

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.05.005

大浊度监测超声测量方法及测量系统研究^{*}

邹钦文,王 英^{*}

(浙江理工大学 机械与自动控制学院,浙江 杭州 310018)

摘要:针对传统光学浊度仪量程小、测量结果易受环境因素干扰等问题,对传统浊度测量方法及超声波衰减模型进行了研究。提出了利用超声波衰减测量混合液浊度的方法,基于虚拟仪器及硬件模块的结合,设计了一套超声波衰减测量系统;以沙土为实验对象配置混合液进行了实验,完成了超声波衰减、浓度、浊度之间的关系探究实验。实验结果表明:在泥沙混合液中,超声波衰减系数与混合液浓度之间存在良好的线性关系,拟合曲线的拟合度大于 0.97,并且浓度与混合液浊度同样存在良好的线性关系,拟合曲线的拟合度为 0.995;通过利用超声波衰减测量大浊度混合液浊度值方案可行。

关键词:混合液;浊度测量;超声波衰减;浓度;虚拟仪器

中图分类号:TH766⁺.4

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)05-0475-06

Ultrasonic measurement method for large turbidity monitoring and implementation of measurement system

ZOU Qin-wen, WANG Ying

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems that the traditional optical turbidimeter has small measuring range and the measurement result is easily interfered by environmental factors, the traditional turbidity measurement method and ultrasonic attenuation model were studied. A method of measuring the turbidity of the mixed liquid by ultrasonic attenuation was proposed, and based on the combination of virtual instruments and hardware modules, a set of ultrasonic attenuation measurement system was designed. The sand was used as the experimental object to carry out the experiment, and the relationship between ultrasonic attenuation, concentration and turbidity was completed. The experimental results show that in the sediment mixture, and there is a good linear relationship between the ultrasonic attenuation coefficient and the concentration of the mixture. The fitting curve fits more than 0.97. The liquid turbidity also has a good linear relationship, and the fitting curve has a fitting degree of 0.995. It is feasible to measure the turbidity value of the large turbidity mixture by using ultrasonic attenuation.

Key words: mixed liquid; turbidity measurement; ultrasonic attenuation; concentration; virtual instrument

0 引 言

海底的锰结核蕴藏量十分丰富,越来越多的国家投入到海底锰结核开采技术的研究。按照《联合国海洋法公约》,世界各国投入开采前需评估采矿对海底环境造成的影响^[1]。目前,海底锰结核主要利用采矿

机进行开采,开采过程中会产生扰动,海底沉积物在矿机行走、结核收集、结核传输过程中扩散到海水中,海底沉积物的扩散和悬浮导致海水浊度、电导率、PH 值等物理和化学的变化。这些变化是可以实时和长期监测的。通过对海底环境参数的监测可以评估采矿对海底环境造成的影响,在监测的环境参数中,海水浊度值

收稿日期:2018-09-07

基金项目:国际海域资源调查与开发“十二五”课题资助项目(DY125-14-T-03);国家教育部产学研合作协同育人项目(201702008076)

作者简介:邹钦文(1992-),男,湖北钟祥人,硕士研究生,主要从事测控技术及检测设备方面的研究。E-mail:1007550549@qq.com

通信联系人:王英,女,教授,硕士生导师。E-mail:wangying@zstu.edu.cn

最为直观。采矿机的扰动造成海水浑浊度的急剧变化,因此,浊度监测要求测量装置量程大、响应快、精度高,能实时在线测量。

常用浊度测量方法有称重法、光透射检测法、光散射检测法以及比值法^[2]。称重法量程大,但步骤繁琐很难实现在线测量;其他测量方法都基于光衰减测量原理,虽然分辨率高,但测量受颗粒大小及颗粒物浓度影响,量程较小,通常在 0~1 000 NTU,大量程的光学浊度计对测量环境要求较高。采矿扰动使海底环境变化,海水中的悬浮物会影响光学浊度计的测量性能,需要自动清理镜头表面,保持镜片的洁净,这将大大增加测量成本。

超声波测量具有穿透能力强、频带宽、非接触性等特点^[3-4],能解决由于颗粒粒径及浓度影响带来的测量量程低等问题。高频的超声波信号具有自动清洗功能,还可以消除气泡带来的干扰,增加测量结果的准确性。

基于以上分析,本文将选择超声波测量海底沉积物悬浮浓度的变化,设计超声波激励信号发生装置以及高频超声波信号采集装置,通过超声波浊度测量实验装置的搭建,以建立探究超声衰减系数与浊度关系模型,并设计大浊度超声测量系统。

1 超声波衰减测浊度方法研究

1.1 浊度与浓度关系

在自然水域中,悬浮物浓度相对较小。海底沉积物被扰动后,采矿机的扰动导致海水中悬浮物浓度增大,悬浮物浓度增大导致海水浑浊。吴华通过建立水体浊度与聚丙烯酰胺(HPAM)浓度关系曲线,实现了通过测量浊度确定 HPAM 浓度值。顾思丁等通过浊度-浓度关系曲线确定,实现了污水中悬浮颗粒浓度的实时监测。金同轨^[5]推导出了浊度与悬浮液中颗粒表面积关系式:

$$T=\lambda CS_w \tag{1}$$

式中:λ—常数;C—颗粒浓度;字母 S_w —颗粒比表面积。

而字母 S_w 的表达式为:

$$S_w=\frac{\sum_{r=0}^{r=st}\alpha_{sr}n_rd_r^2}{\sum_{r=0}^{r=st}\rho_s\alpha_{vr}n_rd_r^3} \tag{2}$$

式中:st—最大颗粒粒径值; α_{sr} —固体颗粒的表面形状系数; α_{vr} —固体颗粒的体积形状系数; d_r —颗粒直径; n_r —直径为 d_r 的颗粒数; ρ_s —颗粒的密度。

当颗粒粒径很小,假设其体积、表面积形状系数均为常数,则式(2)可以简化为:

$$S_w=\frac{\sum_{r=0}^{r=st}n_rd_r^2}{\rho_s\sum_{r=0}^{r=st}n_rd_r^3} \tag{3}$$

假设:

$$d_{32}=\frac{\sum_{r=0}^{r=st}n_rd_r^3}{\sum_{r=0}^{r=st}n_rd_r^2} \tag{4}$$

则式(1)可改写为:

$$T=\frac{\tau}{\rho_s}\frac{C}{d_{32}} \tag{5}$$

式中:τ—常数。

由式(5)可以看出:在悬浮液中颗粒特性确定的情况下,固液混合物的浊度与颗粒物浓度是成正比例关系。当确定了浊度与浓度的线性关系,则可以通过测得其中任何一个变量来确定另一个变量的值。因此,当海水浑浊度太大,光学浊度测量难以实现时,如果能够测得颗粒物浓度,则可以根据浊度与浓度关系确定海水浊度值。

1.2 超声波衰减测浓度方法

超声波在固液混合物中传播时,会因为扩散衰减、吸收衰减及散射衰减等原因发生衰减。针对超声波衰减,存在许多模型来描述衰减过程。最初由 SWELL 提出了声波在气体介质中的传播衰减模型;之后 URICK 提出了一种在悬浮液中的超声波衰减模型,该模型考虑到影响声衰减因素较少,较简单;后来,URICK 与 AMENT^[6]共同研究出 Urick-Ament 模型,对超声波声速与衰减进行了联立求解;EACH 模型是在已经存在的声衰减模型上,经过扩展和修正产生的,涉及的影响超声波衰减的因素较多,但求解较复杂。

为了进一步讨论超声波声衰减系数与浓度、超声波频率之间的关系,本研究选取二氧化钛固液混合物为理论实验对象,二氧化钛及水参数表如表 1 所示。

表 1 二氧化钛及水参数表

物理参数	二氧化钛	水
密度/(kg·m ⁻³)	4 260	997
压缩波速/(m·s ⁻¹)	7 900	1 496.7
剪切黏度/(pa·s)	—	9.03×10 ⁻⁴
剪切模量/(N·m ⁻¹)	3.54×10 ¹⁰	—
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	4.98	0.595 2
比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	930.1	4 178.5
声衰减/(s ² ·m ⁻¹)	1.3×10 ⁻⁶	2.2×10 ⁻¹⁴
热扩散系数/(K ⁻¹)	8.61×10 ⁻⁶	2.57×10 ⁻⁴

当确定了换能器型号即确定了超声波频率,在特定频率下,超声波在混合液中的衰减主要与混合液中固体颗粒含量有关。本研究通过设定物理参数,对 3 种声衰减模型进行仿真,结果如图 1 所示。

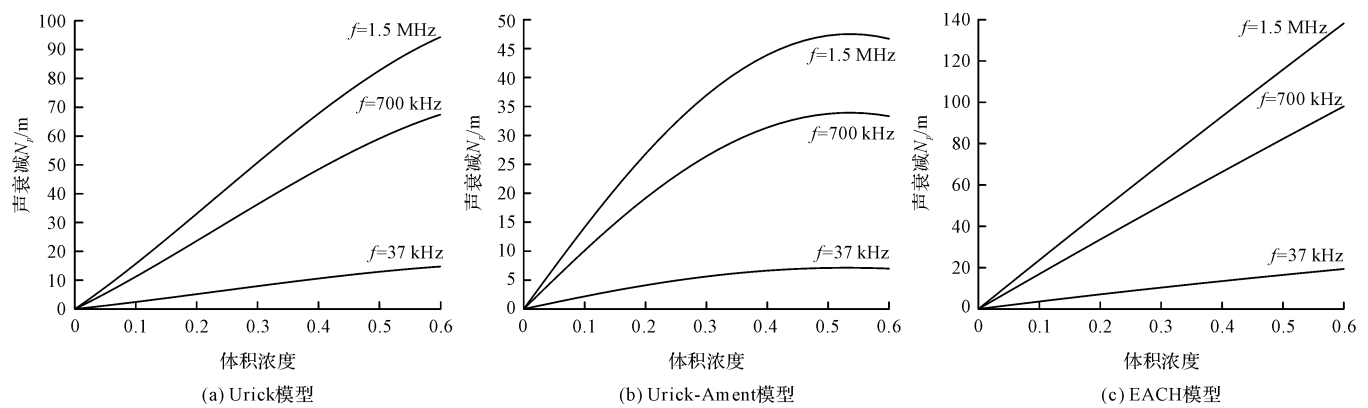


图1 模型仿真

由仿真结果可以看出:当浓度低于40%时,3种模型下,浓度与声衰减之间的线性度较好。通过理论仿真分析,可通过实验探究声衰减与颗粒物浓度及混合液浊度值之间的关系,进而验证利用声衰减测浊度值这一猜想的正确性。

2 测试系统硬件设计

为了验证猜想,本文设计了测试实验平台。整个实验平台由超声波发射及接收模块、实验水槽、不同频率换能器、NI 机箱、数据采集卡及 PC 机组成^[7],如图2所示。

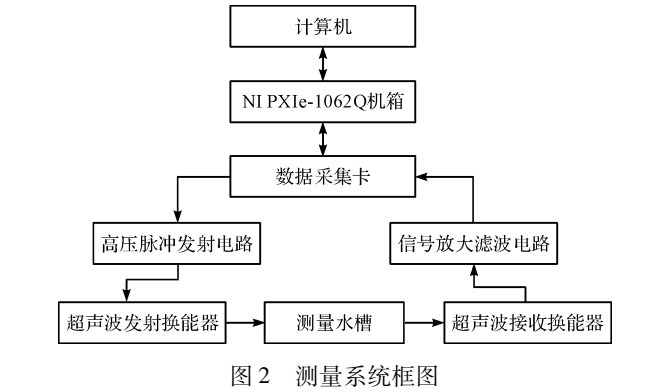


图2 测量系统框图

该系统由 LabVIEW 产生控制信号,结合 NI 机箱及数据采集卡实现控制信号的输出,控制信号控制超

声波发射电路产生激励电压信号激励超声波换能器产生超声波。超声波经过水槽后发生衰减,由超声波接收换能器接收,接收到的超声波信号经过放大滤波,由 Lab VIEW 采集超声波信号。

本文中利用到的 NI 机箱型号为 NI PXIe-1062Q。本文利用到的数据采集卡有两种,其型号分别为 NI PXIe-5105 及 NI PXIe-6341。PXIe-5105 用来实现信号高速采集,PXIe-6341 数据采集卡实现控制信号的输出。两种数据采集卡的具体参数如表2所示。

表2 数据采集卡参数表

数据采集卡型	具体参数
PXIe-5105	8 同步采样通道,12 位,采样率 60 MS/s
PXIe-6341	16 个模拟输入通道,2 个模拟输出通道,单通道最大采样率 500 KS/s,4 个定时器/计数器

2.1 超声波发射电路

高压激励脉冲作用于超声波换能器上可以激励产生超声波^[8]。因此需要设计产生高压激励脉冲电压信号模块。常用的产生高压脉冲的方法有3种:电容瞬间放电法、电源脉冲激励法以及 RLC 谐振法^[9]。

本文基于 RLC 谐振法设计了超声波发射电路。该种电路中只需要提供电压直流电源,较安全、电路体积较小。设计的电路如图3所示。

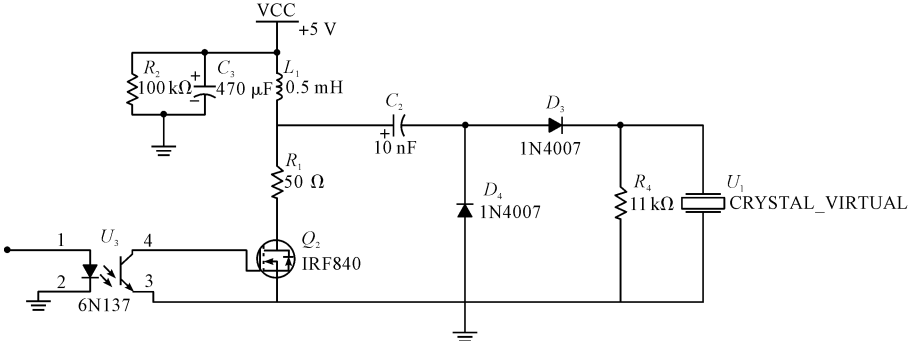


图3 超声波发射电路图

6N137-光耦合器,对控制端具有隔离保护作用; Q_2 -开关元件,当栅极接入高电平,场效应管为导通状

态,电感 L_1 、电阻 R_1 和场效应管 Q_2 构成回路,电感 L_1 进行储能。当栅极接入低电平时,场效应管断开,电感

L_1 、电容 C_2 和电阻 R_4 组成谐振电路进行放电,在 R_4 上形成高压脉冲,加载在传感器 X 上即可激励换能器产生超声波

2.2 超声波接收电路

超声波换能器在高压激励脉冲激励下产生的超声波经过混合液后,会发生衰减,信号电压幅值较小,并且信号中伴随着噪声干扰,不利于后续的信号处理。

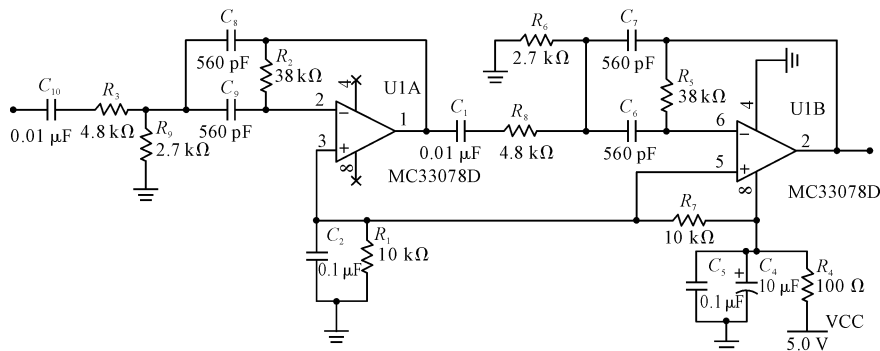


图 4 信号放大滤波电路图

因此,在进行信号采集前,需要对信号进行放大滤波。本研究设计了超声波接收模块电路。由于实验中利用到多种频率超声波换能器,需要设计不同中心频率及带宽的放大滤波电路。

超声波换能器频率为 37 kHz 时的放大滤波电路如图 4 所示(其中心频率为 37 kHz,带宽为 15 kHz,放大倍数为 5 倍)。

3 测试系统软件

本文利用到的软件开发平台为 LabVIEW^[10],利用 LabVIEW 编写程序,结合数据采集卡,实现了控制信号发生装置设计,高频信号的采集储存及处理等功能。

3.1 信号控制软件

超声波发射电路中,需要利用控制信号控制开关元件的开关,通过控制电路中电流的大小变化,产生高频高压激励信号。场效应管的瞬间导通与关断能够让电路中的电流产生快速变化,因而能够产生能量大的高压激励信号。选择并产生合适的控制信号,能够激励换能器产生能量更大的超声波。因此,本研究基于 LabVIEW 设计了激励信号源发生装置,该装置主要由参数设置、数据显示模块组成,可以通过图形显示控件显示产生的理论波形信号,通过瞬态特性测量数据显示部分可以测得产生的波形的基本信息。该装置可以产生多种类型的激励信号,包括正弦波、方波、三角波、锯齿波形等,幅值范围为 $-10\text{ V} \sim 10\text{ V}$ 。可以根据实际需求,发射串波或特定频率的单个波形,也可以自定义波形函数,实现自定义波形输出。

3.2 信号采集软件

本文选用多种频率的超声波换能器进行对比试验,频率范围为 37 kHz ~ 2 MHz,换能器产生的超声波为高频信号,需要利用高速数据采集卡完成数据采集。NI PXI-5105 数据采集卡最大采样频率为 60 MHz 可满足高频信号采集。此次的实际采样频率为 60 MHz,

满足奈奎斯特定理要求。

4 实验及结果分析

4.1 超声波衰减与传播距离关系

本次实验选用的实验对象是泥沙混合物,分别探究浓度与浊度、声衰减与浓度之间的关系。首先,笔者选用了 5 种频率的超声波换能器,探究各种频率的换能器在清水中随换能器之间距离增加接收到的信号电压幅值衰减情况;再分别选取了 37 kHz、700 kHz、1.5 MHz 超声波换能器,探究不同泥沙浓度下超声波衰减情况。超声波幅值变化曲线图如图 5 所示。

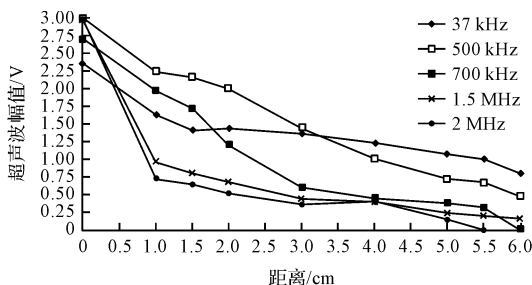


图 5 超声波幅值变化曲线图

在清水中,随着超声波换能器之间距离的增加,超声波信号幅值会出现不同程度的衰减,整体上呈现单调递减形式。由于清水中不存在固体颗粒,此时超声波衰减主要由扩散衰减引起。超声波幅值减少量曲线图如图 6 所示。

由图 6 中可以发现:随着距离的增加,超声波衰减量逐渐加大;频率越高的超声波,衰减程度越严重。

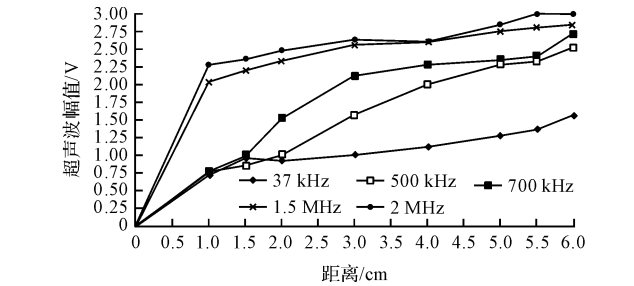


图6 超声波幅值减少量曲线图

4.2 超声波衰减与浓度关系

本研究选取了3种超声波换能器,测量了在不同浓度下超声波的衰减系数,求取拟合曲线,如图7所示。

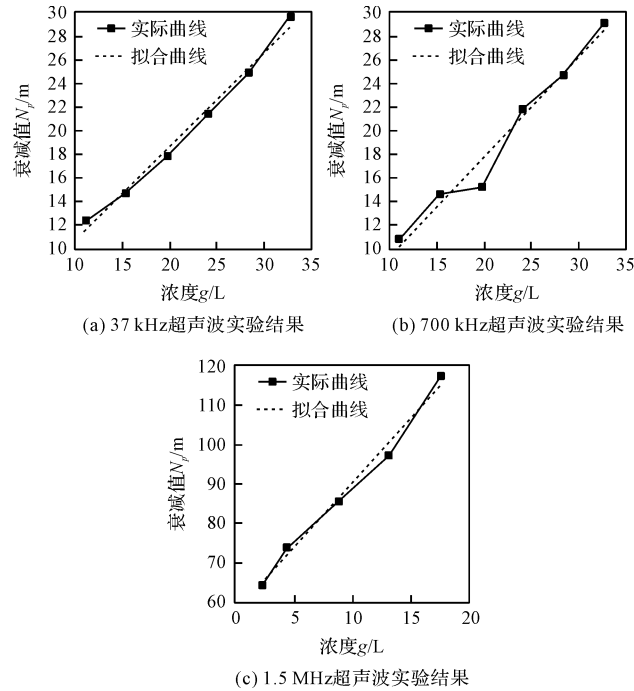


图7 声衰减系数与浓度关系曲线图

3条拟合曲线的拟合度分别为0.989、0.971、0.987,泥沙浓度与超声波衰减系数之间呈良好的线性关系,频率越高,超声波信号衰减幅度越大。这是因为频率越高的超声波,其波长越短,衰减主要受浓度及混合物颗粒粒径影响,而频率越低的超声波,波长较长,受到颗粒阻碍较小,衰减主要受混合物浓度影响。因此,同等浓度下的泥沙混合物,频率较低的超声波衰减较少,能够测得的浓度范围更广。当泥沙浓度较小时,利用高频超声波信号检测浓度灵敏度更高;泥沙浓度较大时,高频超声波信号会变得十分微弱,因此更适合用低频信号检测浓度变化范围大的混合液中固体颗粒物的浓度。

4.3 混合液浓度与浊度关系

本研究配置了不同浓度的泥沙混合液,利用光学浊度计测量不同浓度下泥沙混合液浊度值,并建立了泥沙混合液浊度与浓度关系曲线,并求取拟合曲线。

浊度与浓度关系曲线图如图8所示。

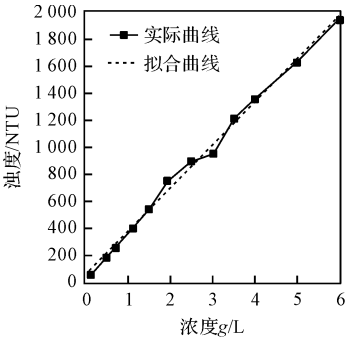


图8 浊度与浓度关系曲线图

图8中,拟合曲线的拟合度为0.995。由于实验所采用的光学浊度量程范围为0~2000NTU,只在该量程范围内,做了浊度与浓度之间的关系研究。由关系曲线可以发现:随着泥沙浓度的增加,泥沙混合液浊度值也在增加,并且通过测得数据建立拟合曲线,拟合度较高,泥沙混合液浊度与浓度呈良好的线性关系,与理论分析结论相符合。由于超声波衰减与混合液固体颗粒物浓度之间,及混合液固体颗粒物浓度及混合液浊度值之间都存在良好的线性关系,可以证明利用超声波衰减测混合液浊度值方法可行。

5 结束语

本文通过理论分析,得出了利用超声波衰减测混合液浊度值的可行性。设计了一套探究超声波衰减测混合液浊度值的测量系统,利用LabVIEW设计了控制信号源发生装置及信号采集程序,完成了系统的软件设计,结合NI机箱及数据采集卡实现了多种控制信号源的产生及高频信号的采集及处理;设计了超声波发射及接收电路,结合超声波换能器实现了不同频率超声波的发射及接收。

本文通过配比不同浓度的泥沙混合液进行测量实验,验证了利用超声波衰减测量混合液浊度值方案是可行的。当混合液浓度较低时,利用高频超声波信号

(下转第495页)

本文引用格式:

邹钦文,王英.大浊度监测超声测量方法及测量系统研究[J].机电工程,2019,36(5):475-479,495.
ZOU Qin-wen, WANG Ying. Ultrasonic measurement method for large turbidity monitoring and implementation of measurement system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(5): 475-479, 495.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>