

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.02.007

基于改进的 LMS TOFD 图像直通波抑制研究^{*}

林乃昌

(泸州职业技术学院 机械工程学院, 四川 泸州 646000)

摘要:针对 TOFD 背景杂波问题,提出了一种改进的变步长的 LMS 超声 TOFD 图像直通波抑制方法。首先,分析了步长因子与稳态误差的关系,得出了最优变量及变步长迭代公式;其次,为了解决算法没有完全收敛而步长因子已经减小到最小值的问题,引入了记忆因子概念;最后,将算法应用于非近表面缺陷及近表面缺陷图像,研究了不同参数下误差信号与步长因子的关系,比较了其滤波及抑制效果,并分别讨论了各参数的影响。实验结果表明:当 α 取值为 0.02 时, β 取值为 0.8 时,对于直通波的抑制效果最佳,该方法能够有效实现时基抖动较大时直通波的稳健去除。

关键词:超声衍射时差;无损检测;最小均方误差算法;记忆因子;变步长

中图分类号:TH878

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)02-0150-05

Lateral wave suppression of TOFD image based on improvement LMS

LIN Nai-chang

(School of Mechanical Engineering, Luzhou Vocational and Technical College, Luzhou 646000, China)

Abstract: Aiming at background clutter of TOFD, the modified variable step size LMS was proposed for suppressing lateral wave of ultrasonic TOFD images. First, step factor of the relationship with the steady-state error was analyzed for obtaining the optimal variable and variable step iterative formula. Secondly, the memory factor concept was introduced for solving the problems of algorithm does not fully converge step factor has been reduced to a minimum. Finally, the algorithm was applied to non-near-surface and near surface defects defect images, the relationship between error signal and step size factor under different parameters was studied, filtering effect was compared, and the influence of each parameter was discussed. The results indicate that the suppression effect of lateral wave is the best when the value of α is 0.02 and the value of β is 0.8. This method can effectively removal the timing jitter lateral waves.

Key words: time of flight diffraction (TOFD); non-destructive testing; least mean square(LMS); the memory factor; variable step

0 引 言

因超声衍射时差 (TOFD) 检测技术具体原理简单、操作方便、检测结果易存储、特别适合于大厚度结构焊缝的检测等特点,正越来越受到人们的青睐,尤其是该方法对裂纹类缺陷的检出效果比较明显,是其他检测方法所无法比拟的^[1-3]。

然而,在超声 TOFD 法检测缺陷图像中,只有一部分数据代表缺陷信息,其他数据均作为图像的背景。

作为非检测目标的背景杂波给目标提取等后续处理增加了冗余数据,干扰了缺陷信号的检出。而去除背景杂波对于提高缺陷的检出率具有重要意义。而直通波作为图像中连续分布的杂波之一,在时间上具有一定长度的拖尾,易与近表面缺陷信号发生混叠。由于直通波的存在而形成的近表面盲区,影响了近表面缺陷的有效检出和评价。

2000 年,张锐等人^[4]提出了超声 TOFD 和脉冲回波相结合的检测方法,该方法有效地弥补了超声

收稿日期:2018-12-14

基金项目:四川省科技计划项目(2019YF90064);泸州市智能制造重点实验室基金资助项目(2020IM01)

作者简介:林乃昌(1982-),男,福建长汀人,博士,高级工程师,主要从事无损检测及图像处理方面的研究。E-mail:nehlin@126.com

TOFD 法对近表面缺陷不敏感的缺点,但是同时增加了对检测系统的硬件要求;2004 年,IDO N 等人^[5]采用超声 TOFD 纵波二次反射的方法对近表面缺陷进行了检测,该方法具有较高的检测灵敏度;但由于接收信号复杂,该方法不便于解释;2007 年,CHI D Z 等人^[6]提出了基于图像能量分布的直通波抑制方法,该方法具有较高的检测灵敏度,且算法简单;但是该方法对被检测试件表面的表面粗糙度有较高的要求,同时要求检测系统稳定,时基抖动小;2010 年,陈伟等人^[7]提出了基于峰值检测算法的直通波拉直技术,并在直通波拉直的基础上引入了基于 A 扫描线能量分布算法的直通波消除技术,实验结果显示,该技术有效地提高了对近表面缺陷的识别能力,能够提高定位精度。但该方法对近表面缺陷信号与背景信号能量分布相当的情况分辨率较差;2018 年,汪俊等人^[8]提出了一种基于自适应滤波的近表面缺陷信号处理方法,采用 Comsol 软件建立了 TOFD 近表面缺陷的二维有限元模型,根据超声波传播过程及 A 扫描信号分析了近表面盲区产生的原因,通过 RLS 自适应滤波算法对信号进行了处理,能较好将隐藏在直通波下的缺陷信号提取出来。

为了扩大超声 TOFD 法的检测范围,本文通过研究直通波抑制方法,提取混叠的近表面缺陷回波。相比于直接计算滤波器的最佳权值,基于最小均方误差作为准则的最小均方误差算法(LMS)^[9]大大简化了计算的复杂程度。然而,该算法的好坏受到参数 α 、 β 、 M 的影响。

因此,针对 TOFD 图像直通波的特点,笔者采用该算法应用于 TOFD 的杂波抑制,并引入记忆因子概念,重点讨论各参数对 TOFD 杂波抑制的影响。

1 基于改进的最小均方误差算法

最小均方误差算法(LMS)是自适应滤波中估计梯度的方法,它的一个显著特点是其简单性,即不需要计算有关的相关函数,也不需要矩阵求逆运算。LMS 自适应滤波器主要有两部分:

(1)横向滤波器。用于完成滤波过程;

(2)自适应控制算法。对滤波器抽头权值进行自适应控制。

在滤波过程中,期望信号 $d(n)$ 与输入向量 $u(n)$ 一道参与处理。在这种情况下,横向滤波器产生一个输出 $y(n)$ 作为期望信号 $d(n)$ 的估计。因此,可把估计误

差 $e(n)$ 定义为期望响应 $d(n)$ 与实际滤波器输出 $y(n)$ 之差,估计误差 $e(n)$ 与输入向量 $u(n)$ 都被加到自适应控制部分。LMS 算法流程如下:

参数:

M = 抽头数(即滤波器长度)

μ = 步长因子

$0 < \mu < 1(\lambda_{\max})$, 其中 $\lambda_{\max}$ 是输入 $u(n)$ 的相关矩阵的最大特征值。

初始化:

$\omega(0) = 0$

数据:

给定的: $u(n) = n$ 时刻 $M \times 1$ 输入向量 =

$[u(n), u(n-1), \dots, u(n-M+1)]^T$

$d(n) = n$ 时刻的期望响应

要计算的: $\omega(n+1) = n+1$ 时刻抽头权向量估计

计算:对于 $n = 0, 1, 2, \dots$, 计算

$$y(n) = \omega^H(n)u(n)$$

$$e(n) = d(n) - y(n)$$

$$\omega(n+1) = \omega(n) + 2\mu u(n)e(n)$$

因此,本文提出一种新的变步长算法用于 TOFD 图像去除直通波,该方法是在传统算法[10]的基础上的一种改进的变步长 LMS 算法。先引入变量 m , 则固定步长迭代公式为:

$$\mu(n) = \beta \left(1 - \frac{3}{2 + \exp(\alpha |e(n)|^m)} \right) \quad (1)$$

式中: α —控制函数形状的常数; β —控制函数取值范围的常数。

步长因子与稳态误差关系图如图 1 所示。

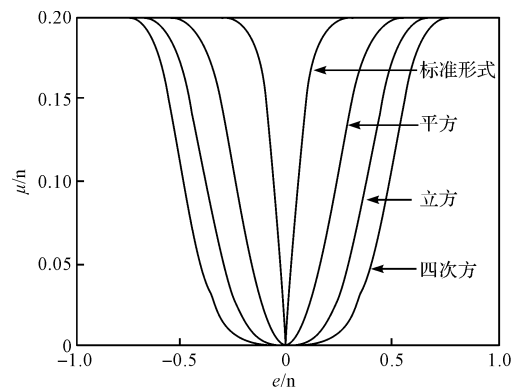


图1 步长与误差关系图

随机选取参数 $\alpha = 20, \beta = 0.2, m = 1, 2, 3, 4$ 所得的关系图。当 $m = 1$ 时,新步长函数与 Sigmoid 函数具有相似的形状。当 $m = 3$ 时,曲线底部变化趋势比 $m = 1, 2$ 时要缓慢些。当稳态误差趋近于 0 时,步长因子变

化不是很大。当然,随着 m 的增大,新的步长函数的曲线会变的更加缓慢,会造成系统的稳态失调。综合权衡收敛速度和稳态误差,经过计算及分析,选取为理想值。因此,改进的变步长迭代公式为:

$$\mu(n) = \beta \left(1 - \frac{3}{2 + \exp(\alpha |e(n)|^3)} \right) \quad (2)$$

LMS 在迭代过程中,稳态误差在收敛阶段相关性比较小;当时,调整步长会导致步长变小速度加快,可能出现算法还没有完全收敛而步长因子已经减小到最小值的问题,因此,此处引入记忆因子的概念^[11],即:

$$\lambda(i) = \exp(-2i), (i = 0, 1, \dots, n-1) \quad (3)$$

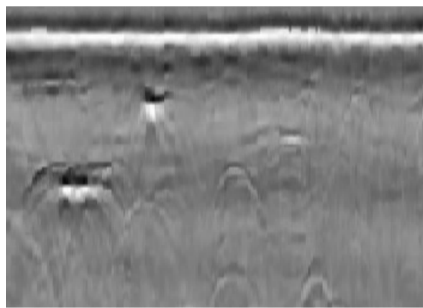
$\mu(n) =$

$$\left[-\alpha (\exp(-|e(n)|^3) / \beta + \sum_{i=0}^{n-1} \lambda(i) e^2(n-i)) \right] + \alpha \quad (4)$$

记忆因子是对过去迭代得到的稳态误差的加权因子。显然,越新的信息对当前步长因子的调整影响越大,使用记忆因子与前误差平方的乘积累加之和与稳态误差的立方共同作用,来调整步长因子的更新,可以保证步长不会在算法还没收敛的情况下就减小到最小值。

本文通过对图像提取各列信号(即 A 扫信号),并进行 LMS 变步长自适应滤波处理、迭代和调整,最终获取杂波抑制图像。

直通波抑制流程如图 2 所示。



(a) 具有多个缺陷的原始图像

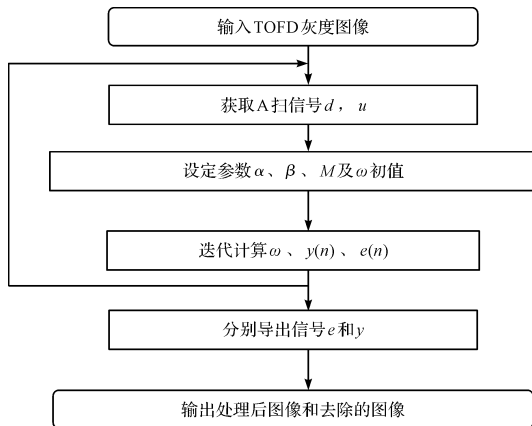


图 2 基于 LMS 变步长算法的直通波抑制流程图

2 实验结果与分析

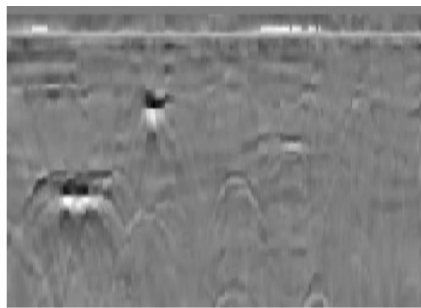
2.1 实验参数

为了验证改进的 LMS 算法在 TOFD 直通波抑制效果,笔者分别将该算法应用于非近表面缺陷及近表面缺陷,比较其滤波及抑制效果。本文选取压力容器常用材质 20 号钢,采用偏置 D 扫描方式,扫描方向平行于焊缝方向;D 扫描图像利用 CTS-1008 型数字超声探伤仪获取,系统采样频率为 160 MHz;所用探头为一对 TOFD 探头,晶片直径为 6 mm,中心频率为 5 MHz;声速在工件中的折射角为 60°;探头与工件之间采用机油耦合。

2.2 实验结果

(1) 非近表面缺陷改进的变步长 LMS 自适应滤波结果。

滤波结果如图 3 所示。



(b) $\beta=0.375/\lambda_{\max}$, $M=7$, $\alpha=0.02$ 时处理图像

图 3 非近表面缺陷变步长 LMS 滤波

图 3 结果表明:在不损害图像缺陷信息的情况,改进的变步长 LMS 算法很好地去除了直通波,提取到了图像中的各个缺陷;

(2) 近表面缺陷改进的 LMS 自适应滤波结果。

滤波结果如图 4 所示。

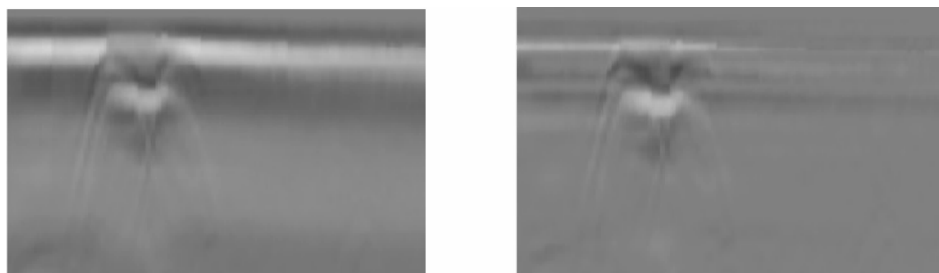
图 4 结果表明:在不损害图像缺陷信息的情况,改进的变步长 LMS 算法也很好地去除了直通波,提取到了图像中的近表面缺陷;

(3) 参数选取及讨论。改进的变步长 LMS 算法主

要受参数 α 、 β 、 M 及 ω 初值影响。在 TOFD 图像处理中, ω 初值为零向量, M 取值为 5 ~ 10, 因此, TOFD 直通波抑制处理主要受参数 α 、 β 的影响。

α 、 β 的选取遵循兼顾收敛速度及收敛精度的原则为:在 $e(n)$ 较大时,对应的步长因子应该较大,以保证算法有较快的收敛速度;在 $e(n)$ 较小时,对应的步长因子应该较小,以保证算法有较高的收敛精度;

固定 β , α 分别取值 0.000 2、0.002、0.02、0.2、2、20 时的滤波效果图像如图 5 所示。



(a) 具有近表面缺陷的原始图像

(b) $\beta=0.8/\lambda_{\max}$, $M=7$, $\alpha=0.02$ 时处理图像

图4 近表面缺陷变步长 LMS 滤波

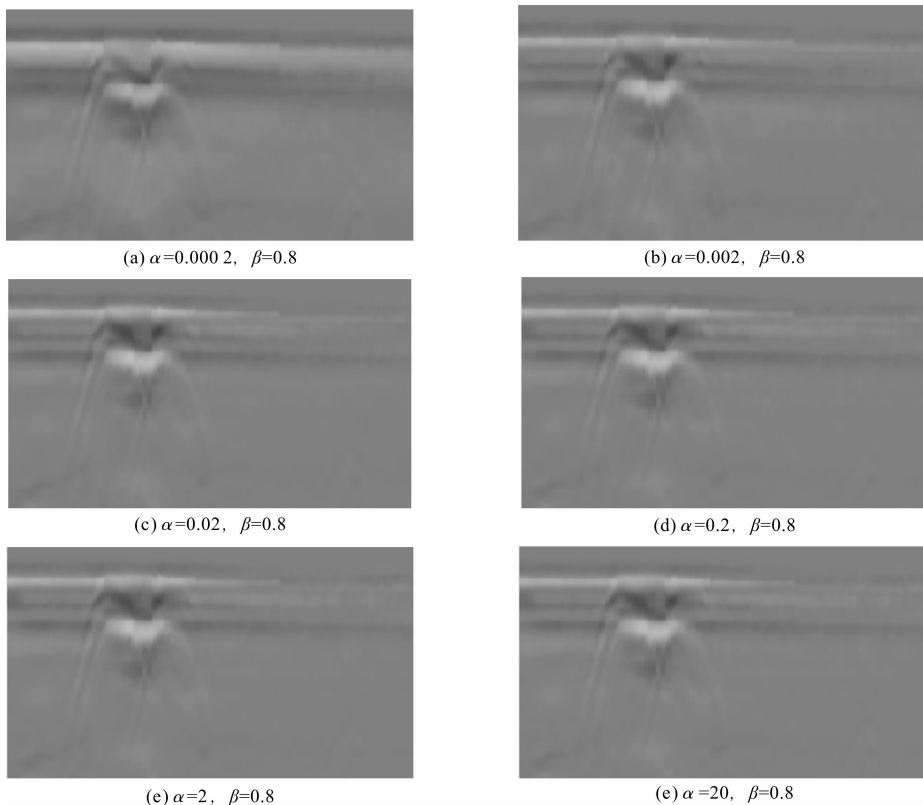
(a) $\alpha=0.0002$, $\beta=0.8$ (b) $\alpha=0.002$, $\beta=0.8$ (c) $\alpha=0.02$, $\beta=0.8$ (d) $\alpha=0.2$, $\beta=0.8$ (e) $\alpha=2$, $\beta=0.8$ (f) $\alpha=20$, $\beta=0.8$ 图5 α 取值不同的滤波效果

图5结果表明:随着 α 的增大,图像的直通波抑制效果也逐渐变好;但是当 α 大于或等于0.02时,图像的改变极其微弱,可以忽略不计。

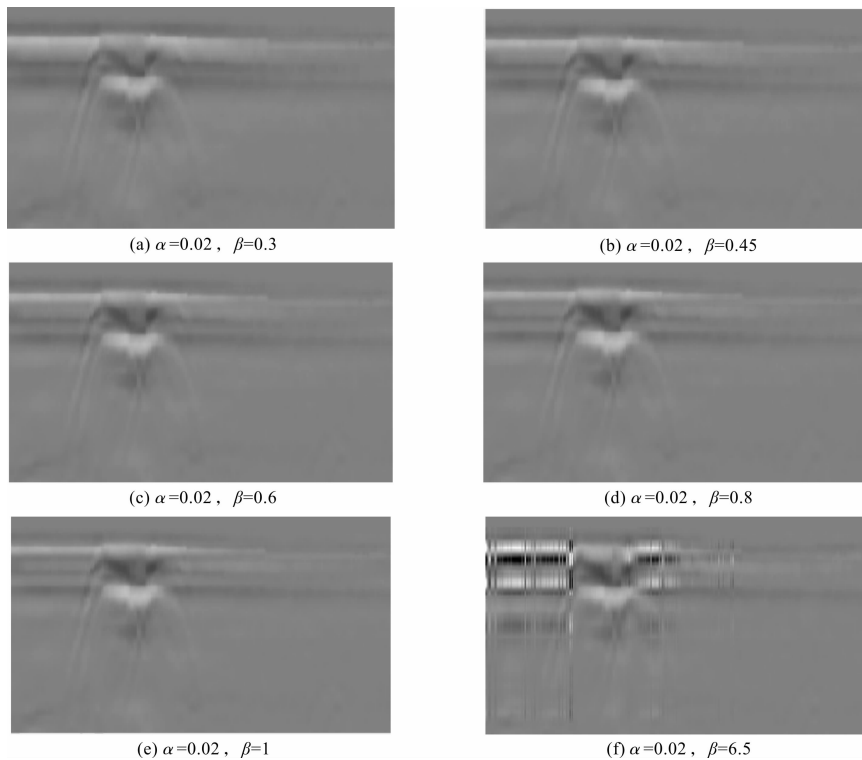
通过比较 β 取值不同误差信号与步长因子的关系,当选择较小的 α 时,算法的收敛速度慢,即使在 $e(n)$ 较大时,对应的步长因子也较小,滤波的效果比较差;当选择较大的 α 时,即使在 $e(n)$ 较小时,对应的步长因子都很大,会造成算法收敛精度降低。通过比较 β 取值不同误差信号与步长因子的关系,当 β 取值为0.8时, α 取值为0.02时,算法不但有足够的收敛速度,也有较高的收敛精度。

固定 α , β 分别取值 $0.3/\lambda_{\max}$ 、 $0.45/\lambda_{\max}$ 、 $0.6/\lambda_{\max}$ 、 $0.8/\lambda_{\max}$ 、 $1/\lambda_{\max}$ 、 $6.5/\lambda_{\max}$,滤波效果图像如图6所示。

图6结果表明:当 $\beta = 6.5/\lambda_{\max}$ 时,图像的直通波抑制效果极其差,缺陷信息被损坏,这是因为在传统算

法中,收敛条件是 $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$,根据式(2),改进算法的 μ 最大值为 β ,则可知当 β 小于 $1/\lambda_{\max}$ 时,算法一定收敛;而 $\beta \geq 1/\lambda_{\max}$ 时,算法可能不收敛;当 $\beta \geq 6.5$ 时,算法一定不收敛;当 $\beta < 1/\lambda_{\max}$ 时,随着 β 的增大,滤波效果得到提升,但一旦 $0.8/\lambda_{\max} \leq \beta \leq 1/\lambda_{\max}$ 之间时,滤波效果变化不大。

通过比较 β 取值不同误差信号与步长因子的关系,当选择较小的 β 时,在 $e(n)$ 较大时,对应的步长因子也较小,缺乏足够的收敛速度,因此图像的滤波效果不明显;当选择较大的 β 时,在 $e(n)$ 较小时,对应的步长因子较大,使算法的收敛精度不足。通过比较 β 取值不同误差信号与步长因子的关系,得出当 α 取值为0.02时, β 取值为0.8时,算法不但有足够的收敛速度,也有较高的收敛精度。

图 6 β 取值不同的滤波效果

3 结束语

为了扩大超声 TOFD 法的检测范围,针对 TOFD 图像直通波的特点,本文提出了基于改进的变步长 LMS 的 TOFD 图像杂波抑制算法,经过理论分析及实验验证,可以得到如下结论:

通过研究步长因子与稳态误差的关系,得出为理想值;通过固定其他变量,改变其中一个参数的对比实验效果,得出了 α 为 0.02, β 为 0.8 时,对于直通波的抑制效果最佳;引入记忆因子概念使算法完全收敛,该方法能有效抑制图像中的直通波,能较好地区分混叠在直通波的缺陷信号,有效地解决实际工况中耦合不好、时基抖动带来的问题。

参考文献 (References):

- [1] 盛朝阳,刚 铁,迟大钊. 基于分水岭方法的超声 TOFD 检测图像分割[J]. 机械工程学报,2011,47(8):35-40.
- [2] 林乃昌. 基于变型波的超声 TOFD 近表面检测新方法[J]. 机电工程,2013,30(8):967-970.
- [3] 林乃昌,杨晓翔,唐旭晟,等. 基于 Gabor 小波的 TOFD 图像缺陷识别研究[J]. 机电工程,2013,30(12):1450-1454.
- [4] 张 锐,万明习,CAO W W. 超声衍射——回波渡越时间方法焊缝裂纹原位定量无损估计[J]. 机械工程,2000,36(5):54-57.
- [5] IDO N, HATANAKA H, ARAKAWA T, et al. Examination of flaw detection near the surface by the ultrasonic TOFD method[J]. **Key Engineering Materials**, 2004,270(1):378-383.
- [6] CHI D Z, GANG T, GAO S S. Background removal and weld defect detection based on energy distribution of image[J]. **China Welding**,2007,16(1):14-18.
- [7] 陈 伟,詹红庆,杨贵德,等. 基于直通波抑制的超声 TOFD 图像缺陷检测新方法[J]. 无损检测,2010,32(6):402-405.
- [8] 汪 俊,伏喜斌,张金梅,等. 基于自适应滤波的超声 TOFD 的近表面缺陷检测[J]. 机电工程,2018,35(6):618-622.
- [9] WIDROW B, MCCOOL J M, LARMORE M G, et al. Stationary and nonstationary learning characteristics of the LMS adaptive filter[J]. **Proc IEEE**, 1976,64(8):1947-1951.
- [10] 罗小东,贾振红,王 强,等. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法[J]. 电子学报,2006,34(6):1123-1126.
- [11] 李方伟,张 浩. 一种新的变步长自适应滤波算法及其仿真[J]. 重庆邮电大学学报,2009,21(5):591-594.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

林乃昌. 基于改进的 LMS TOFD 图像直通波抑制研究[J]. 机电工程,2020,37(2):150-154.

LIN Nai-chang. Lateral wave suppression of TOFD image based on improvement LMS[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2020,37(2):150-154.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>