第 32 卷第 5 期　　河 北 科 技 大 学 学 报　　Vol. 32, No. 5
2011 年 10 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　Oct. 2011

文章编号：1008-1542(2011)05-0451-04

基于波概念迭代法的缝隙加载 H 形双频天线分析

姬五胜[1,2]，罗全珍[3]，杨　帆[3]，李益敏[3]，张　妍[1]

(1. 兰州城市学院电子信息科学与技术研究所，甘肃兰州　730070；2. 西安电子科技大学电子工程学院，陕西西安　710071；3. 兰州理工大学计算机与通信学院，甘肃兰州　730050)

摘　要：阐述了波概念迭代法的基本原理，描述了同轴探针激励条件下空域散射算子的表达形式，运用 WCIP 方法仿真了缝隙加载 H 形双频天线表面的电场和电流密度分布，分析了该天线的回波损耗，计算结果与参考结论进行了对比，达到了较好的一致性，从而验证该方法的正确性和有效性。

关键词：微带天线；波概念迭代法；傅里叶模式变换；回波损耗

中图分类号：TN828.4　　**文献标志码**：A

Analysis of slot-loaded H-shaped dual-frequency antenna by wave concept iterative procedure

JI Wu-sheng[1,2], LUO Quan-zhen[3], YANG Fan[3], LI Yi-min[3], ZHANG Yan[1]

(1. Institute of Electronic Information Science and Technology, Lanzhou City University, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China; 3. School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

Abstract: In this paper, the principle of the wave concept iterative procedure (WCIP) are described. The spatial diffraction operation is concluded in coaxial probe feed conditions. The transverse electric field and current density distribution of slot-loaded H-shaped dual-frequency antenna surface are simulated by the WCIP. Besides, the return loss of the antenna is analyzed. The numerical results show a good agreement compared with the references, which illustrates the correctness and efficiency of the WCIP.

Key words: microstrip antenna; WCIP; FMT; return loss

微带天线具有剖面薄、体积小、质量轻、便于集成等优点，广泛应用于移动通信、航空航天、卫星通信等领域[1]，而具有双频(或多频)特性的微带天线是近年来的研究热点之一[2]。分析该类天线的常用数值计算方法有矩量法、有限差分法、有限元法等，都存在一定的局限性。如矩量法对内部区域建模问题困难大，有限差分法对无边界问题需要吸收边界条件处理，有限元法对无边界问题需要对边界进行建模[3]，同时这些传统的数值计算方法要消耗大量的内存以及计算时间。针对这一问题，1996 年，AZIZI 等学者提出了波概念迭代法[4]。该方法结合了传输线理论与傅里叶模式变换，通过电路表面的切向电场和电流密度引入波的概念。由于该方法概念新颖、建模简便、计算快捷，得到了快速发展，成功应用于微带天线[5-6]、滤波器[7]等平面微带电路的研究中。

笔者在波概念迭代法的理论基础上，描述了微带结构在同轴探针激励下空域散射算子的表达形式，运用该方法对 U 形缝隙加载 H 形双频天线进行分析，通过仿真电路表面的场分布及求解回波损耗验证了该方

收稿日期：2011-02-22；修回日期：2011-07-03；责任编辑：陈书欣
基金项目：甘肃省自然科学基金资助项目(3ZS061-A25-058)；甘肃省高校研究生导师科研计划项目(0811-05)
作者简介：姬五胜(1968-)，男，甘肃秦安人，教授，博士，主要从事微波电路三维集成、计算微波等方面的研究。

法的正确性，并与矩量法在计算复杂度方面比较论证了该方法的有效性，从而扩展了该方法的应用范围。

1 原理阐述

波概念迭代法通过电路分界面的切向电场和电流密度引入横向电磁波（图1），波概念定义如下：

$$A_i=\frac{1}{2\sqrt{Z_{0i}}}(E_i+Z_{0i}J_i)，\tag{1}$$

$$B_i=\frac{1}{2\sqrt{Z_{0i}}}(E_i-Z_{0i}J_i)。\tag{2}$$

其中：A_i 是电路交界面的入射波；B_i 是反射波，i（$i=1$，2）表示界面两侧的不同介质区域；Z_{0i} 是介质的特征阻抗，其值为 $Z_{0i}=\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0\varepsilon_{ri}}$。

1.1 空域散射算子

将微带结构的分界面剖分成小矩形网格，则分界面被划分为金属区域、介质区域、源区域以及其他区域，根据各个区域的边界条件得到相应的散射矩阵，从而得到空域散射算子。空域散射算子表征空域入射波和空域反射波之间的关系：

$$B_i=[S]A_i+B_0。\tag{3}$$

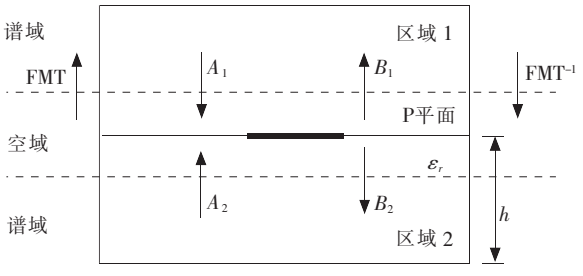


图1 波概念的定义

Fig. 1 Definition of wave concept

对于金属区域，其边界条件：$E_1=E_2=0$，介质区域的边界条件：$J_1+J_2=0$，$E_1=E_2\neq0$。将该边界条件分别代入式(1)、式(2)，得到金属和介质区域空域入射波与空域反射波之间的关系：

$$\begin{bmatrix}B_1\\B_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-H_m-\dfrac{1-N^2}{1+N^2}H_d & \dfrac{2N}{1+N^2}H_d\\ \dfrac{2N}{1+N^2}H_d & -H_m-\dfrac{1-N^2}{1+N^2}H_d\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A_1\\A_2\end{bmatrix}。\tag{4}$$

其中：$N=\sqrt{\dfrac{Z_{01}}{Z_{02}}}$，$H_i=\begin{cases}1，\text{在 } i \text{ 区域内}\quad i=\text{金属，介质；}\\0，\text{在其他区域。}\end{cases}$

对于源区域，同轴探针经过接地板与分界面的贴片相连，天线由馈电探针与底板之间的电压所激励，其空域入射波与空域反射波之间的关系为

$$\begin{bmatrix}B_1\\B_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-1 & 0\\0 & JJ^t-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A_1\\A_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\\dfrac{1}{2}\sqrt{Z_{02}}J_0\mathrm{e}^{\mathrm{j}\vartheta}J\end{bmatrix}。\tag{5}$$

其中：$J=\dfrac{1}{\sqrt{8}}(1,1,-1,1,-1,-1,1,-1)^{\mathrm{T}}_{(x,y)}$，$\theta=k_0h$，$k_0=\dfrac{2\pi}{\lambda_0}$。

1.2 谱域反射算子

谱域波在上、下区域发生反射。谱域入射波和谱域反射波之间的关系为

$$[A_i^\alpha]=[\Gamma_i^\alpha][B_i^\alpha]。\tag{6}$$

谱域反射算子由下式求得：

$$\Gamma_i^\alpha=\frac{1-Z_{0i}Y_{mn,i}^\alpha\coth(\gamma_{mn,i}h_i)}{1+Z_{0i}Y_{mn,i}^\alpha\coth(\gamma_{mn,i}h_i)}。\tag{7}$$

其中：$Y_{mn,i}^{\mathrm{TE}}=\dfrac{\gamma_{mn,i}}{\mathrm{j}\omega\mu_0}$，$Y_{mn,i}^{\mathrm{TM}}=\dfrac{\mathrm{j}\omega\varepsilon_0\varepsilon_{ri}}{\gamma_{mn,i}}$，$\gamma_{mn,i}^2=(\dfrac{m\pi}{a})^2+(\dfrac{n\pi}{b})^2-k_0^2\varepsilon_{ri}$，式中 $Y_{mn,i}^\alpha$ 和 $\gamma_{mn,i}$ 分别是介质 i 中的导纳和传播常数，k_0 是自由空间波数，α 代表模式 TE 或 TM。

1.3 傅里叶模式变换

空域波和谱域波之间的转换采用傅里叶模式变换，其变换如下：

$$\begin{bmatrix}B_{mn}^{\mathrm{TE}}\\B_{mn}^{\mathrm{TM}}\end{bmatrix}=K_{mn}\begin{bmatrix}-m/a & n/b\\n/b & m/a\end{bmatrix}\mathrm{FFT}\begin{bmatrix}B_x\\B_y\end{bmatrix}，\tag{8}$$

$$\begin{bmatrix}A_x\\A_y\end{bmatrix}=\mathrm{IFFT}\left\{\left[K_{mn}\begin{bmatrix}-m/a & n/b\\ n/b & m/a\end{bmatrix}\right]^{-1}\begin{bmatrix}A_{mn}^{\mathrm{TE}}\\A_{mn}^{\mathrm{TM}}\end{bmatrix}\right\}。\tag{9}$$

其中：$K_{mn}=\sqrt{\dfrac{ab}{2\sigma_{mn}}}\dfrac{1}{\sqrt{[m/a]^2+[n/b]^2}}$，$\sigma_{mn}=\begin{cases}2, & mn\neq 0\\ 1, & mn=0\end{cases}$，$a$，$b$ 代表分界面的尺寸。

1.4　迭代过程

首先在电路的源区域处给定初始激励，则在电路上、下区域产生空域反射波 $B_i(i=1,2)$；此时，通过傅里叶模式变换将波转换至谱域，得到谱域入射波 $B_{mn,i}^{a}$；通过谱域反射算子进一步得到谱域反射波 $A_{mn,i}^{a}$；反射后的谱域波经过傅里叶模式反变换得到空域入射波 A_i；最后经过空域散射算子再次得到新的空域反射波，完成一次迭代过程。如此反复循环，经过第 k 次迭代后参数收敛，然后根据第 k 次的空域波得到切向电场和电流密度，进一步计算得到所需的参数。

2　数值结果

图 2 是一种 U 形缝隙加载 H 形双频天线[2]，该天线由同轴探针馈电，H 形结构降低了天线的谐振频率，缩小了天线尺寸，U 形缝隙实现了双频效果。其双频效果主要是利用 TM_{10} 和 TM_{30} 谐振模式。天线参数如表 1 所示。

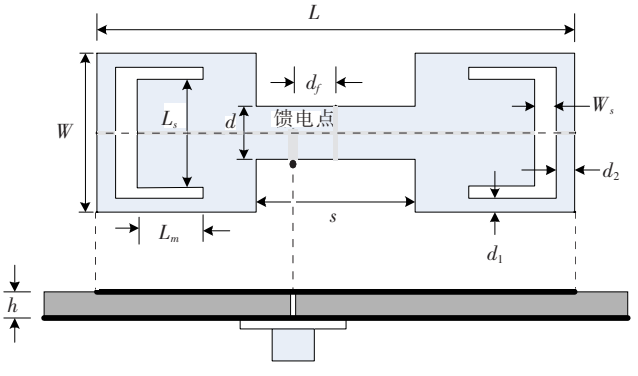


图 2　缝隙加载 H 形天线

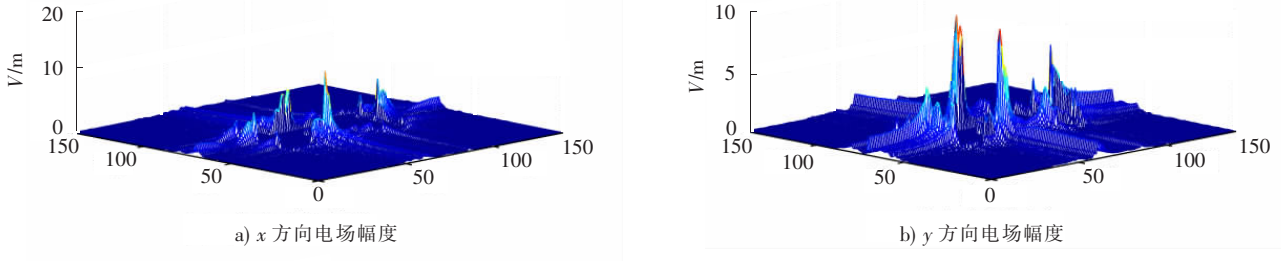
Fig. 2　Slot-loaded H-shaped antenna

表 1　缝隙加载 H 形天线参数

Tab. 1　Parameter of slot-loaded H-shaped antenna

参　数		参　数	
ε_r	2.8	d_1/mm	1
h/mm	2	d_2/mm	1
L/mm	70	d_f/mm	6.5
W/mm	42	W_s/mm	1
d/mm	21	L_s/mm	38
s/mm	34	L_m/mm	8

用 Matlab 编写基于 WCIP 的程序，将缝隙加载 H 形天线的不连续性表面剖分为 140×140 个的网格，经过 500 步迭代运算，得到缝隙加载 H 形天线表面的电场分布如图 3 所示，电流密度分布如图 4 所示。可以看出，天线表面的切向电场在金属区域的值为 0，电流密度在介质区域的值为 0，满足电路表面的边界条件。图 5 显示了 WCIP 方法计算的天线回波损耗与文献参考结论的对比情况，图 5 中 WCIP 方法计算得到的谐振频率分别为 930 MHz 和 1 800 MHz，谐振时幅值为－21.8 dB 和－18.3 dB，参考谐振频率为 929 MHz 和1 790 MHz，谐振时幅值为－20 dB 和－16.3 dB，结果表明 WCIP 计算的回波损耗除了曲线走势略有不足外，谐振频率及幅值均吻合很好，从而证明了该方法的正确性。



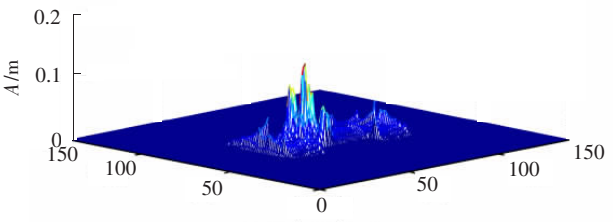
a) x 方向电场幅度　　b) y 方向电场幅度

图 3　电场分布

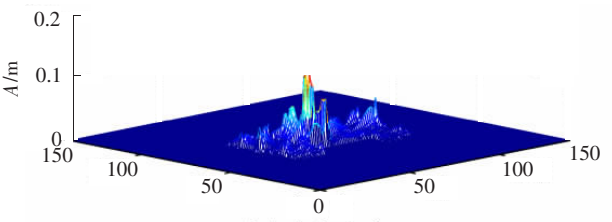
Fig. 3　Electric field distribution

下面对 WCIP 方法的有效性进行分析，已知 WCIP 方法的计算复杂度为 $q(4P+12P\log_2 P)$，矩量法的计算复杂度：$(KP)^3/3$。在本例中，电路分界面金属区域占整个表面的比例 $K=11\%$，网格剖分数 $P=$

19 600，迭代次数 $q=500$，图 7 显示了波概念迭代法与矩量法的计算复杂度对比，可以看出，波概念迭代法相对于矩量法在分析该电路时有较高的计算效率。



a) x 方向电流幅度



b) y 方向电流幅度

图 4 电流密度分布

Fig. 4 Current density distribution

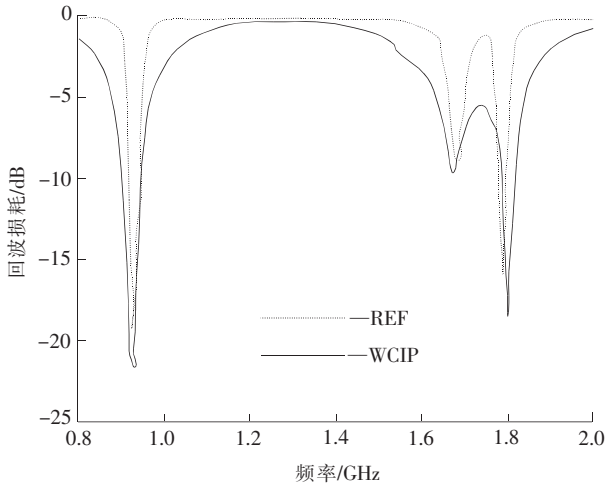


图 5 WCIP 计算的回波损耗与参考结论对比

Fig. 5 Comparison of return loss between WCIP and reference data

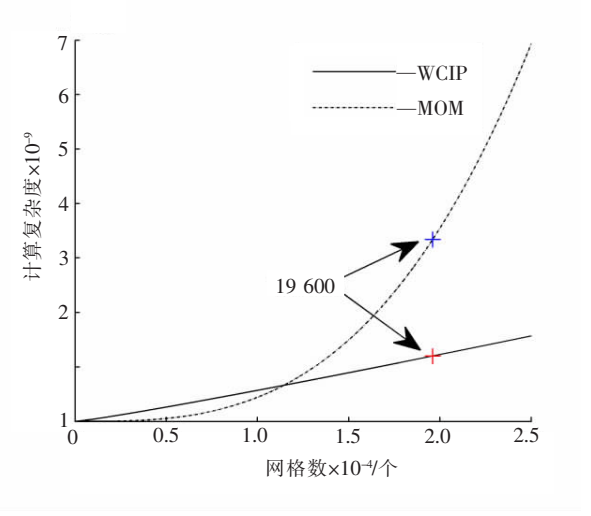


图 6 矩量法与波概念迭代法的计算复杂度比较

Fig. 6 Computational complexity comparison of MOM and WCIP

波概念迭代法在分析微带天线时，只对天线的不连续性表面剖分网格，同轴探针激励处的区域定义为源区域，贴片所在区域为金属区域，其他为介质区域，根据各自区域的边界条件建立空域散射算子，从而表征空域波之间的关系；电路表面之外的区域利用传输线理论等效，电路模型建立简单；利用空域波在分界面的散射和谱域波在上、下区域的反射关系展开迭代运算，避免了基函数的选取和大矩阵的求逆，简化了运算；空域和谱域波之间的交互采用傅里叶模式变换实现，提高了计算速度。本例中，在 CPU 主频为 2 GHz，内存为 2 GB 的计算条件下，采用 Matlab 编程对该电路的仿真时间为 7′26″。可以看出波概念迭代法特别适合于分析具有分层介质的微波平面电路。

3 小 结

运用了波概念迭代法对缝隙加载 H 形双频天线进行了研究，仿真了天线表面的电场和电流密度分布，所得结果符合天线的表面边界条件；同时还分析了微带天线的回波损耗，计算结果与参考结论有较好的一致性。结果表明波概念迭代法具有概念清晰、处理简便、计算效率高的优点，由于该方法基于分界面通过电场和电流密度引入入射波和反射波，特别适合微波平面电路研究。

参考文献：

[1] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，1991.

[2] 戚冬生，黎滨洪，刘海涛，等. 缝隙加载 H 形双频天线[J]. 电波科学学报(Chinese Journal of Radio Science)，2004，19(1)：95-98.

(下转第 517 页)

参考文献:

[1] 周　琪,赵由才. 染料对人体健康和生态环境的危害[J]. 环境与健康杂志(Journal of Environment and Health),2005,22(3):229-231.

[2] 钟金汤. 偶氮染料及其代谢产物的化学结构与毒性关系的回顾与前瞻[J]. 环境与职业医学(Journal of Environmental & Occupational Medicine),2004,21(1):58-62.

[3] 丁忠浩. 有机废水处理技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2002. 317-338.

[4] 李家珍. 染料、染色工业废水处理[M]. 北京:化学工业出版社,1997. 1-7,342-348.

[5] 钱　易,汤鸿霄,文湘华,等. 水体颗粒物和难降解有机物的特性与控制技术原理(下卷):难降解有机物[M]. 北京:中国环境出版社,2000. 1-21.

[6] 徐文东,文湘华. 微生物在含染料废水处理中的应用[J]. 环境污染治理技术与设备(Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control),2000,1(2):9-16.

[7] 王　惠,郑小伟,王宾香. 真菌对染料的脱色研究进展[J]. 应用与环境微生物学报(Chinese Journal of Applied & Environmental Biology),2009,15(1):147-151.

[8] JEFFREY K G,MICHAEL H G. Decolorization fo several polymericdyes by the lignin-degrading basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*[J]. Applied and Environmental Microbiology,1983,45:1 741-1 747.

[9] LIBRA J A,BORCHERT M,BANIT S. Competition strategies for thedecolorization of a textile-reactive dye with the white-rot fungi trametes versicolor under non-sterile conditions[J]. Biotechnol Bioeng,2003,82(6):736-744.

[10] 李向飞,文湘华,林　刚. 白腐真菌 F1 对染料脱色特性的研究[J]. 环境污染治理技术与设备(Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control),2002,3(7):1-4.

[11] 荚　荣,谢　萍,秦　易. 固定化白腐真菌对多种染料脱色的研究[J]. 菌物系统(Mycosystema),2003,22(2):308-313.

[12] 苏　丹,李培军,许华夏. 均匀设计在固定化毛霉载体配方优化中的应用[J]. 农业环境科学学报(Journal of Agro-Environment Science),2006,25(6):1 667-1 670.

[13] 姜庆宏,崔岱宗,赵　敏,等. 一株产漆酶真菌新月弯孢霉 JQH-100 在染料脱色中的应用[J]. 菌物学报(Mycosystema),2010,29(5):678-682.

[14] 乔治杰,马　斌,陈琼华,等. 灵芝漆酶催化阳离子红 2GL 脱色的研究[J]. 菌物学报(Mycosystema),2010,29(2):261-266.

[15] 张慕明,余志晟,张洪勋,等. 东方伊萨酵母 YP-1 对染料活性艳红 K-2BP 的脱色[J]. 中国环境科学(China Environmental Science),2009,29(12):1 266-1 271.

[16] 罗　晓,王　婷. 固定化真菌处理土霉素废水的研究[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology),2011,32(1):98-102.

(上接第 454 页)

[3] 倪光正,杨仕友,钱秀英. 工程电磁场数值计算[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[4] AZIZI M,BOUSSOUIS M,AUBERT H,et al. A three-dimensional analysis of planar discontinuities by an iterative method[J]. Microwave and Optical Technology Letters,1996,13(6):372-376.

[5] JI W,LUO Q,YANG F. Analysis of H-shaped patch antenna by wave concept iterative procedure (WCIP)[A]. ICMMT 2010 Proceedings[C]. Chengdu:[s. n.],2010. 797-800.

[6] ZAIRI H,GHARSALLAH A,GHARBI A,et al. Modelisation of probe feed excitation using iterative method[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal,2004,19 (3):198-205.

[7] GHARSALLAH A,GHARBI A,DESCLOS L,et al. Analysis of interdigital capacitor and quasi-lumped miniaturized filters using iterative method[J]. International Journal of Numerical Modelling,2002,15(2):169-179.

(上接第 506 页)

[5] LIU T C H,FAHAD M K,DAVIES J M. Experimental investigation of behavior of axially restrained steel beams in fire[J]. J of Constructional Steel Research,2002,58:1 211-1 230.

[6] ALLAM A M,BURGESS I W,PLANK R J,et al. Performance-based simplified model for a steel beam at large deflection in fire[A]. Proc 4th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods[C]. Melbourne:[s. n.],2002.

[7] 王银志. 考虑结构整体性的组合梁抗火性能研究[D]. 上海:同济大学,2008.

[8] 郭士雄. 约束钢梁在升温段和降温段的反应及梁柱节点的破坏研究[D]. 上海:同济大学,2006.

[9] 李侥婷. 平端板连接半刚性梁柱组合节点的抗火性能研究[D]. 上海:同济大学,2010.

[10] 李国强,李侥婷,楼国彪. 考虑梁轴力影响的平端板连接组合节点抗火性能试验[J]. 建筑结构学报(Journal of Building Structures),2011,32(4):125-133.

[11] 李　卫,过镇海. 高温下砼的强度和变形性能试验研究[J]. 建筑结构学报(Journal of Building Structures),1993,14(1):8-16.

[12] 楼国彪. 钢结构高强度螺栓外伸式端板连接抗火性能研究[D]. 上海:同济大学,2005.

[13] ENV 1993-1-2(Eurocode 3),Design of Steel Structures(Part 1. 2):Structural Fire Design[S].