

电磁感应加热系统的近似变压器模型

丛志鹏, 秦会昌, 王洪光, 闫晓松
(烟台供电公司, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对电磁感应加热中某一温度分布的控制电压难以计算的问题, 建立了加热系统的近似变压器模型。首先, 把加热线圈和加热物体分别等效成 3 个电感线圈, 作为变压器的一次侧和二次侧绕组; 其次, 求出各线圈电阻电感参数和二次侧电流, 然后由各绕组互感关系推导出的二次侧电流和一次侧电压关系式, 估算出控制电压; 最后, 利用 ANSYS 软件仿真出控制电压对应的温度分布, 并与目标温度分布做了对比。研究表明, 该控制电压满足目标温度分布要求。

关键词: 等效线圈; 电压估算; 数值计算

中图分类号: TM154.2*1

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)12-1506-03

Approximate transformer model of electromagnetic induction heating system

CONG Zhi-peng, QIN Hui-chang, WANG Hong-guang, YAN Xiao-song
(Yantai Power Supply Company, Yantai 264001, China)

Abstract: To solve the problem of estimating the controlling voltages of certain temperature distribution, an approximate transformer model was introduced to electromagnetic induction heating. The heating coils and heating object were firstly equivalent as 3 inductance coils respectively as approximate transformer model's primary and secondary coils. Secondly, the resistance and inductance parameters and secondary coils' currents were calculated. An equation involving primary coils' controlling voltages and secondary coils' currents was deduced according to all the coils' mutual inductances. The controlling voltages were estimated by the equation. The temperature distribution corresponding to the estimated controlling voltages was simulated by ANSYS software. The research results indicate that the controlling by the approximate transformer model meets the need of target temperature distribution.

Key words: equivalent coils; voltage estimation; numerical calculation

0 引言

在电磁感应加热中, 经常需要确定某一目标温度分布对应的控制电压。然而对于电磁感应加热这一复杂现象来说是十分困难的。它的复杂性体现在: 它是电路、磁场和温度场的耦合, 加热电源、加热线圈和加热物体通过电磁场相互作用; 温度增加、热量传递和材料特性随温度的变化使其成为一个混合的动态过程; 端部效应、圆环效应、邻近效应和集肤效应同时发生使得对温度分布的控制困难化; 不仅要确定三相电压幅值, 还要确定电压相角。在目前的实际生产中, 电

压的确定根据经验和多次调试获得, 过程较为繁琐, 精度较差。目前关于此类问题的研究很少^[1-4]。

本研究以三相圆柱形感应加热装置加热铝棒为例, 详细论述求取某一目标温度分布对应的控制电压的方法—近似变压器模型法。笔者用等效线圈代替铝棒, 把加热线圈和等效线圈看成变压器一次侧绕组和二次侧绕组, 然后根据此模型估算出控制电压, 然后调整优化, 最后将该方法编成 Matlab 程序。

1 近似变压器模型的建立

电磁感应加热系统如图 1 所示, 铝棒长度为 66 cm、

半径 7.75 cm,放置在感应器中部偏左位置。感应器结构如图 2 所示,它由 3 个线圈组成,在线圈交接处匝数变密。本研究假设:铝棒加热时间为 50 s,冷却时间为 50 s;目标温度分布为从左至右 450 ℃~550 ℃均匀变化(以半径为 5.75 cm 处为准)。

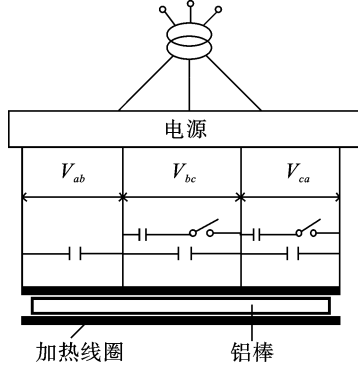


图 1 电磁感应加热系统

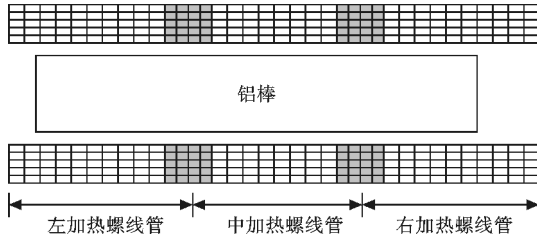


图 2 感应器结构

外部 3 个加热线圈匝数可视为均匀分布。加热线圈的电阻相对于电感可以忽略不计,即为 3 个纯电感线圈。

本研究将铝棒均匀分为 3 段。由集肤效应可知,加热过程中产生的大部分热量分布在铝棒的外层。因此,可用一个电感线圈和电阻串联来代替每段铝棒。线圈与对应段的约一个集肤深度厚的外层部分大小相等、位置相同。匝数可任意设置,本例取 $N=30$ 。

本研究把外部 3 个加热线圈看作变压器的一次侧绕组,内部 3 个等效线圈看作二次侧绕组,等效线圈串接的电阻看作二次侧的负载;两侧均为星型接线,且中性点接地,这就是所谓的近似变压器模型。它与变压器不同之处在于两侧绕组的所有线圈之间均存在互感。模型如图 3 所示,图中星号为各线圈互感

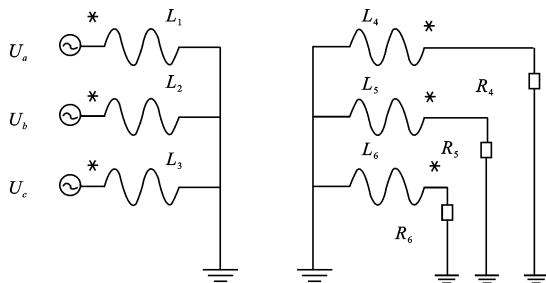


图 3 近似变压器模型

同名端^[5-8]。

6 个线圈编号顺序为从外到内,从左到右。电阻编号与对应线圈编号相同。

二次侧负载电阻按如下公式求取:

$$R_i = \rho \frac{l}{s} \quad (1)$$

式中: ρ —该等效线圈电阻率; l —等效线圈长度; s —等效线圈截面积; $i=4,5,6$ 。

本研究运用场源离散化方法求取 6 个线圈自感和互感。将 6 个线圈分别离散为 m ($m=m_r, m_z, m_r$ 与 m_z 分别为径向与轴向的分段数)个环形线圈。第 1 个螺线管第 ij 号环形线圈电感为:

$$L_{ij} = \mu_0 r_{ij} \left(\ln \frac{8r_{ij}}{a_{ij}} - 1.75 \right) + \sum_{n=1}^{m_r} \sum_{l=1}^{m_z} \frac{2\mu_0}{k} \sqrt{r_{ij}r_{nl}} \left[\left(1 - \frac{1}{2}k^2 \right) K - E \right] \quad (2)$$

式中: r_{ij}, a_{ij} 和 z_{ij} —第 1 个线圈第 ij 号环形线圈半径、线圈截面的等效半径和轴向坐标; r_{nl}, a_{nl} 和 z_{nl} —第 1 个线圈第 nl 号环形线圈半径、线圈截面的等效半径和轴向坐标; K, E —第 1 类和第 2 类完全椭圆积分。

模数 k 为:

$$k = \sqrt{\frac{4r_{ij}r_{nl}}{(z_{ij}-z_{nl})^2 + (r_{ij}-r_{nl})^2}}$$

第 1 个线圈自感为:

$$L_1 = \sum_{i=1}^{m_r} \sum_{j=1}^{m_z} L_{ij} \quad (3)$$

同理求得 L_2, L_3, L_4, L_5, L_6 。详细过程见参考文献[9]。

类似式(2),第 1 个线圈第 ij 号环形线圈与第 2 个线圈的互感为:

$$M_{ij} = \sum_{n=1}^{m_r} \sum_{l=1}^{m_z} \frac{2\mu_0}{k} \sqrt{r_{ij}r_{nl}} \left[\left(1 - \frac{1}{2}k^2 \right) K - E \right] \quad (4)$$

式中: $r_{ij}, a_{ij}, z_{ij}, K$ 和 E —含义同式(2); r_{nl}, a_{nl} 和 z_{nl} —第 2 个线圈第 nl 号环形圈半径、线圈截面的等效半径和轴向坐标。

模数 k 为:

$$k = \sqrt{\frac{4r_{ij}r_{nl}}{(z_{ij}-z_{nl})^2 + (r_{ij}-r_{nl})^2}}$$

第 1 个线圈和第 2 个线圈互感为:

$$M_{1,2} = \sum_{i=1}^{m_r} \sum_{j=1}^{m_z} M_{ij} \quad (5)$$

同理可得 $M_{i,j}$ ($i, j=1, 2, \dots, 6$), $M_{j,i} = M_{i,j}$ 。

根据每段铝棒的平均温度,相应等效线圈的电流满足如下关系:

$$\frac{1}{2} I_i^2 R_i t = q_{mi-3} c \Delta \theta_{i-3} \quad (6)$$

式中: I_i 和 R_i —第 i ($i=4,5,6$) 个线圈电流幅值和对应负载电阻; q_{mi-3} , c , $\Delta \theta_{i-3}$ 和 t —第 $i-3$ 段铝棒的质量、比热、温度增量和加热时间。

根据式(6),得:

$$I_i = \sqrt{\frac{2 q_{mi-3} c \Delta \theta_{i-3}}{R_i t}} \quad (7)$$

2 控制电压的估算及验证

在建立近似变压器模型和求得相关参数后,本研究推导了用二次侧电流表示一次侧控制电压的关系式。

6 个线圈电压电流满足如下关系式:

$$\dot{U}_{1-3} = A \dot{I}_{1-3} + C^T \dot{I}_{4-6} \quad (8)$$

$$\dot{U}_{4-6} = C \dot{I}_{1-3} + B \dot{I}_{4-6} \quad (9)$$

其中:

$$\dot{U}_{1-3} = [\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3]^T, \dot{U}_{4-6} = [0, 0, 0]^T, \dot{I}_{1-3} = [\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3]^T, \dot{I}_{4-6} = [\dot{I}_4, \dot{I}_5, \dot{I}_6]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} j\omega L_1 & j\omega M_{1,2} & j\omega M_{1,3} \\ j\omega M_{2,1} & j\omega L_2 & j\omega M_{2,3} \\ j\omega M_{3,1} & j\omega M_{3,2} & j\omega L_{3,3} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} R_4 + j\omega L_4 & j\omega M_{4,5} & j\omega M_{4,6} \\ j\omega M_{5,4} & R_5 + j\omega L_5 & j\omega M_{5,6} \\ j\omega M_{6,4} & j\omega M_{6,5} & R_6 + j\omega L_6 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} j\omega M_{4,1} & j\omega M_{4,2} & j\omega M_{4,3} \\ j\omega M_{5,1} & j\omega M_{5,2} & j\omega M_{5,3} \\ j\omega M_{6,1} & j\omega M_{6,2} & j\omega M_{6,3} \end{bmatrix}.$$

求解式(8,9),可得:

$$\dot{U}_{1-3} = (C^T - AC^{-1}B) \dot{I}_{4-6} \quad (10)$$

该方案求出的控制电压为:

$$486.2 \angle -113.3^\circ \text{ V}, 545.9 \angle -112.3^\circ \text{ V}, 510.0 \angle -113.2^\circ \text{ V}.$$

本研究利用 ANSYS 仿真软件建立电磁感应加热系统的电路、磁场和温度场耦合的轴对称模型来计算

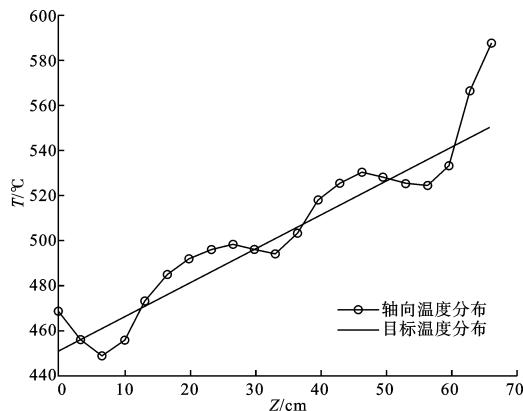


图 4 半径为 57.5 mm 处轴线温度分布

某一控制电压对应的温度场分布^[10]。以上述三相电压施加于加热线圈,半径为 5.75 cm 处的温度分布如图 4 中曲线所示:与目标温度分布相比,两端处最大误差 37.5 °C,误差率 6.8%;其余部分最大误差为 11.8 °C,误差率为 2.4%;平均误差 9.7 °C,误差率 1.9%。其中两端处误差之所以过高,源于加热线圈交接处磁场畸形,仅靠调节控制电压无法克服。平均误差是指所有采样点上温度值与目标值差的绝对值之和的平均值,平均误差很小,说明控制电压满足要求。

3 结束语

本研究讨论了通过建立电磁加热系统的近似物理模型来估算某一目标温度分布对应的控制电压的方法。首先把复杂的加热系统抽象为较为简单的近似的变压器模型,然后通过数学方法推导出控制电压,并进行了验证。本研究将该方法编制成 Matlab 程序,只需输入加热系统的结构参数和目标温度参数就能迅速求出控制电压,具有较强的普适性和实用价值。

参考文献 (References):

- [1] 李韵豪. 锻压工业中的感应加热—第一讲 感应加热基础[J]. 机械工人(热加工), 2007(1): 80-82.
- [2] NERG J. Numerical solution of 2D and 3D induction heating problems with non-linear material properties taken into account[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 3119-3122.
- [3] YANG Xiao-guang, WANG You-hua, YAN We-li. Simulation of induction heating device with double inductors for continuously heating up steel bars[C]//Automation congress. [s.n.], 2008: 1-5.
- [4] 胡旭东. 电磁感应加热理论研究及强力感应加热器设计[D]. 天津: 河北工业大学电气工程学院, 2006: 1-50.
- [5] GIBSON R C. Introduction to coupled electromagnetic and thermal field computer simulations of induction heating processes [J]. Electromagnetic and Induction Heating, 1996(10): 1-3.
- [6] WANG Qi-han, YAO Ying-ying. A study on the method of temperature distribution control in electromagnetism induction heating[C]//Proceedings of ICEMS, Wuhan: [s.n.], 2008: 512-515.
- [7] 罗平. 快速全局优化算法及其在高温超导储能磁体中的应用[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2004: 15-63.
- [8] 阎照文. 工程电磁场分析技术与实例详解 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [9] 倪光正, 杨仕友, 钱秀英, 等. 工程电磁场数值计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [10] 高印寒, 高洪, 刘长英, 等. 电磁感应加热温度场建模方法的研究 [J]. 内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版, 2007, 36(1): 54-57.

[编辑: 张翔]