冶金爐水力模型实驗室

А.Я.列赫特曼　Б.Л.馬尔科夫

В.А.克利万金

冶金工业出版社

А.Я.列赫特曼　Б.Л.馬尔科夫
В.А.克利万金　著

冶金爐水力模型实驗室

张鳳祿　韓昭滄
何永鏘　譯

冶金工业出版社

本書叙述了冶金爐水力模型原理，举出模型的計算方法及例子，並叙述了模型的制造及模化法。此外，还提供了实驗室平面布置图，水和风的供应及必需設备的清单等。

本書可供冶金工厂工程技术人員之用，亦可供冶金爐的研究人員、教学人員、大学生之用。

А.Я.РЕХТМАН, Б.Л.МАРКОВ, В.А.КРИВАНДИН
ЗАВОДСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ
Металлургиздат (Москва—1956)

冶金爐水力模型实驗室　　张鳳祿　韓昭滄　何永鏘　譯
編輯：刘应妙　設計：魯芝芳　赵香苓　責任校对：刘頌古

1958年9月第一版　1958年9月北京第一次印刷 3,000 册
850×1168 • 1/32 • 43,900 字 • 印张 $2\frac{24}{32}$ • 定价 (10) 0.50 元
冶金工业出版社印刷厂印　新华書店发行　書号 0865

冶金工业出版社出版（地址：北京市灯市口甲45号）
北京市書刊出版业营业許可証出字第 003 号

目　　录

序　　言

在冶金爐內进行的热过程，在很大程度上受爐內的气体运动所影响。但是，由于作实驗往往还有一系列的困难，所以用现厂設备来研究气体动力学不是一件容易的事。

特别困难的是在爐子的設計方面，因为除了极簡单的情况以外，现代的数学工具还不允許利用計算的方法，来求得所設計的設备中有关气体运动的数据。

近来，求得这些数据的最可靠的办法就是模化法。

由于М.В. 基尔皮切夫（М.В.Кирпичев）、А.А. 古赫曼（А.А.Гухман）、Г.И.伊万佐夫（Г.И.Иванцов）等人的努力，作为一个在科学上有根据的爐子模化法在苏联首先提出，並且得到了最广泛的应用。Л.С. 艾根松（Л.С.Эйгенсон）的著作对模化法理論的发展起了很大的作用。

在过去一个比較长的阶段，模化方法已經經过考驗，可以有成效地在工厂实驗室內应用。最近几年来，在馬格尼托戈尔斯克冶金联合企业、“鐮刀与鎚子”工厂及其他等厂，已經建立起水力模型实驗室。

进行模型研究，可以解决改善爐子构造及其构件，增加爐子生产率、提高加热質量及砌砖耐久性等問題。

就冶金爐水力模型方面，本書可供实际指导；書中的各章分别闡述了相似理論、研究方法、模型的設計和計算等概念❶。

書中还提供了必需的設备清单，以及設备布置图，这些在建立水力模型实驗室时都可供利用。

本書第一、三章由技术科学付博士Б.Л. 馬尔科夫（Б.Л. Марков）写成，第二章由技术科学付博士А.Я. 列赫特曼（А.Я. Рехтман）写成，第四章由技术科学付博士В.А. 克利万金（В.А. Кривандин）写成。

❶ 这些例子基本上取自莫斯科斯大林鋼鉄学院冶金爐实驗室的实际工作結果。

第一章　模化法的理論基础

在冶金爐的設計或分析爐子的工作情况时，我們一般都沒有掌握数学資料，从而无法靠計算方法来获得爐膛內速度和压力分布的概念，以及决定与气体流动有关的一系列問題。研究现厂爐子的气体流动不是常常能达到目的的，因为进行实驗往往还有相当大的困难。

可以借助于模型来解决很多与气体流动有关的問題，模型是一种与现厂爐子几何相似的設备。但是，要使模型內进行的各种过程都和实物相似，单单靠一个几何相似是不够的。只有在遵守确定了的条件下，模型內的运动才会和实物內的运动相似。如果沒有实现这些模化条件，那末就可能将研究导至錯誤的結果。可以得到几百倍的誤差，甚至可以得到与实物全然不同的其他的定性图象。

我們来看一些例子，这些例子說明模型內的过程如何与实物过程相似；以及“相似”这个詞的意义如何应用在物理现象上❶。

第一节　几何相似

为了便于分析物理现象相似，我們先看看几何相似的某些特点。

大家知道，具有几何相似的图形或系統內，任何相应长度的比例是一个常数。

設有两个相似三角形 ABC 和 $A'B'C'$（图1），图中：

长度　$AB=l_1$；　　长度　$A'B'=l'_1$；

〃　$BC=l_2$；　　〃　$B'C'=l'_2$；

〃　$AC=l_3$；　　〃　$A'C'=l'_3$；

---

❶ 这些問題更严格、更詳尽的叙述，讀者可参考 Л.С.艾根松(Л.С.Эйгенсон)的著作〔1〕，本章即以該著作作为基础。

〃　$BD=l_4$；　　　〃　$B'D'=l'_4$；

〃　$EF=l$；　　　〃　$E'F'=l'$。

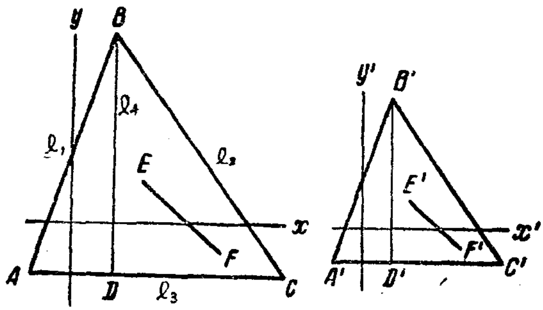

图 1　相似三角形

那么，这两个三角形便有以下关系：

$$\frac{l'_1}{l_1}=\frac{l'_2}{l_2}=\frac{l'_3}{l_3}=\frac{l'_4}{l_4}=\frac{l'}{l}=\cdots\cdots=\frac{p'}{p}=c_l,$$

式中　$p=l_1+l_2+l_3$——周长；

l——任意綫 EF 长；

c_l——相似常数。

l_1，l_2，l_3，l'_1，l'_2，l'_3等数値，表示它所代表的长度比我們所选择的量度单位大多少倍。

为了能够将同类量（长度与长度，溫度与溫度等等）进行比較，它們的量度要采用同一的单位。測量长度采用标准单位——米，所有长度——l_1，l_2，l_3，l'_1，l'_2，l'_3 等，都具有同一因次——“米”。

但在几何相似系中，长度的量度所采用的不是同一的标准单位，而是采用相应的綫段，这样可以比較方便。

例如在三角形 ABC 中，我們选择了一个任意参数（长度）作为量度单位，即 l，在三角形 $A'B'C'$ 中——相应的参数是 l'，所有其他部分的长度都可以用无因次量来表示：

$$\left.\begin{array}{llll}\text{长度}\ AB & L_1=\dfrac{l_1}{l}; & \text{长度}A'B' & L_1'=\dfrac{l_1'}{l'};\\ \text{〃}\ \ BC & L_2=\dfrac{l_2}{l}; & \text{〃}\ B'C' & L_2'=\dfrac{l_2'}{l'};\\ \text{〃}\ \ AC & L_3=\dfrac{l_3}{l}; & \text{〃}\ A'C' & L_3'=\dfrac{l_3'}{l'};\\ \text{〃}\ \ EF & L_4=\dfrac{l}{l}; & \text{〃}\ E'F' & L'_4=\dfrac{l'}{l'}\\ \quad\text{等等} & & \quad\text{等等} & \end{array}\right\}\quad(1)$$

在等式1中，无因次量用大写字母表示。上述几何相似系的特性可以証明：在相似系中，相应的无因次参数相等：

$$L_1=L_1';\ L_2=L_2';\ L_3=L_3';\ L_4=L_4';\ L=L'=1。\quad(2)$$

如果两个三角形的坐标軸也具有相应的位置（如图1所示），那末不单只长度的无因次量（即参数）相等，而且任何相应点的无因次坐标也相等。

从等式1可以得出：有因次的参数（及座标）是相应无因次量和量度单位的乘积：

$$l_1=lL_1;\ l_2=lL_2;\ l_3=lL_3;\ l_1'=l'L_1';\ l_2'=l'L_2';\ l_3'=l'L_3'。\quad(3)$$

Л.С.艾根松称等式3为“比例的轉換”(Масштабные пре-эбразования)，因为他把选择用来作为量度单位的数字叫做“比例”。在工程上，“比例”这个字有一个特别的概念——即包含有相似常数c_l的意义。以后，我們就在这个意义下应用“比例”这个术語。

应用相应綫段作为参数来测定长度的几何相似图形，具有重要的性能。

大家知道，**“若选擇相应的參数作为比例，則描述各个几何相似系的函数或方程变成無因次的形式后，互相恒等。”**正确的应該反过来說：“若描述几何系的无因次方程式恒等，同时所有坐标軸的比例互相相等，則几何系相似”〔1〕。

不必提出証据，而用具体例子就可以指出第一个說法的正确

性。

假定，在两个座标的相应位置上有两个椭圆（图2）：

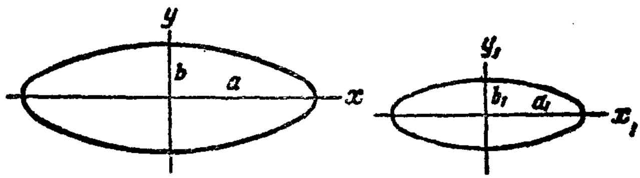

图 2 相似椭圆形

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1 \quad 及 \frac{x_1^2}{a_1^2}+\frac{y_1^2}{b_1^2}=1, \qquad (4)$$

式中 x 及 y——座标；

a 及 b——长半軸及短半軸。

我們可以使椭圆方程式化成沒有因次的。例如，我們取相应的长半軸 a 及 a_1 作为量度单位，則：

$$x=aX;\quad y=aY;\quad a=aA;\quad b=aB;$$

$$x_1=a_1X_1;\quad y_1=a_1Y_1;\quad a_1=a_1A_1;\quad b_1=a_1B_1。\qquad (5)$$

将式5代入椭圆方程式，得：

$$X^2+\frac{Y^2}{B^2}=1 \quad 及 \quad X_1^2+\frac{Y_1^2}{B_1^2}=1,$$

因 $A=A_1=1$。

因而，椭圆的相似不单具有相应参数的关系，而且还具有相应点坐标一致的关系：

$$\frac{x}{x_1}=\frac{y}{y_1}=\frac{a}{a_1}=\frac{b}{b_1}=c_l。$$

由此可见，

$$\frac{x}{a}=\frac{x_1}{a_1};\ \frac{y}{a}=\frac{y_1}{a_1};\ \frac{b}{a}=\frac{b_1}{a_1},$$

或

$$X=X_1;\ Y=Y_1;\ B=B_1。$$

利用这种相等的方法，便可得相似椭圆形的无因次方程：

$$X^2+\frac{Y^2}{B^2}=1。\qquad (6)$$

把方程式（4）化为无因次形式具有什么优点呢？

第一，方程式6不論对一个、两个或多个相似椭圓形都是适用的。在这許多图形中的一个图形上定出了任何的无因次参数（或任何点的无因次坐标）以后，我們馬上就可以說，对所有的相似椭圓形，这些参数也能利用上。或相反，如果两个椭圓的无因次方程相等，則馬上就可以說，这两椭圓相似。

第二，无因次参数在数量上比有因次参数要少一些。

第二节　描述物理现象的方程

这个或那个的物理现象可用微分方程来描述。

描述物理现象的微分方程推导如下。

1. 过程不是在整个空間中进行，而是在无限小体积中进行（在狄卡兒坐标中，这个无限小体积是一个平行六面体，每边长各为 dx, dy, dz）。

2. 过程在无限短的时間間隔 $d\tau$ 內进行，这个时間是这样的短，以致在瞬时內，該现象中的各变量，仅仅来得及有无限小的改变。

这样，得出的方程式对所有的同类现象（Явления данного класса）来說，都是适合的，但是，解决具体問題也还不够，因为所研究的过程是在空間进行的，而空間的几何边界以及在这边界上过程如何进行等等，方程都沒有指明。此外，如果描述过程的量场（поле величин）随时間而改变，也就是过程是不稳定的，那末，要解决具体問題，还必需对瞬时的量场加以描述，一般都描述开始时的情况。

描述所研究的空間的几何边界和边界上过程进行的特点的方程，叫做边界条件。

描述过程在开始瞬間的特性的方程，叫做开始条件。

开始条件和边界条件又合称边緣条件。

在研究复杂的、表述爐内气体流动的水动力学方程及其边緣条件以前，我們首先从传热方面比較簡单的例子着手，看看边緣条件如何定出。

在固体中所传遞的热量可用傅立叶方程描述：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}=a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right), \tag{7}$$

式中　x,y,z——狄卡兒坐标；

t——溫度；

τ——时間；

$a=\frac{\lambda}{c\gamma}$——导溫系数；

λ——导热系数；

c——重量比热；

γ——容积比重。

但是，如果要求定出在物体的任何点(三个座标：x、y、z)上，开始加热后τ时間内的溫度t，那末，光靠一个公式（7）是不够的。事实上，物体的形状和尺寸，公式（7）都沒有加以任何表达；也沒有表达我們一开始加热时物体溫度的情况；以及經物体表面进入的热流强度等。当然，我們要依靠所有这些附加数据，才能得到問題的解答。

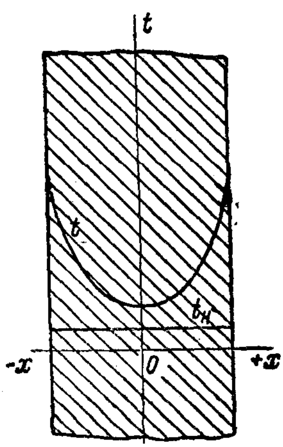

图 3 无限大平板加热問題的簡图

說得明白一点，給出开始条件就等于給出加热开始时物体内的溫度分布；給出边界条件就等于給出物体的形状、大小，以及与周围介質热交换的条件等。

假定我們要加热一块厚 2S 的无限大平板(图 3)。在加热前，平板上

所有各点的溫度都等于 $t_н$。平板周围的介質，是溫度固定（$t_м=\text{const}$）的热源。由热源到平板表面的給热系数 $\alpha=\text{const}$。固定参数 λ 及 a 等已知。

因为在 y 軸及 z 軸方向，平板的长度是无穷大，所以可以認为热量只沿 x 軸方向传播。故公式（7）可写成：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}=a\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}。\qquad (8)$$

我們现在来导出边緣条件：

1. 开始条件：$\tau=0$，$t=t_н$，
2. 边界条件：

a） 物体的形状——无限大平板；

б） 平板表面的热流

$$q_1=\alpha\ (t_м-t)\ ;$$

从表面传到平板內的热流

$$q_2=\mp\lambda\ \frac{\partial t}{\partial x},$$

但$q_1=q_2$，所以，边界条件的最后形式是：

当 $x=\pm s$ 时

$$\alpha\ (t_м-t)\ =\mp\lambda\frac{\partial t}{\partial x};$$

式中 $t_н$——物体开始溫度；

$t_м$——热源溫度；

α——給热系数；

λ——导热系数；

s——板厚的一半。

现在，解决問題，即找出平板任何点 x 在任何瞬时 τ 內的溫度問題所应該具备的所有条件，都已經具备了。

但是，解决这个比較簡单的問題所需要的数学工具是够复杂的。如果拿来一个这种类型的稍为难一点的問題（如物体的形状不是平板，而是較为复杂的形状），那末，要解决这个問題，实

际上是不可能的。

所以，解决实际上常常碰到的問題，我們或者采用近似計算法（有时这种算法很粗糙），要不然就采用类似法或基于物理现象相似的模型法。

第三节　物理现象的相似

表述几何系統的方程式联系着具有因次为“米”的物理量；描述物理现象的方程式則联系着具有因次各不相同的一些物理量。

两个系統在几何上相似系指此一系統的所有尺寸等于另一系統的尺寸的 c_l 倍：

$$\frac{l_1'}{l_1}=\frac{l_2'}{l_2}=\frac{l_3'}{l_3}\cdots\cdots\cdots\cdots=c_l。$$

然而，在这些系統内所进行的物理现象的相似，絕不意味着在一系統內的相应点上的一切物理量也都等于另一系統的物理量的 c_l 倍。

一般地，当对比物理现象时，只有比較同名的、具有同一因次的量才有意义，因此可以給出物理相似的定义如下：**若在相应点上及相应瞬間內任何同名变量的比值为一常数，則这些物理现象称为相似的物理现象。**

如同几何方程式一样，表述相似物理现象的方程式也可以轉換为无因次形式。假若用对应量作为量度单位，則相似系統的同名无因次变数在相应点上以及相应时間內必将相等。

如在几何相似的情况下一样，对于相似的物理现象也証明了：**假若用相应的量作为量度单位，則描述物理现象的方程式在轉換为無因次形式后将成为恒等式。**

相似物理现象的这些性质給出什么結果呢？

前面，当用物体的加热作为例子时曾經指出，描述这个过程的微分方程式並非都能解出的。

这一类問題只能靠实驗方法来求解，但是复制所研究的现象常常要化很大代价；除此以外，直接測量物理量或者观察实物中过程的进行情况，有时也有困难。

描述相似现象的无因次方程式恒等这一性质使我們可以不必在实物中，而在模型中进行物理现象的研究，此时在模型中，过程系相似地进行。自无因次方程式恒等得出，在具有同一无因次座标的点上以及在同一无因次时間內，在模型內以及在据它而制成模型的实物內已知的无因次量也必将恆等。

在模型上借直接測量所求出的未知的无因次量对于实物也将有效。将无因次量轉換为有因次量並不困难。

在什么条件下两个物理现象才是相似的呢？

1. 表述这些物理现象的方程式在結构上应当一样（包括描述边緣条件的方程式在內）。

2. 表述开始条件和边界条件的无因次方程式应当恆等。

3. 包括在描述这些现象的方程式內的同名无因次量应当恆等。

我們来研究一下，对于第二节中列举的問題，倘若能够滿足这些要求的話，具体条件是什么。

預先将边界条件簡化一些。取任意规定溫度作为溫度計算的起点。我們拿热源的溫度 $t_н$ 作为計算的起点。那末在我們所采取的系統中任意溫度将决定于下列等式

$$\vartheta = t - t_н。$$

描述平板透热和边緣条件的方程式为：

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a\,\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}; \\ &\tau = 0;\quad \vartheta = \vartheta_н; \\ &x = \pm s,\ \alpha\vartheta = \pm\lambda\frac{\partial \vartheta}{\partial x}。\end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

利用和几何相似一样的方法（参閱第一节），将方程式（9）轉換为无因次形式。

在表述物理现象的方程式中，总会含有其因次为其他物理量的因次的函数的物理量，因此所选择的量度单位也应当在它們之間具有一定的关系。

暂时先不选择具体的物理量作为量度单位，而用带零的字母来表示。无因次量用大写字母表示。那末一切有因次的量可表示为下列形式：

$$\left.\begin{array}{ll} \vartheta=\vartheta_0\theta; & a=a_0A\ ; \\ \vartheta_н=\vartheta_0\theta_н; & \lambda=\lambda_0A\ ; \\ x=l_0X; & \alpha=\alpha_0A\ , \\ s=l_0S; & \tau=\tau_0T\ 。 \end{array}\right\} \qquad (10)$$

将轉換式（10）代入方程式（9），得到❶：

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{\vartheta_0}{\tau_0}\cdot\dfrac{\partial\theta}{\partial T}=\dfrac{a_0\vartheta_0}{l_0^2}A\dfrac{\partial^2\theta}{\partial x^2};\ T=0,\ \ \theta=\theta_н; \\ X=\pm S,\ \ \alpha_0\vartheta_0A\theta=\pm\dfrac{\lambda_0\vartheta_0}{l_0}A\dfrac{\partial\theta}{\partial x}。 \end{array}\right\} \qquad (9a)$$

方程式（9a）暂时还是有因次的，因为其中尚包含由量度单位（具有符号 0 的字母）組成的有因次的綜合数群。

为了使方程式（9a）变成无因次，必需使：

$$\frac{l}{\tau_0}=\frac{a_0}{l_0^2} \qquad 以及 \qquad \alpha_0=\frac{\lambda_0}{l_0}, \qquad (11)$$

这样方程式（9a）每項前的有因次的綜合数群便消掉了。

公式（11）称为量度单位之間的关系方程式。关系方程式使我們不能任意选择任何物理量的量度单位。在这种情况下其中包括五个量，因此只有三个可以任意选择，而其余两个（根据关系方程式的数目）应当由方程式（11）求出。

当选择作为量度单位的量时必須遵循两条规則：

а）任意选择的应当是那些和該现象的本質有关的参数；

б）它們的因次应当是独立的。这意味着，任何任意选择的量的因次不应当是其它任意选择的量的指数函数❷。

---

❶ 微分符号中的量的轉換如同所有其他的量一样。

❷ 例如，a，λ，l 和 ϑ 具有自变因次，而 α 和 τ 具有因变因次。

遵循这些规则，我們选以下的量作为量度单位[1]。

$$a_0=a;\quad \lambda_0=\lambda;\quad l_0=s;\quad \vartheta_0=\vartheta_н。$$

其它单位的数值从方程式（11）得到，将任意选择的单位代入式中：

$$\tau_0=\frac{s^2}{a};\qquad \alpha_0=\frac{\lambda}{s}。$$

将量度单位的值代入公式（10），得到无因次量的表示式如下：

$$\left.\begin{array}{ll}
\theta=\dfrac{\vartheta}{\vartheta_н}; & A=1; \\
\theta_н=1; & A=1; \\
X=\dfrac{x}{s}; & A=\dfrac{\alpha s}{\lambda}; \\
s=1; & T=\dfrac{a\tau}{s^2}。
\end{array}\right\} \tag{12}$$

现在方程式（9a）具有以下形式：

$$\left.\begin{array}{c}
\dfrac{\partial\theta}{\partial T}=\dfrac{\partial^2\theta}{\partial x^2}; \\
T=0,\ \theta=1; \\
X=\pm 1,\ A\theta=\pm\dfrac{\partial\theta}{\partial x}。
\end{array}\right\} \tag{9б}$$

方程式（9б）較原来的方程式有所簡化，因为两个无因次參数A和A等于1。

这样一来，为了使现象与第二节所研究的现象相似，必須：

a）使被研究的现象（实物）与模型的无因次边界条件恆等。这意味着，模型应当与实物几何相似（长度与厚度之比也应当等于无限大），以及实物与模型的无因次給热系数应当一样：

$$A=A' \text{ 或者} \frac{\alpha s}{\lambda}=\frac{\alpha' s'}{\lambda'};$$

---

[1] 关系方程中不包含ϑ_0，因此可以取任意规定温度作为温度的量度单位。

б）使实物与模型的无因次开始条件恒等。这意味着在开始瞬間模型的无因次开始溫度应当等于实物的无因次开始溫度，亦即

当 $T'=T=0$ 时 $\theta'_{\text{н}}=\theta_{\text{н}}$，

因为 $\theta'_{\text{н}}=\theta_{\text{н}}=1$，有因次的起始溫度可以是任意的，重要的只是使沿模型整个厚度上的溫度与实物中的一样；

в）无因次参数 A 和 Λ 在此情况下等于1，所以模型中的有因次的 a 和 λ 可以任意选择，重要的只是它們像在实物中一样等于常数。

假若遵守了所有这些条件，則实物和模型中的现象便相似，而描述这些现象的无因次方程式（95）便恒等。这样就可以借模型之助以求出在时間 τ 和点 x 上所要求的溫度。实际上，在模型上直接測量出在点 $X'=X$（对应点）处，在时間 $T'=T$（对应时間）时的无因次溫度 θ' 后，便可以很容易地求出 t，因为从实物与模型的无因次方程式恒等得出的結論看来，$\theta=\theta'$。

在技术上模型可以和实物有如下的区別，模型的溫度更为适宜，在尺寸上更适于操作等等，这些就可以使得各种測量与实物相比大为簡易。

讓我們指明，无因次給热系数 A 通常称为比奥规范数（Bi），无因次时間 T 称为傅立叶规范数（Fo），无因次溫度称为溫度规范数（也可用字母 θ 表示）。

第四节　水动力学的相似

冶金爐及其构件的热工作在很大程度上决定于气体的流动。充分而全面地理解这种流动具有很大的意义。遺憾的是，表述气体（或液体）流动的方程式很复杂，並且只是对于簡单的情况，才能用計算方法来获得我們所研究的空間內速度或压力分布的概念。

解决与爐內气体流动有关的問題通常都用实驗方法，因为液