

Design and Application of Main-Frequency Inductive Coil

Guixi Jia¹, Chol Son², Hyonchol O³

¹Electrical Engineering & Automation of Tianjin University, Tianjin

²Pyongyang Mechanical Engineering University, Pyongyang, North Korea

³Kim Chaek Industrial University, Pyongyang, North Korea

Email: jiaguixi@126.com, SONUCHOL923@126.com, WXZ201309@126.com

Received: Dec. 2nd, 2013; revised: Dec. 12th, 2013; accepted: Dec. 19th, 2013

Copyright © 2013 Guixi Jia et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Guixi Jia et al. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: This paper will introduce an inductive coil design method using main-frequency that will improve efficiency. The heat treatment process has many advantages, such as low initial investment; affordable equipment, eco friendly, mechanized process control and production arrangement. Steel heating can be used for the production of numerous goods including plastic and rubber processing. This paper contains in-depth research concerning inductive coil design that highlights the different specific rate of work on the steel cylinder surface.

Keywords: Inductive Heat Coil; Main-Frequency; Different Specific Rate of Work; Steel Cylinder Surface

工频感应加热线圈的设计与应用

贾贵玺¹, 鲜于哲², 吴贤哲³

¹天津市天津大学自动化学院, 天津

²平壤机械大学自动化工程系, 平壤, 朝鲜

³金策工业综合大学热工系, 金策, 朝鲜

Email: jiaguixi@126.com, SONUCHOL923@126.com, WXZ201309@126.com

收稿日期: 2013年12月2日; 修回日期: 2013年12月12日; 录用日期: 2013年12月19日

摘要: 本文介绍了一种工频电流的感应线圈设计方法。由于其设备投资不大、没有环境污染、且便于进行工艺控制, 具有明显的技术优点。利用工频感应加热技术把钢铁加热到不太高的温度(指钢铁磁性变态点以下)可用于树脂加工、合成橡胶生产等, 本文针对这种应用范围, 进行了在圆筒形钢铁表面上产成不同功率比分布的感应线圈设计。

关键词: 感应加热线圈; 工频; 功率比分布; 圆筒形钢铁表面

1. 引言

工频感应加热技术具有很多技术优点, 所以工频感应加热技术在工业上得到了广泛的应用^[1-3]。感应器的设计计算比较麻烦, 计算的项目也较多。由于在推导计算公式中作了一些假设, 与实际感应加热的情况并不完全一致, 所以要计算出一个很准确的结果是比

较困难的。目前该方面的研究较多, 付正博等根据多年的实践, 采取一些经验数据与图标, 简化了设计计算过程, 节约了计算时间^[4-6]。

工频感应加热技术通常用于钢铁加热领域, 正确地选定感应线圈的参数是非常重要的。本文提出一种分析感应线圈中功率比分布和钢铁表面温度分布之

间的关系的方法，为实现期望的钢铁表面的温度分布，进行了感应线圈设计参数的研究。

首先，根据导热微分方程得到工频感应加热系统的数学模型，用 COSMOS 软件求解，通过实验验证该模型的准确性。然后，基于完成的数学模型利用 COSMOS 得到神经网络(NN)的学习数据，使得通过感应线圈设计得到钢铁表面上的任意温度分布。

在等匝数密度感应线圈里放进圆筒形钢铁进行感应加热的时候，中心部分的钢铁温度最高，离中心部分越远温度越低。使得加热不是均匀分布，不能满足生产工艺要求。针对上面的问题，本文提出了一种使得钢铁表面实现同一的温度分布的感应线圈设计方法，并通过实验验证了该方法的可行性。

2. 圆筒形工频感应加热系统的数学模型和感应线圈参数决定方法

2.1. 圆筒形工频感应加热系统的数学模型

如图 1，对圆筒形钢铁进行感应加热的时候，采用圆筒坐标系表示的导热微分方程如下^[7-9]。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial \Phi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + \frac{F}{c \cdot \rho} \quad (1)$$

式中

θ : 温度

r : 钢铁圆筒的半径

F : 热源

t : 时间

z : 钢铁圆筒的长度

Φ : 角度

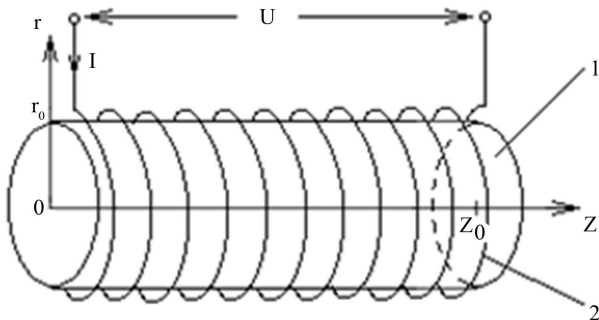


Figure 1. Main-frequency inductive heating cylinder system. 1) Steel cylinder; 2) Inductive coil
图 1. 圆筒形工频感应加热系统。1) 钢铁圆筒；2) 感应线圈

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

a : 钢铁圆筒的热扩散率

P : 钢铁的密度

c : 钢铁的比热容

本系统是正常热场，且抽对称所以温度 θ 跟角度 φ 无关系。如果 $f = \frac{F}{\lambda}$ ，导热微分方程如下。

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = -f \quad (2)$$

式(2)的边界条件如下。

$$[\theta]_{r=0} \neq \infty \quad (3)$$

$$\left[\frac{\partial \theta}{\partial r} + H_1(\theta - \theta_0) \right]_{r=r_0} = 0 \quad (4)$$

$$\left[\frac{\partial \theta}{\partial z} + H_2(\theta - \theta_0) \right]_{z=0} = 0 \quad (5)$$

$$\left[\frac{\partial \theta}{\partial z} + H_2(\theta - \theta_0) \right]_{z=z_0} = 0 \quad (6)$$

2.2. 热源的强度分析

钢铁表面上的磁场强度如下。

$$H_{m0} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{\omega}{Z_0} \right) \quad (7)$$

式中

ω : 感应线圈的匝数

Z_0 : 感应线圈的长度

I : 感应线圈的交流电流

如图 2 所示，钢铁表面上涡电流密度如下。

$$\delta_{m0} = \sqrt{2} \cdot \frac{H_{m0}}{\Delta} = 2 \cdot \frac{I}{\Delta} \cdot \left(e^{\frac{r-r_0}{\Delta}} \right) \quad (8)$$

式中

δ_{m0} : 钢铁表面上的涡电流密度

Δ : 电流的浸透深度

随着半径变化，涡电流密度可用下式列出。

$$\delta_{mr} = \delta_{m0} \cdot e^{\frac{r-r_0}{\Delta}} \quad (9)$$

在图 2 上考虑半径 r 的微小面积 dS 时，通过微小面积的涡电流为：

$$dI_r = \delta_{mr} \cdot dS \quad (10)$$

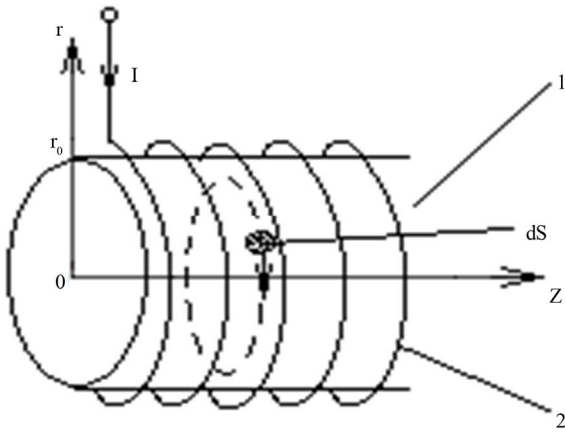


Figure 2. Eddy current density. 1) Steel cylinder; 2) Inductive coil, dS-small area
图 2. 涡电流密度。1) 钢铁圆筒; 2) 感应线圈, dS-微小面积

由涡电流发生的功率如下。

$$dP = (dI_r)^2 \cdot dR \cdot \frac{1}{J} \quad (11)$$

其中

dR: 对通过微小面积的涡电流的尽数材料的有效电阻

J: 换算参数(=4.18 cal/w)

所以从式(8)-(10)热源的强度可以算出。

$$F = \frac{dP}{dV} = \frac{4 \cdot \rho \cdot I^2}{\Delta^2 \cdot J \cdot e^{\frac{2r_0}{\Delta}}} \cdot \left(\frac{\omega}{Z_0}\right)^2 \cdot e^{\frac{2r}{\Delta}} \quad (12)$$

如果把钢铁材料分为几个部分进行感应加热, 每个部分的匝数密度一定时, 第 i 个部分的热源强度为:

$$F_i = \frac{4 \cdot \rho \cdot I^2}{\Delta^2 \cdot J \cdot e^{\frac{2r_0}{\Delta}}} \cdot \left(\frac{\omega_i}{Z_i}\right)^2 \cdot e^{\frac{2r}{\Delta}} \quad (13)$$

总热源强度如下。

$$F = \sum_{i=1}^N F_i \quad (14)$$

求解该感应加热系统的导热微分方程非常困难。这是因为导热微分方程里有非同次项, 而且该项具有两个变量即匝数密度和钢铁圆筒的半径。所以本文利用有限元(变量)解析软件 COSMOS 求解该导热微分方程^[10,11]。

3. 基于 COSMOS 有限元思想的系统分析和实验验证

在正常场上进行感应加热时, 圆筒形工频感应加

热系统的解表示系统相对于钢铁的长度和半径的温度分布。利用 COSMOS 的系统分析过程如下图 3。

对用 COSMOS 解析的钢铁温度分布和实际模型的温度分布进行了比较, 得到误差。实际模型是长度 280 mm、直径 50 mm 的圆筒形钢铁。实际钢铁圆筒上温度测定位置和线圈的分割如下图 4 所示, 钢铁表面上热电偶的配置如图 5 所示。

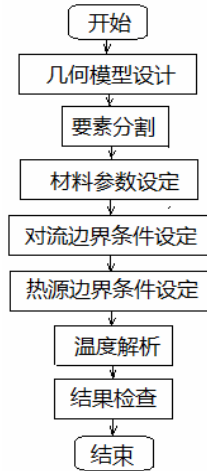


Figure 3. Processes of COSMOS analysis
图 3. 利用 COSMOS 的系统分析过程

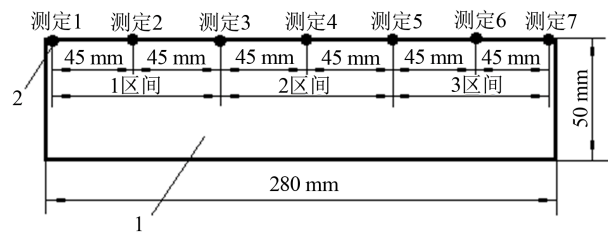


Figure 4. Temperature measuring position on steel cylinder and inductive coil arrangement. 1) Steel cylinder; 2) measuring position
图 4. 实际钢铁圆筒上温度测定位置和线圈的分割。1) 钢铁圆筒; 2) 测定位置

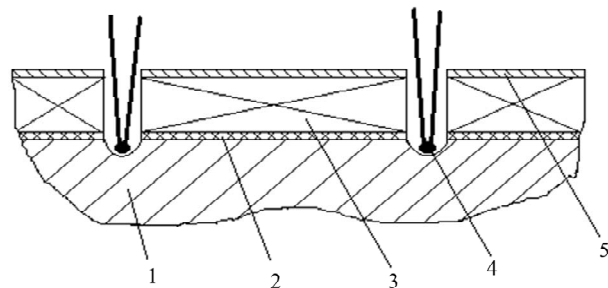


Figure 5. Thermocouple arrangement on steel cylinder. 1) Steel cylinder; 2) Inner isolation material; 3) Inductive coil; 4) Thermocouple; 5) Outer isolation material
图 5. 钢铁表面上热电偶的配置。1) 钢铁圆筒; 2) 内部绝缘材料; 3) 感应线圈; 4) 热电偶; 5) 外部绝缘材料

利用实际的钢铁模型测定的温度分布和利用 COSMOS 得到的温度分布互相比对, 评价误差, 其结果如表 1、表 2 所示:

经过多次实验, 发现利用 COSMOS 软件的工频感应加热系统的解具有 0.326% 的平均相对误差。通过软件仿真与实际对比, 可以得出: 利用 COSMOS 软件得到的温度分布值与实验的温度分布值差不多。故在实际设计时, 可以利用该软件得到的数值来近似实际不同条件下铁圆筒上的温度。

4. 基于神经网络的感应线圈设计

4.1. 原理概述

COSMOS 软件的解析过程是把每个区间匝数和电流代入圆筒形工频感应加热系统的数学模型后计算钢铁圆筒温度分布的过程。

如果人为的设定任意一种钢铁圆筒的温度分布情况, 而需要求解出该分布下圆筒每个区间的线圈匝数和电流大小。这个问题和 COSMOS 软件的解析过程相反。而这正是本文要解决的问题。这个问题的求解非常复杂, 利用神经网络可以解决这个问题^[12]。但是利用神经网络时需要比较充分的学习数据。为了得到这些很多实验数据要做大量的实验, 实验投资很大, 而且工作量也很大。然而利用 COSMOS 软件容

易得到神经网络的学习数据。本文就是采用了这种方法。

本论文的目的是为了设计制造钢铁表面上非平均分布的感应线圈的参数即每个区间的匝数和电流。这个问题和 COSMOS 的解析互相相反。基于 COSMOS 解能够比较正确的反映工频感应加热系统的温度分布, 采用 COSMOS 各种各样的条件下即不同的匝数和不同的电流下得到相应的温度分布值, 把温度分布值作为神经网络的输入数据, 把匝数和电流作为神经网络的样本数据, 开始神经网络的学习。神经网络的学习过程结束以后, 就可以得到设计者希望的钢铁表面温度分布的感应线圈参数即每个区间的匝数和感应线圈的电流。需要的每个区间的温度分布输入给已经学习完的 BP-NN, 经过 BP-NN 就可以得到每个区间的匝数和感应线圈的电流, 如表 3 所示, 验证结果如表 4 所示。

4.2. 具体步骤

感应线圈设计步骤如下。第一, 利用 COSMOS 软件建立圆筒形工频感应加热系统的模型, 然后利用 COSMOS 软件在每个区间不同的匝数和电流的条件下通过仿真计算得到十几个钢铁表面的温度分布值。通过实验比较可以验证利用 COSMOS 软件得到的温度分布值准确性。第二, 把利用 COSMOS 软件得到

Table 1. Temperature error evaluation of inductive coil having average number of turns
表 1. 平均分布匝数的感应线圈的温度误差评价

| 测定位置 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 测定温度平均值 | 203.75 | 216.5 | 219.5 | 224 | 219.5 | 216.5 | 204 |
| 利用 cosmos 得到的温度值 | 204.0 | 216.0 | 219.7 | 224.0 | 220.1 | 215.9 | 204.0 |
| 温度差 | 0.25 | 0.5 | 0.2 | 0 | 0.6 | 0.6 | 0 |
| 相对误差 | 0.12 | 0.23 | 0.09 | 0 | 0.27 | 0.28 | 0 |

Table 2. Temperature error evaluation of inductive coil having non average number of turns
表 2. 非平均分布匝数的感应线圈的温度误差评价

| 测定位置 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 测定温度平均值 | 223.1 | 247.5 | 254.2 | 251.2 | 244.5 | 229.7 | 215.9 |
| 利用 cosmos 得到的温度值 | 234.2 | 48.5 | 254.8 | 252.3 | 245.2 | 230.5 | 215.1 |
| 温度差 | 1.1 | 1.0 | 0.6 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.8 |
| 相对误差 | 0.47 | 0.4 | 0.23 | 0.19 | 0.28 | 0.34 | 0.37 |
| 测定条件 | 总匝数 280, 1 区间匝数 98, 2 区间匝数 105, 3 区间匝数 77, 电流 8.5 A, 频道 50 Hz, 环境温度 25°C | | | | | | |

Table 3. Inductive coil design parameters obtained by BP-NN
表 3. 利用 BP-NN 得到的感应线圈的设计参数

| 实验编号 | BP-NN 的输入数据 | | | BP-NN 的输出数据 | | | 电流 A |
|------|-------------|-----------|-----------|-------------|---------|---------|------|
| | 1 区间的中心温度 | 2 区间的中心温度 | 3 区间的中心温度 | 1 区间的匝数 | 2 区间的匝数 | 3 区间的匝数 | |
| 1 | 238 | 250 | 238 | 92 | 110 | 92 | 8.1 |
| 2 | 270 | 268 | 251 | 108 | 91 | 87 | 8.7 |
| 3 | 260 | 260 | 260 | 115 | 84 | 115 | 7.9 |

Table 4. Test of inductive coil design parameters obtained by BP-NN
表 4. 利用 BP-NN 得到的感应线圈的设计参数的验证实验

| 实验编号 | 测定条件(环境温度 25°C) | 测定误差 | 1 区间的中心温度 | 2 区间的中心温度 | 3 区间的中心温度 |
|------|--|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 总匝数 294, 1 区间匝数 92, 2 区间匝数 110, 3 区间匝数 92, 电流 8.1A, 频率 50Hz | BP-NN 设计 | 238 | 250 | 238 |
| | | 实际测定值 | 235 | 248 | 235 |
| | | 温度差 | 3 | 2 | 2 |
| | | 相对误差 | 1.27 | 0.84 | 1.27 |
| 2 | 总匝数 288, 1 区间匝数 108, 2 区间匝数 91, 3 区间匝数 87, 电流 8.7 A, 频率 50 Hz | BP-NN 设计 | 270 | 268 | 251 |
| | | 实际测定值 | 265 | 264 | 247 |
| | | 温度差 | 5 | 4 | 4 |
| | | 相对误差 | 1.86 | 1.51 | 1.61 |
| 3 | 总匝数 314, 1 区间匝数 115, 2 区间匝数 84, 3 区间匝数 115, 电流 7.9 A, 频率 50 Hz | BP-NN 设计 | 260 | 260 | 260 |
| | | 实际测定值 | 256 | 257 | 257 |
| | | 温度差 | 4 | 3 | 3 |
| | | 相对误差 | 1.56 | 1.16 | 1.16 |

的温度分布值作为神经网络的输入数据, 相应的匝数和电流作为神经网络的样本数据, 开始进行神经网络的学习过程。神经网络的学习过程结束以后, 已经学习完的 BP-NN 就是可以得到感应线圈参数即每个区间的匝数和电流的模型。第三, 把想要实现的每个区间的温度分布输入给已经学习完的 BP-NN, 经过 BP-NN 就可以得到每个区间的匝数和感应线圈的电流。

最后利用 BP-NN 得到的感应线圈的设计参数制作感应线圈, 进行了对设计参数的验证实验。这些结果如下。

5. 结论

通过上面的测定实验可知对钢铁圆筒进行感应加热的时候, 造成钢铁表面上不同的温度分布的感应线圈设计只有1.2%左右的平均相对误差。目前感应加

热由于其加热速度快、节能、生产效率高等优点, 正被广泛地应用于各个领域。尤其利用工频感应加热技术可用于树脂加工、合成橡胶生产, 如果使用本文的技术, 比以前可得到很大提高。

参考文献 (References)

- [1] 吴东勇 (2003) 大功率、大口径铜棒工频感应加热炉. 河南江河工业有限责任公司, 河南.
- [2] 李桂变 (2006) 感应加热新技术的应用及探讨. 山西侯马风雷机械制造责任有限公司, 山西.
- [3] 宫德福 (1993) 节能型工频感应加热装置. 吉林化学工业公司电石厂, 吉林.
- [4] 付正博 (2008) 感应加热与节能 - 感应加热器(炉)的设计与应用. 五洲工程设计研究院, 北京.
- [5] Dahake, G.S. (2006) Race of induction heating in lean manufacturing. *Heat Treating Progress*, **5-6**, 31-36.
- [6] Lasday, S.B. (1991) Work progressing for continuous annealing of sheet by transverse flux induction heating at steel plant. *Industrial Heating*, **10**, 43-45.
- [7] 王贤晖 (2012) 加热炉内钢坯传热的数值模拟与优化的研究.

- 华中科技大学, 武汉.
- [8] 田宏伟 (1999) 加热炉钢坯温度场智能预报系统研究. 昆明理工大学, 昆明.
- [9] 罗晓春 (2009) 熔锌工频有芯感应炉电磁场和温度场的数值仿真研究. 中南大学, 长沙.
- [10] 陈超样 (2013) Solidwork Simulation 高级教程. DS Solidworks 公司, 上海.
- [11] 陈超样 (2013) Solidwork Flow Simulation 教程. DS Solidworks 公司, 上海.
- [12] 杨甲冲 (2007) 基于自适应学习速率的改进型 BP 算法研究. 天津大学电子信息工程学院, 天津.