

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

高重复频率传输线结构冲击磁铁仿真分析

王东兴 韩波 武万锋 黄毛毛 朱燕燕

Analysis based on simulation of kicker working at high repetition frequency with transmission line structure

Wang Dongxing, Han Bo, Wu Wanfeng, Huang Maomao, Zhu Yanyan

引用本文:

王东兴, 韩波, 武万锋, 黄毛毛, 朱燕燕. 高重复频率传输线结构冲击磁铁仿真分析[J]. *强激光与粒子束*, 2025, 37: 035014. doi: 10.11884/HPLPB202537.240273

Wang Dongxing, Han Bo, Wu Wanfeng, Huang Maomao, Zhu Yanyan. Analysis based on simulation of kicker working at high repetition frequency with transmission line structure[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2025, 37: 035014. doi: 10.11884/HPLPB202537.240273

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.240273>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于MOSFET的高重复频率高压脉冲源设计

Design of high repetition rate and high voltage pulse generator based on metal oxide semiconductor field-effect transistor
强激光与粒子束. 2019, 31: 040022-1-040022-4 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.180321>

基于半桥结构的双极性脉冲电源的研究

Investigation of bipolar pulse source based on half-bridge structure
强激光与粒子束. 2024, 36: 025005-1-025005-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230329>

100 kHz高功率高光束质量纳秒激光振荡器

100 kHz high power high beam quality nanosecond laser oscillator
强激光与粒子束. 2023, 35: 071006-1-071006-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.230023>

HEART-50重复频率高功率脉冲驱动源研究

High power repetitive rate pulse generator HEART-50
强激光与粒子束. 2022, 34: 095014-1-095014-5 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210526>

高重复频率猝发多脉冲加载下交联聚苯乙烯真空沿面闪络特性

Vacuum surface flashover characteristics of cross-linked polystyrene under high repetition rate burst multi-pulse loading
强激光与粒子束. 2024, 36: 055015-1-055015-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230337>

三平板传输线结构的解析分析方法

Analytical method of triplate transmission lines configuration
强激光与粒子束. 2022, 34: 095010-1-095010-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210469>



·电源电路拓扑及仿真技术·

高重复频率传输线结构冲击磁铁仿真分析^{*}

王东兴¹, 韩 波¹, 武万锋¹, 黄毛毛¹, 朱燕燕²

(1. 深圳综合粒子设施研究院, 广东 深圳 518107; 2. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201204)

摘 要: 深圳中能高重复频率 X 射线自由电子激光 (S³FEL) 需要 MHz 的高重复频率高稳定性冲击磁铁 (Kicker) 系统, 传输线结构冲击磁铁系统是实现高重复频率的有效途径。但传输线结构冲击磁铁的波形稳定性不足限制了该类型冲击磁铁在大型粒子加速器中的应用。为改善上述不足, 基于传输线结构冲击磁铁的输入波形和电路结构参数开展了研究, 利用傅里叶分析等数学工具分析了影响冲击磁铁工作波形稳定性的主要因素, 揭示了冲击磁铁理想波形的谐波次数与传输线结构冲击磁铁截止频率之间的关系。在此基础上, 提出一种减小冲击磁铁实际波形与理想波形偏差的方法。该方法通过调整冲击磁铁输入波形参数或者传输线结构冲击磁铁截止频率, 在一定范围内可以获得冲击磁铁理想的工作波形。为验证上述关系, 用电路仿真软件对冲击磁铁不同工作波形和不同电路参数进行了仿真。仿真结果证实了上述关系且验证了所提方法的有效性。

关键词: 传输线结构; 冲击磁铁; 高重复频率; 傅里叶级数; 截止频率

中图分类号: TL503.3; TL503.5

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202537.240273

Analysis based on simulation of kicker working at high repetition frequency with transmission line structure

Wang Dongxing¹, Han Bo¹, Wu Wanfeng¹, Huang Maomao¹, Zhu Yanyan²

(1. Institute of Advanced Science Facilities, Shenzhen 518107, China;

2. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract: Shenzhen's medium-energy high-repetition-rate X-ray free electron laser (Shenzhen Superconducting Soft X-ray Free Electron Laser, S³FEL) requires 1 MHz high-repetition-rate and high-stability kicker. Transmission line structure kicker is an effective way to achieve high repetition rate. However, the insufficient waveform stability of the transmission line structure kicker limits the application of this type of kicker in large particle accelerators. To solve the above problem, this paper studies the input waveform and circuit structure parameters of the transmission line structure kicker. It analyzes the main factors affecting the stability of kicker's working waveform using mathematical tools such as Fourier analysis, and reveals the relationship between the harmonic order of kicker ideal waveform and the cut-off frequency of kicker transmission line structure. On this basis, this paper proposes a method to reduce the deviation between the actual waveform and the ideal waveform of kicker. This method can obtain the ideal working waveform of kicker within a certain range by adjusting the input waveform parameters or the cut-off frequency of kicker. To verify the above relationship, this paper uses circuit simulation software to simulate different waveforms and different circuit parameters of kicker. The simulation results verify that the above relationship revealed and confirm the effectiveness of the method mentioned.

Key words: transmission line structure, kicker, high repetition rate, Fourier series, cut-off frequency

深圳中能高重复频率 X 射线自由电子激光 (S³FEL) 需要 MHz 高重复频率高稳定性冲击磁铁 (Kicker) 系统, 传输线结构是实现高重复频率冲击磁铁系统的有效途径。但传输线结构冲击磁铁的波形稳定性不足限制了该类型结构冲击磁铁在大型粒子加速器中的应用。为提高传输线结构冲击磁铁的性能, 国内外许多学者已经做了大量相关工作, 其中有代表性的工作: 文献 [1] 举例说明了传输线冲击磁铁在优化上升时间、增强冲击强度等方面所采用的方法。文献 [2] 采用一种双 C 结构的传输线冲击磁铁, 以满足大孔径和长度的需求。文献 [3] 提供了详细的传

* 收稿日期: 2024-08-23; 修订日期: 2024-12-04
联系方式: 王东兴, wangdongxing@mail.iasf.ac.cn。

传输线冲击磁铁理论描述,揭示了传输线冲击磁铁的理论特性。文献[4]提出了一种脉冲频率大于 500 kHz 的传输线冲击磁铁和驱动器。文献[5-6]提出了一种传输线冲击磁铁结构,详细说明了采用二维和三维软件建模计算质子偏转均匀性,并通过几何结构优化,实现了 3% 偏转均匀性的目标。文献[7]给出了传输线结构冲击磁铁中电容和电感的测量方法。文献[8]提出了一种使用传输线型冲击磁铁来补偿主磁铁反射场的校正方法。文献[9]通过比较不同的磁性材料特性,研究了铁氧体材料对补偿冲击磁铁参数的影响,以优化冲击磁铁的反射场。文献[10-11]详细介绍了分布参数型冲击磁铁物理设计过程和机械结构设计。文献[12]指出传输线冲击磁铁两端存在边缘场,首末端单元的有效电感大于其它单元的有效电感。文献[13]开发了同轴结构的馈通,以避免阻抗失配,提高场的均匀性。文献[14]介绍了使用三维软件预测冲击磁铁电感,并将预测电感值与测量电感值进行比较,二者数据高度一致。文献[15]对比分析了传输线型、简化 PFN 型和固态感应叠加型冲击磁铁参数及各自的技术特点。文献[16]介绍了传输线冲击磁铁的电磁建模及时域分析,优化了磁铁设计。科研工作者在传输线冲击磁铁方面积累了卓有成效的研究成果,但 S³FEL 对高重复频率高稳定性冲击磁铁的性能提出了更高要求。为进一步提升传输线冲击磁铁的性能指标,缩小传输线冲击磁铁技术与 S³FEL 需求之间的差距,本文对电路的输入波形以及电路结构进行分析,希望通过揭示波形特性与电路特性之间的关系,寻找提升传输线结构冲击磁铁性能的方法。

在加速器注入引出中,常用的冲击磁铁有集总参数型和传输线型^{[1][2]}。集总参数型冲击磁铁具有结构简单、可靠性高等优点,但电路中较大的集总电感,限制了磁场的上升和下降速度,同时限制了高重复频率脉冲波形。传输线型冲击磁铁,由电感和电容单元串联组成,模拟传输线的特征阻抗,以最大限度的减少脉冲反射,并提供足够的通频带宽来传输具有快速上升和下降时间的脉冲,实现高重复频率脉冲波形。

1 传输线冲击磁铁结构及脉冲需求

传输线结构冲击磁铁通常由电感和电容构成的单元串联组成,电路结构如图 1 所示^[3]。图 1 中, U 为理想电压脉冲; L_c 是单元电感,通常由铁氧体等材料组成; C_c 是单元电容, L_s 是单元电容的寄生串联电感。为叙述方便,初步设定冲击磁铁最高重复频率为 1 MHz; 需要波形特征为: 脉冲顶宽大于 120 ns, 脉冲底宽不大于 600 ns, 峰值幅度稳定度优于 1×10^{-4} 。为实现束流偏转 $8 \sim 9$ mrad/m, 采用 80 A 的电流得到 0.004 T/m 的积分场强度; 为避免过高的电压对开关管和元器件产生负面影响, 选择脉冲幅值 1000 V 脉冲; 为方便实现阻抗匹配选择 12.5Ω 作为传输线结构电路的特征阻抗。

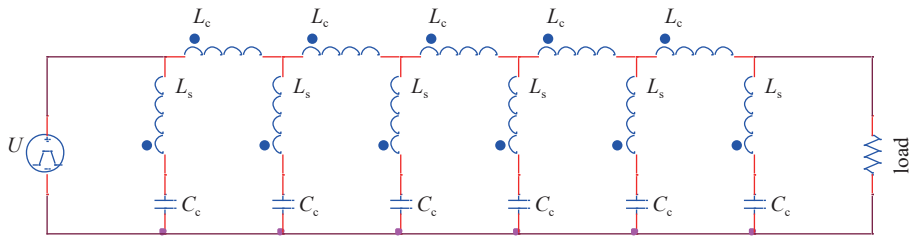


Fig. 1 Schematic of transmission line kicker

图 1 传输线冲击磁铁系统示意图

2 脉冲波形分析

2.1 波形解析

理想脉冲波形通常为方波。考虑实际方波存在上升沿和下降沿, 脉冲波形 $f(t)$ 如图 2 所示。

图 2 脉冲波形 $f(t)$ 的数学解析式可表示为

$$f(t) = \begin{cases} \frac{A}{d}t, & 0 \leq t \leq d \\ A, & d \leq t \leq (d+m) \\ \frac{A}{d}(2d+m-t), & (d+m) \leq t \leq (2d+m) \\ 0, & (2d+m) \leq t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 为脉冲波幅值, d 为脉冲波上升沿, m 为脉冲顶宽,

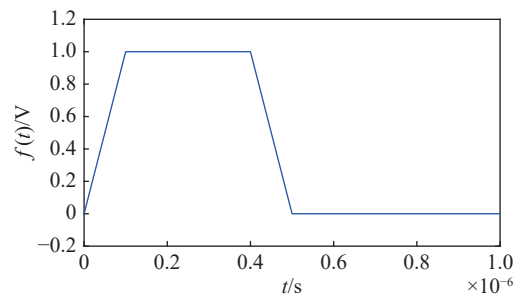


Fig. 2 Diagram of pulse waveform

图 2 脉冲波形示意图

T 为脉冲周期。 $f(t)$ 是周期为 T 的实周期信号, 将式(1)按傅里叶级数展开, 其傅里叶级数系数为

$$a_0 = \frac{2A(m+d)}{T} \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2A[\cos(n\omega_0 d) + \cos(n\omega_0 m + n\omega_0 d) - \cos(n\omega_0 m + 2n\omega_0 d) - 1]}{\omega_0^2 d T n^2} \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2A[\sin(n\omega_0 m + n\omega_0 d) + \sin(n\omega_0 d) - \sin(n\omega_0 m + 2n\omega_0 d)]}{\omega_0^2 d T n^2} \quad (4)$$

$$A_n = \sqrt{(a_n)^2 + (b_n)^2} \quad (5)$$

脉冲波形的傅里叶级数展开为

$$g(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N \rightarrow +\infty} [A_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n)] \quad (6)$$

$$\varphi_n = -\arctan(b_n/a_n) \quad (7)$$

式中: n 为正整数, 代表谐波次数; a_0 、 a_n 、 b_n 为傅里叶级数系数; A_n 为 n 次谐波分量的幅值, φ_n 为 n 次谐波分量的相位, ω_0 是基波角频率, $A_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n)$ 为 n 次谐波分量表达式。

2.2 脉冲波形特性

对式(1)所述波形归一化分析, 设置脉冲波形参数 T 为 1×10^{-6} s, 幅值 A 为 1, 脉冲顶宽 m 为 $3T/10$ 。对式(2)、(3)、(4)中的上升沿 d 、谐波分量频次 n 进行考察, 各次谐波振幅 A_n 与之对应的变化关系如图 3 所示。从图 3 可以看出, 脉冲波形的上升沿 d 越大, 各次谐波振幅 A_n 下降得越快。当傅里叶级数展开的谐波最高频次 N 为确定值时, 上升沿 d 越大, 高于 N 次的各谐波分量振幅之和越小, N 次谐波后面的谐波分量对傅里叶级数的影响就越小。因此, 当谐波最高频次 N 为确定值时, 可以适当增大图 1 中输入脉冲上升沿 d , 以减小 $g(t)$ 与 $f(t)$ 之间的误差, 即输出脉冲与输入脉冲的误差。

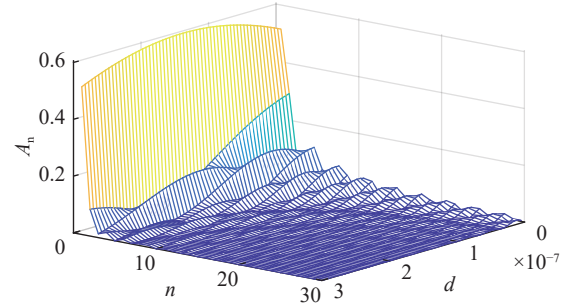


Fig. 3 Relationship between n , d and A_n

图 3 n 、 d 与 A_n 之间的关系图

3 传输线结构冲击磁铁的电路特性

3.1 电路频率特性

脉冲波形通过传输线冲击磁铁电路产生需要的电流或电压信号。输入脉冲包含丰富的频率成分, 受电路特性影响, 在冲击磁铁上产生的电流或电压信号通常不能与输入的脉冲波形完全吻合。其中, 传输线结构的截止频率是影响冲击磁铁产生的电流或电压信号的重要因素。传输线结构冲击磁铁的截止频率 f_c , 可表示为^[4]

$$f_c = 1/(\pi \sqrt{(L_c + 4L_s)C_c}) \quad (8)$$

3.2 波形拟合

由脉冲波形傅里叶分析可知, 脉冲波形各参数 A , d , m , T 为确定值时, 输出脉冲波形仅与谐波最高频次 N 有关, 当 N 趋近于无穷大时, 输出脉冲与输入脉冲的误差也越小, 即 $g(t)$ 逐渐趋近于 $f(t)$ 。

选取不同的谐波最高频次 N 进行波形拟合。设置梯形波周期 T 为 10^{-6} s, 幅值 A 为 1, 上升沿 d 为 $T/10$, 脉冲顶宽 m 为 $3T/10$ 。 N 分别选取 5、10、15、20 所对应的拟合曲线如图 4 所示, 对应的拟合曲线与梯形波误差如图 5 所示。从图中可以看出, 随着谐波最高频次 N 的增大, 拟合曲线逐渐接近梯形波, 拟合曲线与梯形波误差也随着 N 的增大而减小。

3.3 脉冲波形误差分析

设可以通过电路的谐波分量最高频次为 N , 则该谐波的角频率 ω_N 表示为

$$\omega_N = N\omega_0 = 2\pi f_c \quad (9)$$

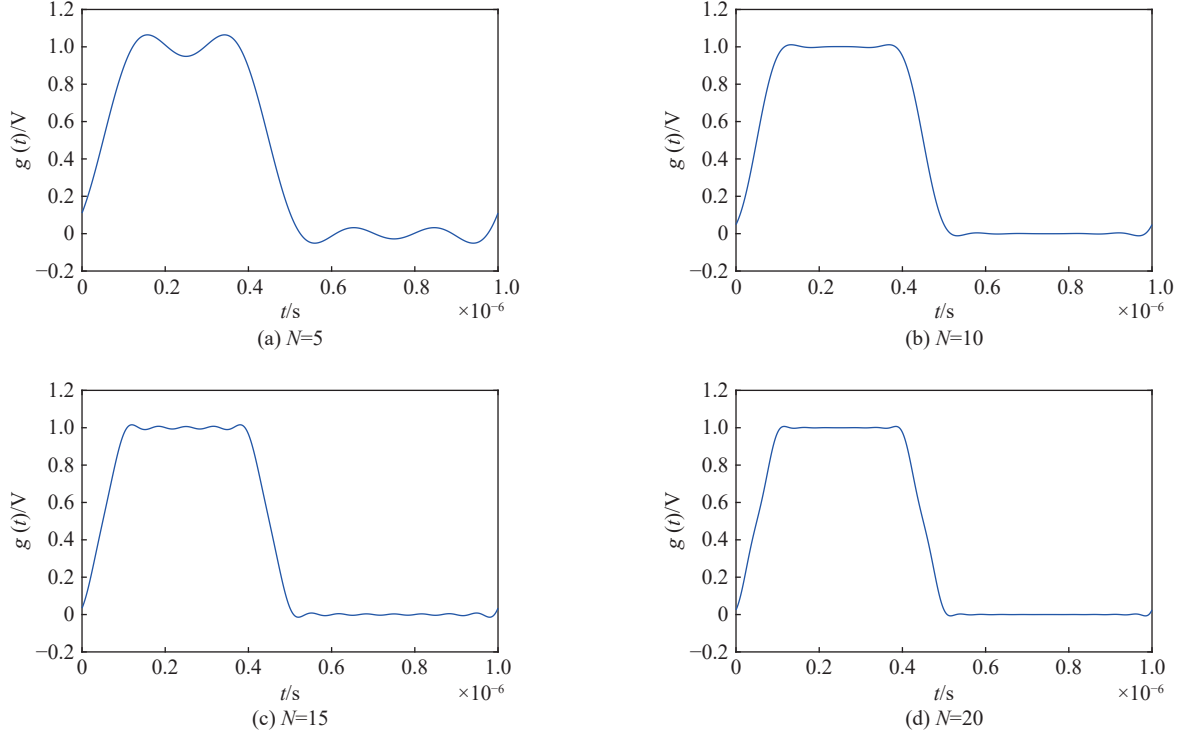


Fig. 4 Fitting curves with different N

图 4 不同 N 时的拟合曲线

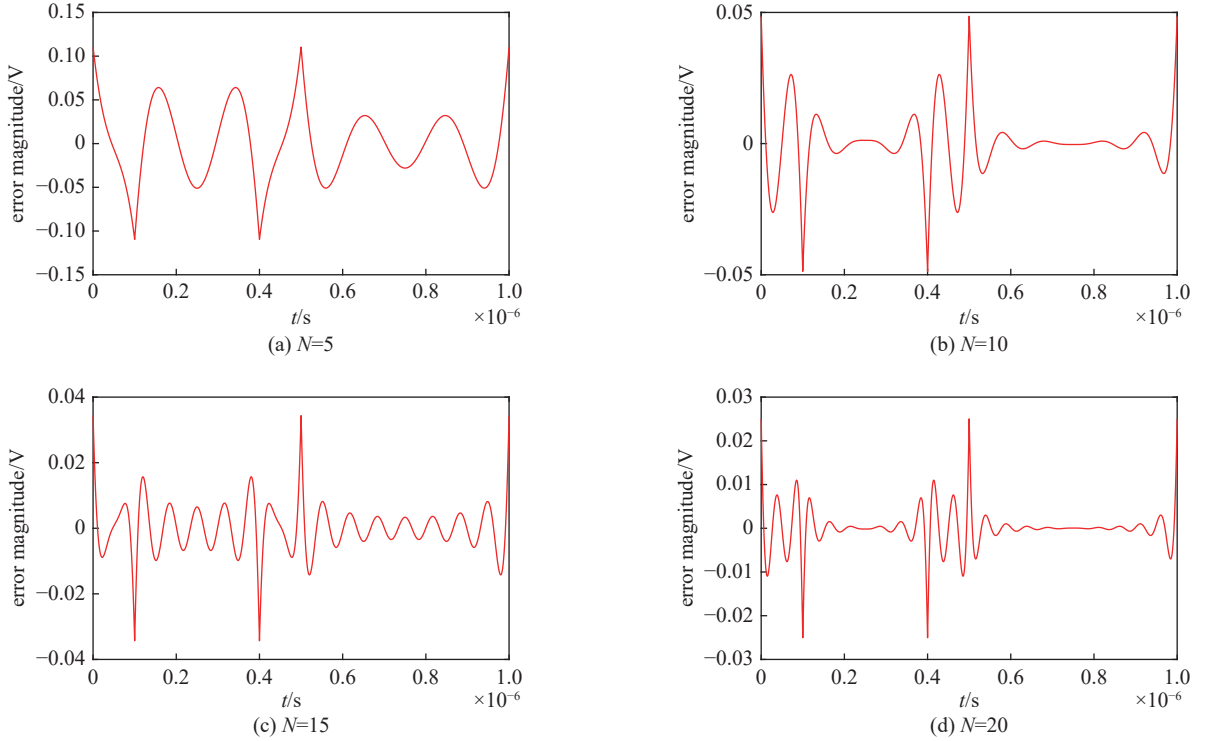


Fig. 5 Error between trapezoidal wave and fitting curve with different N

图 5 不同 N 时拟合曲线与梯形波误差

$$\omega_0 = 2\pi/T \quad (10)$$

依据式(8)~(10),可推导出通频带内谐波的最高频次 N 为:

$$N = T f_c \quad (11)$$

由信号传输原理可知,当输入波形周期 T 确定时,通频带内谐波最高频次 N 与电路单元截止频率有关。电路

单元的截止频率越高,通过的谐波最高频次 N 越大,输出脉冲就越接近输入脉冲波形,输出与输入之间的误差也就越小。由于输入脉冲的上升沿和下降沿与信号的高次谐波相关性较高,高于电路通频带截止频率的谐波分量不易通过传输线冲击磁铁电路,从而使输出脉冲与输入脉冲之间产生误差。因此,反映脉冲波形品质的上升沿 d ,对传输线结构冲击磁铁的通频带提出较高要求。当传输线结构的通频带越宽,输出电压或电流信号的上升沿和下降沿就可以越陡;反之,只适合传输上升沿和下降沿更平缓的脉冲信号。

4 仿真验证

为验证上述理论,对负载电阻上输出电流与理想电流之间的误差进行仿真分析,仿真设置两种方案:(1)为脉冲输入波参数确定时,电路特性改变对输出电流的影响;(2)为电路单元参数确定时,波形特性改变对输出电流的影响。其中,理想电流为幅值 1000 V 的梯形波直接作用在 12.5Ω 的负载阻抗上所产生的电流,该电流幅值为 80 A。仿真电路如图 6 所示。

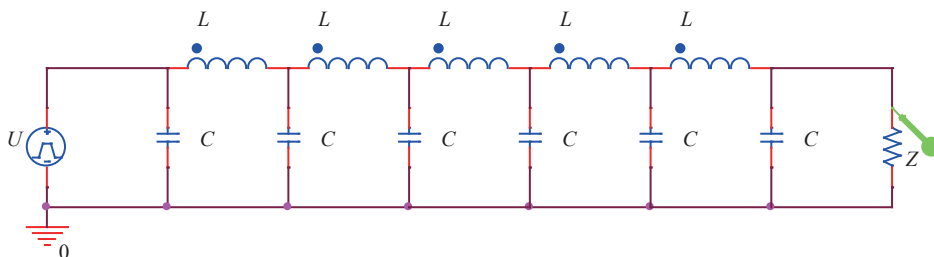


Fig. 6 Schematic of system of transmission line kicker in simulation

图 6 传输线结构冲击磁铁系统仿真示意图

实际的传输线结构冲击磁铁通常采用同轴电缆进行馈电,同轴电缆的工作频率远大于 1 GHz,远高于传输线结构冲击磁铁电路截止频率,因此不考虑同轴电缆对传输线电路带宽的影响。图 1 中单元电容串联的寄生电感 L_s 远小于电感 L ,因此仿真时不考虑电容器单元串联的寄生电感。

4.1 电路特性及分析

设置脉冲电压 U 幅值为 1000 V,上升沿 d 为 100 ns,下降沿宽度与上升沿宽度相同,脉冲顶宽 300 ns。分别取电感 L 为 7.8125、15.625、31.25、62.5 nH,负载阻抗 Z 为 12.5Ω ,电容 C 值可以通过公式 $Z = \sqrt{L/C}$ 计算得出。

利用电路仿真软件可得到负载电流,负载电流会随电路参数 L 、 C 的不同而产生相移, L 、 C 值越大则相移越大,如图 7 所示。负载电流的相移可以通过其上升沿和下降沿中心之和取平均值的方式得出,所得相移存在微小误差,但不影响仿真图趋势。采用数学软件计算负载电流和理想电流之间的误差,所得结果如图 8 所示。为分析理想电流与负载电流的误差,仿真过程对理想电流做适当相移以匹配误差计算。从仿真结果可以看出,仿真分析与理论分析保持一致。在脉冲输入波参数确定时,电路单元中的电感 L 取值对波形稳定性产生影响。 L 越大,电路单元的截止频率越低,通频带越窄,输出电流与理想电流之间的误差越大; L 越小,电路单元的截止频率越高,通频带越宽,输出电流与理想电流之间的误差越小。适当减小电路参数 L 、 C 值,提高截止频率,可减小输出电流与理想电流之间的误差。单元电感可由下式预估^[5]

$$L = k^2 \mu_0 w l / h \quad (12)$$

式中: k 是线圈匝数; μ_0 是磁导率; w 是磁芯孔径宽度; l 是磁芯的长度; h 是磁芯孔径高度。其中 w 和 h 的值由真空管尺寸确定,适当减小 Kicker 设备的单元电感磁芯长度 l ,可减小输出电流与理想电流之间的误差。电容 C 值可根据电感值选取。

4.2 波形特性及分析

设置脉冲电压 U 幅值为 1000 V,脉冲顶宽 300 ns,上升沿 d 分别取 40、60、100、120 ns,下降沿宽度与上升沿相同。电感 L 分别取 7.8125 nH、62.5 nH,负载阻抗 Z 为 12.5Ω ,电容 C 值可以通过公式 $Z = \sqrt{L/C}$ 计算得出。

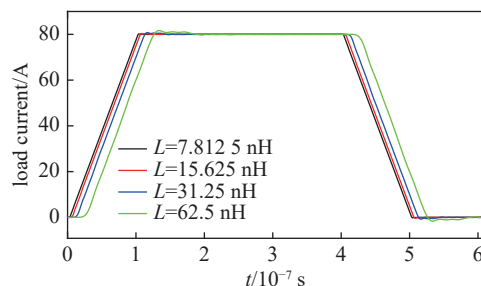
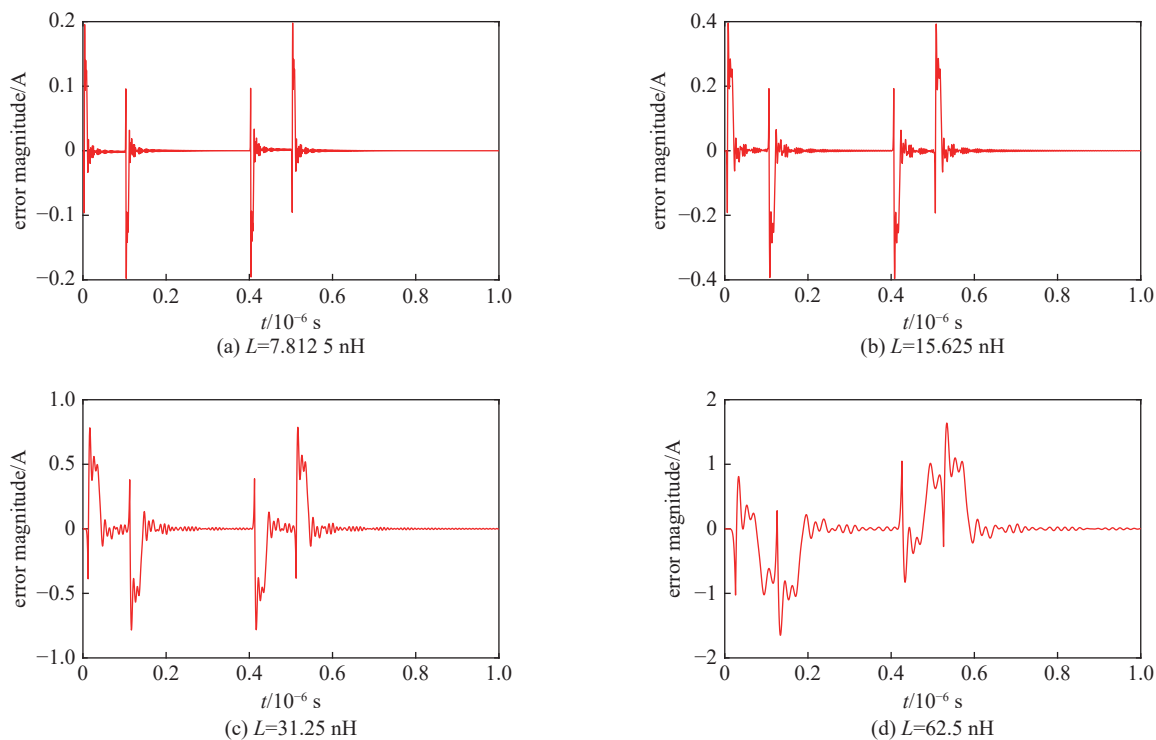
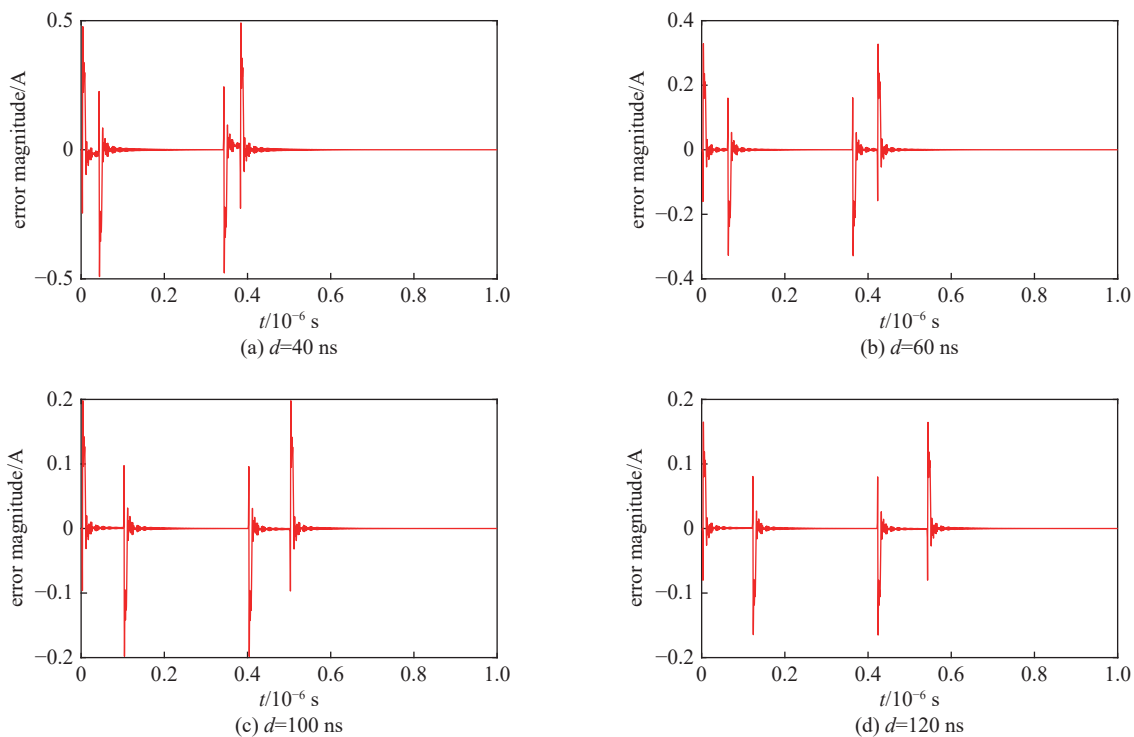


Fig. 7 The phase shift of load current caused by circuit parameter

图 7 电路参数引起负载电流相移

Fig. 8 Error between the load current and the ideal current when $d=100\text{ns}$, L is different图 8 $d=100\text{ ns}$, L 取值不同时负载电流与理想电流误差Fig. 9 Error between the load current and the ideal current when $L=7.8125\text{nH}$, d is different图 9 $L=7.8125\text{ nH}$, d 取值不同时负载电流与理想电流误差

电感 L 取值为 7.8125 nH 时, 仿真得出负载电流和理想电流之间的误差如图 9 所示。电感 L 取值为 62.5 nH 时, 仿真得出负载电流和理想电流之间的误差如图 10 所示。从图 9、图 10 可以看出, 电路单元的 L 值和 C 值保持不变, 梯形输入波的上升沿 d 取值对波形稳定性产生影响。 d 越大, 输入脉冲包含的高次谐波分量越少, 脉冲波形越容易通过 L 、 C 电路单元、输出电流与理想电流之间的误差越小; 反之, d 越小, 输出电流与理想电流之间的误差越大。适当加大冲击磁铁梯形输入波的上升沿 d , 可减小输出电流与理想电流之间的误差。即电路特性相同时,

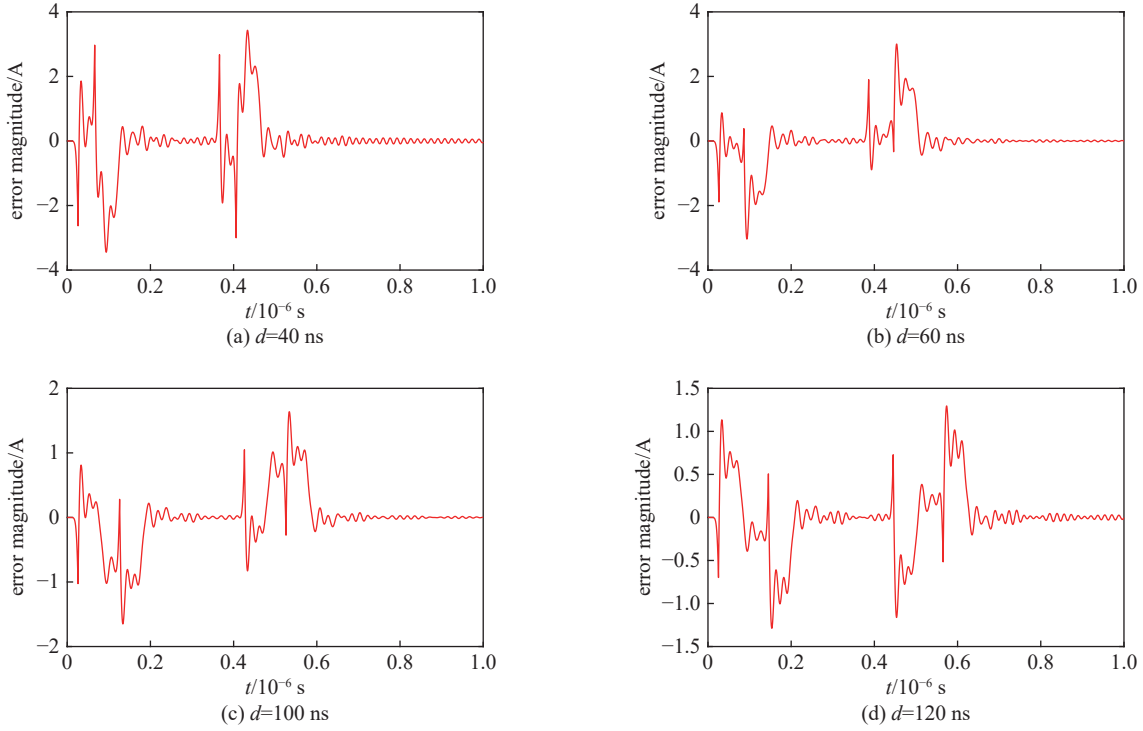


Fig. 10 Error between the load current and the ideal current when $L=62.5$ nH, d is different

图 10 $L=62.5$ nH, d 取值不同时负载电流与理想电流误差

梯形输入波的上升沿越大, 负载电流与理想电流之间的误差越小; 梯形输入波参数保持不变, 即波形特性相同时, 电路单元截止频率越高, 负载电流与理想电流误差越小。

4.3 脉冲平顶稳定性分析

脉冲平顶的稳定性是高重复频率传输线结构冲击磁铁的关键品质, 影响束流的运行状态和品质。因此, 在仿真结果的基础上, 对脉冲电流平顶稳定度做统计分析, 以标准差作为衡量手段。图 8、图 9、图 10 分别是不同状态下负载电流与理想电流的误差值, 由于理想电流的平顶稳定性极好, 因此该误差值能够作为负载电流平顶稳定性的度量标准。表 1、表 2、表 3 分别对应图 8、图 9、图 10 中负载电流脉冲平顶的稳定性。从表中可以看出, d 一定时, L 越大, 通频带越窄, 脉冲平顶的标准差越大, 脉冲平顶稳定性越低; 反之, 平顶稳定性越高。 L 一定时, d 越大, 输入脉冲包含的高次谐波分量越少, 脉冲平顶的标准差越小, 脉冲平顶稳定性越高; 反之, 平顶稳定性越低。当 L 变小、 d 变大时, 电路的通频带变宽, 输入脉冲包含的高次谐波分量变少, 脉冲平顶的标准差有变小趋势, 脉冲平顶稳定性增强。通过减小 L 或增大 d , 可以实现在较宽时间内获得较低的脉冲平顶的标准差。

表 1 $d=100$ ns 时, 不同 L 的脉冲电流平顶稳定性

Table 1 Flat-top stability of pulse current when $d=100$ ns, L has different values

L/nH	standard deviation	time range of error data/ μs
7.8125	0.000292	0.2-0.4
15.625	0.001918	0.203-0.403
31.25	0.006951	0.209-0.409
62.5	0.04593	0.222-0.422

表 2 $L=7.8125$ nH 时, 不同 d 的脉冲电流平顶稳定性

Table 2 The flat-top stability of pulse current when $L=7.8125$ nH, d is 40, 60, 100, 120 ns

d/ns	standard deviation	time range of error data/ μs
40	0.001007	0.14-0.34
60	0.000417	0.16-0.36
100	0.000292	0.2-0.4
120	0.00025	0.22-0.42

表 3 $L=62.5$ nH 时, 不同 d 的脉冲电流平顶稳定性
Table 3 Flat-top stability of pulse current when $L=62.5$ nH, d is 40, 60, 100, 120 ns

d/ns	standard deviation	time range of error data/ μs
40	0.148 448	0.14-0.34
60	0.098 411	0.16-0.36
100	0.049 833	0.2-0.4
120	0.046 15	0.22-0.42

5 结 论

本文通过分析冲击磁铁工作波形的谐波与传输线结构的截止频率, 揭示了两者之间的关系。利用该关系可以在一定范围内调整冲击磁铁工作波形, 从而提高高重复传输线结构冲击磁铁的稳定性。从波形解析拟合结果和仿真验证得出如下结论: 传输线结构冲击磁铁电路单元的通频带越宽, 输出脉冲越接近理想脉冲; 不同参数的脉冲波形保真传输对传输线结构的参数要求不同。脉冲波形上升沿宽度会对输出脉冲产生影响, 脉冲波形上升沿宽度越大, 输出脉冲与理想脉冲之间的误差越小, 输出脉冲越接近理想脉冲。后续工作计划测试和分析传输线冲击磁铁每个 LC 单元的电压和电流波形, 并分析波形反射等因素对脉冲波形的影响。

参考文献:

- [1] Ducimetière L. Advances of transmission line kicker magnets[C]//Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference. 2005: 235-239.
- [2] Lin Munan, Wu Y W, Huang L S, et al. Fast injection and extraction kicker system design for High repetition rate Muon Source at CSNS[J]. *Journal of Instrumentation*, 2021, 16: P08010.
- [3] Barnes M J, Ducimetière L, Fowler T, et al. Injection and extraction magnets: kicker magnets[C]//Proceedings of the CERN Accelerator School CAS 2009: Specialised Course on Magnets. 2009: 141-166.
- [4] Beukers T, Nguyen M, Tang Tao. Discrete element transmission line beam spreader kickers for LCLS-II[C]//2018 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). 2018: 151-155.
- [5] Armenta R B, Barnes M J, Blackmore E W, et al. Design concept for AGS injection kicker upgrade to 2 GeV[C]//Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference. 2005: 1380-1382.
- [6] Armenta R B, Barnes M J, Blackmore E W, et al. Electromagnetic modeling of the AGS A10 injection kicker magnet[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2006, 16(2): 293-296.
- [7] Barnes M J, Wait G D. Low power measurements on an AGS injection kicker magnet[C]//2007 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC). 2007: 2188-2190.
- [8] Fukuoka S, Fan K, Ishii K, et al. Development of a fast compensation kicker system for J-PARC main-ring injection[C]//Proceedings of IPAC 2013. 2013: 684-686.
- [9] Fan K, Ishii K, Fukuoka S, et al. Ferrite property effects on a fast kicker magnet[C]//Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (Nagoya, 2013). 2013: 845-847.
- [10] 吴官健, 王磊, 王冠文, 等. 环形正负电子对撞机注入引出分布参数型冲击磁铁设计[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35: 054002. (Wu Guanjian, Wang Lei, Wang Guanwen, et al. Design of injection and extraction delay-line kicker magnet for circular electron-positron collider[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35: 054002)
- [11] Schröder G. Fast pulsed magnet systems[M]//Chao A W, Tigner M. Handbook of Accelerator Physics and Engineering. Geneva: World Scientific Press, 1999: 460-466.
- [12] Chmieleńska A, Barnes M J. Helical beam screen for the Future Circular Collider for hadrons injection kicker magnets[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2020, 23: 041002.
- [13] Ohkawa T, Chiba Y, Wakasugi M. Development of the kicker magnet for muses[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, 547(2/3): 287-293.
- [14] Barnes M J, Wait G D. Comparison of measured and predicted inductance per cell for a travelling wave kicker magnet[C]//Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference. 1996: 2588-2590.
- [15] 刘超, 尚雷, 刘祖平, 等. 冲击磁铁脉冲发生器技术分析[J]. *高电压技术*, 2008, 34(3): 480-483. (Liu Chao, Shang Lei, Liu Zuping, et al. Technology of pulse generators for kicker magnets[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(3): 480-483)
- [16] Shinde R S, Pareek P, Gaud V, et al. Studies of prototype transmission line extraction kicker magnet for booster synchrotron[C]//Proceeding of InPAC-2011: DAE-BRNS Indian Particle Accelerator Conference. 2011.