

基于汽车电子控制器的模态仿真技术研究

1 前言

随着汽车电子产品在整车中的广泛应用,汽车电子产品的可靠性也备受关注。振动问题是影响汽车电子产品可靠性的一个重要因素,如果在研发设计阶段就能准确的预估汽车电子产品的振动特性,则对汽车电子产品的可靠性设计具有重大的意义。利用有限元技术能够在研发设计阶段预估汽车电子产品的振动特性,但是对于具有复杂结构的电子产品来说,由于模型的复杂度,材料参数的不确定性、边界设定的非线性、计算机配置要求等因素的影响,使仿真结果的可信度不高。因此提高仿真分析的可信度是当今仿真工作者的首要任务。本文对某具有复杂结构的汽车电子控制器进行了模态仿真分析和模态试验,并对仿真分析中的几何模型修正,单元类型选择,边界条件设定等方法进行了研究。

2 汽车电子控制器结构介绍

汽车电子控制器由 PCBA (集成电路板) 和上、下壳体组成,如图 1 所示(为展示控制器内部结构,剖掉部分壳体)。装配该控制器时,先把 PCBA 沿壳体上的卡槽插入下壳体中,再把上壳体扣合到下壳体上,完成装配。该控制器在车上的安装方式是:用螺栓穿过壳体上的安装耳再固定到支架上。



图 1 控制器的实物图

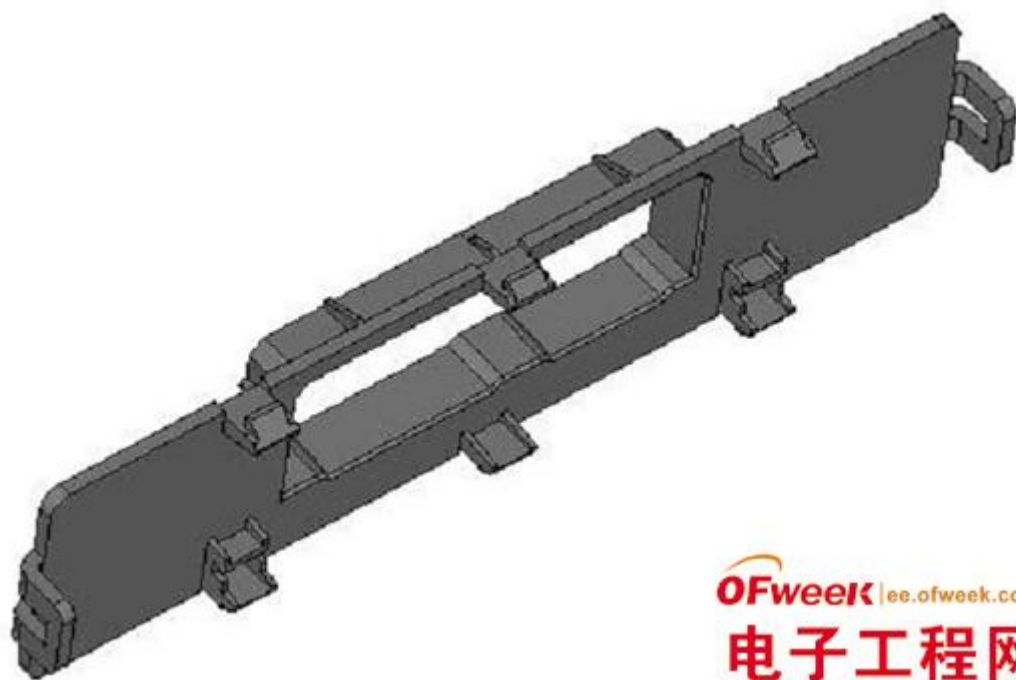


图 2 上壳体的修正模型

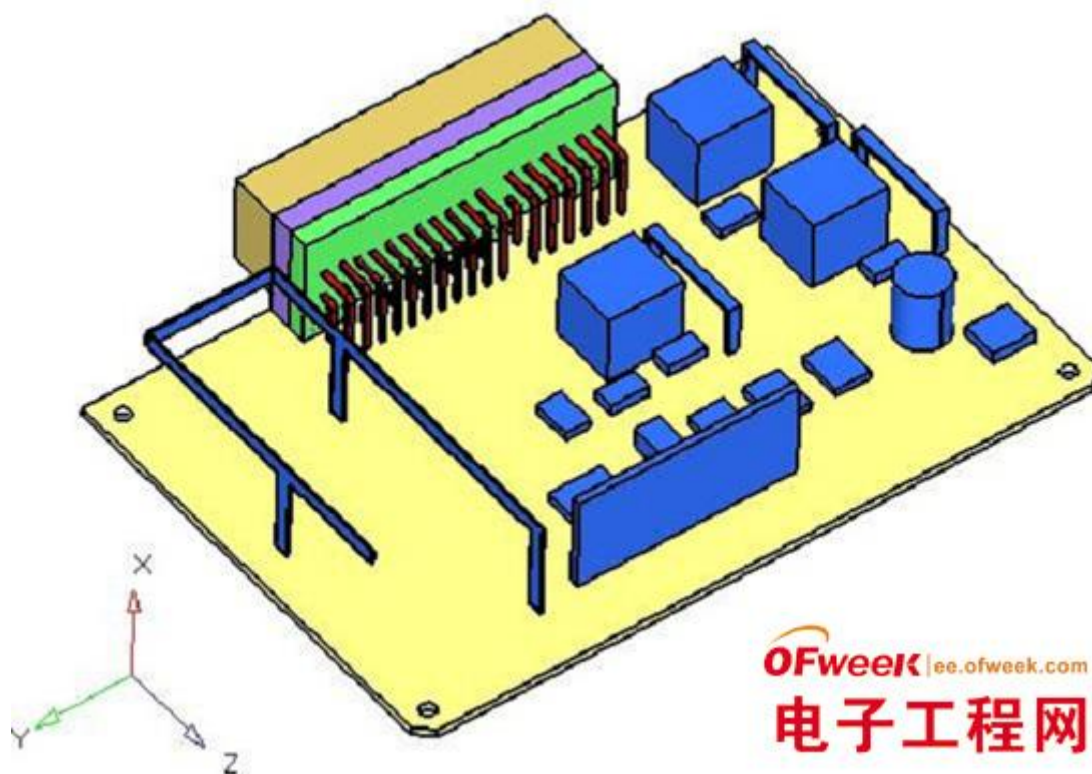


图 3 PCBA 的修正模型



图 4 下壳体的修正模型

3 有限元建模和仿真计算

3.1 几何模型修正

在实际工作中发现，几何模型修正的好坏决定着网格质量的好坏。对复杂的模型来说，不修正几何模型，会增加奇异单元的数目和单元的总数目，导致仿真分析周期变长，分析成本变大，甚至使仿真分析无法进行。该控制器的 PCBA 上有成百上千个微小的孔和器件，壳体上有过密的硬点和线以及微小的倒圆角等，如果不修正几何模型，在中等配置的 HP 工作站上无法完成分析。所以在划分网格前，先对该控制器的几何模型进行修正。几何模型修正工作包括：去掉较小的倒圆角和圆孔；隐藏过密的曲线和硬点；切分不规则的几何体；忽略微小电器件等。该控制器修正后的几何模型如图 2、图 3、图 4 所示。

3.2 有限元网格划分和单元类型选择

控制器的各部件均采用 3D 实体单元建模。其中 PCBA 由电路板、电容、电阻、天线、小电路板、插件，插针等部件组成，这些部件的形状较规则，采用一阶六面体单元建模，单元类型为 C3D8R，需进行沙漏控制。上、下壳体的形状比较复杂，用二阶四面体进行建模，单元类型为 C3D10M。模态分析时，不要使用一阶四面体单元，因为一阶四面体单元刚性偏强，容易导致模态频率偏大（下文将会给出验证）。根据这些原则划分的网格如图 5、图 6、图 7、图 8 所示。

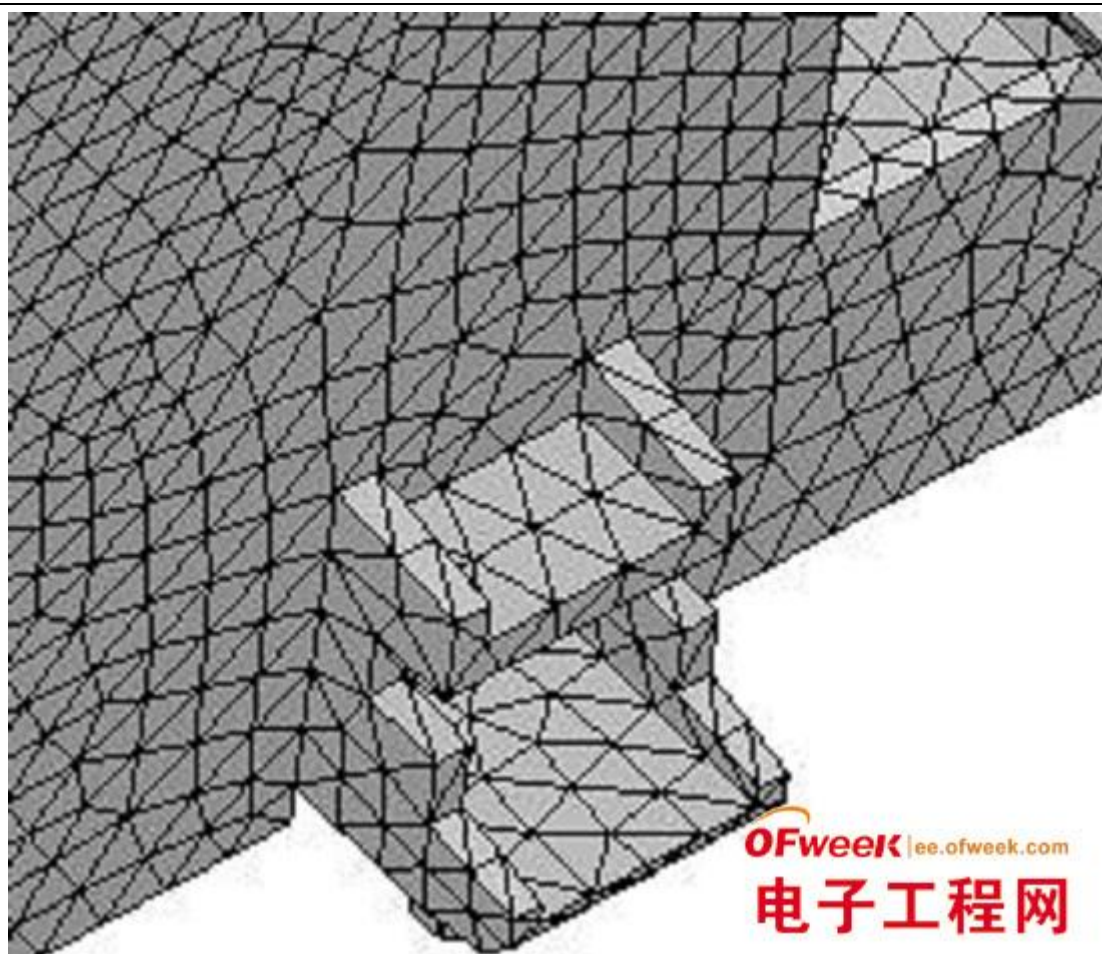


图 5 上壳体的局部网格图

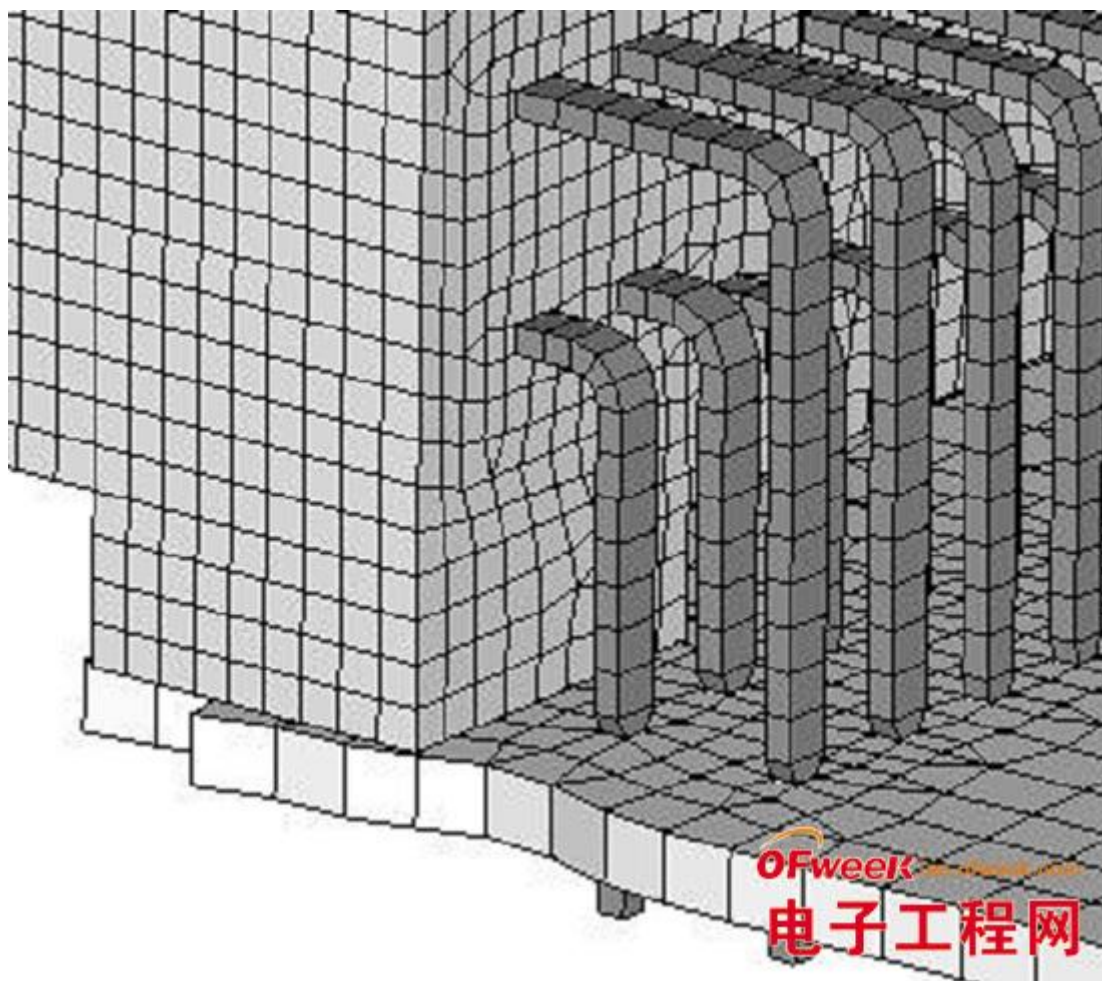


图 6 插件和 PCB 的网格图

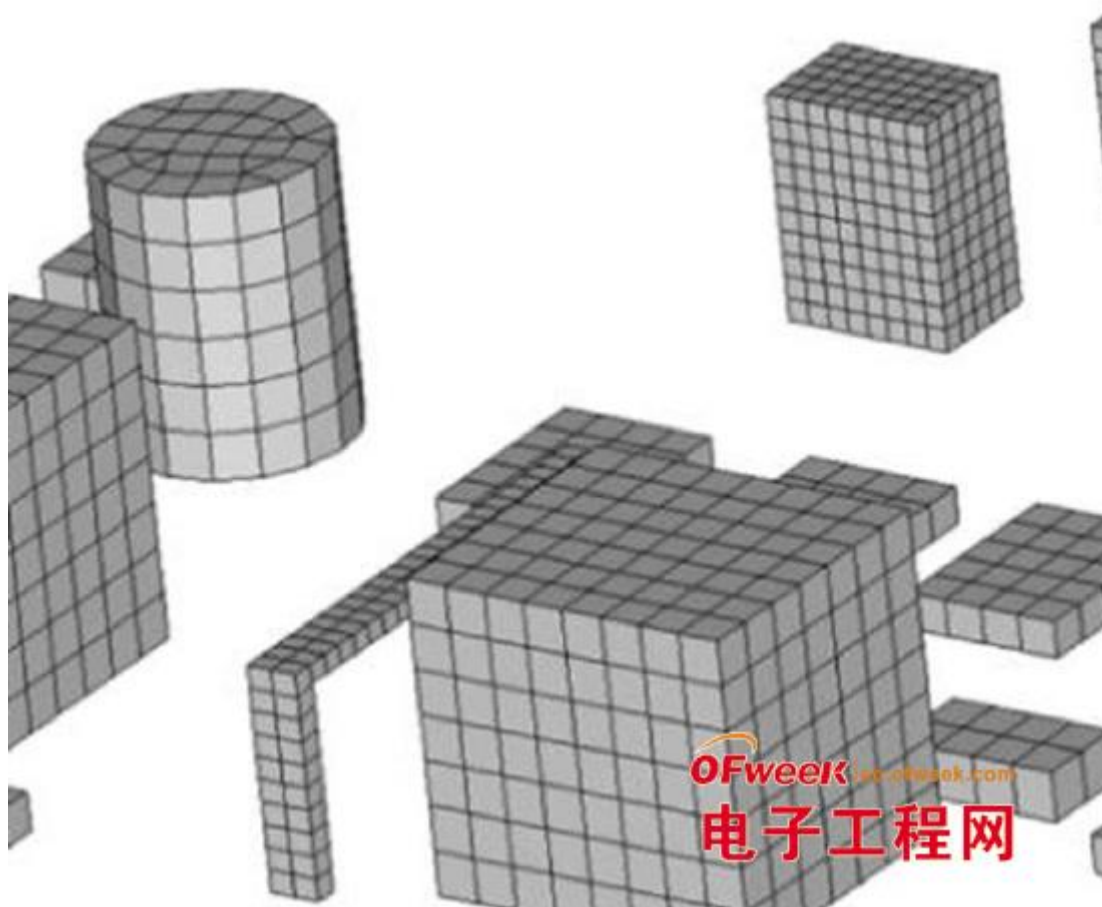


图 7 电容、芯片的网格图

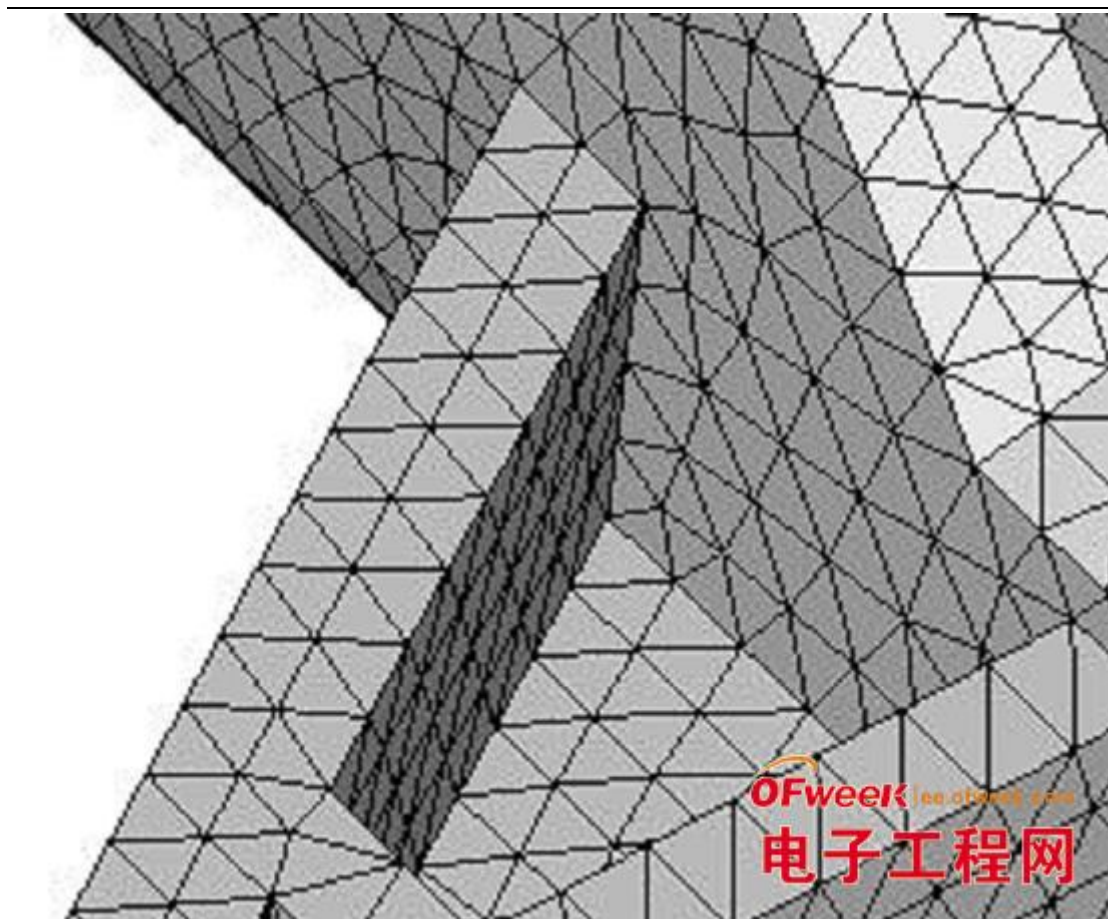


图 8 下壳体的局部网格图

3.3 边界条件设定

对该控制器进行约束模态分析时,需固定安装孔内侧面上的所有节点。上壳体的卡槽与PCBA的间隙为零或者过盈配合的部分用Tie命令进行面对面的粘贴;下壳体的滑道和卡槽与PCBA的间隙为零或者过盈配合的部分用Tie命令进行面对面的粘贴;PCB上的较小的电容、电阻及芯片等器件与PCB直接进行面对面粘贴;为避免局部刚度过大对频率和振型造成影响,把较大的电容、电阻、芯片及接插件等电器件的针脚位置的单元与PCB进行粘贴。后文中比对了较大电器件的针脚位置的单元粘贴到PCB上的粘贴方式与面对面直接粘贴到PCB上的方式对PCBA模态频率的影响。证实了把较大电器件的针脚位置的单元粘贴到PCB上的粘贴方式更优越。

3.4 材料参数

该型汽车电子控制器实物的总重205.4克,其中PCBA重为100.1克,壳体重为105.3克,有限元模型总重为204.9克,其中PCBA模型重为99.5克,壳体模型重为103.9克,实物和有限元模型重量的相对误差为1.0%。为了简化计算,认为电路板具有一种等效材料参数,该等效参数是通过PCB光板的拉伸试验和测量对其测密度得到的。同样认为较大的电器件也具有一种等效材料参数,其弹

性模量和泊松比是参考普通芯片的材料得到的，密度是由芯片的总重量除以总体积得到的。各个部件的材料参数如表 1 所示。

部件名称	材料	弹性模量	泊松比	密度
壳体	PC2200	2200	0.26	1.29e-9
电路板	等效参数	20000	0.26	2.1e-9
天线	钢	210000	0.3	7.8e-9
插件针脚	钢	210000	0.3	7.8e-9
插件塑料	PA6+GF30	9500	0.28	1.36e-9
较大器件	等效参数	100000	0.3	2.5e-9

注：单位制为 (MPa, mm, s)

表 1 各部件的材料参数

3.5 仿真分析结果

利用 Abaqus 软件对该汽车电子控制器进行约束模态分析，得到的前三阶模态频率和模态振型如图 9、图 10、图 11 所示。第一阶固有频率为 172Hz, 第一阶振型为控制器沿两个安装耳中心点连线的前后振动；第二阶固有频率为 262Hz, 第二阶振型为控制器壳体上下面的相向的凸凹振动；第三阶固有频率为 293Hz, 第三阶振型为控制器壳体上下面的相对的凸凹振动。

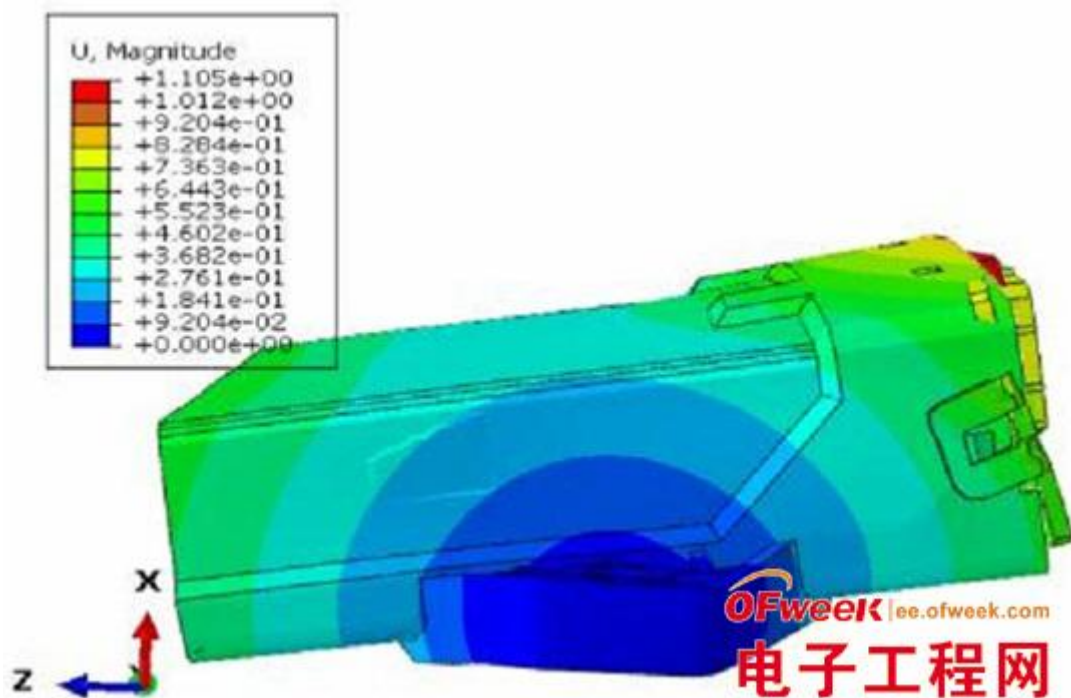


图 9 第一阶频率: 172Hz

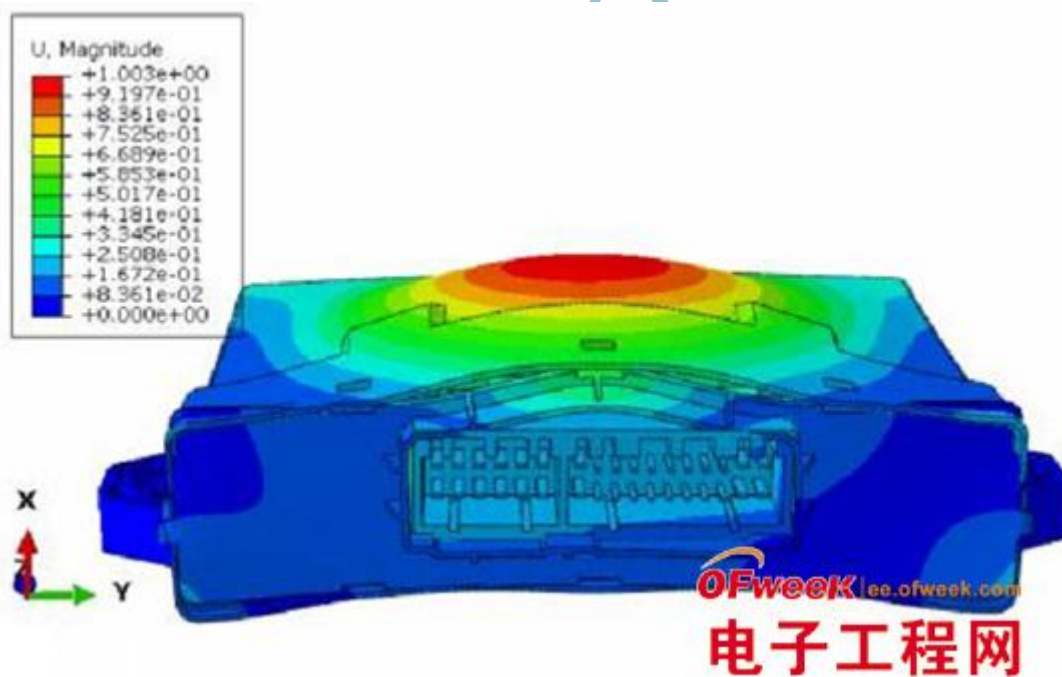


图 10 第二阶频率: 262Hz

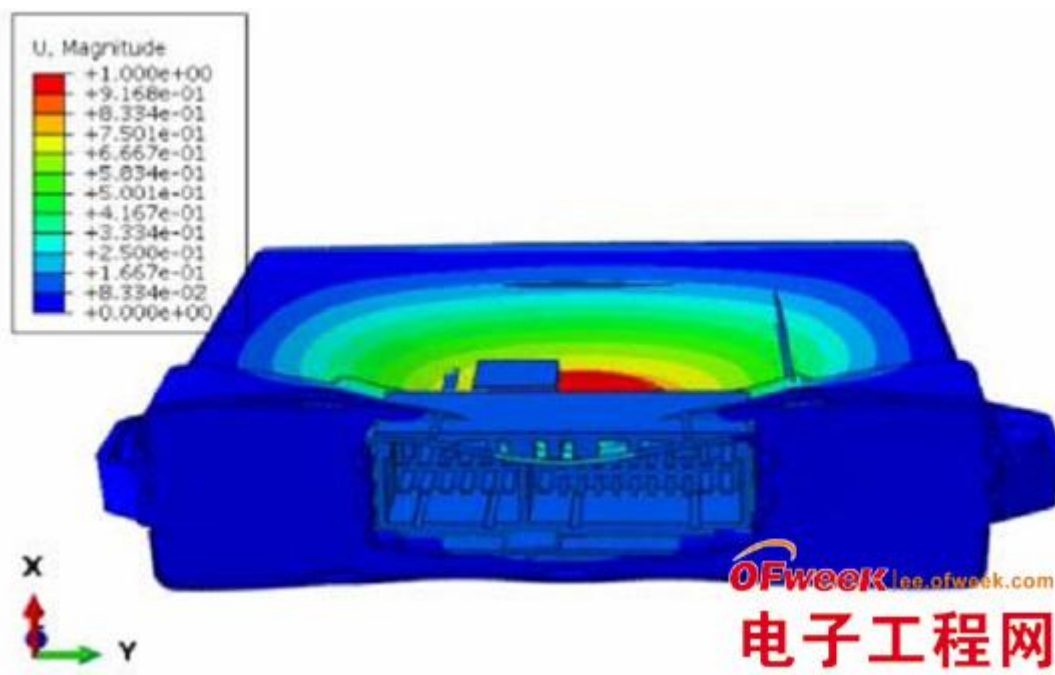


图 11 第三阶频率：293Hz

4 模态实验过程及结果

4.1 模态试验过程

利用美国 PCB 公司的压电式力锤和压电式加速度计进行激励、拾振。然后用 LMS TEST.LAB 试验采集分析系统进行数据采集和分析。试验设置为，采样频率为 2048Hz, 采样带宽为 1024Hz, 频率分辨率为 0.125Hz, 激励用力窗，响应是指数窗。

汽车电子控制器通过两个安装孔固定在基频大于 500Hz 试验台上。采用了 5 传感器布置方案（图 12）进行模型试验。参照仿真分析结果发现，该传感器布置方案漏掉了第一阶扭转模态。而采用 8 传感器的布置方案（图 13）能测得第一阶扭转模态。

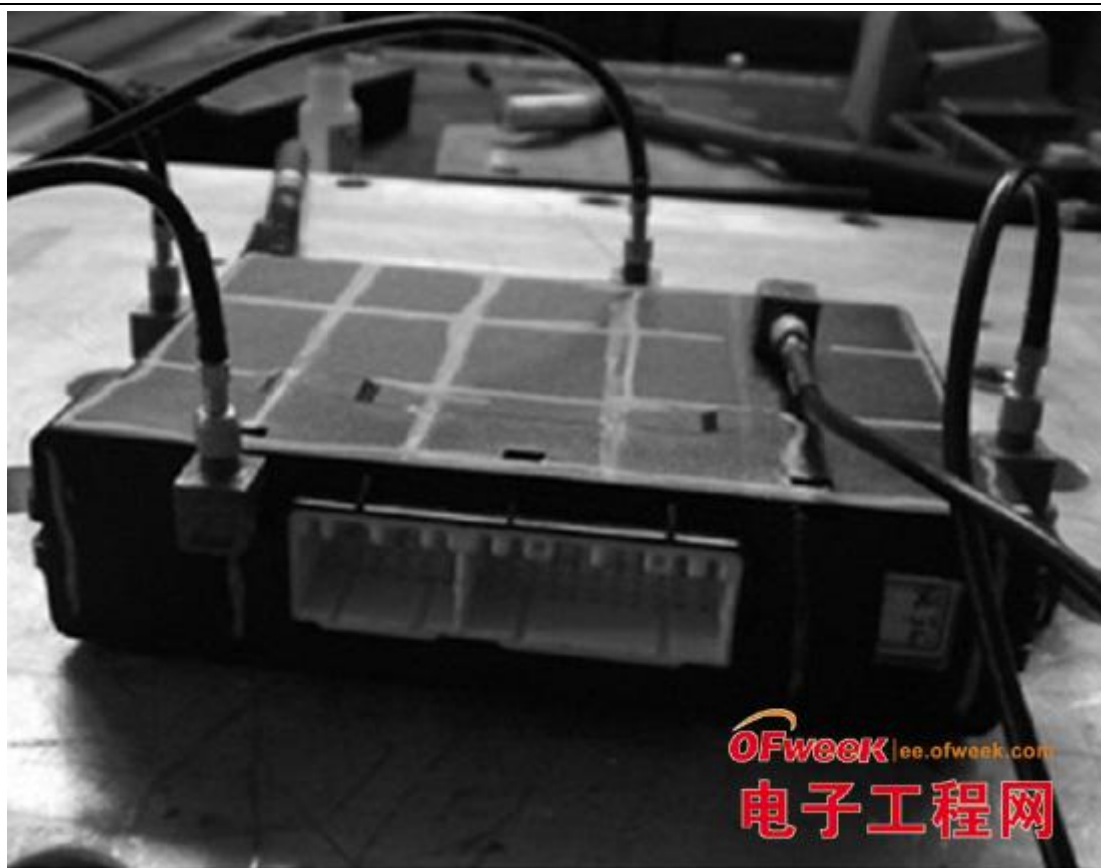


图 12 传感器的布置方案

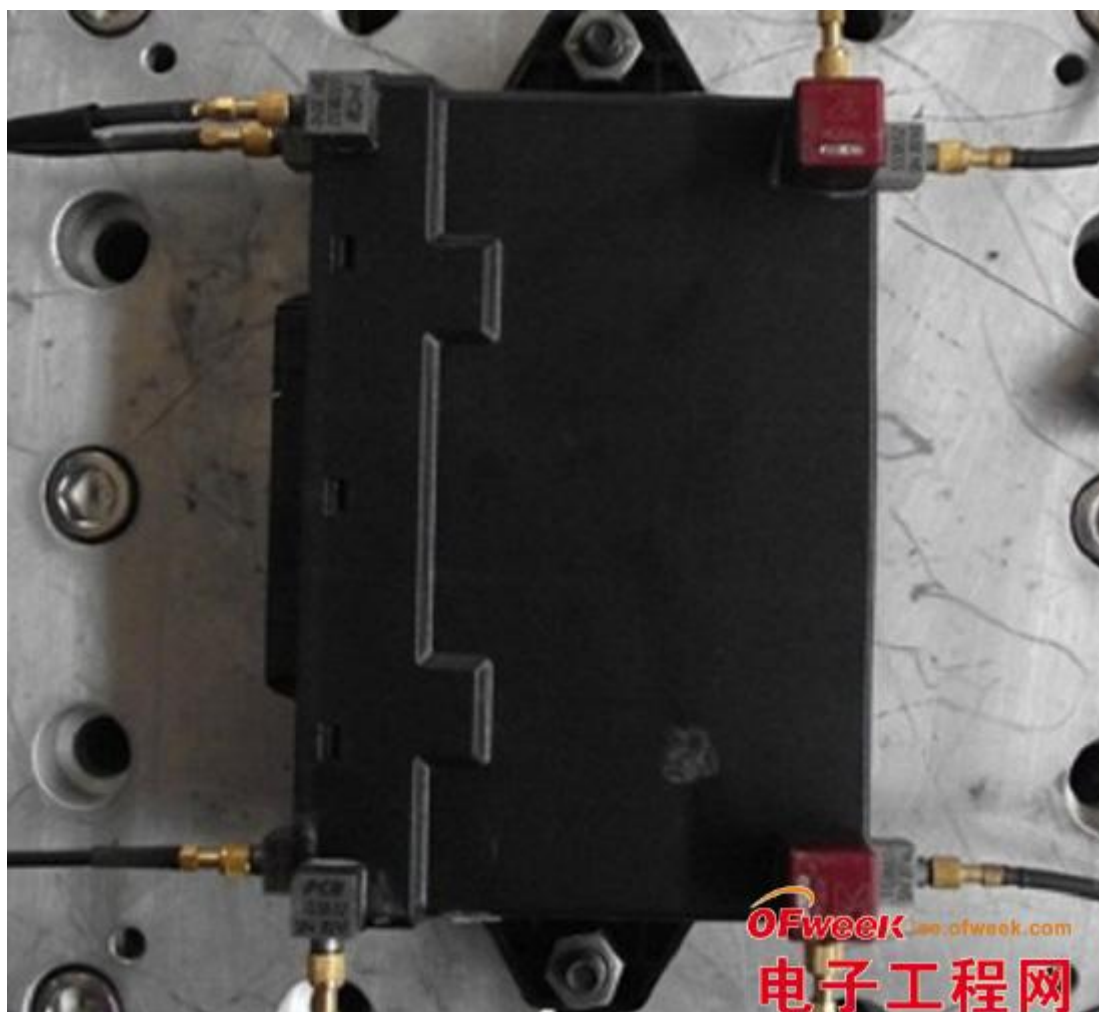


图 13 8 传感器的布置方案

4.2 典型的实验结果

在 5 传感器的试验中，若干点的频率响应函数如图 14 所示。随意选取一个测试点的相干函数如图 15 所示。在有效带宽的范围内，相干函数接近 1, 可以判定频率响应函数的可信度比较高。在 8 传感器的试验中，若干点的频率响应函数如图 16 所示。

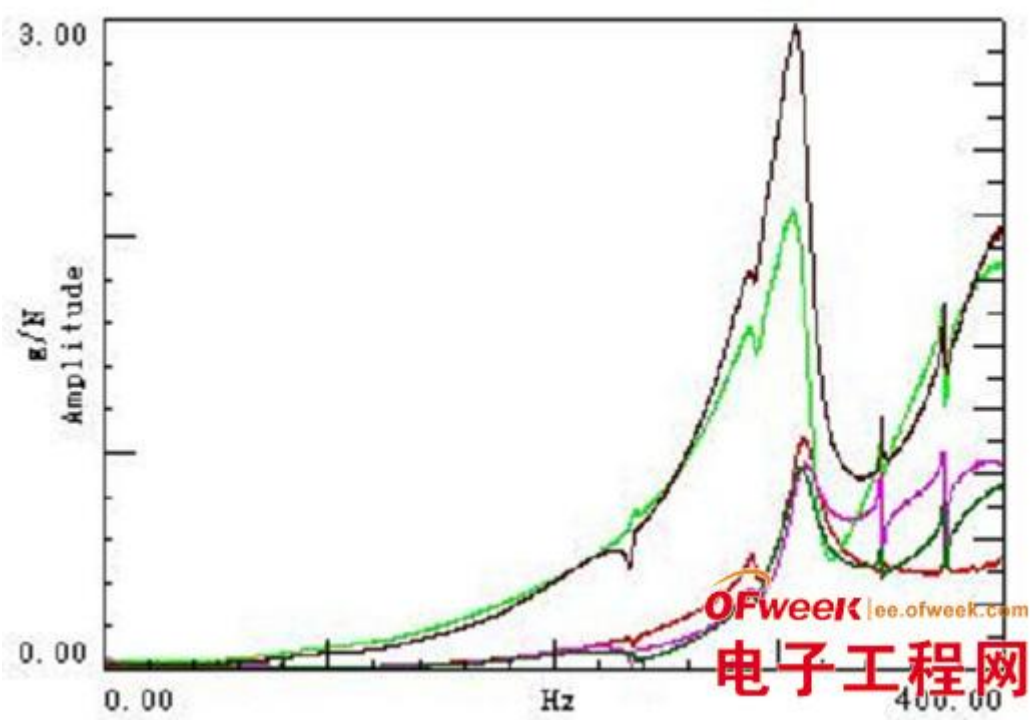


图 14 若干点的频响函数

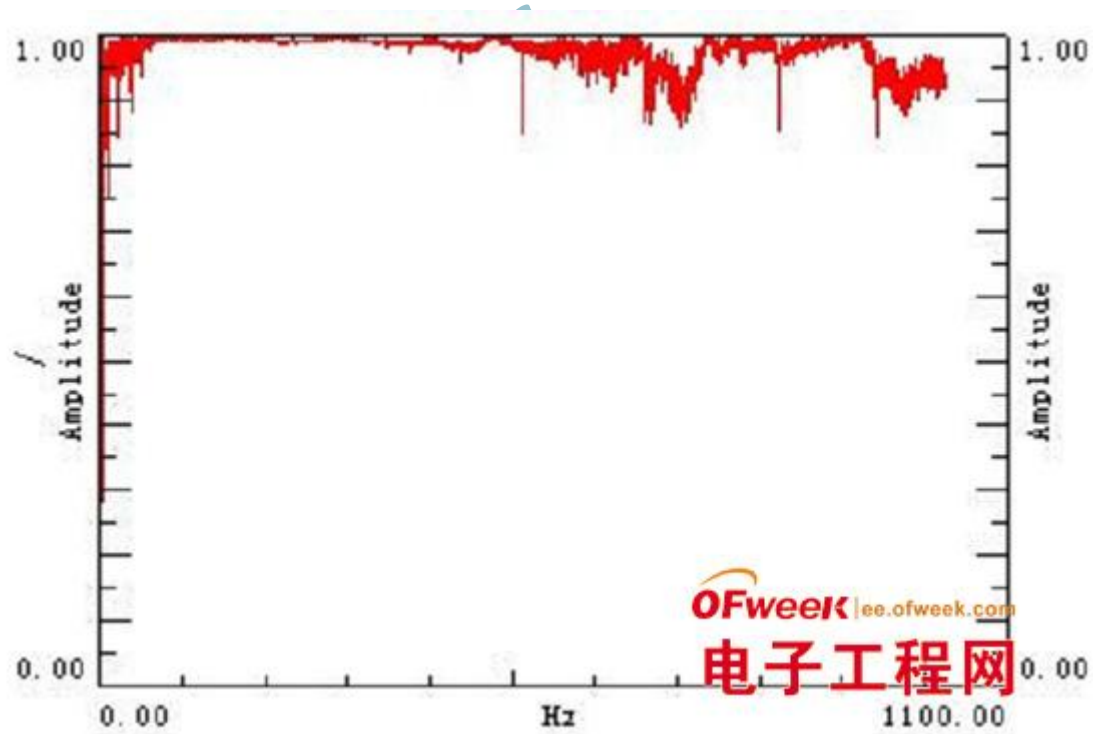


图 15 典型相干函数

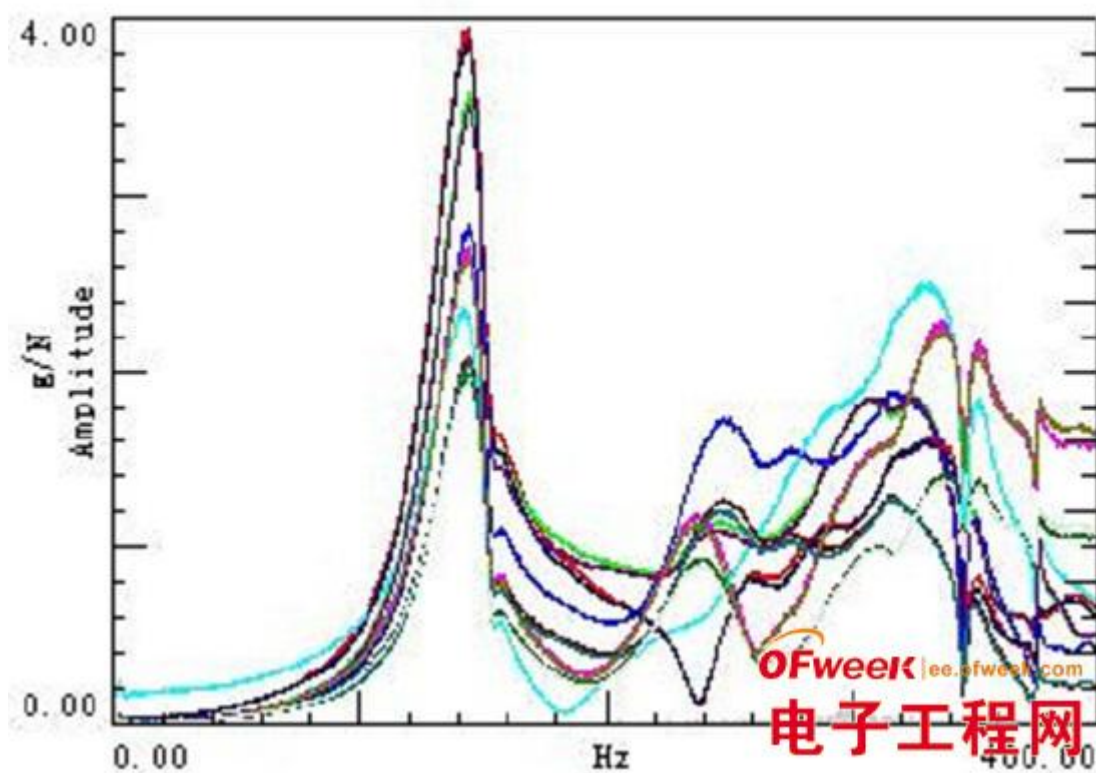


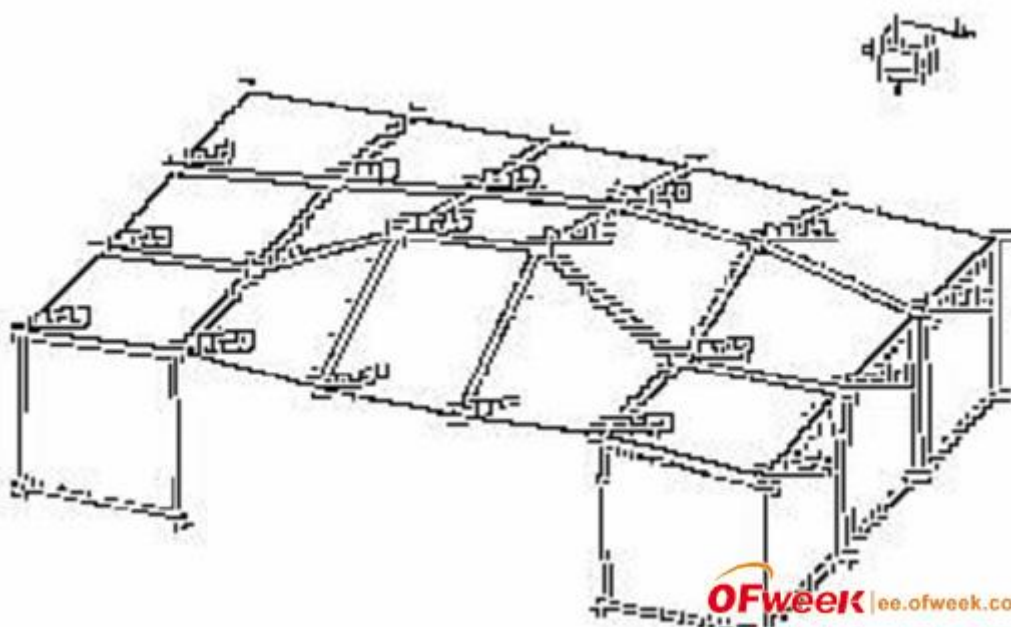
图 16 若干点的频响函数

利用 LMS TEST.LAB 软件中的 Time MDOF 方法进行模态参数分析。根据所有测试点的频率响应函数之和建立稳态图，然后判定真实的模态频率、阻尼和参预因子。利用该方法测得的该控制器的前三阶模态频率和振型如图 17-19 所示。



OFweek | ee.ofweek.com
电子工程网

图 17 第一阶模态: 146Hz



OFweek | ee.ofweek.com
电子工程网

图 18 第二阶模态： 236Hz

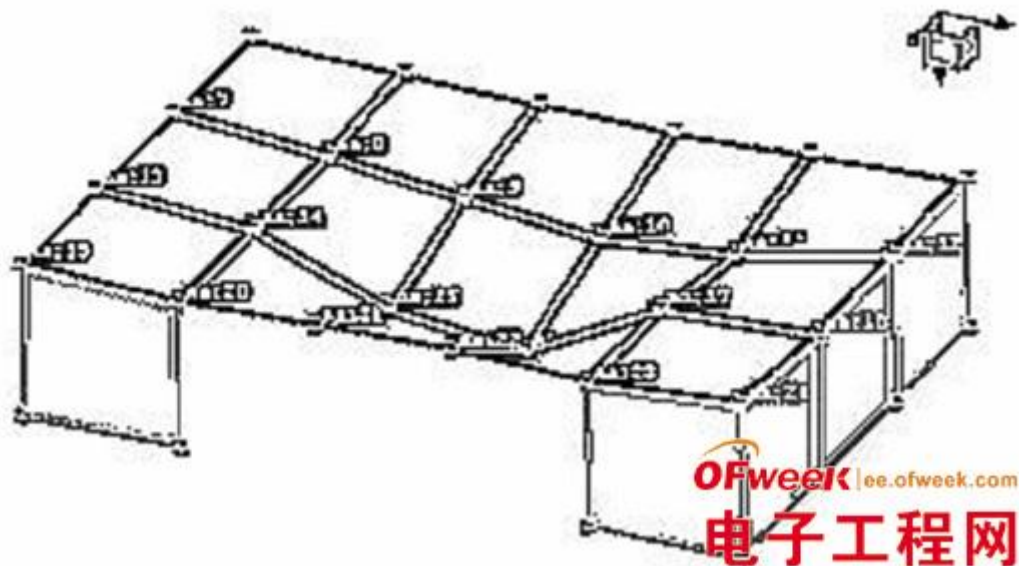


图 19 第三阶模态： 287Hz

5 计算和试验结果对比及分析

5.1 仿真和试验结果对比

对比仿真分析和试验得到的前三阶振型，发现振型匹配很好；对比前三阶频率，发现最大相对误差将近 20%，如表 2 所示。根据以上对比结果，可以判定该试验结果和仿真结果存在很大的误差。为了验证仿真分析方法是否可行，后文中将会对造成误差的原因进行分析。

	第一阶	第二阶	第三阶
试验结果 (Hz)	146	236	287
仿真结果 (Hz)	172	262	293
绝对误差	26	26	5
相对误差	17.8%	11%	1.7%

OFweek 电子工程网

表 2 仿真结果与试验结果的对比表

5.2 传感器重量的影响分析

单个传感器的重量为 5 克，控制器上布置多个传感器时会引入很大的附加质量。于是在有限元模型中添加传感器的模型，并在考虑单元类型等因素的前提下，重新进行模态仿真分析，算得的固有频率和固有振型如图 20~图 22。

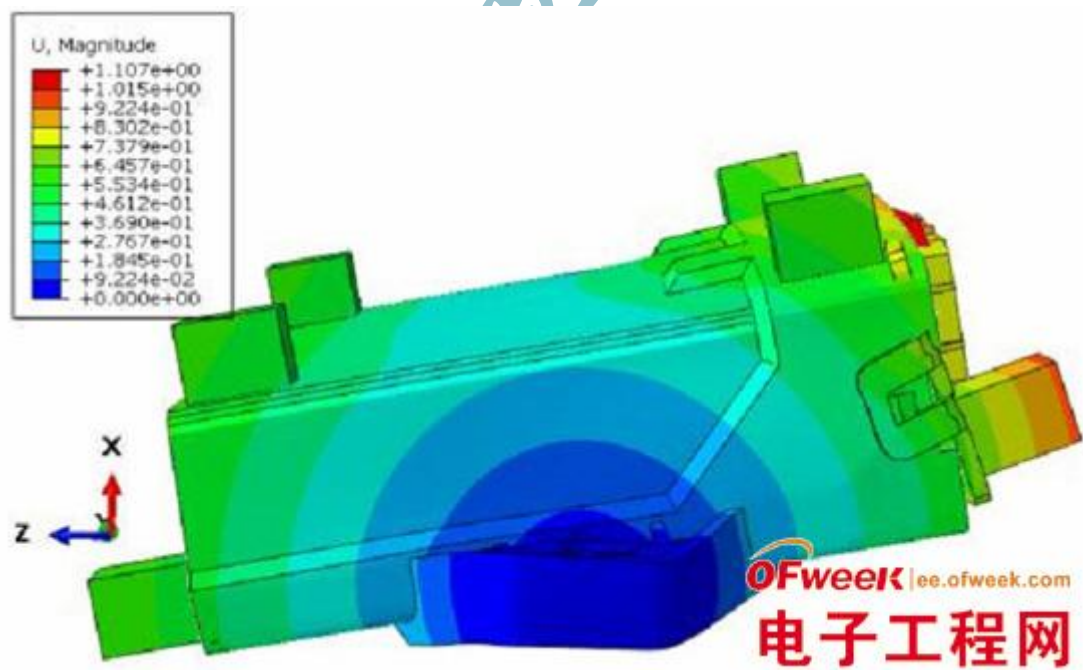


图 20 带传感器的第一阶模态：149Hz

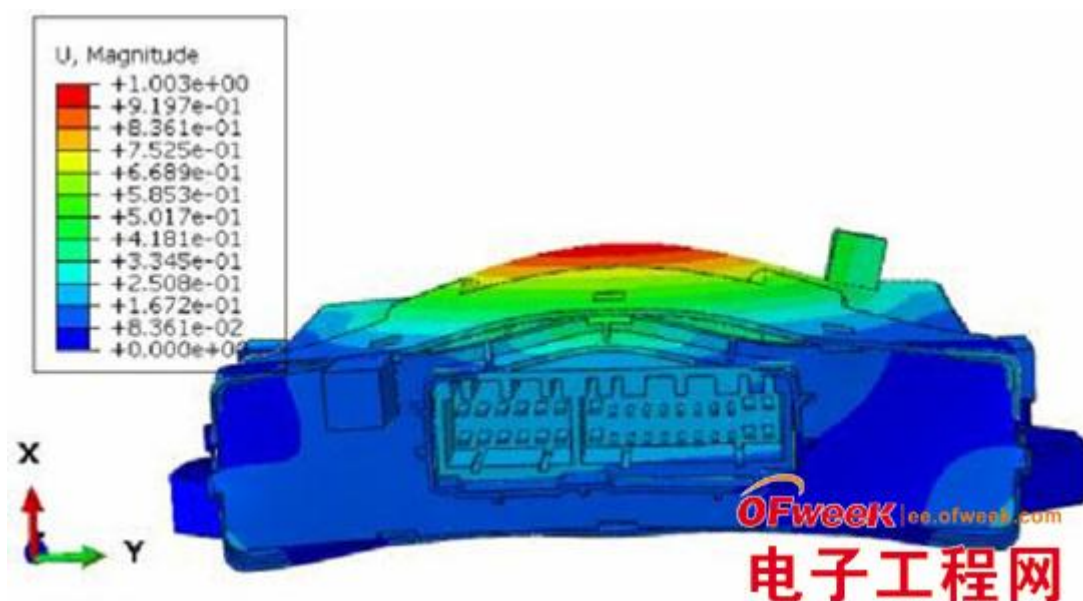


图 21 带传感器的第二阶模态：252Hz

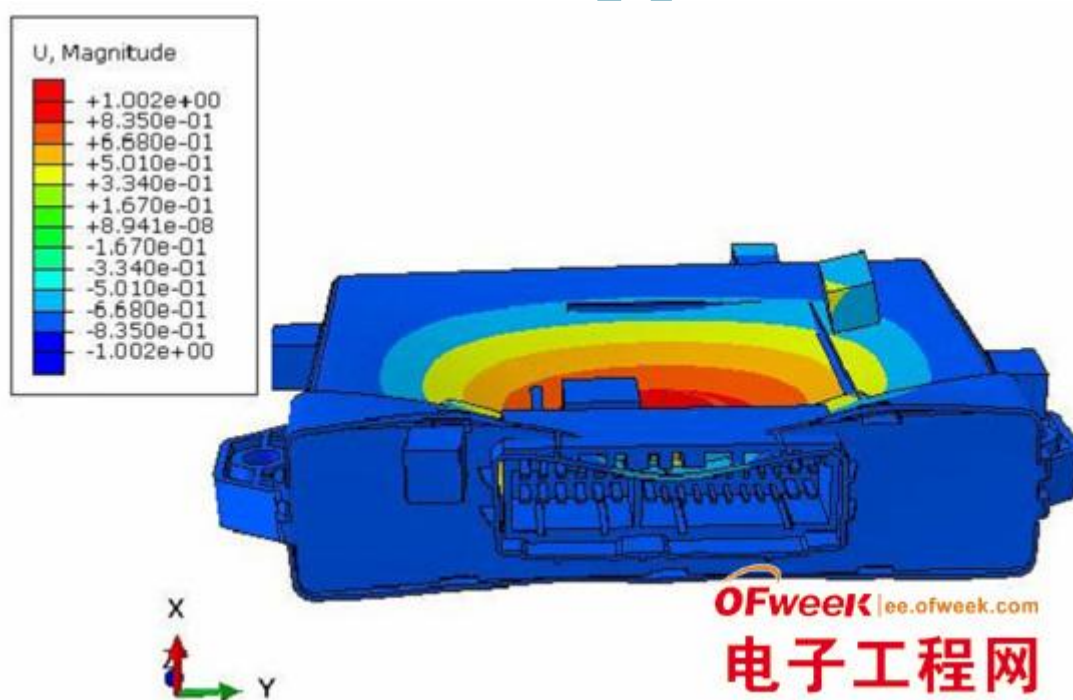


图 22 带传感器的第三阶模态：291Hz

对比修正仿真分析和试验得到的前三阶振型，发现振型匹配很好；对比的前三阶频率，发现最大相对误差保持在 6.8% 以下，如表 3。根据以上分析结果，可以判定传感器的重量是造成试验和仿真误差过大的主要原因。考虑传感器影响时，

仿真分析的可信度能够达到 93%以上，根据工程实际对可信度的要求，可以判定该仿真结果是控制器模态的真实反映。

	第一阶	第二阶	第三阶
试验结果 (Hz)	146	236	287
仿真结果 (Hz)	149	252	291
绝对误差	3	16	4
相对误差	2.1%	6.8%	1.4%

表 3 考虑传感器的仿真结果与试验结果的对比

5.3 单元类型的影响分析

本小节对一阶四面体单元是否适合在模态分析中使用进行验证。一阶四面体单元具有四个节点，边是直线，面是平面，加载变形后边和面仍要保持直线和平面。二阶四面体单元由十个节点，边可以是曲线，面可以是曲面，加载变形后边和面可以是曲线和曲面。所以用一阶四面体单元组成的网格模拟真实复杂的变形和应力场，具有一定的局限性。使用一阶四面体单元和二阶四面体单元对控制器下壳体进行约束模态分析。对比两种情况下算得的前三阶振型，发现振型一致；固有频率结果如表 4，对比表 4 中的数据，发现用一阶四面单元算得的前三阶模态频率比二阶四面体单元算得的前三阶模态频率都要高，并且一阶四面体单元算得的模态频率更偏离实验结果。所以模态仿真分析不能使用一阶四面体单元。

	第一阶	第二阶	第三阶
试验结果 (Hz)	146	236	287
二阶单元 (Hz)	149	252	291
一阶单元 (Hz)	172	265	307

表 4 一阶四面体单元和二阶四面体单元对比

5.4 粘贴方式的影响分析

电器件直接面对面粘贴到 PCB 上的方式相比电器件针脚位置的单元粘贴到 PCB 上的方式会增大 PCBA 的局部刚性，对 PCBA 的自由模态有一定的影响。进行两种粘贴方式下的 PCBA 的自由模态分析，得到的模态频率如表 5。对比两种粘贴方式下的模态频率发现，电器件直接面对面粘贴的方式的 PCBA 模态频率偏大，证明了较大电器件直接面对面粘贴到 PCB 上的粘贴方式增大了 PCBA 的局部刚性，使得模态频率变大。

	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶
直接粘贴 (Hz)	277	298	366	390
针脚粘贴 (Hz)	270	288	364	389
绝对误差	7	10	2	1
相对误差	2.5%	3.4%	0.6%	0.3%

表 5 直接面粘贴和针脚位置单元粘贴对比

6 结论

本文利用有限元软件对某型汽车电子控制器进行了模态仿真的分析，并用模态实验验证了模态仿真分析结果的可信度，得到以下结论有：首先，高质量的网格是仿真分析顺利进行的保障，并且能缩短仿真分析周期，要得到高质量的网格需去掉较小的倒圆角和圆孔，隐藏过密的曲线和硬点，切分不规则的几何体，忽略微小的电器件等；其次，对该类控制器进行了模态仿真分析时，不要使用一阶四面体单元，否则会导致模态频率偏大，可以使用一阶六面体单元（对其进行沙漏控制）和二阶四面体单元；最后，对该类控制器进行了模态仿真分析时，较大的电容、电阻、芯片及接插件等电器件不能直接面对面粘贴到 PCB 上，否则会增大 PCBA 的局部刚性，可以把较大的电容、电阻、芯片及接插件等电器件的针脚位置的单元粘贴到 PCB 上。总之，按照文中的仿真建模方法既能提高计算效率又能保障计算结果有 93%以上的可信度。