

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.01.017

微机械电容式麦克风的仿真研究^{*}

董 健, 龙芝剑, 孙 笠, 金焱立

(浙江工业大学 浙江省特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对麦克风产品开发成本过高问题,对麦克风的制造工艺进行了研究,提出了一种用仿真代替实验的方法,利用 IntelliSuite 软件中的 Blueprint 设计麦克风制作过程中所使用的掩膜版图,再利用 IntelliSuite 软件中 IntelliFab 模块对器件进行了微电容式麦克风的工艺流程仿真,仿真出麦克风器件,再利用 IntelliSuite 软件中的 3D BUILDER, TEM 两个子模块,仿真得到了微机械电容式麦克风的灵敏度、吸合电压以及固有频率等参数,该仿真过程得到的相关参数能够为微机械电容式麦克风性能的佐证提供参考,并指导学者对微电容式麦克风产品的开发与设计过程。分析结果表明,此过程能够代替实际的开发的制造过程,达到节约产品开发成本的目的。

关键词:电容式麦克风;灵敏度;吸合电压;固有频率;敏感膜

中图分类号:TP212

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)01-0083-05

Simulation of micro – mechanical capacitive microphone

DONG Jian, LONG Zhi-jian, SUN Li, JIN Yan-li

(Zhejiang Provincial Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology,
Zhejiang University of Tecnology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the problem of the high cost of the development of the micro-mechanical capacitive microphone, we designed the mask of microphone by Blueprint module inIntellisuiteTM, we simulated the process flow of microphone by IntelliFab module in IntelliSuiteTM in this paper. At the end of simulation, the module of microphone could be geted, then the 3D BUILDER, TEM module in IntelliSuiteTM were used to get sensitivity, pull-in voltage and frequency response of microphone. The relevant parameters of micro mechanical capacitive microphone according to the simulation process could provide a reference and guide the products development and design process of the microphone. The results indicate that the process can replace the actual development of the manufacturing process and aimed at saving the cost of product development.

Key words: capacitive microphone; sensitivity; pull-in voltage; nature frequency; sense film

0 引 言

微机械电容式麦克风是一种能将声音信号转化为可以被放大、传输、处理的电流信号或者电压信号等电信号的设备^[1-3]。微电容式麦克风具有非常广泛的应用领域,例如人们日常使用的手机、MP4、笔记本电脑的内置麦克风,汽车行业中的免提电话,医学领域中的助听器等等^[4-8]。当微机械电容式麦克风工作时,敏感

膜与底板构成麦克风工作电容的两极板,敏感膜通过感应声音压力的变化,使麦克风工作电容发生变化,通过检测工作电容的变化来测量声音信号。微机械电容式麦克风在设计 and 制作时应让敏感膜具有较低的刚度并处于轻微的拉应力状态,让底板有较高的刚度,以此保证麦克风的主要技术性能指标,并且希望能采用简单的工艺制作,以适合工业化批量生产采用的微机械加工方法^[9-10]。D. Hohm and G. Hess 在一块硅片上制

收稿日期:2016-08-09

基金项目:教育部留学回国人员科研启动基金项目(No:48);浙江省公益技术应用研究项目(2016C34007);传感技术联合国家重点实验室基金项目(SKT1305)

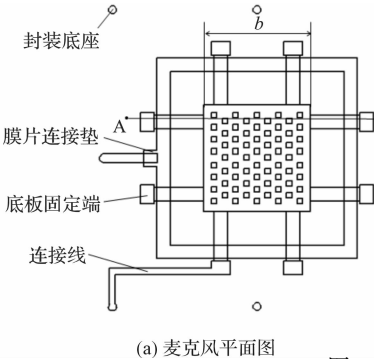
作者简介:董 健(1968-),男,浙江杭州人,博士,副教授,主要从事微机电系统方面的研究. E-mail:zjutdj@zjut.edu.cn

作麦克风的敏感膜,在另一块硅片上制作麦克风的底板,然后用键合的方式将敏感膜和底板合成麦克风,这种制作方法由于需要键合两块硅片,键合过程中对准存在难度,制作工艺较为复杂,不利于工业化推广应用。P. R. Scheeper 在单一硅片上集成制作了微机械麦克风,但由于麦克风敏感膜的内应力较大,导致了麦克风的灵敏度较低。无论是 D. Hohm, G. Hess 还是 P. R. Scheeper,都仅仅只是对麦克风的工艺流程进行一定的改进,本研究从在他们工艺基础上提出了一种能在很大程度上降低麦克风的开发成本的方法。对于已经初步设计好的麦克风来说,需要对它进行相应的性能测试,因此对电容式麦克风进行仿真来辅助开发出新的麦克风产品,这一过程有着极其重要的意义。

本研究将通过 IntelliSuite 软件中的 IntelliFab 模块对麦克风制造进行工艺流程仿真,再通过 IntelliSuite 软件中的 IntelliFab 模块与 BluePrint 模块建立微机械电容式麦克风的结构模型,进而利用 IntelliSuite 软件中的三维建模模块(3D BUILDER)和热机电分析模块(TEM)两个模块对麦克风的灵敏度、吸合电压及固有频率进行分析,通过仿真得到的相关参数以评估微机械电容式麦克风性能。

1 微电容式麦克风的结构和参数

麦克风电容器由三明治薄膜作为阳极,由开有阵



列圆孔的铜板作为阴极。其中三明治敏感膜中间层是由 0.4 μm 厚的多晶硅,上、下层都是 0.1 μm 厚的氮化硅层组成,在制作工艺过程中,会使氮化硅层受拉应力,多晶硅受压应力,通过合理选择三层复合膜的厚度组合和制作工艺参数使复合敏感膜处于轻微的拉应力状态。薄膜为边长为 1 000 μm 的正方形,膜片的 4 个边缘被固定在硅衬底上。铜底板厚度为 15 μm ,有 8 个脚支撑,其中底板距离薄膜的距离为 2.5 μm ,铜板上的正方形小孔边长为 30 μm ,小孔以 76 μm 的中心距在板面呈蜂窝状排布,底板上的通气孔用来调节麦克风工作时膜与底板间的空气压膜阻尼。铜背板的宽度为 600 μm ,铜板的边长要比薄膜边长短 40%,短去的部分能够有效地减少麦克风的附加重量,从而提高麦克风的灵敏度。在敏感膜和铜底板之间,用牺牲层技术构成了空气间隙,作为麦克风工作电容两极板之间间隙。硅基底背面采用湿法腐蚀出声音进口腔的同时,背面板的略去部分用作空气出口以调节麦克风工作时空气间隙阻尼。在硅衬底的背面,利用硅的背面腐蚀技术腐蚀出一个声音入口孔,微机械电容式麦克风工作时,敏感膜感受从声音进口腔进入的声压,弯曲并发生振动,使麦克风工作电容随振动发生变化,通过检测麦克风工作电容的变化来测量声音信号。

麦克风的结构示意图如图 1 所示。

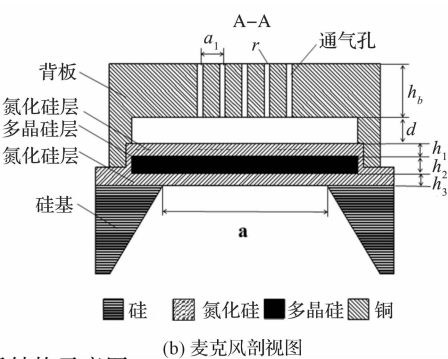


图 1 麦克风结构示意图

a —敏感膜边长; h_1 —敏感膜顶层氮化硅厚度; h_2 —敏感膜中间层多晶硅厚度; h_3 —敏感膜底层氮化硅厚度; b —底板边长; h_b —底板厚度; r —底板通气孔半径; a_1 —底板相邻两通气孔间距; d —敏感膜与底板间隙

麦克风的尺寸参数如表 1 所示。

表 1 麦克风的结构参数

$a/[\mu\text{m}]$	$h/[\mu\text{m}]$	$h_1/[\mu\text{m}]$	$h_2/[\mu\text{m}]$	$h_3/[\mu\text{m}]$	$b/[\mu\text{m}]$	$h_b/[\mu\text{m}]$	$r/[\mu\text{m}]$	$a_1/[\mu\text{m}]$	$d/[\mu\text{m}]$
1 000	0.6	0.1	0.4	0.1	1 000	15	30	76	2.5

2 微电容式麦克风的制造工艺流程仿真

通过利用 IntelliSuite 软件中的 IntelliFab 模块,可以

对所涉及的麦克风进行一系列的工艺流程的仿真,每一步工艺流程结束,都可以得到相应工艺流程仿真结束后的三维结构模型。该麦克风的具体工艺过程如下所示:

(1)硅片正面淀积一层 3 μm 厚的低应力氧化硅

- 和一层 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 厚的氮化硅;
- (2) 硅片正面淀积一层 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 厚的多晶硅并掺杂硼形成导电体,多晶硅刻成正方形区域;
- (3) 硅片正面淀积另一层 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 厚的氮化硅形成三层复合敏感膜;
- (4) 硅片背面开腐蚀窗口,硅片正面复合敏感膜上开引线窗口;
- (5) $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 厚的光刻胶 FH6800L 作为牺牲层涂在硅片正面,光刻形成图形,来构成麦克风敏感膜与底

- 板之间 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的间隙;
- (6) 牺牲层图形上溅射 50 nm 钛和 300 nm 铜作为电镀金属的粘结层和种子层, $20\text{ }\mu\text{m}$ 厚的电镀模型胶 4620 涂在种子层上,光刻形成图形,电镀 $15\text{ }\mu\text{m}$ 厚的铜底板;
- (7) 用夹具保护正面,硅片背面用湿法腐蚀出声音进口。用湿法腐蚀去除低应力氧化硅、电镀模型胶、种子层铜、粘结层钛和牺牲层胶。
- 仿真步骤如图 2 所示。

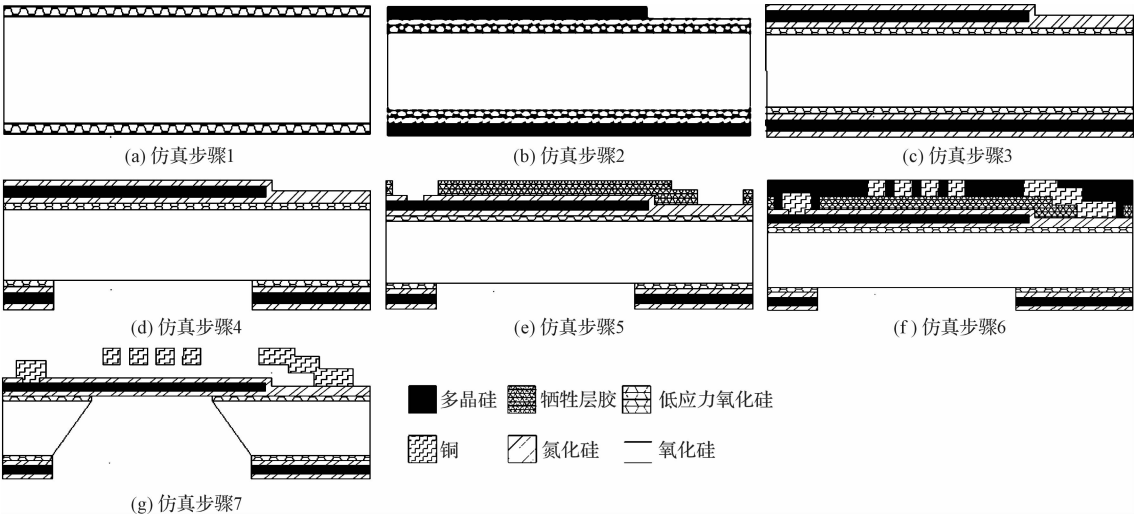


图2 麦克风仿真工艺流程仿真

3 微电容式麦克风的仿真模型的建立

图 2 所示的每一步工艺步骤完成之后都能得到工艺效果的三维图,通过 IntelliSuite 软件中的 BluePrint 模块和 IntelliFab 模块结构仿真得到工艺流程的三维图,通过三维图的直观展示,可以直接了解到每一步工艺的合理性,并对不合理工艺过程进行修改,然后进行再次仿真与分析,直至得到一个理想的器件结构。工艺流程所得到的器件结构如图 3 所示。

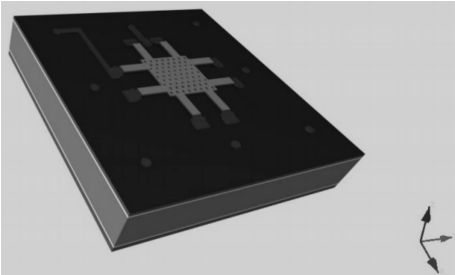


图3 工艺流程仿真器件

4 微电容式麦克风的性能仿真

麦克风的设计常常需要满足 3 个重要的性能指标:(1)麦克风的灵敏度达到 10 mV/Pa 以上;(2)麦克风的吸合电压应大于工作电压;(3)频率响应在

$100\text{ Hz} \sim 10\text{ kHz}$ 的范围内趋于平稳。

利用 IntelliSuite 软件中有着三维建模(3D BUILDER)模块和热机电分析(TEM)模块两个模块可以对麦克风的灵敏度、吸合电压和固有频率进行仿真。具体过程如下:

首先,对已建模型进行网格划分,通过 IntelliSuite 软件中的 3D BUILDER 模块建出麦克风模型,并划分好网格。麦克风网格划分结构图如图 4 所示。

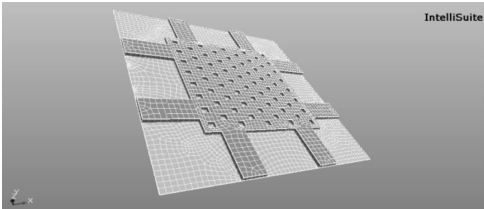


图4 麦克风网格划分结构图

然后,对模型中不同材料进行参数设定,相关材料参数如表 2 所示。

表2 微电容微麦克风的主要材料参数

材料	杨氏模量/GPa	泊松比	材料密度/ ($\text{kg} \cdot \text{M}^{-3}$)	压力/MPa
氮化硅	395	0.27	3 050	0
多晶硅	155	0.23	2 300	10
铜	110	0.34	8 900	0

根据这个模型结构,需要对模型进行边界条件的设定,显然,需要对振动膜片的 4 条边进行固定。边界条件设定完毕之后,则可以对麦克风的灵敏度,吸合电压,以及频率响应等性能进行仿真。振动膜片的边界条件设定如图 5 所示。

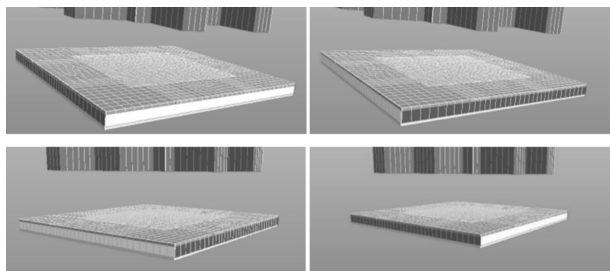


图 5 振动膜片的边界条件设定

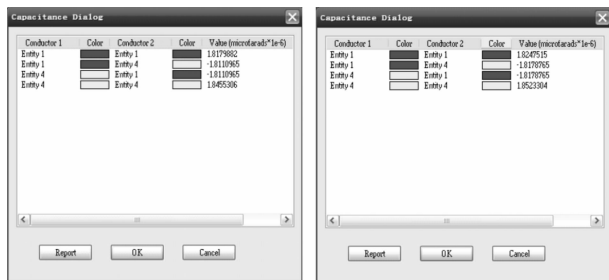
4.1 麦克风的灵敏度仿真

灵敏度 S 计算公式为^[11]:

$$S = \left(\frac{C_1 - C_0}{C_0 \Delta P} V_0 \right) \quad (1)$$

式中: C_0 —无声压的情况下敏感膜与背板之间的电容值, C_1 —有声压的情况下敏感膜与背板之间的电容值, ΔP —敏感膜所受压强, V_0 —工作电压。

麦克风在一般工作情况下,敏感膜的声压为 1 Pa,工作电压 V_0 为 5 V。分别选取敏感膜面和背板的面,在所选取的面上加一个 5 V 的压差,通过 IntelliSuite 软件中的 TEM 模块可以分别计算出 C_0 和 C_1 的数值,仿真结果如图 6 所示。



(a) 不加声压

(b) 加有声压

图 6 电容仿真结果

Entity1 与 Entity4 之间的电容值即为敏感膜与背板之间的电容,由图可知,TEM 测得不加声压的情况下的敏感膜与背板之间的电容值 C_0 为 1.811 096 5 pF,同时可获得在加有 1 Pa 声压的情况下敏感膜与背板之间的电容值 C_1 为 1.817 876 5 pF,将 $C_0 = 1.811 096 5$ pF, $C_1 = 1.817 876 5$ pF, $\Delta P = 1$ Pa, $V_0 = 5$ V 代入公式(1)中,得到麦克风的灵敏度 S 为 18.75 mV/Pa,该灵敏度符合电容式麦克风的灵敏度标准。

4.2 麦克风的吸合电压仿真

随着敏感膜与背板之间间距的减少,静电力的增

加是非线性的,而膜片恢复原状的弹力的增加是线性的,从而导致了敏感膜的不平衡。当偏置电压过大时,膜片受到的电磁力将大于膜片恢复原状产生的弹力,从而会使膜片发生吸合而不能正常工作^[12]。笔者定义吸合电压为在该复位弹簧力不能再平衡静电力从而使两板间隔急剧变成零时候的电压。通过 IntelliSuite 软件中的 TEM 模块可以分析出麦克风的吸合电压,具体方法如下:

首先本研究对所建电容式麦克风模型进行网格划分,如图 4 所示;如果需要更精准的分析,可以在图 4 的基础上,进行手动网格细化,然后定义结构的材料参数,材料参数如表 2 所示;设置边界条件如图 5 所示;最后开始仿真,将电压值从 0 ~ 9.2 V 之间以 0.2 V 的增量递增,敏感膜到背板的距离 Z 随着电压的变化趋势如图 7 所示。

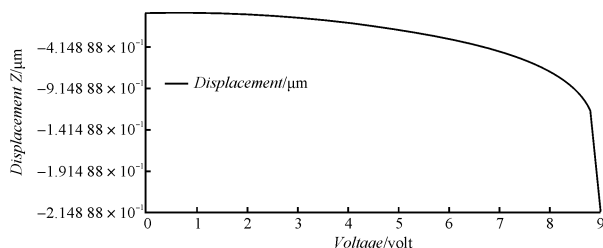


图 7 敏感膜到背板距离 Z 与两板间压力的关系曲线

从图中可见敏感膜到背板的距离 Z 会随着电压的增加而减。

由于背板与敏感膜之间的初始距离为 2.5 μm ,由图 7 可见,当电压增加到 8.8 V 时,敏感膜到背板的距离 Z 出现了急剧减少的趋势;当电压到 9 V 左右的时候, Z 的减少量接近 2.5 μm 。此时的麦克风的敏感膜已经贴合在底板上,导致不能正常工作,故 8.8 V 为该电容式麦克风的吸合电压,该麦克风的吸合电压略小于工作电压的两倍值,所以该麦克风设计还有需要进一步改进的地方。

4.3 频率响应仿真

本研究利用 TEM 对麦克风频率响应做动力学仿真,麦克风的敏感膜会对不同频率的声音信号产生不同的响应,表现在敏感膜会随频率的变化产生不同的位移,利用这样的特性,给定频率的变化范围为 1 Hz ~ 10 000 Hz,得到的频率响应结果如图 8 所示。

由图可知,峰值分析结果显示固有频率为 40 000 Hz 左右,但是,这里的频率响应分析不考虑阻尼和噪音的影响。微机械电容式麦克风用以测量声音信号,人能感知的声音信号的频率带宽为 20 Hz ~ 20 000 Hz,因此,麦克风工作时的频率带宽必须大于 20 000 Hz,由

仿真所得麦克风固有频率可知,该麦克风的设计是合理的。

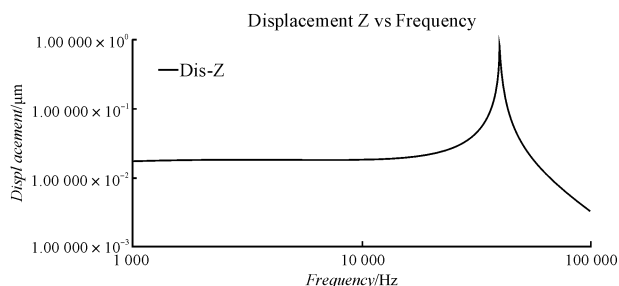


图8 对数信号频率响应图

5 结束语

针对麦克风产品开发过程中样品制备的成本高的问题,本研究提出了一种用仿真过程代替实际样品制备过程方法:

(1)利用 IntelliSuite 软件中的 IntelliFab 模块对器件进行工艺流程仿真,仿出器件,每一步工艺流程之后,都能看到工艺效果的三维图,这让开发者对麦克风的工艺流程进行改进有着指导意义。

(2)利用 IntelliSuite 软件中的三维建模模块(3D BUILDER)和热机电分析模块(TEM)两个模块对麦克风的灵敏度、吸合电压和固有频率进行仿真分析,分析表明,麦克风在 5 V 偏置电压下的开环灵敏度为 18.75 mV/Pa,吸合电压为 8.8 V。

(3)仿真结果可以有效地为微机械电容式麦克风性能的佐证提供参考,并指导麦克风产品的开发与设计过程,整个仿真过程能够代替实际麦克风产品开发的制造过程,达到节约产品开发成本的目的。

参考文献(References):

[1] HOHM D, HESS G. A silicon condenser microphone using bond and etch-back technology[J]. *Sensors & Actuators A physical*, 1994, 45(2): 115-124.

- [2] KOVACS A, STOFFEL A. Fabrication of single-chip polysilicon condenser structures for microphone applications[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 1995, 5(2): 537-542.
- [3] SCHEEPER P R, OLTHUIS W, BERGVELD P. A silicon condenser microphone with a silicon nitride diaphragm and backplate[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 1992, 2(3): 187-189.
- [4] 王伟,董健,计时鸣. 具有自由悬浮敏感膜的硅微机械电容式麦克风的设计与仿真计算[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(11): 1571-1575.
- [5] 张海明,齐丽晶. 一种 YY 0709-2009 中听觉报警信号测试系统的设计[J]. *医疗卫生装备*, 2014, 35(3): 32-33.
- [6] 田丰. 基于 Zigbee 的无线电子听诊器设计[J]. *南京工业职业技术学院学报*, 2012, 12(2): 40-42.
- [7] 叶永,陈建峰,程萍,等. 用于麦克风阵列的阵元筛选方法研究[J]. *传感技术学报*, 2012, 25(11): 1507-1510.
- [8] 郭业才,朱赛男,张宁. 自适应多通道双 L 型麦克风阵列声源定位算法[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(7): 1556-1562.
- [9] WANG W J, LIN R M, GAO D G. Study of single deeply corrugated diaphragms for high-sensitivity microphones[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2003, 13(13): 184-189.
- [10] CHEN J, LIU L T, LI Z J, et al. Single-chip condenser miniature microphone with a high sensitive circular corrugated diaphragm[C]. *IEEE international conference on Micro Electro Mechanical Systems*. New York: IEEE, 2002.
- [11] BERGQVIST J. Finite-Element Modeling and Characterization of a Silicon Condenser Microphone with a Highly Perforate Blackplate[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 1993, 39(3): 191-200.
- [12] WANG W J, LIN R M, ZOU Q B, et al. Modeling and Characterization of a Silicon Condenser Microphone[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2003, 14(3): 403-409.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

董健,龙芝剑,孙笠,等. 微机械电容式麦克风的仿真研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(1): 83-87.

DONG Jian, LONG Zhi-jian, SUN Li, et al. Simulation of micro-mechanical capacitive microphone[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(1): 83-87.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>