

文章编号:1000-582X(2002)10-0009-04

不对称三相四线制系统有害电流的检测方法*

周林, 易强, 秦梅, 周小军, 叶一麟

(重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: $i_p - i_q$ 法能准确、实时地检测不对称三相系统中的有害电流, 被广泛应用于三相电力有源滤波器。目前, 在检测不对称三相四线系统的有害电流时, 均事先剔除零序电流, 然后再采用 $i_p - i_q$ 法。通过理论分析证明, $i_p - i_q$ 法经过 3/2 变换后 i_a, i_β 中都不含零序电流分量, 并且基波正序分量不会受到影响, 因此含有 3/2 变换的 $p - q$ 法、 $d - q$ 法、 $i_p - i_q$ 法都不会受到零序电流的影响, 所以这些检测方法都不用先剔除零序电流而直接用于不对称三相四线系统有害电流检测。理论和仿真结果表明这种方法能正确检测出基波零序、负序及谐波分量, 从而改变了长期以来认为 $i_p - i_q$ 不能直接用于三相四线系统的观点。

关键词: 瞬时无功功率; 有害电流检测; 三相四线制

中图分类号: TN713

文献标识码: A

随着电力电子装置的广泛应用, 电网的谐波及三相不平衡问题日益严重。准确、实时地检测电网谐波、基波负序和零序电流是决定补偿性能好坏的重要环节。20 世纪 80 年代初日本学者赤木泰文提出“瞬时无功功率理论”, 即“ $p - q$ ”理论, 使得电力有源滤波器的研究走出了实验室, 应用于实际生产中。但是, 它只适用于三相电压正弦、对称情况下的谐波电流检测。在三相电压不对称且含谐波成分时, 瞬时有功 p 、瞬时无功 q 中将不仅含有谐波, 其直流分量中还将含有电压和电流中同频率且同相序的谐波相作用产生的成分。因此, 常规的 $p - q$ 法不能检测出全部的有害电流, 且计算量大。由 $p - q$ 法演变而来的 $i_p - i_q$ 法(瞬时有功 - 无功电流运算法)^[1-2] 和 $d - q$ 法(基于平均状态空间法)因采用了与 A 相电网电压同相位的正余弦信号而消除了电源电压畸变、不对称对检测结果的影响, 因此更适合电流的快速检测。

1 三相四线制有源滤波器及其有害电流检测法

对于三相三线制电路, 由于它没有零序电流, 所以传统的 $i_p - i_q$ 法和 $d - q$ 法都能正确检测出有害电流, 关于这方面的文献很多, 笔者不再详叙。对于不对称三

相四线制电路, 由于它有零序电流, 必须对其进行补偿。目前研究较多的用于三相四线制的有源电力滤波器(Active Power Filter, 简称 APF) 主要采用两种主电路结构^[3-5], 一种是采用四桥臂变换器, 每个桥臂分别与一路输电线相对应; 另一种是采用三桥臂变换器, 其直流侧采用中点抽头的两个电容器, 抽头中点与输电线中线相接。图 1 分别为采用这两种变换器的 APF 原理示意图, 前者第 1、2、3 对桥臂分别用于产生 A、B、C 三相的补偿电流, 第 4 臂桥专门用于对零线电流进行补偿; 后者三相电源的零线与直流侧母线中点相连, 给零线电流提供通道。前者比后者多用一对开关, 其检测和开关的驱动电路也比后者复杂, 但它比后者少一个电容器, 直流侧电容器电压控制比后者简单; 而后者不但需要控制直流电压恒定, 而且需要控制两电容器电压的平衡。

文献[3, 4, 6, 7] 认为 3/2 变换只实用于三相三线制, 不适用于三相四线制, 针对图 1(a) 所示的主电路结构采用了图 2(a) 所示的先剔除零序电流的 $i_p - i_q$ 检测法, 针对图 1(b) 所示的主电路结构采用了图 2(b) 所示的先剔除零序电流的 $i_p - i_q$ 检测法。笔者认为前者是合理的, 因为这种结构是用第 4 臂

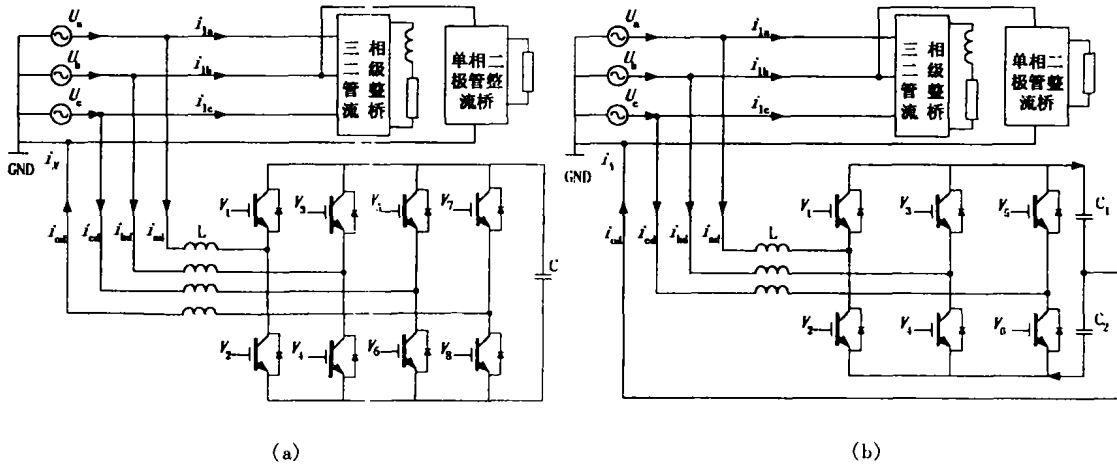
* 收稿日期: 2002-06-13

基金项目: 重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室资助

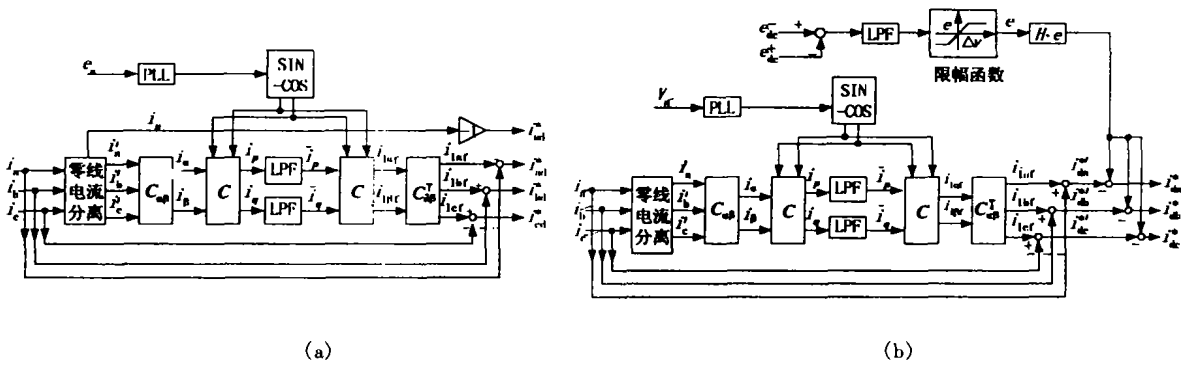
作者简介: 周林(1961-), 男, 四川隆昌人, 重庆大学副教授, 博士生, 主要从事电力电子技术、FACTS 和电网谐波抑制方面的研究。

桥来对零线电流进行补偿,故需检测出零序电流来作为该臂桥控制所需的参考信号;但后者的零序电流补偿由三相桥臂共同分担,没有单独的零

序补偿桥臂,故无需检测出零序电流,从检测目的来分析,也无需剔除零序分量,同样可正确检测出基波零序、负序和谐波电流。



四臂桥变换器和三臂桥变换器的 APF 原理示意图



图中: $C_{\alpha\beta} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$; $C = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix}$

图 2 $i_p - i_q$ 检测法原理图

2 不对称三相四线制系统的 $i_p - i_q$ 检测法

$i_p - i_q$ 检测法的检测原理如图 3 所示,它为了消除电压畸变对检测的影响,采用锁相环和正余弦发生器来获得与 A 相电压同相位的正余弦信号。设在不对称三相四线制电路中,负载电流瞬时值用 i_a, i_b, i_c 表示,它包括正序、负序和零序电流,下标 0、1、2 分别表示零序、正序、负序分量,则有:

$$i_a = i_{1a} + i_{2a} + i_{0a} = 2^{1/2} \sum_n [I_{1n} \sin(n\omega t + \varphi_{1n}) + I_{2n} \sin(n\omega t + \varphi_{2n}) + I_{0n} \sin(n\omega t + \varphi_{0n})]$$

$$i_b = i_{1b} + i_{2b} + i_{0b} = 2^{1/2} \sum_n [I_{1n} \sin(n\omega t + \varphi_{1n} - 120^\circ) +$$

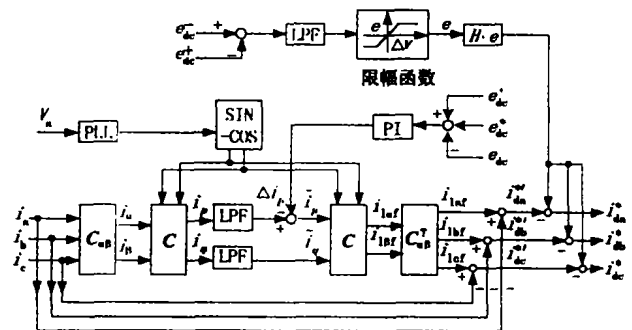


图 3 $i_p - i_q$ 检测法原理图

$$i_c = i_{1c} + i_{2c} + i_{0c} = 2^{1/2} \sum_n [I_{1n} \sin(n\omega t + \varphi_{1n} + 120^\circ) + I_{2n} \sin(n\omega t + \varphi_{2n} - 120^\circ) + I_{0n} \sin(n\omega t + \varphi_{0n})] \quad (1)$$

其中三相电流中所包含的零序分量均相等, 即有:

$$i_{0a} = i_{0b} = i_{0c} = (i_a + i_b + i_c)/3 = 2^{1/2} \sum I_{0n} \sin(n\omega t + \varphi_{0n}) \quad (2)$$

将它们变换至 α, β 两相:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \\ &\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0a} \\ i_{0b} \\ i_{0c} \end{bmatrix} + \\ &\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a} + i_{2a} \\ i_{1b} + i_{2b} \\ i_{1c} + i_{2c} \end{bmatrix} = \\ &\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} i_{0a} - i_{0b} - i_{0c}/2 \\ 0 + \sqrt{3}i_{0b}/2 - \sqrt{3}i_{0c}/2 \end{bmatrix} + \\ &\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} i_{1a} + i_{2a} - 1/2(i_{1b} + i_{2b}) - 1/2(i_{1c} + i_{2c}) \\ \sqrt{3}/2(i_{1b} + i_{2b}) - \sqrt{3}/2(i_{1c} + i_{2c}) \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3^{1/2} \sum_n [I_{1n} \sin(n\omega t + \varphi_{1n}) + I_{2n} \sin(n\omega t + \varphi_{2n})] \\ 3^{1/2} \sum_n [-I_{1n} \cos(n\omega t + \varphi_{1n}) + I_{2n} \cos(n\omega t + \varphi_{2n})] \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} i_{1\alpha} + i_{2\alpha} \\ i_{1\beta} + i_{2\beta} \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

可见, 经过坐标变换的 i_α, i_β 中不再含有零序分量。

再将 i_α, i_β 变换为 i_p, i_q :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1\alpha} + i_{2\alpha} \\ i_{1\beta} + i_{2\beta} \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} 3^{1/2} \sum_n I_{1n} \cos[(n-1)\omega t + \varphi_{1n}] - 3^{1/2} \sum_n I_{2n} \cos[(n+1)\omega t + \varphi_{2n}] \\ -3^{1/2} \sum_n I_{1n} \sin[(n-1)\omega t + \varphi_{1n}] - 3^{1/2} \sum_n I_{2n} \sin[(n+1)\omega t + \varphi_{2n}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{1p} + i_{2p} \\ i_{1q} + i_{2q} \end{bmatrix} \quad (4) \end{aligned}$$

从上式可看出, 由于 i_α, i_β 中不含零序电流分量, 因此通过它运算得出的有功和无功电流分量 i_p, i_q 中也不含零序电流分量, 而只含正序和负序电流分量。 i_p, i_q 的直流分量中当然更不会含零序分量, 具体大小如下:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_p \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3^{1/2} I_{11} \cos(\varphi_{11}) \\ -3^{1/2} I_{11} \sin(\varphi_{11}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

可见, i_p, i_q 的直流分量是由 i_a, i_b, i_c 的基波正序分量产生的, 与零序分量无关。将它们反变换即得出:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{1df} \\ i_{1bf} \\ i_{1cf} \end{bmatrix} &= C_{23} C \begin{bmatrix} \hat{i}_p \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = C_{23} \begin{bmatrix} \sqrt{3} I_{11} \sin(\omega t + \varphi_{11}) \\ -\sqrt{3} I_{11} \cos(\omega t + \varphi_{11}) \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} 2^{1/2} I_{11} \sin(\omega t + \varphi_{11}) \\ 2^{1/2} I_{11} \sin(\omega t + \varphi_{11} - 120^\circ) \\ 2^{1/2} I_{11} \sin(\omega t + \varphi_{11} + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (6) \end{aligned}$$

式(6)表明这种建立在三相三线制电路基础上的 $i_p - i_q$ 法能正确检测出三相四线制电路中的基波正序电流分量, 因而同样适用于三相四线制系统。从上面的推导可以看出, 三相电流在进行 $3/2$ 坐标变换后已不含零序分量, 再经 C 变换得到的有功和无功电流分量 i_p, i_q 中当然也不会含零序分量。因此, 零序分量不出现在直流分量中, 直流分量中只含基波正序分量, 而且其值与先剔除零序的 $i_p - i_q$ 法所得结果相同, 反变换得到的也只是基波正序电流分量。将此基波正序分量与负载电流 i_a, i_b, i_c 相减, 即得含基波零序、负序和谐波等有害电流的总和 $i_{ad}^*, i_{bd}^*, i_{cd}^*$ 。因此, 就图 1(b) 所示的主电路, 所采用的 $i_p - i_q$ 法无需先剔除零序电流, 就可把 $i_p - i_q$ 检测法直接应用于不对称三相四线制系统有害电流的检测, 同样能够正确检测出基波零序、负序及谐波分量。

同样, $p - q$ 法、 $d - q$ 法也是首先对三相电流先进行 $3/2$ 变换, 故也不会受零序电流的影响, 可直接应用于三相四线制系统的有害电流的检测, 而不需事先剔除零序电流。由于篇幅的原因, 笔者不再对上述情况一一推导。

3 仿真结果及分析

为了验证上述理论分析的正确性, 将其应用于并联型三相四线制有源电力滤波器的检测系统, 以补偿不对称负载产生的有害电流, 为与文献[4]作比较, 采用图 1(b) 所示的主电路结构, 谐波源由一个带电感性负载的三相二极管整流桥和带电阻性负载的一个单相二极管整流桥(连接在 b 相与零线之间)组成, 直接应用图 3 所示 $i_p - i_q$ 检测法, 其控制回路采用定时控制的滞环比较方式。利用 Matlab 仿真软件中的电力系统工具包(Power System Toolbox)和动态仿真工具包(Simulink)对该电路进行了仿真, 仿真结果如图 4—图 6。

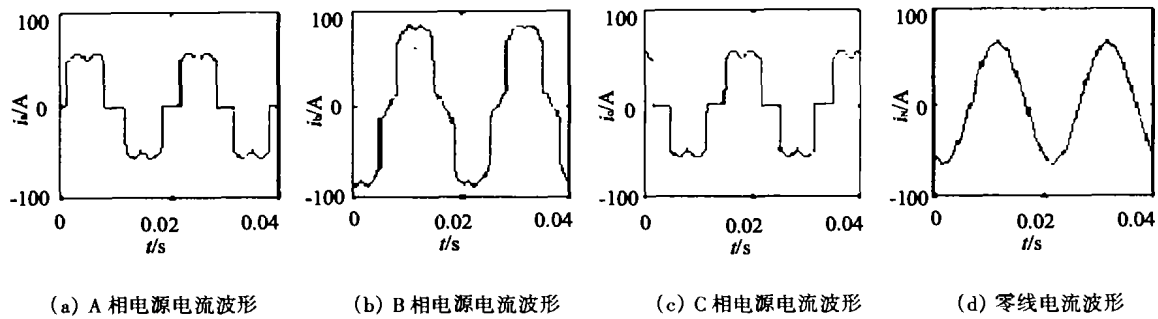


图4 补偿前的电源电流波形及零线电流波形

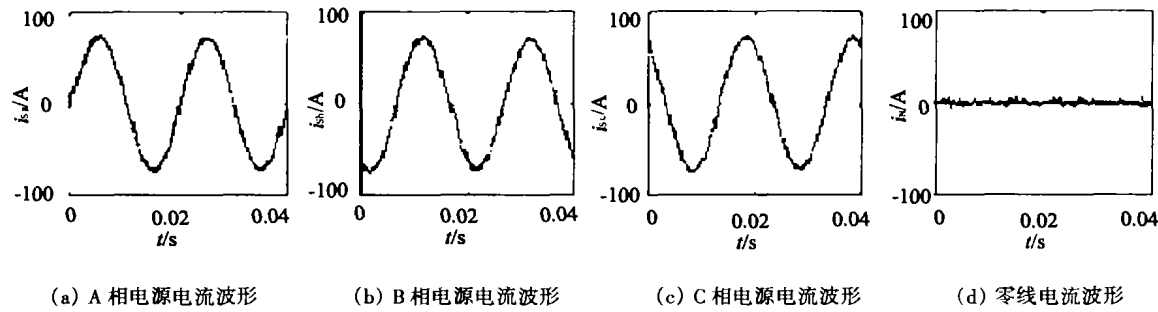


图5 补偿后的电源电流波形及零线电流波形

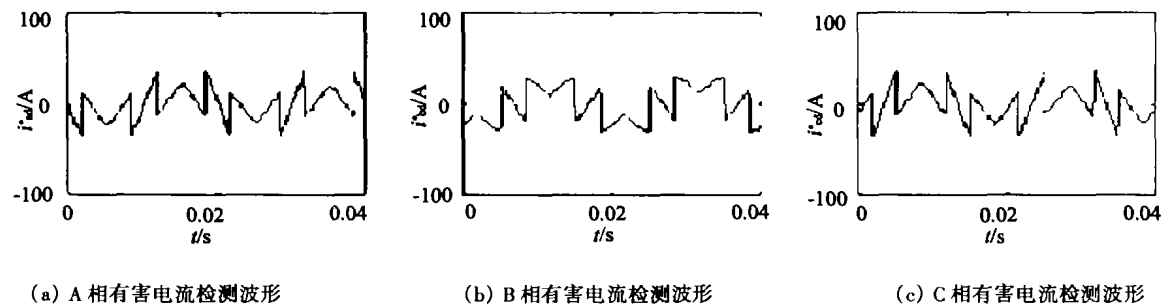


图6 基波零序、负序和谐波电流检测的波形

从图中可以看出, $i_p - i_q$ 检测法能正确地检测出系统中的基波零序、负序和谐波电流, 补偿后电源电流为基波正序电流, 与文献[3,4]的实验结果一致, 具有比较理想的检测效果。

4 结 论

本文从理论上论证了 $i_p - i_q$ 检测法能直接用于三相四线制电路中基波零序、负序和谐波电流的检测, 无需事先剔除零序电流, 这样可以简化检测电路或减少计算量。仿真结果验证了该方法的正确性。

参考文献:

[1] 王兆安, 李明, 卓放. 三相电路瞬时无功功率理论的研究[J]. 电工技术学报, 1992, 7(3): 55-59.

- [2] 李明, 王兆安, 卓放. 基于瞬时无功功率理论的高次谐波和无功功率检测[J]. 电力电子技术, 1992, 26(2): 14-17.
- [3] 卓放, 杨君. 三相四线制系统并联型有源电力滤波器实验研究[J]. 电力电子技术, 1999, 33(6): 16-18.
- [4] 卓放, 杨君. 三相四线制有源电力滤波器主电路的结构形式与控制[J]. 电工电能新技术, 2000, 19(2): 1-6.
- [5] AREDES M. Three-phase four-wire shunt active filter control strategies[J]. IEEE Trans Power Electronics, 1997, 12(2): 311-318.
- [6] 杨君, 王兆安, 邱关源. 不对称三相电路谐波及基波负序电流实时检测方法研究[J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(3): 94-100.
- [7] 王兆安, 杨君. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

(下转第 16 页)

熔融行为进行研究。连铸保护渣熔融过程,连铸结晶器中弯液面上保护渣的受热是以水口中心线为对称轴完全对称的,为方便起见,只取其中四分之一进行研究,传热模型用微分方程表示为:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + S \quad (1)$$

θ ——保护渣层中任一点的温度,℃; k ——保护渣的导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; C ——保护渣热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ρ ——保护渣在温度 θ 时的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; S ——源项,此处主要指熔化潜热。

1.3 边界条件^[5]

- 1) 左边界处理为对称边界,即: $\frac{\partial \theta}{\partial n} = 0$;
- 2) 上边界处理为第三类边界条件,即: $\alpha_i(\theta_f - \theta) = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=H}$;
- 3) 下边界处理为第一类边界条件,即: $\theta = \theta_0$;
- 4) 右边界处理为第二类边界条件,即: $q_x = -k \frac{\partial \theta}{\partial x}$ 。

2 计算方法

用控制容积法将传热微分方程离散化成差分方程的形式,通过编程迭代计算。计算程序用 VisualBasic 语言编

表 1 保护渣 A 的组成(重量比)及性能

渣种	水泥熟料	石英砂	萤石	苏打	碳	CaO/SiO ₂	烧结温度/℃	熔化温度/℃	粘度/Pa·s
A	47	26	12	15	2.0	1.01	912	1 159	0.3

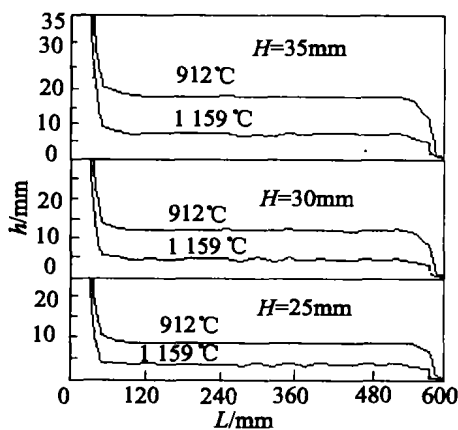


图 2 不同渣厚的各渣层厚度

由图 2 可见,当渣厚为 25 mm 时,液渣层为 6 mm,烧结层为 12 mm;当渣厚为 35 mm 时,液渣层和烧结层分别为 7.5 mm 和 19 mm。即,随着加入保护渣量的增

制,程序的开始先设置变量、赋初值,在计算了各物性参数之后,按照划分的网格用迭代法计算各渣层的温度,最后将计算后的结果以图线的形式显示在计算机上。

3 结果与讨论

3.1 计算工况

在本文中,举例分析的是板坯连铸,板坯宽度为 1 200 mm,厚度为 200 mm,又因为结晶器中保护渣的传热是以水口中心线为对称轴完全对称的,在此只研究其中四分之一。在网格的划分中设, $\Delta x = 10 \text{ mm}$, $\Delta y = 2 \text{ mm}$ 。用以下符号表示相应的物理意义:

- H ——钢液面上保护渣的总厚度,mm;
- θ_1 ——水口中钢液的温度,℃;
- θ_0 ——保护渣下钢液面的温度,℃;
- q ——结晶器壁与保护渣之间的热流密度, kW/m^2 ;
- dt ——非稳态的时间步长,s。

3.2 结果分析

3.2.1 渣层厚度的影响:

改变 H 的值,而保持其他值不变。即当 $H = 25 \text{ mm}$, 30 mm , 35 mm 时,分别对应的各渣层厚度 h 分布如图 2 所示(图中所示温度为表 1 所示渣种的熔化及烧结温度,下同)。

加,液渣层的厚度并没有随之明显增厚,说明保护渣的总厚度对液渣层厚度影响不大,这一点已被其他研究者的研究所确认^[1]。但有一点必须指出,即保护渣的加入量不能太少,以防“露红”。因此,必须认识到,要想改变液渣层的厚度,不能采用增大保护渣厚度的办法来实现,这是无效的。

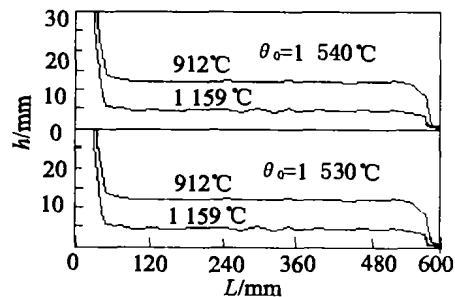


图 3 不同钢液面温度下的各渣层厚度