

*For citation:* Zhang Huiru, Xu Qiao, Cao Lican, Mei Shunqi. Structural optimization of ultra-wide width electromagnetic launch weft inserter based on magnetization theory // Grand Altai Research & Education — Issue 2 (22)'2024 (DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2024.02) — EDN: <https://elibrary.ru/RBOVZJ>

UDK 613.168

## STRUCTURAL OPTIMIZATION OF ULTRA-WIDE WIDTH ELECTROMAGNETIC LAUNCH WEFT INSERTER BASED ON MAGNETIZATION THEORY

*Zhang Huiru<sup>1\*</sup>, Xu Qiao<sup>1</sup>, Cao Lican<sup>1</sup>, Mei Shunqi<sup>1,2</sup>*

1 Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China

2 Innovation Centre of Advanced Textile Technology (Jianhu Laboratory), Shaoxing, 312000, China

E-mail: zhr15623633695@163.com

**Abstract.** The weft inserter is the core component of the piece shuttle loom, in which the weft inserter needs to hold the weft yarn and go through the process of launching, flying, braking and so on. In order to improve the acceleration performance of the weft inserter, according to the magnetization theory, it is proposed to increase the magnetic flux difference by adding permanent magnets to the weft inserter to increase the applied magnetic field force by comparing the position of the permanent magnet material in the weft inserter and analyzing the electromagnetic force on the weft inserter with the addition of the permanent magnet using Ansys Maxwell finite element software. The results show that the addition of a permanent magnet sheet at the end of the weft inserter increases the magnetic field gradient on both sides of the device and enhances the electromagnetic force.

**Keywords:** weft inserter; magnetic field force; electromagnetic launch insertion; optimized design

## 基于磁化理论的超宽门幅电磁发射引纬器结构优化

*张慧茹<sup>1\*</sup>, 徐巧<sup>1</sup>, 曹李灿<sup>1</sup>, 梅顺齐<sup>1,2</sup>*

1 武汉纺织大学, 湖北省数字化纺织装备重点实验室, 中国, 武汉, 430073

2 现代纺织技术创新中心(鉴湖实验室), 中国绍兴, 312000

E-mail: zhr15623633695@163.com

**摘要:** 引纬器是片梭织机的核心部件, 在片梭织机中引纬器需要夹持纬纱, 经过发射, 飞行, 制动等过程. 为了提高引纬器加速性能, 根据磁化理论, 提出通过在引纬器上加装永磁体来增大磁通量差值, 增大所受磁场力. 通过对比永磁体材料在引纬器的位置, 并利用 Ansys Maxwell 有限元软件分析加装永磁体的引纬器

所受电磁力. 结果表明: 在引纬器尾端加装永磁体薄片, 使引纬器两侧磁场梯度加大, 电磁力增强.

**关键词:** 引纬器; 磁场力; 电磁发射引纬; 优化设计

## 0 引言

目前, 根据引纬方式的不同, 可将商业化的织机分为剑杆织机, 片梭织机, 喷水织机, 喷水织机, 其最大幅宽难以达到 12m [1;14]. 超宽门幅的织物在航空航天, 工业, 海防领域使用效果显著 [3]. 近年来随着科学技术的发展和人们需求的提升, 对于宽幅织物的需求迫切, 大量新型织机进入纺织工业生产领域. 造纸聚脂网, 工业滤布, 防鸟网, 化工工业布, 酒店窗帘等织物的需求量日益增加. 天津工业大学季东 [2] 基于德国 JURGNES 织机为研究对象对该机器的引纬机构和梭箱进行了改进. 该织机采用液压式投梭, 大型片梭式双侧引纬, 入纬率纬 16m/s, 但存在投梭用力过大, 梭子寿命会变短, 在连续发射状态下, 织机引纬速度不稳定, 引纬速度不确定, 液压元件在使用过程中出现渗透影响投梭稳定性, 且其可视化程度不高. 山东日发纺织机械有限公司的王方昌 [13] 其公司以 GA731-380 型剑杆织机为基础, 专项开发设计了 7.5m 的特宽幅剑杆织机, 该机采用共轭凸轮引纬, 根据织机引纬的各项参数确定胸梁长和剑带长, 为保证剑头的夹持, 把左右剑头改进为多齿槽凹凸配合结构, 但在研发过程中, 对剑带的材料要求极高, 高度运动下, 普通材料会拉伸变形, 车速超过 90r/min, 剑头交接位置处会出现偏差, 需要消除部分冲量, 且齿轮啮合处也需要提高精度, 噪音大.

对于噪声小, 低能耗, 高入纬率的超宽门幅织机的需求逐渐显现, 现有电磁发射引纬的方式被提出, 可实现超宽门幅引纬织造. 电磁发射的原理是利用磁路中的磁阻变化使物体加速运动, 遵循磁阻最小原理, 即加速物体向磁阻最小的方向运动, 具有可靠性高, 结构简单, 可控性好等优点 [4;15].

Emad Owlia 等在文献 [5] 中研究各参数对电磁发射线圈中抛体速度的影响和在加速度过程中抛体速度的变化趋势. 武汉纺织大学刘念 [6] 建立了感应式电磁投梭与悬浮引纬模型. 在由铁芯, 电磁线圈和引纬器组成的理论投射模型下, 根据麦克斯韦方程, 安培环路定律, 法拉第电磁感应定律和洛仑兹力公式推算出了瞬时电磁推力. 由交流电源, 励磁线圈, U 型铁芯和引纬器组成的引纬器悬浮引纬模型, 引纬器中的感应电流与引纬器处磁场强度的径向分量相互作用会产生悬浮力. 张景卓等对磁阻型电磁发射装置进行理论建模和分析影响发射物体的主要参数 [7]. 徐巧等对超宽门幅电磁发射引纬机构进行了磁场构型, 并建立了结构参数的分析计算模型 [8].

现有片梭织机采用扭轴式投梭方式进行引纬, 存在冲击大, 效率低等问题, 且国产片梭织机可达 5.4m 以上 [9;16], 在电磁发射引纬和电磁发射脉冲电源的快速发展下, 织机采用此种引纬方式可实现 12m 幅宽织造的需要.

本文超宽门幅电磁发射引纬机构是基于磁阻型电磁发射, 磁阻型电磁发射的本质是利用线圈磁场与磁化后的铁磁质弹体之间的作用力来加速弹体, 其作

用力的大小与驱动线圈电流，感应电流及驱动线圈和电枢之间的互感梯度成正比 [10]。目前，磁场构型对发射效率影响方面研究相对较少 [11;17]，为了提高发射组件所受到的轴向加速力，笔者提出在引纬器上加装永磁材料薄片增大引纬器两端磁场梯度，并利用有限元软件 Ansys Maxwell 2D，分别对添加永磁体薄片不同位置的引纬器进行仿真和对比分析。

## 1 电磁发射引纬机理

电磁发射引纬主要由通电发射线圈，包裹线圈3/4的磁轭，夹纬的引纬器组成，基本结构如图1所示。磁轭使用电工纯铁 DT4 材料，发射线圈为铜导线均匀绕成。纬纱由辅助装置的储纬器和递纬装置送入引纬器，引纬器由电磁发射装置的驱动线圈加速系统投梭，高速穿过梭口，再经电磁发射装置驱动线圈制动系统减速至电磁制动器夹持，双侧剪断纱线后实现宽幅引纬。

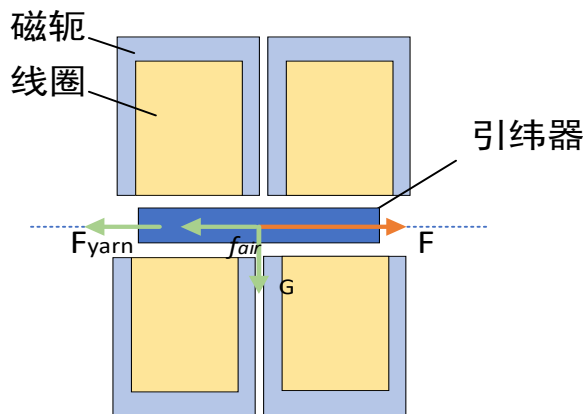


图1 电磁发射引纬原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of the electromagnetic launch weft insertion

## 2 引纬器受力数学模型

电磁引纬发射系统是包含结构 - 电 - 电磁 - 热的一个复杂系统，本文在研究过程中对其进行合理的简化。将磁化的铁磁质引纬器等效为具有磁矩的磁介质。基本假设如下：引纬器磁化过程简化为，采用微分的思想，引纬器被划分为多个微段，在通电线圈产生的空间磁场中，每个微段所受电磁力均匀分布，主要受轴向磁场力。

根据分段组合式超宽门幅电磁发射引纬的特性进行电磁力的建模，如图2。

电磁力在超宽门幅电磁发射引纬中是主要的驱动力，电磁力越大，引纬速度越快。在超宽门幅电磁发射引纬机构中，通电线圈按照设定的逻辑程序开关进行通断电，实现引纬器的持续加速，通过改变通电电流大小，引纬器的发射位置，磁轭厚度等均可改变引纬速度，最终影响门幅宽度。根据磁化理论中的分子电流观点，在磁化场的力矩作用下，各分子环流的磁矩在一定程度上沿着场的方向排列起来。

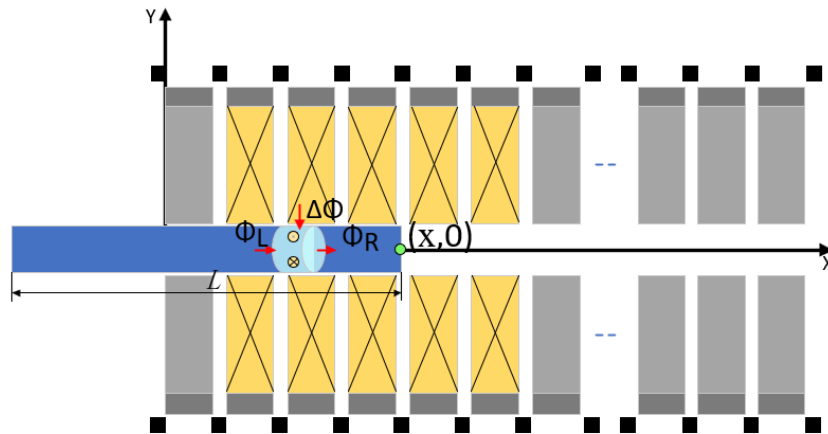


图2 分段组合式超宽门幅电磁发射引纬原理图

Figure 2. Segmented combination of ultra-wide width electromagnetic launch weft inserter principle

磁通连续性定理: 由任一闭合面穿出的净磁通等于零.

$$\Delta\Phi = \Phi_L - \Phi_R \quad (1)$$

简化后的引纬器任意微段所受的电磁力可以表示为 [12]:

$$F = BIL \sin \theta = \frac{\Delta\Phi}{L_s \times l_p} M l_p L_s = M \times \Delta\Phi \quad (2)$$

磁化强度  $M$  与磁化电流密度  $j_s$  在数值上相等, 磁化电流的大小可以表示为:  $I = M l_p$ ,

材料的磁化强度用下式来表示:

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H \quad (3)$$

引纬器所受的电磁力可以表示为 [12]:

$$F = \int M(x + dx) S (B(x + dx) - B(x)) \quad (4)$$

式中,  $M$  为磁化强度,  $l_p$  为微段中的铁磁材料长度,  $L_s$  为微段截面的周长.

### 3 引纬器优化仿真分析

#### 3.1 加装永磁体位置不同的引纬器模型建立

本文引纬器采用苏尔寿片梭织机用引纬器, 图3 为单向引纬结构, 由梭壳和梭夹构成. 由于引纬器内部的梭夹改变形态后对空间磁场中所受力影响效果明显, 修改材料会导致夹纬性能下降, 影响引纬性能. 根据公式 (2), 增大磁通量差值可以增大所受磁场力. 结合永磁体不易退磁的材料特性, 可以改变梭壳的材料, 为其提供固定的磁场强度.

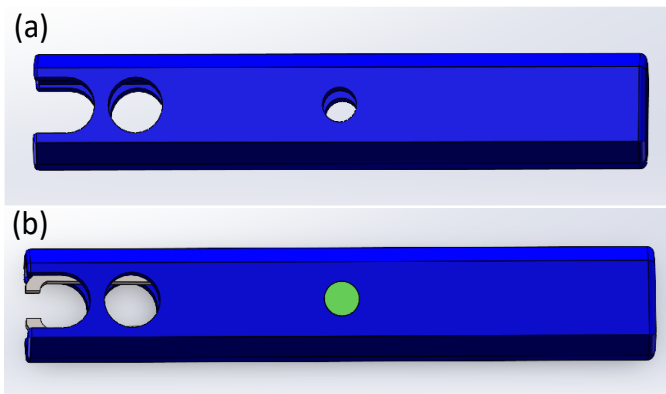


图3 苏尔寿片梭织机用引纬器:  
(a) 引纬器外壳; (b) 单向引纬器结构  
Figure 3. The weft inserter for Sulzer projectile looms: (a) The weft inserter housing; (b) The unidirectional weft inserter structure

在 Maxwell2D 中建立图4 结构的电磁发射引纬结构图, 驱动线圈为密匝铜线赋予 copper, 引纬器, 磁轭赋予 steel\_1008 材料, 运动域和求解域均为 vacuum.

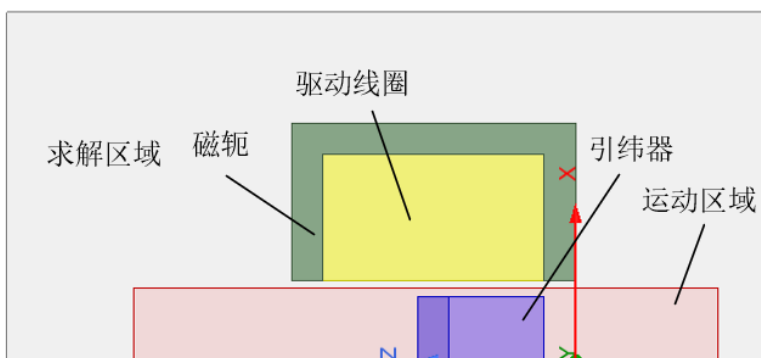


图4 电磁发射引纬仿真图  
Figure 4. Simulation diagram of electromagnetic launch weft insertion

分别对引纬器前端和后端添加大块永磁体材料 n30, 建立 2 维仿真模型, 结构如图5. 为了研究引纬器外壳加装永磁材料对发射电磁力的影响, 设置单级线圈, 发射器其它参数均相同. 引纬器受力图6 可以看出, 在同一激励下, 永磁体材料加装在引纬器后端 (b) 可构成更大的磁通量差, 磁场强度有所增强, 引纬器所受力增加, 且比 (a) 更快到达峰值.

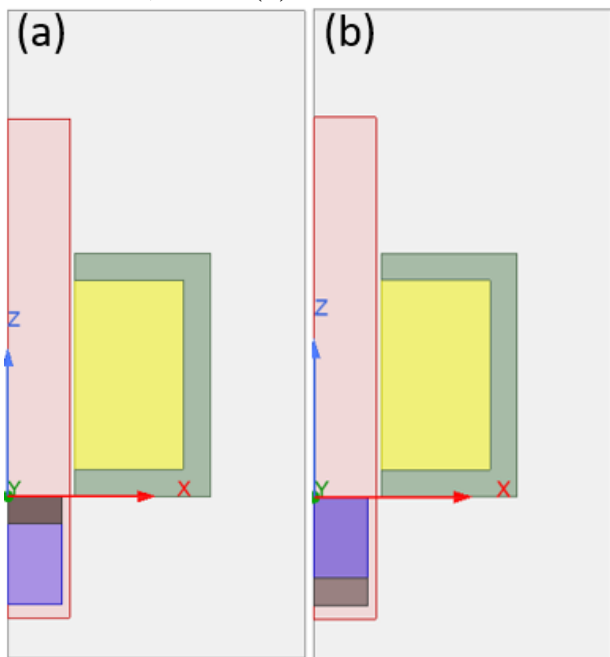


图5 引纬器材料配置方案:  
(a) 引纬器前端为大块永磁体材料;  
(b) 引纬器后端为大块永磁体材料  
Figure 5. The weft inserter material configuration scheme:  
(a) Large permanent magnet material at the front of the weft inserter  
(b) Large permanent magnet material at the back of the weft inserter

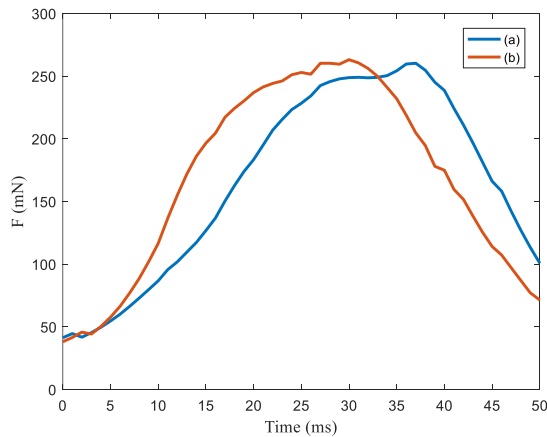


图6 引纬器受力图  
Figure 6. Force diagram  
of the weft inserter

### 3.2 加装在同一位置不同材料的引纬器模型建立

永磁体会对织机内部铁质零件产生力, 进而产生引纬轨迹的偏移. 为了减少这种影响, 由3.1 章节对比得出, 可考虑在引纬器后端添加小块永磁体材料薄片. 如图7 为引纬器后端加装小块永磁材料示意图, 通过对比同一激励下引纬器受力分析图8 可知, 引纬器后端加装钕磁铁 NdFe 比加装小铝块所受电磁力更大, 加装钕磁铁 NdFe 的引纬器可产生更大的磁通量差, 是因为永磁体的作用在于产生一个固定的磁场强度, 使得引纬器两侧有更大的磁场梯度和电磁力.

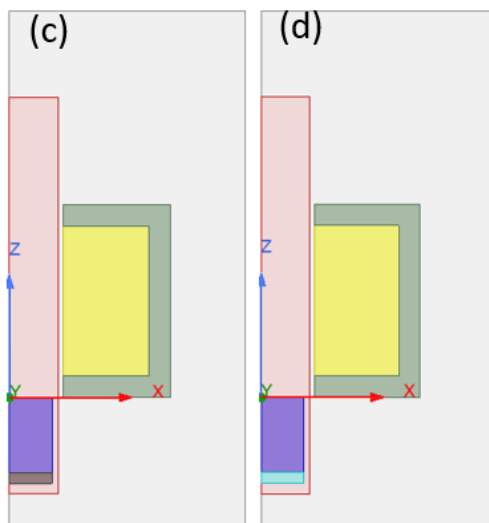


图7 引纬器尾端配置不同永磁体 (c) 引纬器  
后端为小块NdFe (d) 引纬器后端为小块铝  
Figure 7. Configuration of different permanent  
magnets at the rear end of the weft  
inserter (c)  
Small piece of NdFe at the rear end of the weft  
inserter (d)

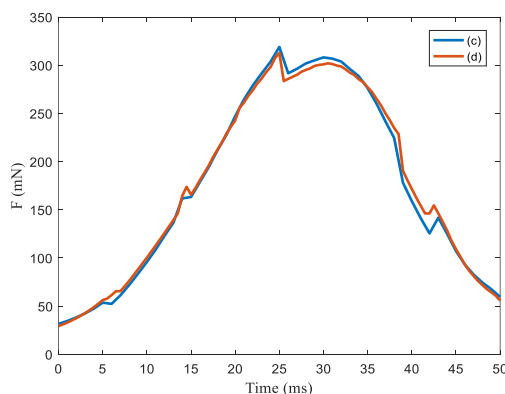


图8 引纬器受力图  
Figure 8/ Force diagram  
of the weft inserter

## 4 结论

根据磁化理论, 本文提出在引纬器后端加入永磁体薄片来增大引纬器所受电磁力的方法, 并利用 Maxwell 2D 软件进行仿真分析, 主要对比了引纬器材料配置位置和种类. 结果表明: 在永磁体后端配置永磁体优于在前端配置; 引纬器后端配置永磁体薄片可产生一个固定的磁场强度, 能够增大引纬器两端的磁场梯度, 使引纬器所受电磁力增大, 从而提高引纬器加速性能. 本文提供了一种在引纬器一侧加上永磁体薄片的优化引纬器性能的思路, 为后续超宽门幅电磁发射引纬机构提升速度提供新思路, 达到优化效果.

## 参考文献

- [1] 徐巧, 闫文军, 梅顺齐, 等. 基于电磁发射的超宽门幅自动织机引纬机构设计方法[J]. 纺织学报, 2018, 39(7):130-136.
- [2] 季东. 重型宽幅织机引纬机构与梭箱的设计[D]. 天津工业大学, 2002.
- [3] Cherston J., Veysset D., Sun Y. et al. Large-area electronic skins in space: vision and preflight characterization for first aerospace piezoelectric e-textile[C]//Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2020. SPIE, 2020, 11379: 239-252
- [4] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 高等教育出版社, 1985.
- [5] Owlia, Emad, Mirjalili et al. Design and modeling of an electromagnetic launcher for weft insertion system[J]. Textile research journal, 2019, 89(5):834-844.
- [6] 刘念, 张弛, 陈海英, 等. 宽幅电磁投射悬浮引纬关键技术及试验研究[J]. 上海纺织科技, 2022, 50(1):12-16.
- [7] 张景卓, 姚陆锋, 杨绍华. 磁阻型电磁发射的建模分析与仿真研究[J]. 大学物理, 2022, 41(2):49-52,81.
- [8] 徐巧, 严小雨, 梅顺齐, 等. 超宽门幅织机电磁发射引纬机构结构与磁场分析[J]. 现代制造工程, 2018(3):138-142,46.
- [9] 张万国. 片梭织机的技术进步[J]. 纺织导报, 2008(8):64-67. DOI:10.3969/j.issn.1003-3025.2008.08.016.
- [10] 向红军. 电磁感应线圈炮原理与技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2015: 24-39.
- [11] 王小召, 于存贵, 沙赵明. 一种电磁线圈发射器磁场构型优化方法[J]. 兵工自动化, 2018,37(8):1-5.
- [12] 贺雨晨. 基于多场耦合的超宽门幅电磁引纬机构结构与性能研究[D]. 武汉纺织大学, 2023.
- [13] 王方昌. 特宽幅剑杆织机的特点及其应用[J]. 棉纺织技术, 2018,46(6):59-62.
- [14] 崔晓龙. 超宽门幅电磁发射引纬机构结构性能优化研究[D]. 武汉纺织大学, 2022.
- [15] 闫文军. 超宽门幅织机电磁引纬装置的控制系统的研究[D]. 武汉纺织大学, 2020.
- [16] 孙伟波. 宽幅悬浮式片梭引纬双向电磁驱动研究与实验[D]. 武汉纺织大学, 2023.
- [17] 田金鹏, 易宁轩. 驱动线圈绕制结构对线圈式电磁发射装置性能的影响[J]. 磁性材料及器件, 2021, 52(03):40-43.

## References

- [1] Xu Q., Yan We, Mei S. et al. Based on the electromagnetic launch of ultra wide width automatic loom weft insertion mechanism design method [J]. Journal of textile, 2018, 33 (7) 6:130-136. (in Chinese) DOI: 10.13475 / j.f ZXB. 20170203607.
- [2] Ji Dong. Design of weft insertion mechanism and shuttle box of heavy-duty wide loom[D]. Tianjin Polytechnic University, 2002.

- [3] Cherston J., Veysset D., Sun Y. et al. Large-area electronic skins in space: vision and preflight characterization for first aerospace piezoelectric e-textile[C]//Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2020. SPIE, 2020, 11379: 239-252
- [4] Ouyang J., Liu Z., Yang L., et al. Numerical analysis of a novel magnetoresistive electromagnetic transmitter[J]. *Microtome*, 2010, 38(7):25-27,30. (in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1004-7018.2010.07.008.
- [5] Owlia, Emad, Mirjalili, Seyed Abbas, Shahnazari, Mostafa. Design and modeling of an electromagnetic launcher for weft insertion system[J]. *Textile research journal*, 2019, 89(5):834-844. DOI:10.1177/0040517518755793.
- [6] Liu N., Zhang Q., Chen H. et al. Key technology and experimental research on wide electromagnetic projection and levitation of weft draw-in [J]. *Shanghai Textile Science and Technology*, 2022, 50 (01): 12-16. (in Chinese) DOI:10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2022.01.079.
- [7] Zhang J., Yao L., Yang S. Modeling analysis and simulation study of magnetoresistive electromagnetic launch [J]. *University Physics*, 2022, 41 (02): 49-52+81. (in Chinese) DOI:10.16854/j.cnki.1000-0712.210180.
- [8] Xu Q, Yan X, Mei S et al. Structural design and magnetic field analysis of electromagnetic launch weft-inducing mechanism for ultra-wide width width loom [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2018, (03): 138-142+46. (in Chinese) DOI:10.16731/j.cnki.1671-3133.2018.03.025.
- [9] Zhang W. Technological progress of projectile loom[J]. *Textile Herald*, 2008(8):64-67. (in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1003-3025.2008.08.016.
- [10] Xiang H. Electromagnetic induction coil gun principle and technology [M]. Beijing: Arms Industry Press, 2015: 24-39.
- [11] Wang X., Yu C., Sha Z. An optimization method of magnetic field configuration of electromagnetic coil transmitter[J]. *Military Automation*, 2018, 37(8):1-5. (in Chinese) DOI:10.7690/bgzd.2018.08.001.
- [12] He Yuchen. Research on structure and performance of ultra-wide width electromagnetic weft insertion mechanism based on multi-field coupling[D]. Wuhan Textile University, 2023.
- [13] Wang Fangchang. Characteristics and application of extra-wide rapier loom[J]. *Cotton Textile Technology*, 2018, 46(6):59-62.
- [14] Cui Xiaolong. Research on structural performance optimization of ultra-wide width electromagnetic emission weft insertion mechanism[D]. Wuhan Textile University, 2022.
- [15] Yan Wenjun. Research on the control system of electromagnetic weft insertion device of ultra-wide width loom[D]. Wuhan Textile University, 2020.
- [16] Sun Weibo. Research and experiment on bidirectional electromagnetic drive of wide-width suspension shuttle weft insertion[D]. Wuhan Textile University, 2023.
- [17] Tian Jinpeng, Yi Ningxuan. Effect of drive coil winding structure on the performance of coil-type electromagnetic transmitter[J]. *Magnetic Materials and Devices*, 2021, 52(03):40-43.