板的 Scale 系列,其具体作用功能见文献[8].



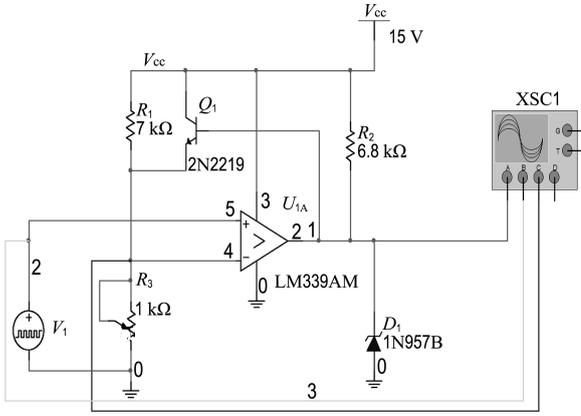
(a) 电路图



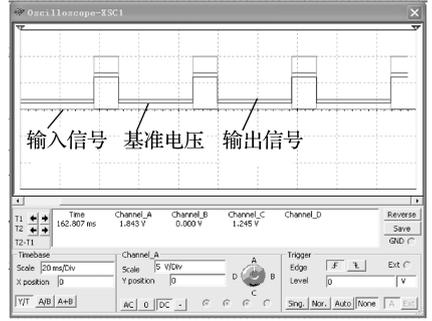
(b) 仿真分析

图 6 放电电路等效电路图及仿真分析结果

Fig. 6 Equivalent discharge circuit and its simulation result

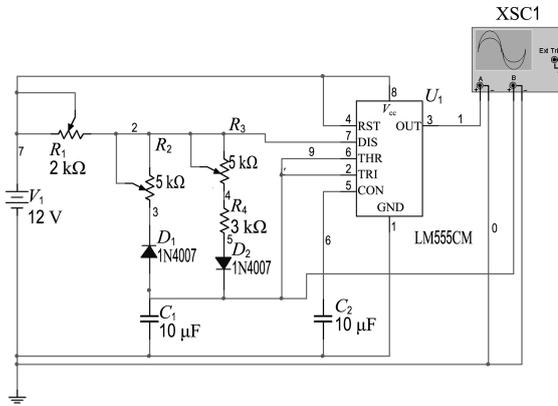


(a) 电路图

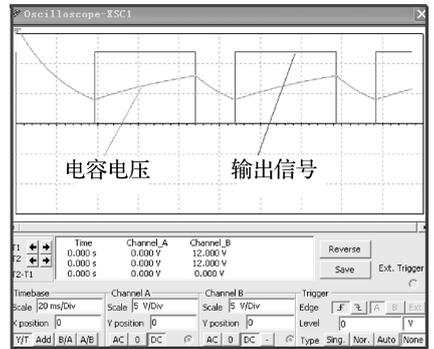


(b) 仿真分析

图 7 电压比较器电路图及其仿真结果
Fig. 7 Circuit of voltage comparator and its simulation result

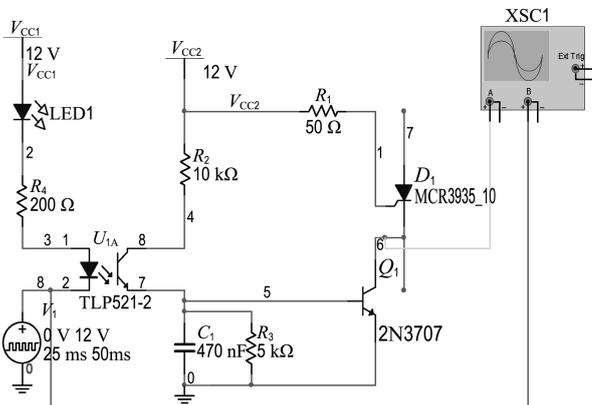


(a) 电路图

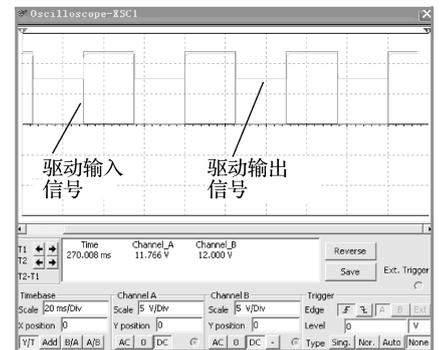


(b) 仿真分析

图 8 信号发生器电路图及其仿真结果
Fig. 8 Circuit of signal generator and its simulation result



(a) 电路图



(b) 仿真分析

图 9 晶闸管驱动电路图及其仿真结果
Fig. 9 Thyristor drive circuit and its simulation result

4 结 语

由于单纯靠水火弯板过程中钢板内部自身产生的热应力有时候难以达到成形要求,本文提出

了一种电磁力辅助水火弯板的新方法,介绍了这种方法的工艺原理和过程.在传统水火弯板过程中施加辅助外力来促进钢板的变形,并采用电磁力作为这种辅助外力,不仅能够改善钢板高温加

热条件,提高钢板成形效率,而且有利于加工控制和提高成形精度.

根据水火弯板对电磁力的要求,本文设计了电磁力辅助水火弯板装置的结构图,阐述了结构组成的各电路及其作用,并对各电路进行了设计,通过 EDA 仿真,对电路设计目标进行了验证.

参考文献:

- [1] Shin J G, Woo J H. Analysis of heat transfer between the gas torch and the plate for the application of line heating [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2003, **125**(4):794-800.
- [2] Malabika A, Mandal N R. Thermo-mechanical analysis of plates undergoing line heating using pseudolinear equivalent constant rigidity system [J]. *Journal of Ship Production*, 2004, **20**(2):84-89.
- [3] Shin J G, Ryu C H, Nam J H. A comprehensive line-heating algorithm for automatic formation of curved shell plates [J]. *Journal of Ship Production*, 2004, **20**(2):69-78.
- [4] Biswas P, Mandal N R, Sha O P. A study on generation of compound curved surfaces by line heating using oxyacetylene gas flame [J]. *Journal of Ship Production*, 2008, **24**(4):180-189.
- [5] 汪 骥,刘玉君,王忠强,等. 船体舳艄部中厚板水火成型主要变形影响因素及其规律研究[C] // 中

- 国造船工程学会 2009 年 CAD/CAM 学术交流会议文集. 郑州:中国造船工程学会, 2009:112-116.
- WANG Ji, LIU Yu-jun, WANG Zhong-qiang, *et al.* Study on the line-heating factors and deformation mechanisms for bow and stem shell plates [C] // *Paper Compilation on the CAD/CAM Academic Symposium of CSNAME in 2009*. Zhengzhou:CSNAME, 2009:112-116. (in Chinese)
- [6] 孙慧平,郭伟刚,吴晓峰,等. 电磁成形技术在薄板成形中应用的研究进展[J]. *机床与液压*, 2007, **35**(6):44-48.
- SUN Hui-ping, GUO Wei-gang, WU Xiao-feng, *et al.* Development of the sheet forming by electromagnetic forming technology [J]. *Machine Tool and Hydraulics*, 2007, **35**(6):44-48. (in Chinese)
- [7] Kamal M, Daehn G S. A uniform pressure electromagnetic actuator for forming flat sheets [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the ASME*, 2007, **129**(2):369-379.
- [8] 孙 强,陶 健. 新型 IGBT 集成驱动模块 2SD315A 应用研究[J]. *现代电力*, 2003, **20**(3):79-83.
- SUN Qiang, TAO Jian. Study on a new type hybrid IC(2SD315A) for IGBT drive and protection [J]. *Modern Electric Power*, 2003, **20**(3):79-83. (in Chinese)

Research on circuit design of electromagnetic force aided line-heating

WANG Ji^{*1,2}, LIU Yu-jun¹, SHI Bing³

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Department of Naval Architecture, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. National Engineering Research Center of Shipbuilding, Dalian 116024, China)

Abstract: The process principle of electromagnetic force aided line-heating is introduced. An electromagnetic coil is used during the line-heating process which can generate electromagnetic force to further the formation of steel plate. This new technique can not only improve the heating condition and increase the forming efficiency, but also be beneficial to processing control and enhancing the forming accuracy. This new technique can be used in the formation of thick hull plate and high strength steel plate. The device circuits of the electromagnetic force aided line-heating are investigated and designed including the filtering rectification circuit, recharge circuit, discharge circuit and control circuit. The simulation results testify the rationality and feasibility of the designed circuits.

Key words: line-heating; electromagnetic force; curved surface forming; circuit simulation