

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.12.016

# 多截面场路耦合法和解析法对比分析水轮机 定子线棒 4 种换位下的环流

周 登, 姚 纓 英 \*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 针对定子线棒三维建模和求解的耗时性以及磁场求解的复杂性, 在满足计算精度同时避免庞大的计算量的情况下, 分别采用解析法和多截面场路耦合法分析了  $0^\circ/360^\circ/0^\circ$  全换位、不足换位、空换位以及延长换位等 4 种换位, 计算了定子各根股线的感应电动势、环流和损耗, 给出了两种方法求得的感应电动势对比图、环流对比图和损耗对比图。计算结果表明: 全换位的环流抑制效果最差; 多截面场路耦合法与解析法计算结果相差很小, 同时多截面场路耦合法在正确模拟漏磁场的基础上具有计算公式简单、过程清晰、计算量小、精确度较高等优点。

**关键词:** 解析法; 多截面场路耦合法; 环流

中图分类号: TK73; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)12-1600-06

## Comparison of multi-section method coupled field-circuit and analytical method for the analysis of the circulating current of 4 kinds of transposition in the stator of a hydraulic turbine

ZHOU Deng, YAO Ying-ying

(Electrical Engineering College, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** Aiming at time-consuming 3D modeling and calculation of stator coils as well as the complexity of magnetic field computation, analytical method and multi-section method coupled field-circuit were proposed to analyze circulating current and loss of stator strands including  $0^\circ/360^\circ/0^\circ$  transposition, inadequate transposition, void transposition and extended transposition on the basis of meeting the computing accuracy and avoiding the large amount of calculation. The comparison chart of the induced voltage, the circulating current and the loss were presented. The results indicate that  $0^\circ/360^\circ/0^\circ$  transposition gets the worst effect in reducing the circulating current compared to other transpositions. And the calculation results are similar between multi-section method coupled field-circuit and analytical method. Moreover, multi-section method coupled field-circuit has advantages in calculation formula, process, amount of calculation and accuracy on the basis of correct simulation of leakage magnetic field.

**Key words:** analytical method; multi-section method coupled field-circuit; circulating current

## 0 引 言

随着制造工艺的发展, 大型水轮机容量越做越大, 发电功率越来越大, 从而水轮机定子附近的漏磁场不断增强, 影响了不同位置的股线产生不同大小的感应电动势。由于定子股线在鼻端相连, 各股线回路之间形成了电势差, 产生环流。不等的环流导致并排股线

上电流的不均匀分布, 造成股线温升不均, 损害股线绝缘设备, 影响了水轮机安全运行和高效运作<sup>[1-3]</sup>。

为了减少环流及其附加损耗, 定子线棒必须换位, 并排的定子股线进行交叉换位使得各根股线均匀通过漏磁场, 使得由漏磁场产生感应电动势趋于相等, 从而有效抑制环流。由于水轮机定子铁芯长度较短, 一般采用换位节距比较大的  $0^\circ/360^\circ/0^\circ$  全换位、不足换位、

收稿日期: 2015-08-25

作者简介: 周 登 (1990-), 女, 浙江嵊州人, 主要从事电磁场理论方面的研究. E-mail: zjzhoudeng@163.com

通信联系人: 姚纓英, 女, 教授, 硕士生导师. E-mail: yaoyy@126.com

空换位以及延长换位等换位方式<sup>[4-7]</sup>。

现有文献[8-10]中主要采用解析法求解定子股线的漏磁场,然后用漏感电势法求解各根股线环流和损耗。每根股线的感应电动势是计算环流和损耗极为重要的数据基础。但是很少有文献提出各根股线计算所得感应电动势的具体数值。

本研究将在 4 种换位的情况下分别分析定子股线漏磁场,给出各根股线的感应电动势、环流和损耗对比图;并将采用多截面场路耦合法,即把多个相互关联 2D 场路耦合近似模拟定子线棒实际的 3D 电磁场模型来计算定子股线环流损耗,同时与解析法进行对比分析。

### 1 4 种换位

本研究参照实际水轮机定子结构,画出线棒的等效模型如图 1 所示。

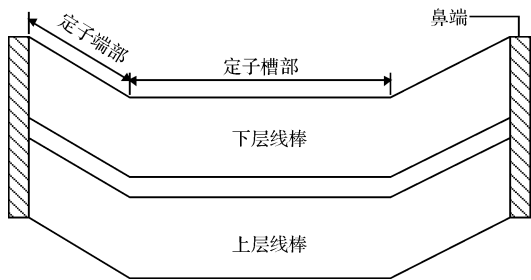


图 1 定子线棒模型

线棒采用两排由数根股线并联而成的条式线棒,将靠近槽口的线棒称为上层线棒,靠近槽底的线棒称为下层线棒。

水轮机定子线棒换位就是将定子线棒中的股线按照一定的规律均匀地转换位置,不同换位方式有不同转换规律。

4 种股线换位方式的示意图如图(2~5)所示(其中: $L_t$ —定子铁芯长度, $L_{s1}$ —左端部的长度, $L_{s2}$ —右端部的长度, $L_v$ —空换位长度, $L_e$ —端部换位长度)。

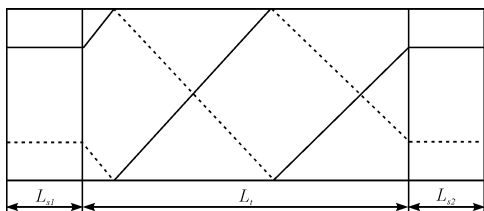


图 2 0°/360°/0°全换位

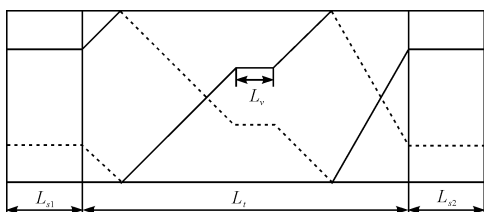


图 3 空换位

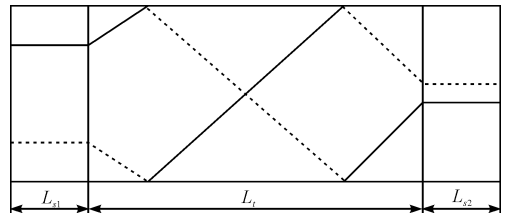


图 4 不足换位

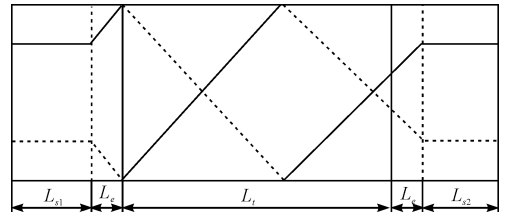


图 5 延长换位

0°/360°/0°全换位是指定子股线在槽部均匀地进行一周的扭转换位,在其左、右端部不换位。由此各根股线在槽部产生感应电动势相等,可以完全抵消,但端部产生的感应电动势没有被抵消。这种换位方式的换位节距长,股线分布均匀,制作方便,但是环流及其附加损耗大。

不足换位是指在定子股线在槽部进行小于 360°的换位,在其左、右端部不换位。这是利用槽部剩余的感应电动势来抵消端部的不平衡电势。这种换位方式的换位节距长,如果换位角度选取得当,抑制环流效果明显,但是由于股线根数为整数,无法任意选取换位角度。

空换位是指在定子股线在槽部适当位置保持一段水平距离,不进行换位,其余位置进行 360°全换位,在其左、右端部不换位。这是利用槽部空换位段残余的漏感应电动势来抵消端部的不平衡电势。这种换位方式的换位节距没有其他 3 种换位长,制造工艺难度增大,但是如果换位长度选取得当,抑制环流效果明显。

延长换位是定子线棒进行 360°全换位,但是换位长度超过了定子槽部铁芯的长度,在端部的一部分进行了换位,相当于槽部进行了不足换位。这是利用槽部和端部的漏电势来抵消端部没有换位的漏电势。这种换位方式的换位节距长,便于制造,如果换位长度选取得当,抑制环流效果明显,但股线延长换位部分不宜超过端部直线段,否则端部导线绝缘容易损坏,造成股线间短路。

### 2 解析法

定子线棒周围的磁场可以分为两大类:槽部漏磁场和端部漏磁场。忽略对环流计算影响很小的端部径向漏磁场,解析法选取槽部横向漏磁场  $B_m$ 、端部横向自感漏磁场  $B_e$  和端部横向互感漏磁场  $B_f$  等磁场计算。

假定每根线棒有  $N$  根股线, 其中  $N = 2m$ , 具体股线编号和磁场如图 6 所示。

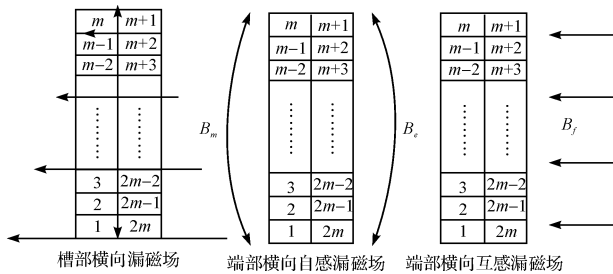


图 6 定子线棒磁场分布示意图

对磁场的定性描述如图 7 所示。

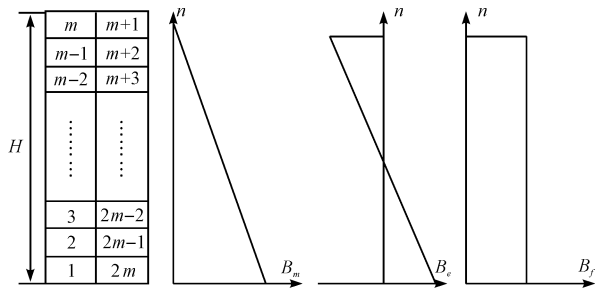


图 7 定子磁场沿线棒高度分布示意图

经推导端部和槽部的磁密为:

$$B_m = \frac{\mu_0 \cdot \sqrt{2}I}{b_s} \quad (1)$$

$$B_e = \frac{\mu_0 \sqrt{2}AS_1 t_1 k}{4(b_s + \Delta)} \quad (2)$$

$$B_f = k_f B_e \quad (3)$$

式中:  $I$ —定子线棒的额定电流;  $b_s$ —一定子槽宽;  $\mu_0$ —空气磁导率;  $AS_1$ —一定子线负荷;  $t_1$ —一定子齿距;  $k$ —磁场校正系数, 通常取 0.8;  $\Delta$ —线棒端部之间的周向距离, 表面冷却时取 12 mm, 内部冷却时取 8 mm,  $k_f$  取 0.5 ~ 3.5。

空换位时, 定子股线的感应电动势:

$$\left\{ \begin{aligned} E_{mi} &= \sqrt{2} \pi f B_m H \left[ \frac{5}{6} \sqrt{(L_i - L_v)^2 + 4H^2} + L_v \left( \frac{3}{2} - n - \frac{n^2}{2} \right) \right] \\ E_{ei} &= \sqrt{2} \pi f B_e H L_s (n - n^2) \\ E_{fi} &= \sqrt{2} \pi f B_f H L_s n \\ E_{ki} &= E_{mi} + E_{ei} + E_{fi} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

$$L_s = L_{s1} + L_{s2} \quad (5)$$

式中:  $E_{mi}$ —第  $i$  根股线槽部产生的感应电动势,  $E_{ei}$ —第  $i$  根股线左端部产生的感应电动势,  $E_{fi}$ —第  $i$  根股线右端部产生的感应电动势,  $E_{ki}$ —第  $i$  根股线总的感应电动势,  $n$ —股线相对高度,  $L_s$ —一股线端部的总长度。

得到感应电动势后, 本研究根据漏感电势法计算

环流和损耗。

先求出所有股线的平均感应电动势  $E_{av}$ :

$$E_{av} = \frac{\sum_{i=1}^N E_{ki}}{N} \quad (6)$$

然后得到股线环流:

$$I_i = \frac{E_{ki} - E_{av}}{Z} \quad (7)$$

最后根据环流计算环流损耗:

$$P_i = I_i^2 R \quad (8)$$

式中:  $E_{av}$ —股线平均感应电动势,  $Z$ —股线等效阻抗,  $I_i$ —第  $i$  根股线的环流,  $P_i$ —第  $i$  根股线的环流损耗。

### 3 多截面场路耦合法

多截面场路耦合法就是将定子线棒按照换位方式, 以股线换位节距的整数倍为长度, 沿轴向划分为若干个截面, 对每一个截面进行 2D 电磁场计算分析, 得到股线电阻  $R$  和感应电势参数  $E$ 。最后利用漏感电势法计算环流。

线棒换位以及相应的多截面划分如图 8 所示。

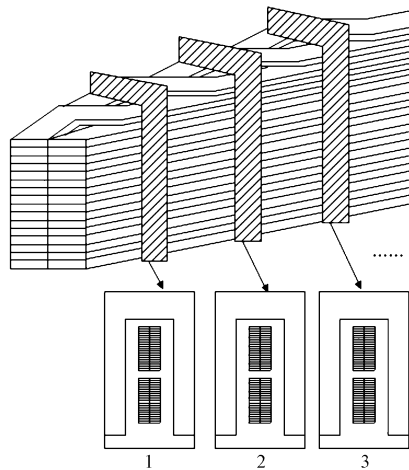


图 8 定子线棒多截面示意图

具体操作步骤如下: 首先利用 Ansys 软件建立关于  $P$  个截面段的 2D 电磁场分析的模型, 分别求解出每个截面下股线电阻  $R$ 、电感  $L$  和感应电动势  $E$  等参数。

然后, 本研究将所有截面按照换位的实际情况组成电网络如图 9 所示。图 9 中所标为  $N$  根各根股线, 其中每根股线的说明符号是按“截面号-元件属性-股线号”标注的。通过把每个截面模型计算的第  $i$  根股线电阻值相加得到第  $i$  根股线的总电阻。通过把每个截面模型计算的第  $i$  根股线感应电动势值相加得到第  $i$  根股线的总感应电动势。

最后将计算得到的股线电阻、电感和感应电动势代入漏感电势法求解股线环流和损耗。

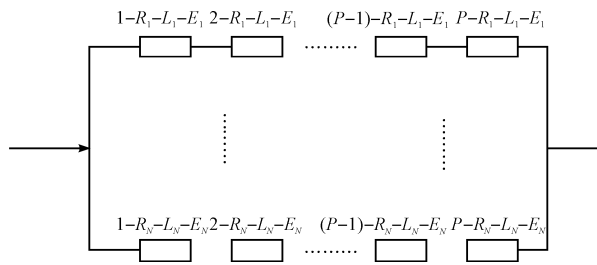
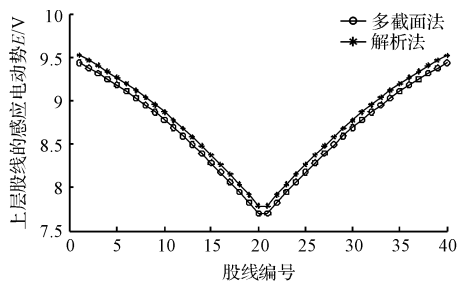


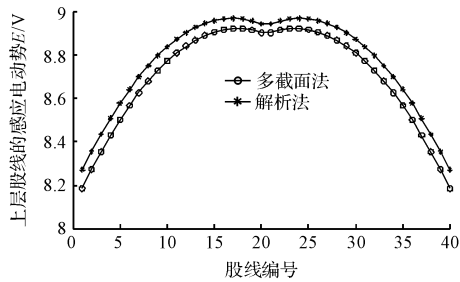
图 9 定子股线多截面场路耦合示意图

### 4 各种换位方式下的环流计算

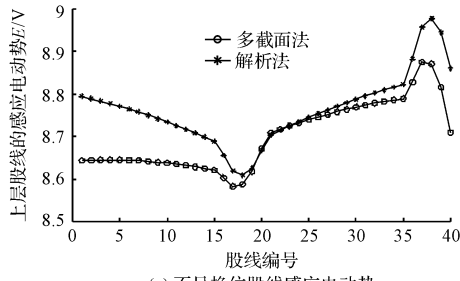
解析法与多截面耦合法求得单根股线总的感应电动势结果,取上层线棒为例,对比图如图 10 所示。可以发现,这两种方法计算得到的每种换位情况下股线感应电动势趋势一致,数值十分接近,全换位最大相差



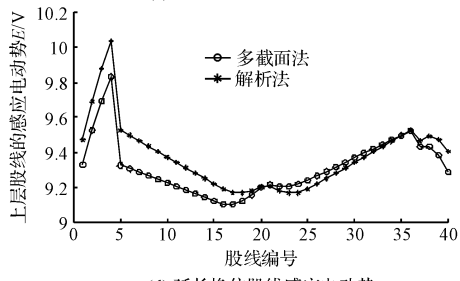
(a) 全换位股线感应电动势



(b) 空换位股线感应电动势



(c) 不足换位股线感应电动势



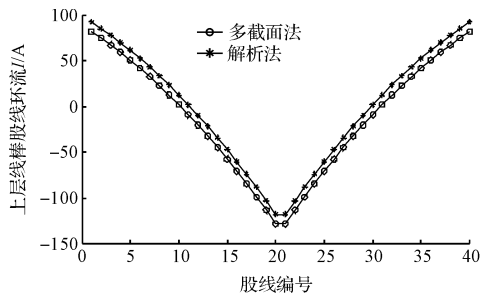
(d) 延长换位股线感应电动势

图 10 两种方法计算 4 种换位情况下的感应电动势对比图

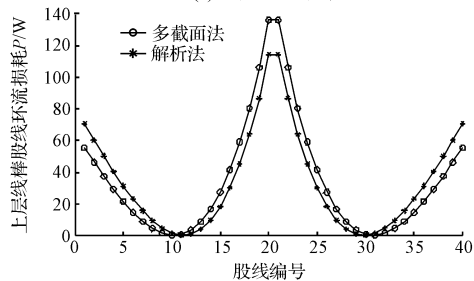
1.13%,空换位最大相差 1.04%,不足换位最大相差 1.72%,延长换位最大相差 2.11%。

笔者利用上述两种方法,分别计算 4 种换位情况下各根股线环流和环流损耗。

0°/360°/0°全换位环流和环流损耗如图 11 所示。



(a) 全换位股线环流

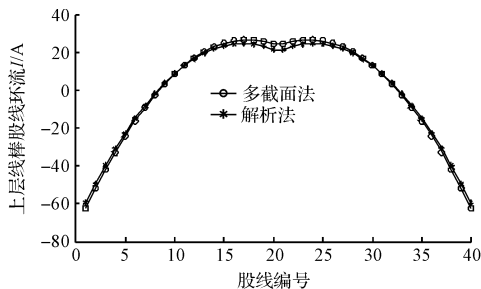


(b) 全换位股线环流损耗

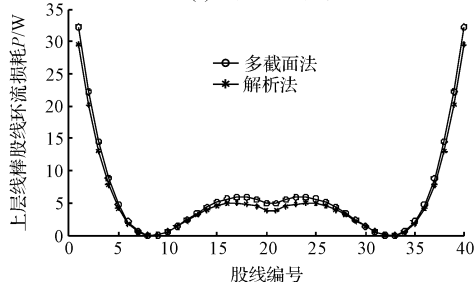
图 11 0°/360°/0°全换位环流和环流损耗

由图 11(a) 中的股线环流、图 11(b) 中的股线环流损耗可知,采用全换位,两种方法计算的环流和损耗的走向基本一致,数值接近,环流呈“V”型分布,换位以后环流仍然比较大,损耗呈“W”型分布,解析法求得总损耗达 1 358.9 W,多截面场路耦合法求得总损耗达 1 396.0 W,相差 2.73%。

空换位环流和环流损耗如图 12 所示。



(a) 空换位股线环流



(b) 空换位股线环流损耗

图 12 空换位环流和环流损耗

由图 12(a)中的股线环流、图 12(b)中的股线环流损耗可知,采用空换位,两种方法计算的环流和损耗的走向基本一致,数值接近,环流呈半圆分布,换位以后削减环流的效果较好,损耗呈“W”型分布,解析法求得总损耗达 234.0 W,多截面场路耦合法求得总损耗达 262.6 W,相差 12.22%。

不足换位环流和环流损耗如图 13 所示。

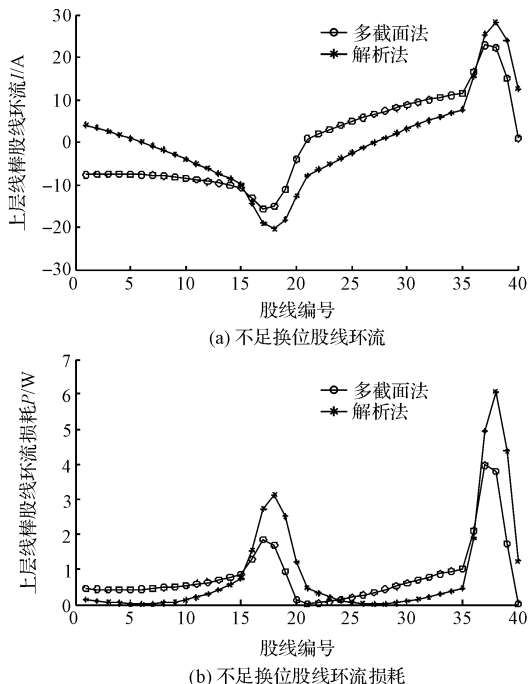


图 13 不足换位环流和环流损耗

由图 13(a)中的股线环流、图 13(b)中的股线环流损耗可知,采用不足换位,两种方法计算的环流和损耗的走向基本一致,数值接近。换位以后削减环流的效果很好,最大的环流值为 28 A。解析法求得总损耗达 34.9 W,多截面场路耦合法求得总损耗达 32.4 W,相差 7.16%。

延长换位环流和环流损耗如图 14 所示。

由图 14(a)中的股线环流、图 14(b)中的股线环流损耗可知,采用延长换位,两种方法计算的换位下环流和损耗的走向基本一致,数值接近,靠近槽口的几根股线相对于其他位置股线环流值更大,换位以后削减环流的效果较好。通过解析法求得总损耗达 171.9 W,通过多截面场路耦合法求得总损耗达 119.2 W,相差 30.66%,这是由于股线在位置 3、4 上误差较大。

### 5 结束语

本研究利用多截面场路耦合法和解析法求解 4 种换位下的感应电动势、环流和环流损耗。计算结果表明,两种方法求解的数据走向基本一致,数据相差不

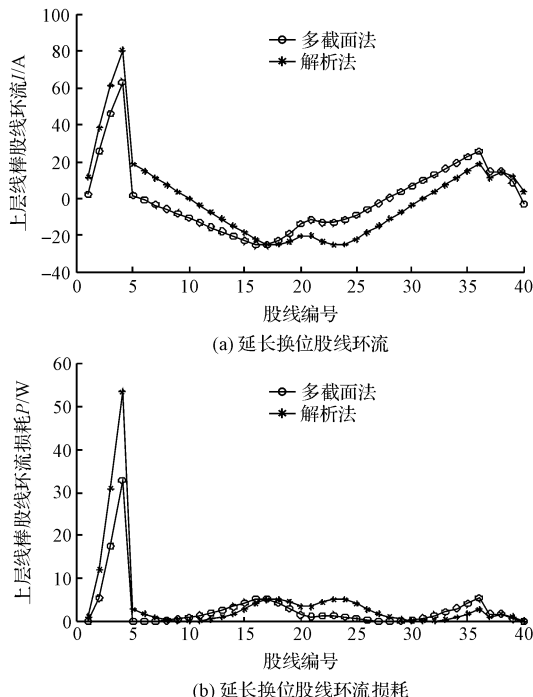


图 14 延长换位环流和环流损耗

大,其中感应电动势最大相差 2.11%。同时,多截面场路耦合法不需要求解像解析法那样如此繁杂的计算公式,计算简单,所以多截面场路耦合法的准确性和便捷性不言而喻。

由研究结果中可以看出,采用全换位的环流最大,这是由于全换位只削减了定子槽部的漏电势,对端部的漏电势没有进行抵消。对于其他 3 种换位,可以继续分别根据空换位长度大小与位置、不足换位角度和延长换位长度来寻找其最优化的换位。

### 参考文献 (References) :

- [1] 许承千,罗荣杰.大型水轮发电机定子线棒中的环流、温升与换位方式[J].大电机技术,1985(2):1-8.
- [2] 余格三.水轮发电机 0°/360°/0°换位线棒的股线电流温度不均的原因及改进措施[J].大电机技术,1989(2):26-30.
- [3] 新安江水电厂线棒测温攻关小组.发电机定子四种换位线棒股线温度测试总结及其分析[J].华东电力,1980(8):1-11.
- [4] 郭宁,韩力,石小坤.水轮发电机定子线棒 4 种换位的分析与比较[J].重庆大学学报:自然科学版,2007,30(2):42-45.
- [5] 张日强,宋文谦.大型交流电机定子线棒换位技术综述[J].大电机技术,2000,1(2):22-23.
- [6] 武威.超声电机的定子振动测试与分析[J].机电工程技术,2013(12):53-55,62.
- [7] 梁艳萍,孙洋,孙玉田.1 000 MW 水轮发电机定子股线环流损耗分析计算[J].电机与控制学报,2011,15(7):

65-70.

[8] 夏盛. 大型水轮发电机定子线棒换位研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2013.

[9] 成涛, 合焯, 陈小安, 等. 基于有限元的异步型电主轴电机电磁场分析和参数优化[J]. 机械, 2013(2): 8-12, 15.

[10] 杜灿勋, 桂卫华, 周光厚. 大型全空冷水轮发电机定子线棒损耗和温度场综合计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 111-114.

[编辑: 洪炜娜]

#### 本文引用格式:

周登, 姚缨英. 多截面场路耦合法和解析法对比分析水轮机定子线棒4种换位下的环流[J]. 机电工程, 2015, 32(12): 1600-1605.

ZHOU Deng, YAO Ying-ying. Comparison of multi-section method coupled field-circuit and analytical method for the analysis of the circulating current of 4 kinds of transposition in the stator of a hydraulic turbine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(12): 1600-1605.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第1599页)

全正确; 梳理头的CAN总线数据传输一帧的时间为141  $\mu\text{s}$ , 与数据扩展帧的传输延时时间公式的计算数据相符合<sup>[12-13]</sup>。两个总线信号的传输速率能满足毛皮机的选针器和梳理头的实时控制需求。

结果表明, 该系统发送和接收数据正常, 编织毛皮与花型图案一致, 具有较好的实时性和扩展性, 可以实现高效率和高质量的毛皮编织。

## 6 结束语

本研究研发的多总线结构提花毛皮机控制系统实现了各个模块间通讯数据的高速准确传输, 比单一总线为各类执行机构提供更多的通讯节点, 减少了总线负载, 提高了总线数据传输速率, 同时提高了系统的实时性和抗干扰能力; 通过不同的总线可以对发生故障的机构进行快速的判断, 同时使得对各个模块的系统调试更加方便, 利于系统的改造和扩大。

运行结果表明, 该系统满足提花毛皮机的准确通讯和控制要求, 运行稳定, 可以十分便捷地对故障模块进行修理、维护和设备更新, 通用性好, 具有很好的市场应用前景。

#### 参考文献 (References):

[1] 刘玉军. 模糊控制自调匀整系统在人造毛皮机中的应用研究[J]. 纺织导报, 1999(3): 29-30.

[2] 蔡运文. 基于CAN总线的提花毛皮机控制系统的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学信息工程学院, 2007.

[3] 史伟民, 郭波峰, 彭来湖, 等. 采用高速串行总线的圆纬机选针驱动器设计[J]. 纺织学报, 2015, 36(5): 110-114.

[4] 潘云磊, 史伟民, 彭来湖. 基于分层体系的横机控制系统的设计[J]. 机电工程, 2011, 28(2): 202-205.

[5] 林立民. 高性能嵌入式数控系统通讯模块的设计和实现[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳计算技术研究所, 2012.

[6] CAVALIERI S. Meeting real-time constraints in CAN[J]. *Industrial Informatics*, 2005(1): 124-130.

[7] 董海萍. 人造毛皮提花机控制系统技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 2011.

[8] 俞子荣, 万光逵, 江泽涛. 人造毛皮机提花的计算机控制技术[J]. 南昌航空工业学院学报, 1999(2): 72-77.

[9] 杨霞. 基于ANSYS的电子提花机电磁阀性能研究[J]. 机电工程技术, 2014(14): 29-32.

[10] 王二强, 孟瑞, 周华波, 等. 基于ANSYS的液压截止球阀设计与分析[J]. 液压气动与密封, 2013(5): 4-6.

[11] 齐晓辉, 戴伏生, 林茂六, 等. 新型人造毛皮提花编织自动控制系统[J]. 针织工业, 2006(11): 8-12.

[12] 徐闯, 邓忠华. 基于CANopen的套色系统主路的实现[J]. 轻工机械, 2014, 32(1): 54-57.

[13] 李佳, 朱元, 田光宇. CAN与TTCAN通讯延时时间的分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(2): 261-265.

[编辑: 洪炜娜]