

语音系统中的子带自适应回声消除技术*

蔡 宇, 洪 纛, 原建平, 侯朝焕, 郝程鹏
中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘 要: 提出了一种基于 DFT 调制滤波器组的子带自适应滤波回声消除技术, 首先使用分析滤波器组将麦克风输入信号和扬声器输出信号分成若干个频(子)带, 扬声器输出信号作为自适应滤波器的输入信号, 估计回声反馈信号, 并从子带麦克风输入信号中减去。在每个子带中, 采用了归一化最小均方自适应算法, 使得子带均方误差最小。子带自适应滤波器的阶数通常比全带自适应滤波器更小, 而且子带收敛速度会有所提高, 同时计算复杂度也大大减少。在实际语音处理实验中证明, 这种方法是有效的。
关键词: 回声消除; 自适应滤波; 滤波器组; 子带处理
中图分类号: TN912.3 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Subband adaptive echo cancellation technique in speech system

Cai Yu, Hong Ying, Yuan Jianping, Hou Chaohuan, Hao Chengpeng
(State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, we propose a subband adaptive filtering method for echo cancellation based on DFT modulated filter bank. The analysis filter bank is used to divide the microphone input signal, as well as the loudspeaker output signal both into several subbands. The loudspeaker output signal is used as the adaptive filter input signal to estimate the echo signal, which is subtracted from the subband microphone input signal. In each frequency band, the normalized least mean square adaptive algorithm is used to minimize the subband mean square error. The order of the subband adaptive filter usually is smaller than that of the full band one. The subband convergence speed is also improved and the computational complexity is reduced. The actual voice processing experiments demonstrate the effectiveness of the proposed method.
Keywords: echo cancellation; adaptive filtering; filter bank; subband processing

1 引 言

回声现象普遍存在于语音设备中, 它的干扰大大影响了受听者的舒适度。例如在电话会议系统或车载免提通话系统中, 远端的语音通过近端的扬声器放大, 经过房间或车内的声学回声路径传播, 被近端的麦克风拾取, 与近端的语音一同被送往远端的扬声器, 这样, 远端的使用者在通话中既听到了对方的声音, 又听到了自己的声音, 这种干扰会让使用者觉得非常不适应。同样的现象也存

在于助听器这样的小型电声设备中, 由于助听器的麦克风和扬声器距离较近, 被助听器放大处理的声音泄露给麦克风, 产生回声反馈, 甚至引起高强度的震荡(即“啸叫”), 使得使用者难以忍受。因此, 为保证语音质量, 在这些语音通信及处理系统中, 必须采用一项关键技术——回声消除。
应用自适应滤波器来消除回声是一种有效的方法, 也是目前最流行的方法^[1-4]。它通过自适应算法调整滤波器系数来估计实际的回声路径, 模拟回声信号, 并从输入声中减去。然而, 回声路径模型往往具有很长的冲激

收稿日期: 2012-42 Received Date: 2012-42
* 基金项目: 国家自然科学基金 61172166 资助项目

响应,可能达到千个采样点的量级,需要使用高阶自适应滤波器来对路径建模。这会导致自适应滤波算法的计算量很大,而且收敛速度会变慢。解决这个问题方法之一是使用滤波器组将信号分成多个频率的子带,然后在子带内使用自适应滤波器^[5-6]。每个子带内的自适应滤波器通常比全频带的自适应滤波器具有更小的阶数,因而,合理地设计子带自适应滤波器可以减小算法复杂度,同时提高收敛速度。

本文提出的子带自适应滤波使用滤波器组将输入信号分为若干独立的子频带,滤波和自适应算法都在每个子频带中进行,在降采样的条件下,每个子带的自适应滤波器能获得比全频带自适应滤波器更短的冲激响应;采用 LMS 类算法在每个子带中使用不同的收敛因子,可以加快算法的收敛速度,并且减小计算复杂度,这对于自适应滤波器回声消除的应用有重要的意义。

2 DFT 调制滤波器组设计

滤波器组的框架结构如图 1 所示, $h_0(k)$ 为分析原型低通滤波器,占有带宽 $2\pi/K$, K 为通道总数, M 为降采样因子。当 $M = K$ 时,称为临界采样; $M < K$ 时,称为过采样。临界采样的 DFT 调制滤波器组很难获得满意的阻带衰减,所以本文中设计灵活、噪声抑制性能更好的过采样滤波器组。DFT 调制滤波器组各通道滤波器之间有如下关系:

$$h_k(k) = h_0(k) e^{-j2\pi k n / K} \quad (1)$$

$$f_k(k) = f_0(k) e^{-j2\pi k n / K} \quad (2)$$

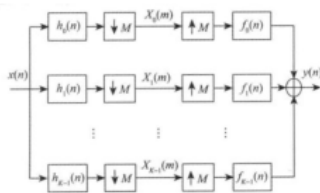


图 1 滤波器组基本结构

Fig. 1 Basic structure of the filter bank

DFT 调制滤波器组也称为复调制滤波器组,是一类重要的、易于实现的滤波器组,它具有设计简单的特点:分析和综合滤波器各只需要一个原型滤波器,其他各通道滤波器可由该原型滤波器调制得到。在原型滤波器设计方面,本文采用了等纹波优化设计法,该方法充分考虑了滤波器阶数、通带截止频率和阻带截止频率之间的约束条件,在设计准则下使得通带范围内误差逼近最小。具体可参看文献 [9]。

DFT 调制滤波器组还具有一个重要的优点就是它具有高效的实现方式:多相结构 (polyphase network, PPN) 和加权叠接相加结构 (weighted overlap and add, WOLA)。这样,它便于实时实现,能用于工程中的各种应用。

3 自适应滤波回声消除原理

自适应回声消除的基本原理如图 2 所示,经过系统处理后送往扬声器的信号 $x(k)$ 同时也送往自适应滤波器,输出信号 $y(k)$ 和麦克风输入信号 $d(k)$ 相比较,得到残差信号 $e(k)$, $e(k)$ 通过某种准则对自适应滤波器系数进行调整,最终使得包含期望信号的某个特定目标函数最小化。由于麦克风输入信号 $d(k)$ 是语音信号和回声信号的叠加,这样,误差信号 $e(k)$ 将是输入语音信号的最佳估计。也就是说,自适应滤波器是对回声路径的建模,其输出信号接近回声信号,并在系统输入端减去这个“制造”出的回声信号,以达到回声消除的目的。其中,可调参数的自适应滤波器可以使 FIR 的,也可以是 IIR 的,虚线表示回声反馈路径。

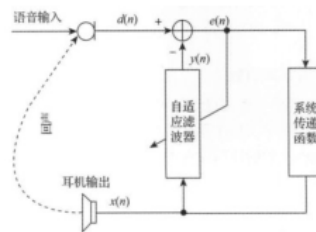


图 2 自适应回声消除原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of adaptive echo cancellation

自适应回声消除实质上是自适应滤波器的一个典型应用——系统辨识问题,需要辨识或建模的未知系统就是回声的反馈路径,自适应滤波器通过调整自身的系数,使其输出逼近未知系统的输出,因此,该自适应滤波器就模拟了回声的反馈路径。

滤波器系数的更新算法是自适应滤波器设计的核心,自适应滤波算法基本可以划分为分为两大类:最小均方算法 (LMS) 和递归最小二乘法 (RLS),其他算法都可以看成是这两类算法的改进和延伸^[10-15]。本文主要研究和使用的是 LMS 算法。

4 子带自适应滤波回声消除

4.1 子带自适应滤波器结构

用于回声消除最常用的子带自适应滤波器结构如图



3所示,输入信号 $x(n)$ 和期望信号 $d(n)$ 同时被分析滤波器组分成 K 个子带,经过滤波后的子带输出信号 $y_k(n)$ 与子带期望信号 $d_k(n)$ 相比较,误差信号 $e_k(n)$ 在每个子带中分析,并自适应调整子带中的滤波器系数向量 $w_k(n)$,最后通过综合滤波器组合成全频带的输出 $e(n)$ 。这种结构也称为开环子带结构,开环子带结构的目标是使子带误差能量最小。

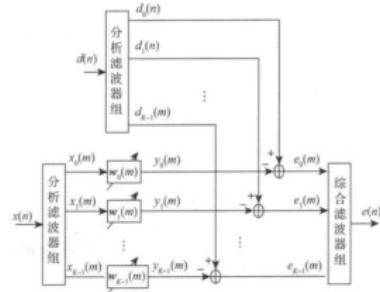


图3 开环子带自适应滤波器
Fig.3 Open-loop subband adaptive filter

4.2 子带回声消除

图4给出了本文设计的开环子带自适应滤波器回声消除结构。图中, $d(n)$ 是麦克风输入信号,它包含近端语音信号 $s(n)$ 和回声反馈信号 $x_r(n)$, $x(n)$ 是扬声器输出信号, $U(k)$ 表示回声反馈传递函数, $G_0(k)$, $G_1(k)$, \dots , $G_{K-1}(k)$ 表示通道处理函数。

下面以第 k 个子带为例分析其工作原理,第 k 个子带的目标函数为:

$$\xi_k(n) = E[e_k^2(n)] = E[(d_k(n) - y_k(n))^2] = E[(d_k(n) + x_{rk}(n) - y_k(n))^2] \quad (6)$$

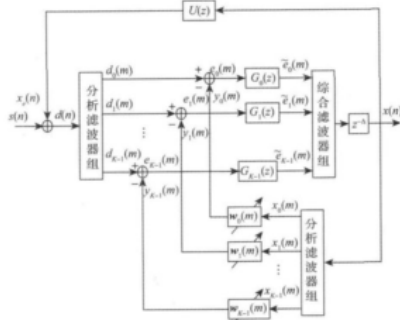


图4 子带自适应回声消除结构
Fig.4 Structure diagram of subband adaptive echo cancellation

如果近端语音信号与扬声器输出信号不相关,即 $s(n)$ 与 $x(n)$ 不相关,则 $s_k(n)$ 与 $x_{rk}(n)$ 均不相关,式(6)可以写成:

$$\xi_k(n) = E[d_k^2(n)] + E[(e_{rk}(n) - y_k(n))^2] \quad (4)$$

这样,当自适应滤波器调整权向量使得子带目标函数最小时,由于近端语音信号功率不受影响,则有:

$$\min \xi_k(n) = E[d_k^2(n)] + \min E[(e_{rk}(n) - y_k(n))^2] \quad (5)$$

式(5)表明,当 $\xi_k(n)$ 最小时, $e_{rk}(n) - y_k(n)$ 也最小,即自适应滤波器输出信号是回声信号的最佳估计。那么,采用NLMS算法的子带自适应滤波器权向量更新方程可写为:

$$e_k(n) = d_k(n) - w_k^T(n)x_k(n) \quad (6)$$

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \frac{\mu}{\varepsilon + \sigma_{rk}^2} e_k(n)x_k(n) \quad (7)$$

在实际应用中,扬声器输出信号 $x(n)$ 与近端语音信号 $s(n)$ 往往是相关的,这样,麦克风输入信号 $d(n)$ 是回声信号 $x_r(n)$ 与近端语音信号 $s(n)$ 2个相关信号的叠加,这会导致对回声传递函数 $U(k)$ 估计的不准确,进而不能很好地从输入信号中消除回声。因此,通常会在前向通路上引入一定时间量的延迟 Δ ,以解除上述两个信号的相关性^[16]。

4.3 计算复杂度分析

以信号每个输入样点所需的乘法次数来度量算法的计算量,下面讨论子带自适应滤波器的计算复杂度。

首先,若采用多相结构(PN)实现滤波器组,则在分析过程中,进行多相滤波的计算量为 N/M (N 是原型滤波器长度,并假设分析和综合原型滤波器长度相同, M 是降采样因子), K 点FFT所需的运算量为 $K \log_2 K$ (K 是子带数);在子带自适应滤波中,若采用NLMS算法,则在低采样率下子带中对每个输入采样点计算自适应滤波器的输出需要的计算量为 $2L/M$ (L 是全带自适应滤波器的长度),更新权值所需的计算量为 $2L/M$, K 个子带一共需要的计算量为 $4KL/M$;在滤波器组综合过程中所需的计算量与分析过程相同。因此,系统输出一个样点总的计算复杂度为:

$$P_{ab} = \frac{3MN + 3MK \log_2 K + 4KL}{M^2} \quad (8)$$

而全带NLMS算法的计算复杂度为 $P_{nms} = 4L$ 。

以 $N = 128, K = 16, M = 8, L = 1024$ 为例,子带NLMS自适应滤波需要1096次乘法,而全频带NLMS自适应滤波需要4096次乘法,这时,子带算法的计算复杂度约为全带算法的1/4,大大节约了计算量,尤其是在自适应滤波器阶数较高的时候。

实际上,在子带自适应滤波中,输入信号经过分频带

和抽取后,其频谱比全带信号更接近于白噪声,这相当于将全带信号的自适应滤波问题转换成为了几个独立的窄带自适应滤波问题,这样,子带自适应滤波器所需要的阶数将小于全带所需的阶数,所有子带中算法的收敛速度也会有所提高。

5 实验和结果

首先通过仿真实验来分析子带自适应滤波算法的收敛性。在回声消除中,通常采用回声返回损失增量 (ERLE) 来作为性能的评价指标,定义为:

$$ERLE = 10\log_{10} \frac{E[d^2(n)]}{E[(\hat{d}(n) - d(n))^2]} \quad (9)$$

式中: $d(n)$ 为参考信号, $\hat{d}(n)$ 为参考信号的估计值,即自适应滤波器的输出,ERLE 值越大表明回声消除效果越好。分别用 500 点和 1 000 点的 FIR 滤波器来模拟回声反馈的传递函数 (未知系统),如图 5 所示。

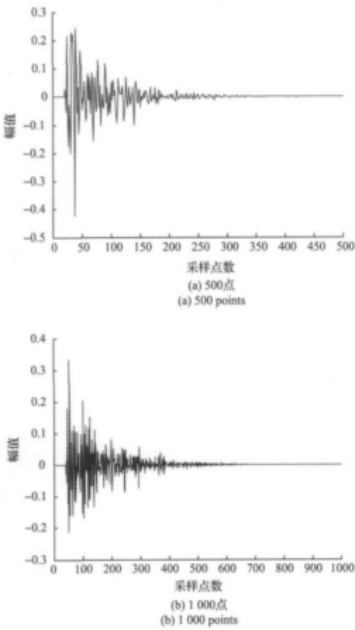


图 5 回声反馈函数
Fig. 5 Echo feedback functions
在子带自适应滤波中,设计滤波器组通道数 $K = 8$, 将采样率 $M = 4$, 分析和综合滤波器组使用同一个原型

滤波器,采用等纹波法设计,长度 $N = 128$, 回声消除用图 4 所示的结构实现,采用 NLMS 自适应算法,子带滤波器长度分别为 125 点和 250 点。输入信号是方差为 1 的均匀分布白噪声,观测噪声是方差为 10^{-3} 且与输入信号不相关的高斯白噪声,重复 50 次独立的实验计算 ERLE 的平均值。将得到的结果和全带 NLMS 算法相比较 (采用的自适应滤波器长度分别为 500 点和 1 000 点),如图 6 所示。可以看出,子带自适应滤波算法具有更快的收敛速度。

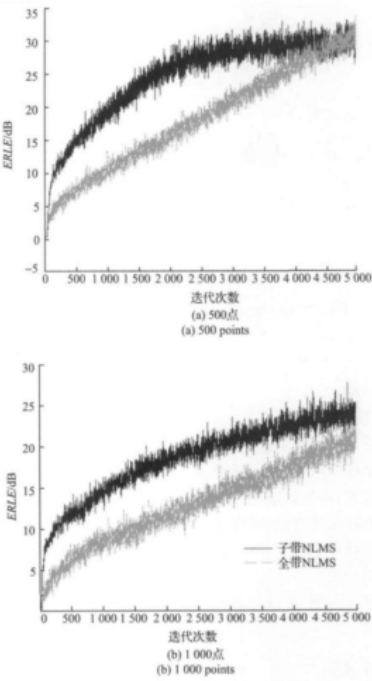


图 6 学习曲线
Fig. 6 Learning curves

为进一步验证子带自适应滤波算法的性能,采用真实语音信号进行回声消除实验,处理结果如图 7 所示。其中图 (a) 是近端语音信号;图 (b) 是麦克风输入端近端语音信号与回声信号的叠加,可以看到波形紊乱,振幅放大,实际听起来有明显的回声;图 (c) 是回声消除后的信号,和近端语音信号比较接近,说明对回声路径的估计是准确的,而在语音信号急剧变化的的开始阶段,仍有一些偏移,这是算法正处于逐渐收敛过程中的表现。

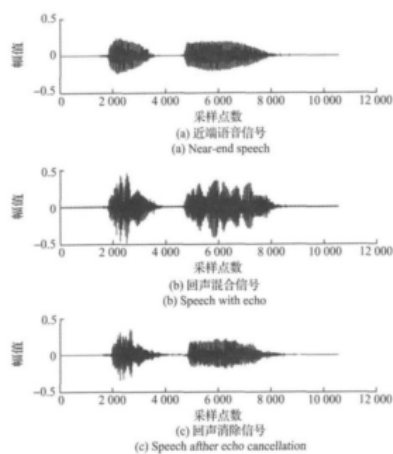


图7 回声消除时域波形

Fig. 7 Time domain waveforms of echo cancellation

6 结 论

本文研究了语音系统中的回声消除问题,考虑到回声消除应用中常使用到的高阶自适应滤波器会使系统开销很大,并且影响收敛速度,本文提出了一种基于 DFT 调制滤波器组的子带回声消除结构,将 NLMS 算法应用到多抽样率滤波器组中,进行子带自适应滤波。这种方法将全频带的自适应滤波问题转换成了独立的窄带自适应滤波问题,可以提高收敛速度,并进一步降低算法复杂度。

参考文献

- [1] DINIZ P S R. Adaptive filtering: Algorithms and practical implementation [M]. 2nd ed. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [2] LOGANATHAN P, HABETS E A P, NAYLOR P A. A proportionate adaptive algorithm with variable partitioned block length for acoustic echo cancellation [C]. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, Prague, Czech Republic, 2011: 73-76.
- [3] SHAO T, ZHENG Y R. A variable step-size normalized sign algorithm for acoustic echo cancellation [C]. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing, Dallas,

TX, 2010: 333-336.

- [4] 张艳凤, 张兴福, 张振川, 等. 基于 DSP 的回声抵消器的研究与设计 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 7 (增刊 1): 867-869.
ZHANG Y F, ZHANG X F, ZHANG ZH CH, et al. Research and design on acoustic echo canceller based on DSP [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 7 (Suppl. 1): 867-869.
- [5] ABUTABLEBI H R, SHEIKHZADEH H, BRENNAN R L, et al. Convergence improvement for oversampled subband adaptive noise and echo cancellation [C]. Eurospeech, Geneva, Switzerland, 2003: 1413-1416.
- [6] LI Q, CHEN W G, HE C, et al. Design of oversampled DFT modulated filter banks optimized for acoustic echo cancellation [C]. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech and Signal Processing, 2009: 197-200.
- [7] YANG F R, WU M, JI P F, et al. An improved multiband-structured subband adaptive filter algorithm [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19 (40): 647-650.
- [8] LEE K A, GAN W S. Improving convergence of the NLMS algorithm using constrained subband updates [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11 (9): 736-739.
- [9] 蔡宇, 侯朝焕, 原建平, 等. 适用于助听器语音信号处理的 DFT 调制滤波器组设计 [J]. 声学技术, 2012, 31 (5): 517-521.
CAI Y, HOU CH H, YUAN J P, et al. Design of DFT modulated filter bank for speech processing in hearing aids [J]. Technical Acoustics, 2012, 31 (5): 517-521.
- [10] CARINI A. Efficient NLMS and RLS Algorithms for Perfect Periodic Sequences [C]. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing, Dallas, TX, 2010: 3746-3749.
- [11] 李竹, 杨培林, 行小帅. 一种改进变步长 LMS 算法及其在系统辨识中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28 (7): 1340-1344.
LI ZH, YANG P L, XING X SH. Modified variable step size LMS algorithm and its application in system identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28 (7): 1340-1344.
- [12] ANGELOSANTE D, GIANNAKIS G B. RLS-weighted least squares for adaptive estimation of sparse signals [C]. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech and Signal Processing, 2009: 3245-3248.
- [13] 宁小玲, 刘忠, 冯成旭, 等. 快速收敛变换域自适应滤波算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25 (3): 240-245.
NING X L, LIU ZH, FENG CH X, et al. Fast convergence transform domain adaptive filter algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25 (3): 240-245.



第 7 期蔡宇等:语音系统中的子带自适应回声消除技术1453

240-245.

[14] 王光辉,罗小武,张曼.一种改进的补对 LMS 算法及性能分析[J].电子测量与仪器学报,2004,18(增刊2):788-791.

WANG G H,LUO X W,ZHANG M. A new complementary pair LMS algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2004,18(Suppl.2):788-791.

[15] SHIN H C,SAYED A H,SONG W J. Variable step-size NLMS and affine projection algorithms[J]. IEEE Signal Processing Letters,2004,11(2):132-135.

[16] SIQUEIRA M G,ALWAN A. Steady-State analysis of continuous adaptation in acoustic feedback reduction systems for hearing-Aids[J]. IEEE Trans. on Speech and Audio Processing,2000,8(4):443-453.



洪纓,1992 年于西北工业大学获得学士学位,1995 年于西北工业大学获得硕士学位,1998 年于中国科学院声学研究所获博士学位,现为中国科学院声学研究所研究员,主要研究方向为语音信号处理、VLSI 信号处理。

E-mail:hongying@mail.ioa.ac.cn

Hong Ying received her bachelor and master degrees both from Northwestern Polytechnical University, China in 1992 and 1995, respectively; and obtained Ph. D. degree from Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, in 1998. She is currently a research fellow at Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. Her research interests are speech signal processing and VLSI signal processing.

作者简介



蔡宇,2003 年于北京理工大学获得学士学位,2012 年于中国科学院声学研究所获博士学位,现为中国科学院声学研究所助理研究员,主要研究方向为语音信号处理。

E-mail:caiyu@mail.ioa.ac.cn

Cai Yu received his bachelor degree from Beijing Institute of Technology, China in 2003, and Ph. D. degree from Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, in 2012. He is currently a research assistant at Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. His research interest is speech signal processing.



原建平,1995 年于西北工业大学获得学士学位,1997 年于西北工业大学获得硕士学位,2000 年于中国科学院声学研究所获博士学位,现为中国科学院声学研究所研究员,主要研究方向为数字信号处理。

E-mail:yuanjianping@vip.sina.com

Yuan Jianping received his bachelor and master degrees both from Northwestern Polytechnical University, China in 1995 and 1997, respectively; and obtained Ph. D. degree from Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences in 2000. He is currently a research fellow at Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. His research interest is digital signal processing.

全文阅读已结束，如果下载本文需要使用

350 积分

下载此文档 文档不适合？发起文档求助吧~


分享至

该用户还上传了这些文档

<div>217 p.</div> <div>煤矸石资源化利用过程中微量元素的环境</div>	<div>126 p.</div> <div>煤热解中间体和自由基表征及反应机理研</div>	<div>127 p.</div> <div>煤层气解析-扩散-渗流问题的数值模拟</div>	<div>92 p.</div> <div>焦虑性抑郁障碍临床特征及治疗结局研究</div>	<div>137 p.</div> <div>焚烧过程二噁英形成机理的密度泛函研究</div>
---	---	---	--	---

发表评论

验证码：

 换一张

☐ 匿名评论

提交

关于我们

- 关于道客巴巴

人才招聘

联系我们
- 网站声明

网站地图

APP下载
- 帮助中心

会员注册

文档下载

如何获取积分

关注我们

新浪微博



关注微信公众号

