

*For citation:* Liao Mingzhe, Xu Qiao, Mei Shunqi, Zhang Huiru, Dai Yuguang. The influence of yoke on electromagnetic force during electromagnetic weft insertion // Grand Altai Research & Education — Issue 2 (22)'2024 (DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2024.02) — EDN: <https://elibrary.ru/BGFLIH>

УДК 613.168

## THE INFLUENCE OF YOKE ON ELECTROMAGNETIC FORCE DURING ELECTROMAGNETIC WEFT INSERTION

*Liao Mingzhe*<sup>\*1</sup>, *Xu Qiao*<sup>1</sup>, *Mei Shunqi*<sup>1,2</sup>, *Zhang Huiru*<sup>1</sup>, *Dai Yuguang*<sup>1</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: 1325113434@qq.com

**Abstract.** Electromagnetic weft insertion technology has a broad application prospect in the weaving of wide-width textiles. Based on the principle of electromagnetic drive, this paper analyzes the factors that may affect the electromagnetic force. The electromagnetic weft insertion device without yoke is simulated by finite element simulation software. It is found that most of its magnetic field lines are diffused outwardly, the energy conversion efficiency is low and the electromagnetic force is unstable. Then a magnetic yoke is installed outside the drive coil. The results show that the magnetic field inside the drive coil increases significantly, the magnetic field line escaping to the outside decreases obviously, and the electromagnetic force received by the clip weft device increases and becomes more stable, which can effectively improve the efficiency of electromagnetic weft insertion.

**Keywords:** Electromagnetic weft insertion mechanism, Electromagnetic launch, Electromagnetic yoke

## 电磁引纬过程中磁轭对驱动力影响分析

*廖明哲*<sup>1</sup>, *徐巧*<sup>1</sup>, *梅顺齐*<sup>1,2</sup>, *张慧茹*<sup>1</sup>, *戴宇光*<sup>1</sup>

1 武汉纺织大学, 湖北省数字化纺织装备重点实验室, 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: 1325113434@qq.com

**摘要:** 电磁引纬技术在宽幅纺织品的织造中有着广阔的应用前景. 根据电磁发射基本原理, 分析了影响电磁力的因素. 采用有限元仿真软件对无磁轭电磁发射引纬机构进行了仿真. 发现其磁力线大部分向外扩散, 能量转换效率低, 电磁力不稳定. 然后在驱动线圈外安装一个磁轭. 结果表明, 驱动线圈内部磁场明显增大, 向外逸出的磁场线明显减小, 引纬器所受电磁力增大且变得更加稳定, 可有效提高电磁引纬效率.

**关键词:** 电磁引纬机构; 磁阻发射; 磁轭

## 0 引言

随着航空航天, 水利工程, 新型建筑材料等的发展, 现代对高品质纺织品的需求越来越大. 因此也对织机转速, 幅宽等的要求越来越高, 传统的织机也越来越难以满足织造要求, 以喷气织机, 喷水织机等为代表的无梭织机成为了现在研究的主流 [1].

国外喷气和剑杆织机的最高演示速度分别可达 2015 r/min 和 850r/min, 剑杆和喷气织机的最大幅宽可达 5.4m ~ 5.5m, 而生产在一些特殊场景如防护自然灾害所使用的布料时, 都需要超大幅宽的织机, 目前主要采取的方法还是采用多台织机拼接生产, 这样虽然能满足生产要求, 但在拼接部位的强度与其他正常织造部位还是存在差异.

超宽门幅纺织品的织造难点在于其引纬工序, 因此有人提出改进引纬方式, 采用电磁力来进行引纬, 1974 年, 在传统片梭织机的基础上, 提出了第一个电磁力引纬方案的专利 [2]. 2006 年上海工程技术大学提出了一种磁力引纬织机 [3]. 后来意达公司推出了全新的 DISCOVERY 片梭织机样机, 通过电磁弹射技术驱动飞梭引纬, 梭子飞行引导上采用了磁悬浮技术, 集成物联网技术和智能遥测技术, 具有预测性维护和低能耗的特点, 可以实现高效且环保的生产, 双幅织造牛仔面料时引纬速度超过 400纬/min [4]. 武汉纺织大学的徐巧团队在超宽门幅织机上建立了一种电磁发射引纬系统 [5], 该系统具有铁磁金属引纬装置. 对引纬装置的运动进行了仿真, 对考虑引纬装置影响的电磁场进行了分析, 对技术参数和电磁参数进行了分析和计算 [6]. 由于引纬装置的铁磁性和非线性磁化强度影响磁感应强度, 电磁力和最大飞行速度, 还对这些因素以及在超宽门幅织机上引纬所需的电磁力进行了研究 [7][8].

电磁发射的最根本原理是通过洛伦兹力将发射体加速到满足要求的速度. 按照发射装置的类型可将电磁发射分为三大类: 磁阻型, 导轨型和重接型. 其中磁阻型可发射速度快, 发射体质量大, 但其电路控制较为复杂 [9]; 导轨型因为发射体和发射装置有接触, 因此会与较大的摩擦和腐蚀产生 [10]; 重接型虽然无接触无腐蚀, 但其理论和实践还尚未成熟.

本文主要对磁阻型电磁引纬装置进行研究, 改变发射装置中磁轭的形状, 通过有限元仿真软件获取各种磁轭对引纬器运动参数的影响, 探寻最佳的磁轭结构.

## 1 工作原理

电磁引纬技术根本原理是通过电磁力做功, 将电能转换为引纬器的动能, 使其达到满足要求的速度.

磁阻型电磁引纬装置主要由电源, 驱动线圈, 开关, 铁磁引纬器, 发射管道组成. 当电源给驱动线圈供电后, 线圈内部会激发磁场, 从而使得铁磁引纬器被磁

化. 被磁化后的引纬器受到驱动线圈所激发的磁场的作用而加速, 最后在速度达到要求后被发射出去.

这一过程相当于是磁场对磁矩的作用, 在磁感应强度为  $B$  的磁场中, 磁矩为  $m$  的铁磁材料受到的力是:

$$F = \nabla(m \cdot B) \quad (1)$$

由上式可知, 铁磁材料在磁场中所受到的力不仅与磁感应强度大小有关, 还与磁感应强度的变化有关. 根据磁阻最小原理, 当铁磁引纬器在驱动线圈中运动时, 线圈内部的磁路磁阻会发生变化, 铁磁引纬器也因此会受到电磁力的作用, 当引纬器的中心在驱动线圈中心前面时, 受到的是向前的驱动力作用, 而当引纬器通过线圈中心后, 受到的则是反向的阻力. 因此在引纬器通过线圈中点后需要将线圈断电, 防止线圈阻碍引纬器运动.

将引纬器近似为一个圆柱体, 则其在驱动线圈产生的磁场中所受到径向电磁力会是平衡力, 因此我们只需要考虑沿轴向的电磁力, 可以大大降低计算量. 电磁引纬装置简图如下:

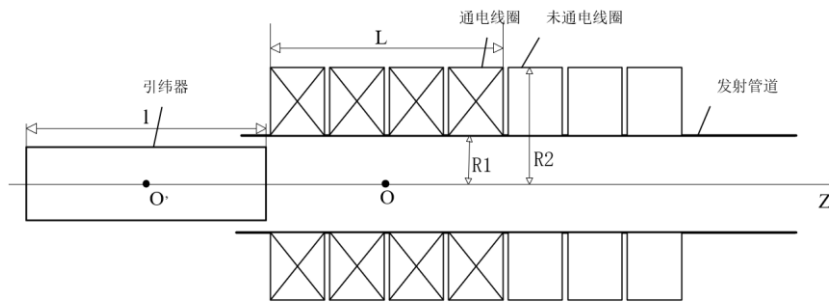


图1电磁引纬装置简图

Figure. 1 Schematic diagram of electromagnetic weft insertion device

当线圈中流过电流为  $i$ , 线圈内半径为  $R_1$ , 外半径为  $R_2$ , 通电线圈总长度为  $L$ , 引纬器长度为  $l$  时, 以通电线圈中点为原点, 引纬器运动方向为  $Z$  轴正方向, 根据毕奥-萨伐尔定律 [11], 在线圈中心沿轴线方向磁感应强度分布为:

$$B(z) = \frac{\mu_0 n_r n_z i}{2} \left[ \begin{array}{l} \left(\frac{L}{2} + z\right) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{L}{2} + z\right)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{L}{2} + z\right)^2}} + \\ \left(\frac{L}{2} - z\right) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{L}{2} - z\right)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{L}{2} - z\right)^2}} \end{array} \right] \quad (2)$$

上式中  $\mu_0$  为真空磁导率,  $n_r n_z$  分别为驱动线圈径向匝密度和轴向匝密度. 由于引纬器近似为圆柱体, 因此  $X$  与  $Y$  方向上的电磁力会相互抵消, 我们可仅计算  $Z$  方向电磁力  $F_z$ :

$$F(z) = 2\pi r^2 \frac{\chi_m}{\mu_0} \int_{z-\frac{l}{2}}^{z+\frac{l}{2}} B(z) \frac{\partial B(z)}{\partial z} dz \quad (3)$$

上式中  $r$  为引纬器半径,  $\chi_m$  为引纬器磁化率. 由式 (3) 可得引纬器加速度  $a$ :

$$a = \frac{F(z)}{m} = \frac{2\pi r^2}{m} \frac{\chi_m}{\mu_0} \int_{z-\frac{l}{2}}^{z+\frac{l}{2}} B(z) \frac{\partial B(z)}{\partial z} dz \quad (4)$$

加速完成时引纬器速度  $v$ :

$$v = \int_0^t a dt = \frac{2\pi r^2}{m} \frac{\chi_m}{\mu_0} \int_0^t \int_{z-\frac{l}{2}}^{z+\frac{l}{2}} B(z) \frac{\partial B(z)}{\partial z} dz dt \quad (5)$$

由上式可知, 引纬器完成加速时的出口速度与磁场分布密切相关, 因此对驱动线圈添加磁轭使其内部的磁场分布更加密集, 理论上可以有效提高引纬器所受到的电磁力进而增加它的出口速度.

## 2 有限元仿真分析

由于磁场计算涉及多个变量以及会产生的涡流效应, 使用数值计算方法计算量较大, 故采用专业的电磁场仿真软件 Maxwell 进行求解. 前面将引纬器近似为圆柱体, 因此可使用 about-Z 的二维瞬态求解器进行计算.

### 2.1 无磁轭电磁引纬系统的模型建立

在 Maxwell2D 中建立如下无磁轭的电磁引纬系统, 其内容包括引纬器, 驱动线圈, 运动域和求解区域. 引纬器赋予 steel\_1008 材料, 驱动线圈赋予 copper 材料, 运动域和求解区域赋予 vacuum.

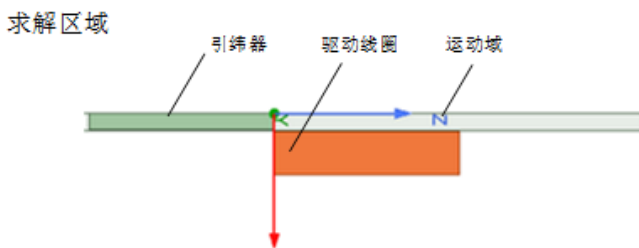


图2 无磁轭仿真模型图  
Figure 2. Simulation model without yoke

线圈匝数给定 1800 匝, 电流 100A, 线圈内径 9mm, 外径 30mm, 长度 90mm. 引纬器半径 8mm, 长度 90mm, 质量为 50g, 给引纬器固定 10m/s 的速度运动, 读取它运动过程中的受力情况. 为保证计算的精确性, 将运动域和引纬器进行进一步的网格剖分, 选择 On Selection 方式, 最大网格为 0.5mm; 驱动线圈同样选择 On Selection 方式进行剖分, 最大网格为 1mm. 设置边界条件为气球边界, 求解时间 10ms, 求解步长 0.5ms, 经仿真计算后可得到无磁轭电磁引纬模型磁力线分布如下:

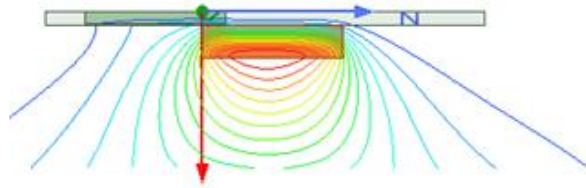


图3 无磁轭电磁引纬模型磁力线分布

Figure. 3 Magnetic field line distribution of electromagnetic weft insertion model without yoke

引纬器所受到的电磁力变化图如下:

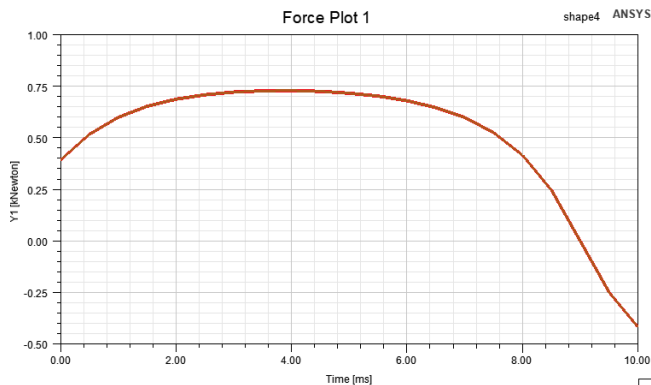


图4 无磁轭电磁引纬模型电磁力  
Figure 4. Electromagnetic force  
of electromagnetic weft insertion  
model without yoke

由上图可知引纬器受到最大电磁力为 727.1N, 当引纬器运动时间约为 9ms 即引纬器中心与线圈中心重合时, 其所受到的电磁力为零, 再继续向前运动时受到的力为负值, 代表反向的阻力, 这也符合磁阻最小原理.

## 2.2 有磁轭电磁引纬系统的模型建立

同样在 Maxwell2D 中建立如下有磁轭 (半环绕式) 的电磁引纬系统, 除磁轭外其他参数和无磁轭电磁引纬系统一致, 磁轭赋予 steel\_1008 材料, 厚度为 8mm, 选择 On Selection 方式进行剖分, 最大网格为 1mm.

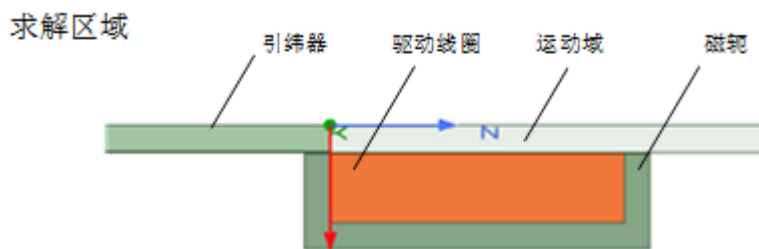


图5 有磁轭仿真模型图  
Figure 5. Simulation  
model with yoke

经仿真计算后可得到有磁轭电磁引纬模型磁力线分布如下:

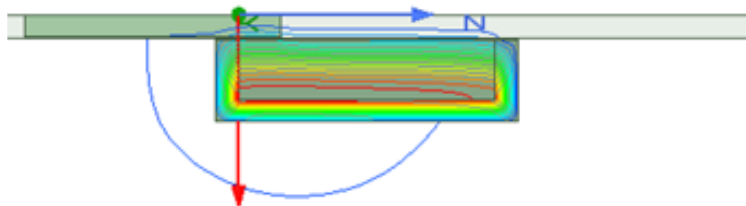


图6 有磁轭电磁引纬模型磁力线分布  
Figure. 6 Magnetic field line  
distribution of electromagnetic weft  
insertion model with yoke



对比图3 和图6, 在驱动线圈外侧增加磁轭后, 线圈内部磁力线有了明显集中, 向外部逸散的磁力线明显减少. 在有磁轭电磁引纬模型中引纬器所受到的电磁力变化图如下:

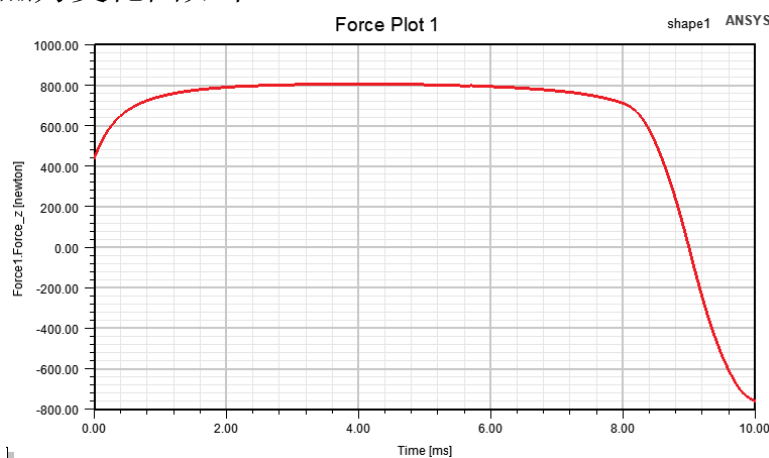


图7 有磁轭电磁引纬模型电磁力  
Figure.7 Electromagnetic force of  
electromagnetic weft insertion  
model with yoke

由上图可知引纬器受到最大电磁力为 804.8N. 与无磁轭电磁引纬模型相比, 在增加磁轭之后引纬器受到电磁力更大, 而且达到稳定电磁力所花费的时间更少.

### 3 结论

本文利用 Maxwell 电磁仿真软件, 对电磁引纬过程中引纬器所受到的电磁力进行了分析计算, 计算结果表明在引纬器运动过程中, 电磁力确实与分析一致, 呈现先增大后反向趋势, 且临界点为引纬器运动到驱动线圈中点附近. 通过观察仿真计算结果中的磁力线分布, 发现在没有磁轭束缚的情况下, 磁力线向四周扩散, 造成了能量的浪费, 因此进行了相同激励的增加磁轭实验, 结果显示有磁轭组电磁力相较于无磁轭组有了显著的提升, 符合预期.

### 参考文献

- [1] 洪海沧, 李雪清. 近期国内外织造技术的进步与发展趋势(上)[J]. 纺织导报, 2019(7):71-74. DOI:10.3969/j.issn.1003-3025.2019.07.028.
- [2] Josef, J., & Ernst, G. (1974). Weft insertion system for weaving looms (Patent number: US3902535A). United States.
- [3] 刘平, 方绍恩. 一种新型织机——磁力引纬织机[J]. 上海纺织科技, 2006, 34(7):59-61. DOI:10.3969/j.issn.1001-2044.2006.07.025.
- [4] Jim Kaufmann. ITMA 2019 — Just a Few of The "Cool" Things on Display[J]. Textile World, 2019, 169(5).
- [5] 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. DOI:10.13475/j.fzxb.20170203607.
- [6] 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设计与磁场分析[J]. 现代制造工程, 2018(3):138-142, 46. DOI:10.16731/j.cnki.1671-3133.2018.03.025.
- [7] 严小雨. 电磁发射引纬机构的分析设计与仿真[D]. 武汉纺织大学, 2018.
- [8] 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.
- [9] 孙韩, 白秀军. 电磁炮物理模型构建与系统实现[J]. 智能计算机与应用, 2015, 5(4):33-35. DOI:10.3969/j.issn.2095-2163.2015.04.010.

- [10] 王群, 耿云玲. 电磁炮及其特点和军事应用前景[J]. 国防科技, 2011, 32(2):1-7. DOI:10.3969/j.issn.1671-4547.2011.02.001.
- [11] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.

## References

- [1] Hong Haicang, Li Xueqing. Recent progress and development trend of weaving technology at home and abroad [J]. Textile Review, 2019(7):71-74. (in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1003-3025.2019.07.028.
- [2] Josef, J., & Ernst, G. (1974). Weft insertion system for weaving looms (Patent number: US3902535A). United States.
- [3] Liu Ping, FANG Shao-en. A New Type of loom — Magnetic weft Insertion Loom [J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2006, 34(7):59-61. (in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1001-2044.2006.07.025.
- [4] Jim Kaufmann. ITMA 2019 — Just a Few of The "Cool" Things on Display[J]. Textile World, 2019, 169(5).
- [5] Xu Qiao, YAN Wenjun, Mei Shunqi, et al. Based on the electromagnetic emission of ultra wide width automatic loom weft insertion mechanism design method [J]. Journal of textile, 2018, 33 (7) 6:130-136. The DOI: 10.13475 / j.f ZXB. 20170203607.
- [6] Xu Qiao, YAN Xiaoyu, Mei Shunqi, et al. Structure Design and Magnetic Field Analysis of Electromagnetic Emission weft Insertion Mechanism for Ultra-Wide Door Loom [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(3):138-142, 46. DOI:10.16731/j.cnki.1671-3133.2018.03.025.
- [7] Yan Xiaoyu. Analysis, Design and Simulation of Electromagnetic Emission weft Insertion Mechanism [D]. Wuhan Textile University, 2018.
- [8] Yan Wenjun. Research on Control System of Electromagnetic weft Insertion Device for Super Wide Door Loom [D]. Wuhan Textile University, 2020.
- [9] Sun Han, BAI Xiujun. Physical Model Construction and System Implementation of Electromagnetic Gun [J]. Intelligent Computer and Applications, 2015, 5(4):33-35. (in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.2095-2163.2015.04.010.
- [10] Wang Qun, GENG Yunling. Electromagnetic gun and its Characteristics and Military Application Prospect [J]. National Defense Science and Technology, 2011, 32(2):1-7. (in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1671-4547.2011.02.001.
- [11] Zhao Kaihua, Chen Ximou. Electromagnetics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1985.