

大型电站锅炉燃烧器区向火侧剪切大涡的尺度及其旋转速度

刁永发¹, 何伯述¹, 许晋源², 陈昌和¹

(1 清华大学 煤的清洁燃烧国家重点实验室, 北京 100084; 2 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 采用 IFA300 恒温式热线风速仪, 首次使用六线涡量探针及其定位坐标系, 对具有普适性的 HG-2008-YM2 型切向燃烧煤粉锅炉燃烧器区的涡量场进行了测量, 采用兰金复合涡(Rankine Vortex)旋涡模型描述了切向炉四角燃烧器射流向火侧的剪切大涡, 由冷模试验确定了该剪切大涡的尺度及其旋转速度, 该剪切大涡的涡核半径 r_0 为 25 mm, 炉内流体微团作刚体式旋转的角速度为 $-1.56 \times 10^5 \text{ r/min}$, 分析了剪切大涡对煤粉着火以及燃烧器区涡相干结构中 NO_x 初生形态的影响。

关键词: 切向炉; 燃烧器区; 剪切大涡; 尺度; 旋转速度; 六线涡量探针

中图分类号: TK224; O357 文献标识码: A

1 引言

相干结构在动量传输、传热、传质和噪声控制等方面都起着重要作用, 在航空气动研究、锅炉炉内燃烧与各种化学反应研究、环境保护以及大气与海洋研究等诸方面, 都希望用涡动力学的理论来研究相干结构。因此, 为了研究大型电站四角切向燃烧炉内涡相干结构中 NO_x 的初生形态, 首先必须对炉内四角燃烧器射流形成的大涡相干结构有清醒的认识。本文首次利用 IFA 300 恒温式热线风速仪, 使用三维可移坐标架给六线涡量探针定位, 并用伺服电机驱动其固定座, 采用条件采样技术研究了四股燃烧器射流向火侧形成的大涡相干结构, 为了与切向炉特有的特大主流涡相区别, 本文尽量避免混淆, 而只称“相干结构涡”, 即就是由于四角燃烧器射流的相互影响、相互作用在射流的向火侧形成的剪切大涡。对于引进型切向燃烧技术, 包括上锅、哈锅、武锅自行设计的锅炉, 都是大切圆, 因此, 本文以具有普适性的 HG-2008-YM2 型切向燃烧煤粉锅炉为

研究对象, 通过冷态模型试验研究, 测量和计算了切向炉燃烧器区剪切大涡的尺度及其旋转速度, 为更深入地研究高端动区气流中煤粉燃烧和污染物(如 NO_x)治理提供了理论基础。

2 试验设备及试验方法

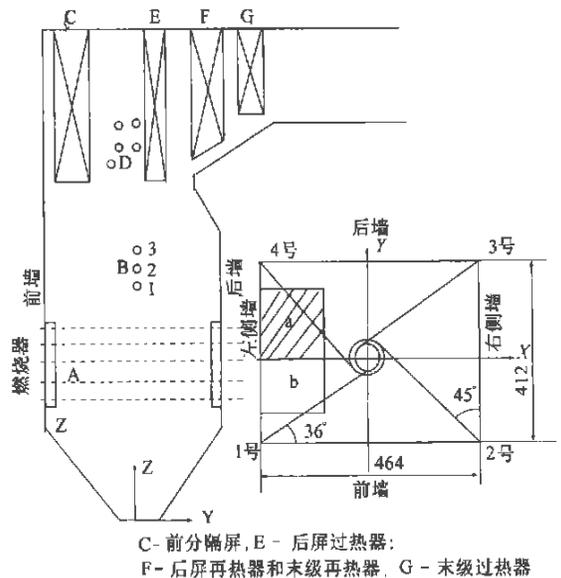


图 1 试验台及测量区域示意图(单位: mm)

图 1 为试验台及测量区域示意图, 试验台以 HG-2008-YM2 型切向燃烧煤粉锅炉(哈三工程)为原型, 采用 Thring-Newbym 模化方法, 模型和原型的比例是 1:40。除燃烧器外, 整个锅炉模型按照与原型几何相似的原则制造, 由角钢框架和有机玻璃安装而成。燃烧器作常见的逆时针布置, 屏式受热面(分隔屏、后过、后再和末再)由厚度为 1.2 mm 的薄钢板

收稿日期: 2002-03-20

基金项目: 机械工业技术发展基金资助项目(95JB1101); 国家重点基础研究基金资助项目(G 19990222);

中国博士后科学基金资助项目(2002-07)

作者简介: 刁永发(1968-)男, 江苏太兴人, 清华大学博士后

制成, 上面钻有 $\Phi 2$ mm 的小孔若干, 以与实际结构中烟气串流的情况相符。炉膛的上部是可拆卸的, 可以方便地更换屏式受热面。原型中前后分隔屏各为 6 片, 后屏过热器为 12 片, 后屏再热器和末级再热器共 24 片, 末级过热器为 48 片。考虑到测量的需要, 建造模型时做了适当的简化: 后屏过热器为 8 片, 后屏再热器和末级再热器共 12 片, 末级过热器为 24 片。每角燃烧器都有一台 1.5 kW 风机单独送风, 额定风量为 $45 \text{ m}^3/\text{min}$, 风压为 1 kPa; 风量通过控制风机入口截面积来调节。在风机与燃烧器喷口之间的连接圆管上装有“靠背管”型测速管。四台风机的压头已经足够, 因此在水平烟道出口未接引风机, 气流经一长 500 mm 的通道后排入大气。

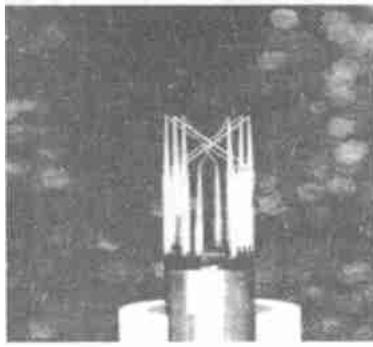


图 2 六线涡量探针实物照片

实验中测量区域在燃烧器区中部 ($z = 525$ mm) 水平面内 a 区域, 如图 1 中所示阴影部分。测量使用的是美国 TSI 公司生产的 IFA300 型全自动热膜风速仪系统, 由六线涡量探针、IFA300 恒温式风速计、测温

热电偶、高速多通道 A/D 转换板、数据采集与分析软件包 (Thermalpro 软件包) 及 1129 型全自动速度校准仪等组成。图 2 为六线涡量探针的实物照片, 利用该探针和 Windows NT 的平台上的多功能数据处理软件包, 可以真正实现 HWA 涡量强度的测量。六线涡量探针可同时测量两个涡量强度分量 ω_x 和 ω_z 或者 ω_x 和 ω_y (只要探针绕长轴转 90°) 和三个速度分量 u , v 和 w 。六线探针由四个 X 型探头组成。4 个 X 型探针平行于 xz 平面, 还有一个 X 型探针平行于 xy 平面, 所有的热线都与轴线方向成 45° 角, 轴线方向就是 x 轴方向。 xz 平面内热线间距为 1 mm, 在 xy 平面内热线间距为 1 mm, 空间分辨率为 2×1 mm。热线总长度为 8.4 mm, 敏感元件为钨丝。热线中部是敏感部分, 两端镀金, 以降低角度变化的影响。德国柏林工业大学 HF 研究所的实验证实^[1], 当与轴线方向的角在 20° 以内时, 对所有热线来说误差都微不足道 (小于 1%)。每根热线的敏感段长度为 1.3 mm, 直径 $5 \mu\text{m}$, 长径比为 260。镀金段长度约为 7 mm, 直径为 $50 \mu\text{m}$ 。此直径大于标准 X 型热线的直径, 以便降低热线电阻。尽管热线在空间交叉排列,

但热线的敏感段互相不重合, 即任一热线位于另一热线的下游, 且间距不小于 1 mm, 这样热线和叉杆尾迹不会互相干扰。测量时, 将六线涡量探针固定于三维可移坐标架上, 其固定座可以通过步进电动机在 x , y , z 方向定位, 三个方向的定位精度都是 0.01 mm。六线涡量探针的每根热线敏感段的长度仅是 1.3 mm, 直径 $5 \mu\text{m}$, 敏感段的长度是相当小的, 按照涡量定义, 在求取涡量的速度梯度时, 为了消除测量误差, 采用精确的定位坐标系统, 对燃烧器区的空间涡量强度进行精确的测量是很重要的。

当四股燃烧器相交湍流射流, 风量分配均匀, 炉内旋转气流自修正 (自修正即为每角燃烧器射流受等风量的上邻角射流冲击后, 在炉内形成的旋转角速度一定的主旋流) 并且稳定运行后, 采用条件采样 (conditional sampling) 技术, 应用六线涡量探针详细测量切向炉燃烧器区域的速度场和涡量场^[2]。在涡量场的测定过程中, 要求尽可能在时间和空间上能够扩大测量范围, 六线涡量探针带有一个扫描频率为 20 480 Hz (每个 A/D 通道) 的采集模块, 这是一个最快的显示模块, 空间解析可以在 7.5 m/s 到 0.37 mm/s 的对流速度 u_c 时进行, 其缺点是测量时间仅 0.1 s 只能连续测量 12 800 个数据, 并且用自动启动的接受器将很长的一串数据串在一起, 以达到连续测量的目的。因此, 用六线探针测量涡量时, 选取采样频率为 20 kHz, 大气压力为 100.64 kPa。

3 试验结果及分析

图 3 给出了燃烧器区高度方向上, 燃烧器区中部水平面 a 区域内, 四角燃烧器全部投运时, 竖直方向 ω_z 的等涡量线分布。图示表明: 在燃烧器区域中部 ($z = 525$ mm) 的水平面 a 区域内, 由于四角燃烧器射流相互联系, 相互影响, 形成了一个充满炉膛的主旋流涡, 使煤粉能迅速的着火和充分燃尽; 另外, 由于 4 号燃烧器射流及上邻角燃烧器横向射流的干涉作用, 在 4 号燃烧器射流的向火侧, 形成了与横向射流之间的剪切大涡, 剪切大涡作逆时针旋转, 剪切大涡的涡量强度达到 $-3.25 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。

文献[3]指出: 在湍流中与分子运动有关的过程, 湍流动能的粘性耗散, 分子运动引起的混合和热交换, 燃烧与化学反应等都发生在涡量的集中区, 粘性耗散区好比化学反应速率极大的良好搅拌反应器, 置于四周很大但没有化学反应的环境中。因此, 煤粉在炉内的燃烧过程初期, 其燃烧与化学反应主

要发生在涡量集中的剪切大涡里。

4 炉内燃烧器相交射流的旋涡模型

使用六线涡量探针和条件采样技术,对炉内四股燃烧器相交射流的研究发现:4号燃烧器的射流与横向往流相互干涉下会形成涡;在4号燃烧器射流的向火侧,由于4号燃烧器射流的迎风面受到了上邻角燃烧器射流的冲击,在相交射流的撞击点处,形成了大的剪切涡,剪切涡的旋转方向为逆时针旋转。因此,可以推测:在1号、2号、3号角燃烧器射流和各自的上邻角燃烧器射流相交处,在燃烧器射流的向火侧,也会形成三个大的剪切涡,在炉内形成的四个大剪切涡是煤粉在炉内着火和燃烧的重要因素,对炉内的煤粉着火、燃烧起着主控作用,为研究炉内污染物(如NO_x)控制及其治理启示了思路。如何用一种涡(Vortex)模型来描述四股相交射流,对每角燃烧器射流的向火侧形成的剪切涡,对分析炉内煤粉燃烧和污染物治理很有必要。

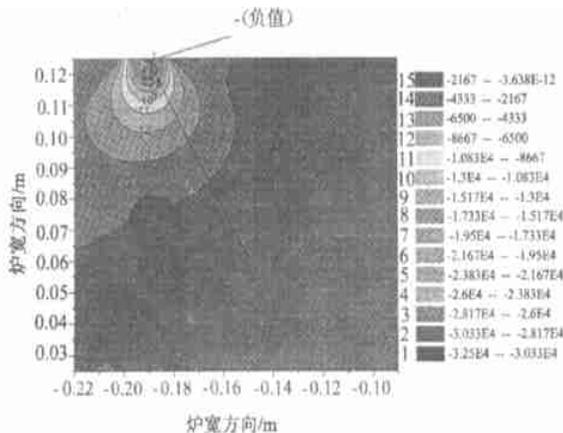


图3 燃烧器区水平截面(a区)纵向涡(ω_z)的等涡量线分布($z=525\text{ mm}$)

由图3可知,在切向炉4号燃烧器射流的向火侧,剪切大涡的速度梯度较大,涡量 $\omega = \text{const}$,近似于刚体涡;在剪切涡的周围,速度梯度较小,涡量 $\omega = 0$,速度环量存在,近似于势位涡,因此,按照势涡、兰金复合涡二维轴对称涡和描述势涡涡量扩散的Oseen涡和泰勒(Taylor)涡的定义^[4],本文认为在4号燃烧器射流的向火侧,剪切涡的旋涡模型服从Rankine Vortex的分布规律。本文最关心的是 xoy 平面内,炉内垂直方向分量 ω_z 的变化情况,对于4号燃烧器射流的向火侧的剪切大涡,引入半径为 r 的周线上速度环量 $\Gamma = 2\pi r v_0$,按照兰金(1882)提出的

复合涡模型^[4],对于水平面内二维定常旋涡流,采用兰金复合涡(Rankine Vortex)模型,作为该旋涡流的基本解。兰金复合涡的涡量分布表达式为:

$$\text{如果 } r \leq r_0, \omega_z = \frac{\Gamma}{2\pi r_0} \quad (1)$$

$$\text{如果 } r \geq r_0, \omega_z = 0 \quad (2)$$

在 $r \leq r_0$ 的区域里,流体做刚体式旋转,涡量全部集聚在该区域里, r_0 称之为涡核半径,流体做刚体式旋转的角速度为: $\Omega = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Gamma}{\pi r_0^2}$, (rad/s)。

5 炉内剪切大涡的尺度及其旋转速度

本文最关心的是:炉内四角燃烧器射流形成的剪切涡中,剪切大涡的尺度及其中流体微团做刚性旋转的速度。这里需注明的是,本文所讲的剪切大涡是指:该旋涡的涡量强度最大,涡量强度均匀分布,最大的涡量全部集聚在半径为 r_0 的区域里,流体做刚体式旋转,该旋涡周边的局部涡量强度为零。用兰金复合涡(Rankine Vortex)模型来描述四角燃烧器射流向火侧形成的剪切涡,正是基于这一思想而确定的。根据模型试验研究结果,四角直流燃烧器同时投运,在4号燃烧器射流向火侧形成的剪切涡中,由图3可以确定,对于冷态模型,炉内剪切大涡的涡核半径 r_0 为25 mm,即大涡的涡量全部集聚在半径为25 mm的旋涡里。本文HG-2008/18.2-YM2型锅炉原型与模型的比例为M40:1,按照相似模化准则,锅炉原型中大涡的涡核半径为1000 mm。实炉中,在半径约为1 m的涡核里,流体微团做刚体式旋转。

冷模试验中,炉内燃烧器区,燃烧器射流的向火侧,剪切大涡的涡核半径 r_0 为25 mm,涡量 ω_z 为 $-3.26 \times 10^4 \text{ rad/s}$,则按照兰金复合涡模型,由式(1)和式(2)计算可得,炉内流体微团做刚体式旋转的角速度为 $-1.56 \times 10^5 \text{ r/min}$ 。

实炉中,以4号燃烧器射流向火侧的剪切大涡为例,在HG-2008/18.2-YM2型切向燃烧锅炉原型中,当煤粉喷入炉膛燃烧,煤粉颗粒主要在大涡结构里,做刚性旋转并且着火燃烧,这时,剪切大涡相干结构类似于大涡反应器。当煤粉进入剪切大涡着火燃烧时,由于刚体涡的涡量强度等于常量,因此,在刚体涡内部,煤粉空气混合较强,而在势位涡里,涡量强度等于零,煤粉空气混合没有刚体涡内强烈。

(下转第26页)

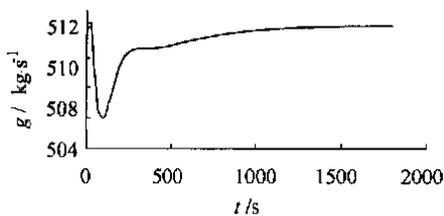


图7 新蒸汽流量变化

额定工
况下燃料量
发生-10%
的阶越扰动
后,由于烟气
放热量减少,
新蒸汽温度、
省煤器出口

水温及再热器出口汽温逐渐降低至新的稳定值(图2~图4),水冷壁容积储水率逐渐增加至新的稳定值(图5),新蒸汽压力逐渐降低至新稳定值(图6),新蒸汽流量先随新蒸汽压力下降一段时间后随新蒸汽温度下降而上升至其初始值(图7)。上述仿真结果与文献[6]中使用传统方法的仿真结果一致,而本文的模型更为简单。

5 结论

通过合理的机理分析和简化,建立了超临界直流以锅炉单相换热面壁温变化及水冷壁内储质与压力变化的动态方程,导出了工质侧压力流量变化的非线性关系式。上述的动态方程和非线性关系式同

(上接第22页)

6 结论

通过本文的试验研究,可以得到以下结论:

(1) IFA300 恒温式热膜风速计和六线涡量探针及其采集系统能方便和精确地测量炉内的涡量场,从而可以认识炉内燃烧器区由于燃烧器相交射流形成的剪切涡。

(2) 由于燃烧器射流及上邻角燃烧器横向射流的干涉作用,在4号燃烧器射流的向火侧,形成了与横向射流之间的剪切大涡,剪切大涡做逆时针旋转,剪切大涡的涡量强度达到 $-3.25 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。可以推测:在1号、2号、3号角燃烧器射流和各自的上邻角燃烧器射流的相交处,在燃烧器射流的向火侧,也会形成三个大的剪切涡,在炉内形成的四个大剪切涡是煤粉在炉内着火和燃烧的重要因素,对炉内的煤粉着火、燃烧起着主控作用。

(3) 按势涡、兰金复合涡二维轴对称涡和描述势涡

以往的数学模型相比具有主次分明、形式简单、内容全面、结果合理和适用范围大等重要特点,为超临界直流锅炉的长期动态特性乃至整个机组的仿真及控制系统研究提供一种十分新颖、简便、可靠的数学模型和研究方法。

参考文献:

- [1] FLYNN M, MALLEY M. A drum boiler model for long term power system dynamic simulation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1999, 14(1): 209-217.
- [2] DIECK-ASSAD G. Development of a state space boiler model for process optimization[J]. *Simulation*, 1990, 55(4): 201-203.
- [3] ORDYS A. Modelling and simulation of power generation plants[M]. London: Springer-Verlag London Limited, 1994.
- [4] VANI K, ANJAN B, PAUL M. Power plant models for operator training simulations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1989, 4(2): 559-565.
- [5] WATARO S, DANIEL E. A simplified model based supercritical power plant controller[A]. *Proceeding of the 35th Conference on Decision and Control*[C]. Japan: IEEE Press, 1996. 4486-4491.
- [6] 范永胜. 600 MW 超临界机组直流锅炉的全工况建模与仿真研究[D]. 南京: 东南大学, 1997.

(何静芳 编辑)

涡量扩散的 Oseen 涡和泰勒(Taylor)涡的定义,炉内剪切大涡的旋涡模型服从 Rankine Vortex 的分布规律。

(4) 冷模试验中,炉内燃烧器区,燃烧器射流的向火侧,剪切大涡的涡核半径 r_0 为 25 mm, 涡量 ω_z 为 $-3.26 \times 10^4 \text{ rad/s}$, 按照兰金复合涡模型,炉内流体微团做刚体式旋转的角速度为 $-1.56 \times 10^5 \text{ r/min}$ 。对于 HG-2008/18.2-YM2 型锅炉原型,在半径约为 1 m 的涡核里,流体微团做刚体式旋转。

参考文献:

- [1] KIM J H. Wirbestaekemessungen in einer turbulenten scherschicht [D]. Berlin: Technischen Universität Berlin, 1989.
- [2] 刁永发. 切向燃烧煤粉炉内旋涡运动的试验及理论研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2001.
- [3] 是刚刚. 湍流基础研究的进展. 现代流体力学进展[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [4] 董秉纲, 尹协远, 朱克勤. 涡运动理论[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1994.

(何静芳 编辑)

the method described above is highly effective in conducting the fuzzy quantitative treatment of fault sample modes of a regenerative heating device, dramatically improving the convergence of a neural network training and facilitating the fault diagnosis of the regenerative heating system. **Key words:** steam turbine unit, regenerative heating system, fault diagnosis, fuzzy treatment, radial base function network

电站锅炉蛇形管焊接接头加速寿命试验规范的研究 = **A Study of the Accelerated-life Test Specification for the Coil-tube Welded Joints of a Utility Boiler** [刊, 汉] / ZHAO Ji-jun, ZOU Jing-xiang (College of Astronautics under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), XU Shi-bin (Harbin Boiler Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 17 ~ 19

A test specification for the accelerated-life test of utility boiler coil-tube welded joints was developed for the study of the latter's reliability. On this basis high-temperature internal-pressure explosion endurance tests were conducted with regard to a huge amount of resistance welded 15CrMo and 12Cr1MoV steel tube joints. An analytical processing of the test results has demonstrated the consistency of the failure mechanism of the welded joints under various accelerated-life test conditions, testifying at the same time to the validity of the test specification. **Key words:** accelerated-life test, test specification, welded joint, reliability

大型电站锅炉燃烧器区向火侧剪切大涡的尺度及其旋转速度 = **Scale and Rotating Velocity of a Big Shear Vortex at the Fire-facing Side of a Burner Region in a Large-sized Utility Boiler** [刊, 汉] / DIAO Yong-fa, HE Bo-shu (National Key Laboratory of Coal Clean Combustion under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), XU Jin-yuan (Energy and Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 20 ~ 22, 26

Measurements were taken of the vorticity field in the burner region of a HG-2008-YM2 type tangentially fired pulverized-coal boiler, which is considered as having a universal significance. The above measurements were conducted by employing a IFA300 constant-temperature hot wire anemometer with the use for the first time of a six-sensor hot-wire probe and its locating coordinate system. The big shear vortex at the fire-facing side of the tangentially fired burner jets is described by the use of a Rankine composite vortex. The scale and rotating velocity of the big shear vortex has been determined by a cold model test. The vortex core radius of the big shear is 25mm, and the rotating angular velocity of an in-furnace fluid tiny ball rotating as a rigid body, -1.56×10^5 r/min. The influence of the big shear vortex on pulverized-coal ignition and the NO_x nascent state in the relevant structure of the burner zone vortex was also analyzed. **Key words:** tangentially fired furnace, burner zone, big shear vortex, scale, rotating velocity, six-sensor hot-wire probe

超临界直流锅炉长期动态特性的建模与仿真 = **Modeling and Simulation of the Long-term Dynamic Characteristics of a Supercritical Once-through Boiler** [刊, 汉] / LI Yun-ze, YANG Xian-yong (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 23 ~ 26

The long-term dynamic characteristics of a supercritical once-through boiler play a key role in the simulation and design of the control system of a supercritical once-through boiler and turbogenerator unit. To conduct a rapid, comprehensive and reliable study of the long-term dynamic characteristics of a supercritical once-through boiler in the process of peak-shaving and load changes, a simplified mathematical model has been set up for the economizer, water wall, superheater and reheater of a supercritical once-through boiler. The model building has been carried out on the basis of a rational mechanism analysis and model simplification and through the use of a state-space method. A group of fairly concise and innovative nonlinear relations for the pressure and flow rate changes at the working medium side have been derived. Finally, with the help of the above-mentioned simplified state-space model and nonlinear relations a simulation study was conducted of the long-term dynamic characteristics of a 600MW supercritical once-through boiler. The simulation results were found to be accurate. The present study has provided a very simplified and convenient mathematical model and method for