

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.01.004

机夹式球头铣刀有限元及试验模态分析*

张 宪,周浩东,王扬渝,王慧强,沈 斌

(浙江工业大学 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 310032)

摘要:针对加工过程中机夹式球头铣刀振动控制和铣削稳定性优化等问题,基于通用有限元软件 ABAQUS 建立了机夹式球头铣刀的有限元模型,对其模态特性进行有限元分析,给出了前 6 阶固有频率和振型;同时采用锤击激振法对球头铣刀进行了模态试验,应用模态参数识别的新技术 PolyMAX 方法对试验结果进行了处理,获得了模态参数识别稳态图,拾取了可能的模态频率,并将所得试验结果与有限元模态分析结果作了比较,计算了仿真值与试验值之间的误差,分析了出现误差的主要原因。研究结果表明,有限元模态分析结果与模态试验结果相吻合,模态频率误差在 13% 以内,较好地反映了结构的物理特性,同时验证了有限元模型的合理性,分析结果为球头铣刀振动控制和铣削稳定性研究提供了依据。

关键词:球头铣刀;有限元;试验模态分析;PolyMAX

中图分类号:TH122;TG54

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)01-0015-06

Finite element and experimental modal analysis of clip-type ball end mill

ZHANG Xian, ZHOU Hao-dong, WANG Yang-yu, WANG Hui-qiang, SHEN Bin

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: Aiming at the vibration control of chip-type ball end mill and the optimization of milling stability in the machining process, based on the general finite element analysis (FEA) software ABAQUS, FEA model of ball end mill was established, modal characteristics of ball end mill were analyzed by FEA method, and then six extended natural frequency and modal shape were given. Meanwhile hammer excitation method was adapted to conduct modal experiment, modal parameter identification method for new technology PolyMAX was applied to deal with the experimental result, the stabilization chart of modal parameter identification was obtained, the possible modal frequencies were picked, and modal experimental results were compared with the FEA result. The results indicate that the FEA results are in accordance with modal experimental results, error of modal frequency is within 13%, the physical properties of the structure are reflected preferably, and the rationality of the finite element model is validated. The analytical results can provide a basis for vibration control and milling stability study for ball end mill.

Key words: ball end mill; finite element; experimental modal analysis; PolyMAX

0 引 言

球头铣刀是在立铣刀的基础上发展起来的,在制造业(尤其在模具生产行业)中应用广泛,可用于加工涡轮、冲模、压膜、飞机零件,以及具有复杂外形的产品等,

是数控加工复杂曲面(尤其是自由曲面)的重要刀具。球头铣刀铣削工艺在大型淬硬钢模具加工中有着重要的应用,采用球头铣刀铣削多硬度拼接淬硬钢材料^[1]时,振动对加工系统稳定性的影响尤为突出。因此,对球头铣刀动态特性进行分析,了解结构本身具有的固有

收稿日期:2013-08-27

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)重点资助项目(2009AA044302);浙江省科技厅公益性技术应用研究计划资助项目(2012C31017);黑龙江省高校重点实验室开放基金资助项目(2012DJ-002)

作者简介:张 宪(1954-),男,山东临邑人,教授,硕士生导师,主要从事精密抛光技术、小型农业作业机方面的研究. E-mail: xianzh168@126.com

频率和振型,有效地避开切削共振区的影响,对减小加工振动、提高铣削效率及保证铣削加工质量非常必要。

模态分析法是一种非常有效的动态分析方法,包括理论模态分析和试验模态分析。目前国内很多学者进行了模态分析方面的研究,高庆伟等^[2]用 ANSYS 有限元软件对二刃球头铣刀进行了模态分析,发现其一阶固有频率离铣刀在外力作用下的振动频率较远,加工中不会发生共振现象;张国梁等^[3]应用有限元方法分析了直齿圆柱木工铣刀的振动特性;石岚等^[4]应用有限元模态分析方法对不同直径的硬质合金立铣刀在不同的刀具悬伸长度情况下进行了模态分析,得出铣刀悬伸长度为铣刀全长的 50% ~ 60% 左右为较优的工艺参数;黄建建等^[5]对加工中心工作台进行了有限元模态分析和实验模态分析,并利用验证后的有限元模型对其进行了结构优化;聂勇军等^[6]利用有限元模态分析得到了桁架结构的低阶固有频率和振型,并进行了试验模态分析,验证了有限元分析的准确性;张立彬等^[7]应用 LMS Test. Lab 测试系统,对 JSX5D 小型农业机进行了模态试验与分析,得到了其固有频率、阻尼比及相应的振型等模态参数。

本研究采用有限元分析与试验模态分析相结合的方法,应用 ABAQUS 软件建立球头铣刀的有限元模型并进行了有限元模态分析,并采用锤击激振法对球头铣刀进行试验模态分析,利用模态参数识别的新技术 PolyMAX 方法^[8-12]对试验结果进行处理,并将两者对比以验证有限元模型的有效性。

1 模态分析理论

对于一般多自由度的结构系统而言,任何运动都可以由其自由振动的模态来合成。模态分析的本质为求解具有有限个自由度的无阻尼及无外载荷状态下的运动方程的模态矢量。

将球头铣刀结构近似看作是线性系统,球头铣刀运动微分方程如下:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (1)$$

式中: $[M]$, $[C]$, $[K]$ —系统质量、阻尼及刚度矩阵; $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$ —结构的加速度向量、速度向量、位移响应向量; $\{F\}$ —系统所受外力向量; $[M]$, $[K]$ —实数对称矩阵; $[C]$ —非对称矩阵。

因此,运动微分方程为耦合方程,模态分析就是以无阻尼的各阶主振型所对应的模态坐标来代替物理坐标,使得微分方程解耦,变成各个独立微分方程。

若无外力作用时,则得到系统的自由振动方程。在求解结构自由振动的固有频率和振型时,因结构的

阻尼对其模态频率及振型的影响很小,可以忽略,式

(1)可化为无阻尼自由振动的矩阵表达式:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (2)$$

式(2)是常系数线性齐次常数微分方程组,其解的形式为:

$$X = \delta \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

式中: δ —各点振幅, ω —圆频率, θ —相位角。

将式(3)代入式(2),可得:

$$(K - \omega^2 M)\delta \sin(\omega t + \theta) = 0 \quad (4)$$

结构在自由振动时各点振幅 δ 不全为 0,因此式(4)中括号内矩阵的行列式之值必为 0,由此得到结构的自振频率方程,即:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (5)$$

结构的刚度矩阵 $[K]$ 和质量矩阵 $[M]$ 均为 n 阶方阵,其中 n 为节点自由度的数目,所以式(5)是关于 ω^2 的 n 次方程,解该方程,可得结构的 n 个固有频率; ω^2 为广义特征值,对应于每一个固有频率。由式(5)可以确定一组各节点的振幅值,工程上成为振型。因此,通过求解式(5)就可求得系统的固有频率和相应的振型。

2 基于 ABAQUS 的球头铣刀有限元分析

球头铣刀有限元模态分析的建模方法主要是指把球头铣刀作为一个弹性系统,运用有限元方法对球头铣刀进行离散,建立系统特征值问题的数学模型,用各种近似方法求解系统特征值和特征矢量,解得的特征值和特征矢量即为系统的固有频率和固有振型矢量。

2.1 球头铣刀有限元建模

铣削加工中采用日本戴杰 RNMM-200105S-S20C 刀杆及 RNM-200-R03 涂层硬质合金两刃机夹式球头铣刀,该铣刀规格为 $\varnothing 20 \times 200 \text{ mm}^2$,前角 0° ,后角为 22° ,螺旋角为 30° ,材质为硬质合金,其弹性模量为 600 GPa,泊松比为 0.3,密度为 $15\,000 \text{ kg/m}^3$ 。针对 ABAQUS 软件实体建模功能相对薄弱的缺点,首先在三维建模平台 Pro/E 软件中建立球头铣刀简化后的几何模型,如图 1(a)所示,图中把球头铣刀刀杆与刀片作为一个整体,忽略了它们之间的螺栓联接,以及忽略刀柄上的倒角。应用 Pro/E 与 ABAQUS 的接口将建立好的球头铣刀几何模型导入有限元软件 ABAQUS,并进一步对其材料物理参数进行设置。球头铣刀单元类型采用 8 节点六面体减缩积分实体单元 C3D8R 单

元。由于球头铣刀刀片上存在切削刃,几何拓扑不适合直接六面体单元划分,本研究预先将球头铣刀分割,分割后形状较规则的上刀杆和下刀杆使用结构化网格划分技术生成高质量的六面体单元网格,铣刀刀片由于存在较复杂的螺旋曲面,本研究采用自由网格划分技术对其进行四面体网格划分,建立球头铣刀的 ABAQUS 有限元网格模型如图 1(b)所示,该模型总共包含 52 737 个单元和 29 547 个节点。

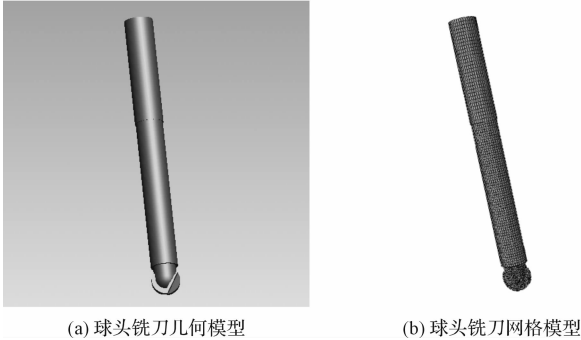


图 1 球头铣刀有限元模型

2.2 边界条件及模态求解

球头铣刀的边界条件是铣刀的位移约束条件,应根据装夹的实际情况来确定。由于实际加工过程中气动夹头对铣刀的约束发生在铣刀上刀杆的外表面上,刀具与夹头不发生跳动和转动,铣刀的夹持相当于固定端约束,本研究将上刀杆外表面设为全约束。

对球头铣刀进行模态分析时,不必求出全部固有频率和振型,而着重考虑系统工作条件下所涉及的频率,因为通常只有这些阶次的固有频率可能引起铣刀共振。被测加工中心的转速为 $0 \sim 10\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,所以机床的最高工作频率为 166.7 Hz,考虑到多刃铣刀的倍频影响,二倍频为 333.3 Hz,可见球头铣刀在铣削加工时振源频率属低频范围,因此低阶振型对球头铣刀的动态特性起决定作用,故只需对球头铣刀的低阶固有模态进行分析。本研究采用计算精度高、速度快的 Lanczos 算法对球头铣刀进行模态求解,分别输出 $0 \sim 3\,200\text{ Hz}$ 范围内的模态频率和相对应的振型,以确定其结构的振动特性。

2.3 模态结果分析

笔者指定分析类型和分析选项后,求解得到铣刀的前 6 阶固有频率如表 1 所示,并提取相应的模态振型如图 2 所示。

表 1 固有频率值

阶数	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	572.27	572.54	1 196.2	1 197.3	1 991.9	3 116.5

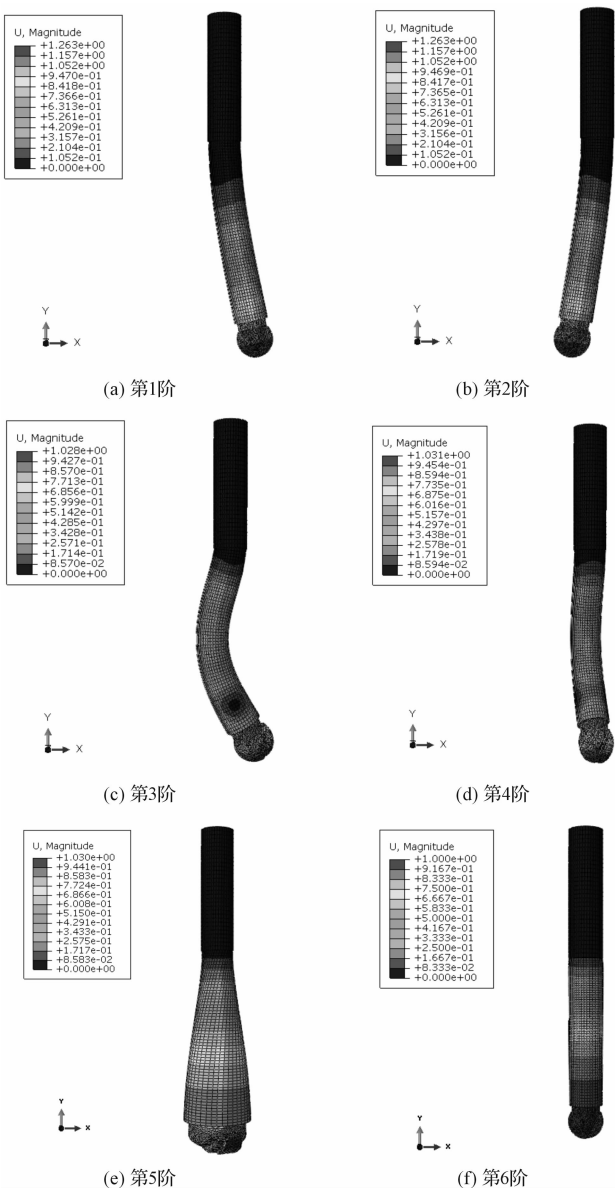


图 2 球头铣刀模态振型

通过有限元模态分析计算可获得该球头铣刀的前 6 阶固有频率,可以发现:第 1、2 阶固有频率几乎相同,频率在 572 Hz 左右;第 3、4 阶固有频率也很相近,集中在 1 197 Hz 附近;第 5 阶频率约为 1 992 Hz,第 6 阶频率为 3 116.5 Hz,两阶模态相隔较远。表 1 所列球头铣刀的模态频率是考虑其工作时运转稳定性的主要因素,当外加激励频率和铣刀的固有频率一致时发生共振,铣刀振幅加剧,引起对工件的加工质量下降。从球头铣刀前 6 阶固有频率值可以看出,球头铣刀的固有频率在 500 Hz 以上,与数控加工中心的工作频率相离较远,故机床在铣削加工时不会引起球头铣刀的共振。

从模态振型图上看,第 1、2 阶振型存在一定的相似性,第 1 阶和第 2 阶振型发生的均为弯曲变形,且最大相对位移均发生在刀尖处,且都为 1.263 mm,存在差

异的是铣刀的振动方向相反;第 3 阶与第 4 阶振型也非常相似,主要表现为弯曲变形,变形最大的位置都在刀尖处,不同的是第 3 阶的变形主要表现在 XY 平面内,而第 4 阶弯曲变形主要发生在 YZ 平面内,同时可以发现刀尖处第 4 阶模态最大位移为 1.031 mm,较第 3 阶最大位移 1.028 mm 稍大;第 5 阶振型为复合振型,球头铣刀在该阶模态下振动时,会产生扭转以及膨胀变形,并且从下刀杆最上端到下刀杆与球头连接处依次变大,最大位移为 1.030 mm,发生在刀柄处,刀尖处变形较小;第 6 阶变形以膨胀为主,但铣刀各处变化较均匀,从振型上看,铣刀没有发生任何弯曲和扭转变形,最大位移发生在刀柄下端及球头刀片上,最大位移为 1 mm,为前 6 阶模型变形最小的一阶。

3 试验模态分析

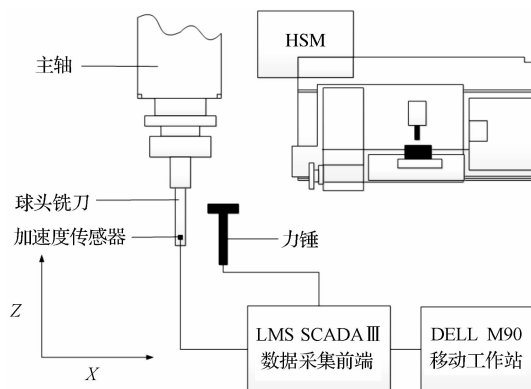
有限元分析方法主要是通过建立有限元模型来模拟实际加工系统,计算结果的可靠性与结构单元的划分、载荷及边界条件模拟实际情况的准确程度有很大关系,其结果最终还要通过实际检验。本研究采用锤激法对球头铣刀进行了试验模态分析,应用 PolyMAX 方法对试验模态进行了处理,并与有限元分析结果作了比较,以确保有限元分析结果的可靠性。

3.1 试验装置及试验方法

试验采用锤击激振法,锤击激振是由带力传感器的力锤敲击结构来实现的,一次可激出被测系统多阶模态,该方法所用仪器少、效率高,而且可以重现试件的振型动画,是一种高效的模态测试技术。

试验采用戴杰 RNMM-200105S-S20C 刀杆及 RNMM-200-R03 涂层硬质合金两刃球头铣刀,在 AVC1200C 精密立式加工中心上进行模态分析。试验所用仪器为比利时 LMS 公司声学及振动测试系统,本研究在此基础上建立的球头铣刀模态试验测试与分析系统如图 3 所示。本研究以刀具上、下运动方向作为 Z 方向,以加工进给方向作为 X 方向建立试验系统笛卡尔坐标系。笔者在球头铣刀的顶端安装了灵敏度为 100 mv/g 的 353B16 型单方向加速度传感器,并且在球头铣刀上共选取 10 个测点,选用 PCB 公司的 086D05 型力锤在选取的激励点上分别进行激励,测试球头铣刀 X 和 Y 方向的加速度响应,以获取刀具自由端的 FRF(频率响应函数)。加速度信号通过导线 002C30 接入数据采集前端。数据前端通过衰减、串扰少、最高传输速率为 100 Mbps 的以太网网线联接至 DELL M90 移动工作站,将数据传输至进行数据处理的 LMS Test. Lab

测试分析软件平台。



(a) 模态试验系统示意图



(b) 模态试验测试分析平台

图 3 模态试验测试与分析系统

由于模态试验中力锤激励球头铣刀导致的高频冲击特性非常明显,该信号需以高采样频率进行数据采集,避免频率混叠。本研究以 25.6 kHz 采样频率对铣削加工过程进行数据采集,通过加权平均方法去除随机误差。同时采集 0 ~ 3 200 Hz 频带宽度内的信号,每数据段采集谱线数为 8 192 线,频率分辨率为 0.39 Hz。

3.2 试验模态结果分析

为使提取后得到的模型更逼近于实际,本研究将球头铣刀测量得到的各响应点的 FRF 函数导入进行求和计算,利用多个频响函数做整体曲线拟合。试验采用多参考点最小二乘复频域法(PolyMAX)对球头铣刀进行模态参数识别,考虑到数控加工中心的转速范围及工作频率,选择 0 ~ 3 200 Hz 的频段,通过稳态图来拾取可能的模态频率,试验利用 PolyMAX 法分析得到的模态参数识别稳态图如图 4 所示。

图 4 是提取模态参数的直接工具,可以识别紧密耦合模态以及重根模态,观察结构在各个频率处的稳定情况,并能选取结构多阶的固有频率。由图 4 可见存在模态处出现了一系列稳定的 s 标示,而且对应模态指示函数的“尖峰”位置。经过模态 PolyMAX 分析,得

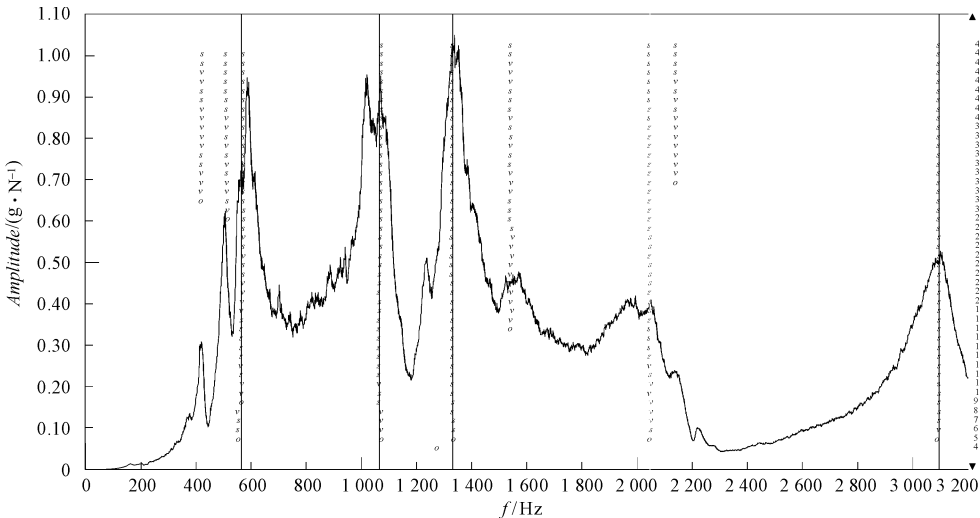


图 4 模态参数识别稳态图

o—未找到极点;f—在给定的精度内频率稳定;d—频率与阻尼稳定;v—模态参与因子与频率稳定;s—3 种参数全部稳定

到的球头铣刀前 6 阶模态参数如表 2 所示。

表 2 球头铣刀各阶模态频率与阻尼比

阶次	固有频率/Hz	阻尼比/(%)
1	537.9	3.67
2	563.5	4.44
3	1 066.1	3.85
4	1 330.6	4.23
5	2 045.5	2.99
6	3 095.4	2.85

3.3 有限元与试验模态结果对比

为了验证有限元模型的合理性,本研究将有限元计算结果与试验模态结果分析对比,对比相同振型下的固有频率值,得到的仿真值和试验值之间误差如表 3 所示。

表 3 有限元与试验模态对比

模态阶数	有限元模 态频率/Hz	试验模态 频率/Hz	误差百分比 /(%)
1	572.54	537.9	6.44
2	572.27	563.5	1.56
3	1 196.2	1 066.1	12.2
4	1 197.3	1 330.6	10.1
5	1 991.9	2 045.5	2.62
6	3 116.5	3 095.4	0.68

从表 3 中可以看出,第 3 阶与第 4 阶误差稍大,但均在 13% 以内,分析出的其余 4 阶实验模态与有限元模态固有频率在 0 ~ 3 200 Hz 范围内相对误差均在 7% 以内,吻合度较高,验证了本研究建立的有限元模型的合理性,较好地反映了结构的物理特性。计算值与试验值存在一定的误差,其主要原因有以下几个方面:有限元模型进行了刀柄上过渡倒角的忽略;试验时敲击点及测试点的位置受构件结构的限制,存在随机误差;此外,本研究在建立有限元模型时为了减小模型

的复杂程度,提高模型的求解速度,把球头铣刀刀柄与刀片的螺纹连接部分简化为刚性连接,忽略了螺纹孔对结构的影响。

4 结束语

本研究利用有限元软件 ABAQUS 建立了机夹式球头铣刀的有限元模型,并采用 Lanczos 法对其进行了有限元模态分析,得到球头铣刀的前 6 阶固有频率和模态振型;同时采用 LMS Test. Lab 测试分析系统完成了试验模态分析,应用 PolyMAX 分析方法对试验结果进行了处理,得到了 0 ~ 3 200 Hz 频率范围内的模态频率,并与对应的有限元模态频率相比较,模态频率的相对误差在 13% 以内,验证了有限元模型的合理性,分析结果为球头铣刀振动控制和铣削稳定性研究提供了依据。

参考文献(References):

[1] 王扬渝,计时鸣,王慧强,等. 球头铣削多硬度拼接淬硬钢的振动研究[J]. 中国机械工程,2012,23(26):636-641.
[2] 高庆伟,刘辞英. 二刃球头铣刀铣削力建模与仿真研究[J]. 科学技术与工程,2010,10(20):5031-5033.
[3] 张国梁,杨 宇,赵 旭. 基于 Pro/E 与 ANSYS 的直齿圆柱铣刀运动和模态分析[J]. 机械传动,2010,34(7):71-74.
[4] 石 岚,王成勇,秦 哲. 高速铣削立铣刀的有限元模态分析[J]. 工艺与检测,2008(7):102-105.
[5] 黄建建,马 平,陈爱民,等. 基于 PolyMAX 方法的加工中心工作台计算模态与实验模态对比分析[J]. 机床与液压,2010,23(38):92-96.
[6] 聂勇军,廖启征. 桁架结构有限元试验模态分析[J]. 机械设计与研究,2011,27(2):61-64.
[7] 张立彬,蒋 帆,王扬渝,等. 基于 LMSTest. Lab 的小型农

业作业机振动测试与分析[J]. 农业工程学报,2008,24(5):100-104.

[8] 伊蒙生. 基于 ABAQUS6.9 的 20/316L 复合管旋压成形有限元数值模拟[J]. 轻工机械,2012,30(6):36-39.

[9] 丁立聪,张 宪. 基于有限元技术的锅炉水冷壁焊机关键部件研究[J]. 轻工机械,2012,30(3):92-96.

[10] BART P, HERMAN V D A, PATRICK G, et al. The PolyMAX frequency domain method: a new standard for modal parameter estimation[J]. Shock and Vibration, 2004(11):395-409.

[11] 何 辉. 多参考最小二乘复频域法在飞行器模态参数识别中的应用[J]. 航空兵器,2010(6):7-11.

[12] 周 云,易建伟. 用 PolyMAX 方法进行弹性地基板的实验模态分析[J]. 振动与冲击,2007,26(7):139-143.

[编辑:张 翔]

本文引用格式:

张 宪,周浩东,王扬渝,等. 机夹式球头铣刀有限元及试验模态分析[J]. 机电工程,2014,31(1):15-20.

ZHANG Xian, ZHOU Hao-dong, WANG Yang-yu, et al. Finite element and experimental modal analysis of clip-type ball end mill[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(1):15-20.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 14 页)

救生舱通过内部的生存保障系统满足避难人员在舱内必备的各项生存条件。例如:避难人员在进入到救生舱内部后,空气供给设备能够提供生存必须的空气;空气净化设备可以保证舱体内空气适宜人体生存;环境监控设备可以准确监控救生舱内外环境温度、空气质量等参数并及时报告给舱内人员;座椅、座便器、医药工具箱、食物和水都可以保证人员的正常生存并且呼救设备可以向外界传递求救信号。

表 1 家用救生舱的基本参数

项目	指标
额定人数/人	2~3
额定防护时间/h	≥48
瞬间耐高温能力/(s,℃)	3,1 200
舱内持续温度/℃	≤35±2
人均占有容积/m ³	0.6
舱内正压力/Pa	100~500
舱内 O ₂ 含量/(%)	18.5~23.0
舱内 CO ₂ 含量/(%)	≤1.0
舱内 CO 含量/(%)	≤24×10 ⁻⁴
被困人员每人每日供水量/L	≥1.5
被困人员每人每日食物所含热量/kJ	≥5 000

4 结束语

本研究提出了一种家用救生舱的概念设计。该救生舱在平时可作为餐桌、书桌、电脑桌等家具使用,而在地震、火灾等灾害事故发生时,可为家庭成员提供一个安全的避难所,以抵御来自外界的坠落物、有害气体、高温等的伤害,并且该家用救生舱系统还可以向外界呼救,以保证受困人员能够安全地等待救援,从而减少意外伤亡的发生。

但由于该设计目前还处于概念设计初级阶段,因此后续还需要进行更加深入的研究。

参考文献(References):

[1] 张鸿鹤,王晋波. 高层建筑避难间设置探讨[J]. 消防科学与技术,2012,31(10):1057-1060.

[2] 王圆宾,徐德华. 一种抗震救生设施的开发与研究[J]. 科技资讯,2012(11):216.

[3] 高广伟,张禄华. 煤矿井下移动救生舱的设计思路[J]. 中国安全生产科学技术,2009,5(4):162-164.

[4] 许 建,李长录,王 凯. 救生舱的生存温度保障[J]. 煤矿安全,2011,42(8):66-68.

[5] 汪 声,金龙哲,栗 婧. 救生舱热防护性能研究[J]. 煤矿安全,2010,41(11):16-19.

[6] 国家安全生产监督管理总局. 矿用可移动式救生舱通用技术条件[R]. 国家安全生产监督管理总局,2009.

[7] 周小燕,李 兵,孔芬霞,等. 基于 ANSYS Workbench 柴油机后处理装置的模态分析[J]. 机电工程,2011,28(8):928-930.

[8] 金大鹏,李建勇,王 恒,等. 基于 ANSYS Workbench 的固晶机构柔性动力学分析[J]. 机电工程,2012,29(10):1146-1149.

[9] 马静静,胥光申. 重要电子设备机箱动态特性分析与试验[J]. 机械,2013,40(6):26-29.

[10] 王进军,陈光柱,夏小东. 煤矿井下救生舱舱体结构设计与分析[J]. 煤矿机械,2011,32(12):13-15.

[11] 梅瑞斌,李长生,蔡 般,等. 爆炸冲击下煤矿救生舱抗爆能力有限元分析[J]. 东北大学学报:自然科学版,2013,34(1):85-94.

[编辑:张 翔]