

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.010

基于载荷时间历程的休闲椅机械装置的疲劳分析*

胡 冲, 胡 凯, 应富强*, 段立江

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

摘要: 针对休闲椅在使用过程中的疲劳损坏问题, 结合人机工程学理论设计了一款休闲椅, 并建立了三维模型。对休闲椅的疲劳寿命分析的方法进行了归纳, 提出了一种基于时间历程载荷的休闲椅疲劳寿命分析方法: 根据 QB/T 4191-2011 标准在 ANSYS 中进行瞬态力学分析, 找出了机械装置中应力较大的杆件; 之后在虚拟样机中进行了运动学仿真, 校验模型, 得出了危险杆件的载荷-时间历程; 联合 ANSYS 和 DesignLife 对危险杆件进行了疲劳寿命分析; 最后, 制作样机并进行了测试。分析结果表明: 测试结果与疲劳分析的结果相符, 也验证了该分析方法的准确性, 为相关研究分析提供了参考。

关键词: 休闲椅机械装置; 载荷时间历程; 疲劳分析; 样机测试

中图分类号: TH871.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1133-05

Fatigue analysis of leisure chair mechanical device based on the load time history

HU Chong, HU Kai, YING Fu-qiang, DUAN Li-jiang

(Key Laboratory of E&M Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang
University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem of fatigue damage of leisure chairs, a leisure chair was designed based on ergonomics theory, and the geometric model was established. Methods to analyze the fatigue life of the leisure chair were summarized, and a method was proposed to analyze the fatigue life based on load time history of leisure chair. Then the transient mechanical analysis of the chair was carried out in ANSYS to find out the bars which stress are larger according to the QB/T 4191-2011 standard. Later, the model was verified and the load time histories of the dangerous bars were obtained in the virtual prototype. And the fatigue life analysis of the dangerous rods was conducted based on ANSYS and DesignLife. Finally, the prototype was made and tested. The result shows that the test results are consistent with the results of fatigue analysis, and the accuracy of the method which provides a reference for the related research and analysis is verified.

Key words: leisure chair mechanical device; load time history; fatigue analysis; prototype testing

0 引 言

现代生活中, 人们“坐”的时间越来越长, 即使是休息也无法在椅子上能得到很好的放松, 长期下来给他们的脊椎、腰椎带来巨大的伤害^[1]。

对于沙发椅, 需要经常的变换姿态以满足使用要

求。据调查表明, 一款沙发椅平均每天的使用次数为 10 次, 这也导致机构的疲劳损坏是沙发椅的主要破坏形式^[2]。一旦机构超过材料的性能饱和点而发生破坏, 就会造成意外, 甚至对人体造成伤害。

对于机构的疲劳分析, 多基于静力学分析并取得了一系列进展。杨庆乐^[3]根据现场测量的载荷数据, 结合

收稿日期: 2017-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475425)

作者简介: 胡 冲 (1989-), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要从事机械工程方面的研究。E-mail: 996841782@qq.com

通信联系人: 应富强, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: motor@zjut.edu.cn

ANSYS\FE-SAFE 软件对强夯机臂架进行疲劳寿命分析,并在此基础上进行优化,并利用试验验证了该分析方法的可靠性;具体到椅子的疲劳特性研究,蔡欢等^[4]基于静力学分析,采用脉动循环载荷对办公椅搁脚机构进行疲劳分析;段立江^[5]利用 Workbench 完成了对椅子整体的疲劳分析。以上针对椅子的疲劳分析,对设计有一定的指导作用,但是其载荷的添加较为理想化,而在载荷的特性直接决定椅子的疲劳寿命,理想化的载荷严重影响载荷的准确性。并且,椅子各部件之间存在着相互作用,单独分析某个部件的疲劳寿命而忽略部件之间的相互作用也会影响到疲劳分析的准确性。

本文将从人机工程理论的角度出发,设计一款休闲椅,以满足当前人们的健康需求。在此基础上,根据 QB/T 4191-2011 标准对装置进行瞬态分析和疲劳分析,之后进行打样测试,观察测试结果与分析结果是否一致。

1 休闲椅机械装置的结构设计

为了在满足椅子的性能,同时也可以确保用户的舒适和健康要求,本研究参照坐姿理论,结合人机工程学,按照一定的参数比来设计沙发椅相关尺寸,设计出一款休闲椅,其总体机械装置如图 1 所示。

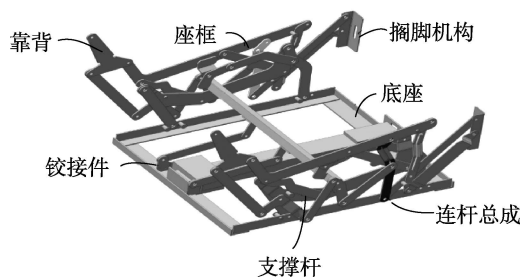


图 1 休闲椅的总体结构

该沙发椅机械装置可以满足多种姿态,即坐姿、休闲坐姿以及躺姿。根据人机工程理论及国内外相关舒适性研究^[6],确定坐面倾角 $4^{\circ}\sim 5^{\circ}$,靠背倾角 $108^{\circ}\sim 112^{\circ}$,从坐姿到躺姿,靠背倾倒 35° 左右,完全伸出的搁脚机构距离座面前端 $390\text{ mm}\sim 440\text{ mm}$,且高度应高于座面 $5\text{ cm}\sim 6\text{ cm}$ 。沙发椅搁脚机构和靠背采用“分动”的运动方式,休闲坐姿时,搁脚机构在电机推杆的作用下缓缓打开到一定位置,此时靠背不动;当需要切换到躺姿,搁脚板继续向前运动,椅座前移,靠背后倾,角度达到 $141^{\circ}\sim 145^{\circ}$ 。上述的 3 种位姿在切换的过程中可以实现平稳变换,满足健康和舒适的需求。

2 整体结构的瞬态动力学分析

为了得到沙发椅在工作过程中的危险杆件,为下文

的疲劳分析确定对象,需要对椅子机械装置的整体进行有限元分析。由于 QB/T 4191-2011 测试标准中,只有针对椅子进行冲击和疲劳的测试标准,本研究对椅子进行瞬态分析。并且,在实际使用中,沙发椅会经常受到瞬态冲击,容易造成装置损坏而出现意外。针对这种情况,本研究将参照 QB/T 4191-2011 测试标准对座面进行瞬时动力学分析。

结合实际,考虑到休闲椅一般会在坐姿状态下受到瞬态冲击。因此本研究在仿真时需将模型调整为坐姿并进行简化,之后导入 ANSYS Workbench 中的 Transient Structure 模块。

根据 QB/T 4191-2011 测试标准,在距离座框正上方 406 mm 处,自由跌落直径为 406 mm 、重 90 kg 的冲击包,冲击一次。

座椅冲击时物理模型如图 2 所示。

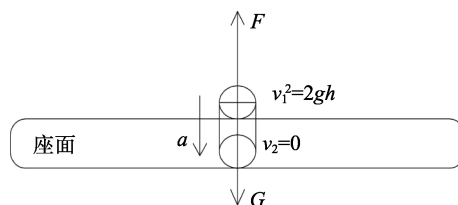


图 2 冲击物理模型

根据实际情况,当试验沙袋冲击座椅时,在刚接触座椅的一瞬间,沙袋速度为 v_1 ,从下一瞬间开始,沙袋受到座面的反作用力直到速度减为 $v_2 = 0$,冲击结束^[7]。

考虑到实际和测试中,蒙皮(或海绵)有缓冲和减震的作用,延缓了这个冲击过程,因此冲击的时间取 0.3 s ^[8],并且需添加表面印记。

针对该物理模型根据自由落体运动及动量守恒定律,列出如下公式:

$$v_1 = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

$$(Mg - F) \cdot t = 0 - Mv_1 \quad (2)$$

式中: F —座椅对试验沙包的反作用力; t —碰撞过程时间, $t=0.3\text{ s}$; h —沙包释放高度, $h=0.406\text{ m}$; v_1 —碰撞瞬间前的速度。

得出座面平均冲击载荷为 $1\ 746\text{ N}$,将冲击载荷简化为三角形函数,得到冲击载荷峰值为 $3\ 192\text{ N}$ 。

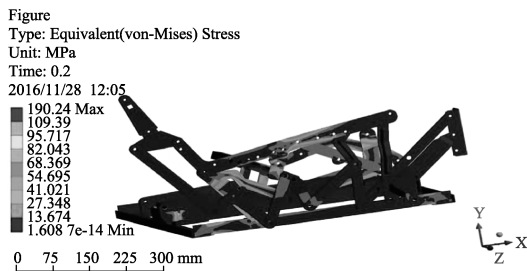
添加 Q235 材料属性,如表 1 所示。

表 1 碳素结构钢 Q235 材料属性

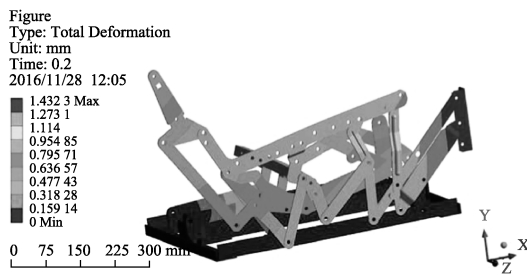
材料 牌号	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	泊松比 μ	抗拉强度 σ_b/Mpa	屈服极限 σ_s/MPa
Q235	7 850	2.06e11	0.277	4.6e8	2.35e8

施加上述函数载荷, 并于 0.2 s 达到峰值, 进行仿真。

由上面的施加的载荷可知, 在 0.2 s 的时候, 载荷达到最大值, 因此观察 0.2 s 时的响应图, 如图 3 所示。



(a) 等效应力云图



(b) 总形变云图

图 3 瞬态响应云图

最大等效应力和最大变形如表 2 所示。

表 2 最大应力和最大形变

分析类型	姿态	最大应力/MPa	最大形变/mm
瞬态力学	坐姿	190.24	1.432 3

结构的最大应力小于材料的比例极限和屈服极限, 不会引起结构上的损坏和功能的丧失, 最大形变也在允许的范围之内, 符合测试标准。由瞬态分析的应力响应云图可以看出, 最大的应力发生在点击和推杆之间的铰接件上。另外, 可以看出支撑杆的应力也比较大, 达到了 152.97 MPa。这些应力值大的结构位置, 在循环载荷作用下容易萌生疲劳裂纹, 发生疲劳破坏, 是疲劳分析的热点位置^[9], 下文称为危险杆件。由瞬态分析的变形响应云图可知, 椅子的最大变形发生在搁脚处, 并且变形较小, 因此, 下文在虚拟样机中进行分析时, 采用全刚性模型。

3 危险杆件的循环载荷

为了得到椅子危险杆件的载荷-时间历程, 本研究将该休闲椅整体模型, 经过简化后导入到虚拟样机中, 添加各个杆件之间的约束关系, 设置材料和重力场, 建立了休闲椅机械装置的模型, 如图 4 所示。

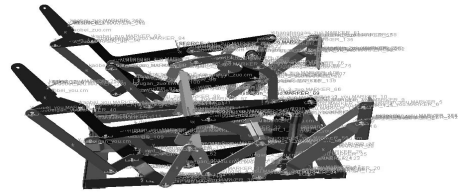


图 4 虚拟样机模型

3.1 模型验证

基于上述模型, 笔者根据该椅子机械装置的工作过程在虚拟样机中建立仿真函数。该沙发椅在使用过程中的姿态转变过程: 坐姿、休闲姿、躺姿、休闲姿、坐姿。对移动副添加驱动函数如下:

$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 1, 30) + \text{step}(\text{time}, 9, 0, 10, -30) + \text{step}(\text{time}, 10, 0, 11, -30) + \text{step}(\text{time}, 19, 0, 20, 30)$ 。即电机利用 1 s 进行加减速, 采用 30 mm/s 的速度匀速运动。取仿真时间 20 s, 步数 2 000, 其运动曲线如图 5 所示。

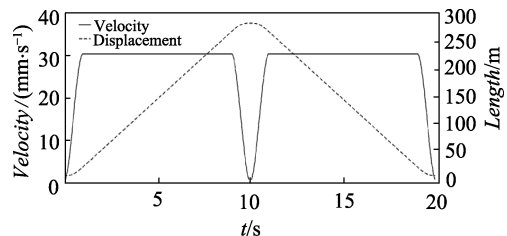


图 5 电机运行的位移及速度曲线

本研究在 ADAMS 中建立相关的 measure 函数, 测得其工作参数如表 3 所示。

表 3 沙发椅的工作参数

工作参数	仿真值	设计值	合理取值范围
座面角度/(°)	4.2	4.5	4~5
靠背角度/(°)	109.8	110	108~112
搁脚前伸/mm	402.0	400	390~440
搁脚高度/mm	58.7	59	50~60

由表 3 可知, 仿真得出的数值与设计的略有偏差, 但是其值仍在合理的取值范围之内。由此也验证了该仿真模型的正确性, 为下文进一步正确得出危险杆件的载荷-时间历程曲线奠定了基础。

3.2 载荷-历程曲线

参照 QB/T 4191-2011 测试标准, 其在测试过程中, 采用的是沙发铁架进行循环加载, 因此在仿真过程中, 分别对靠背、座框和搁脚添加的载荷如表 4 所示。

表 4 载荷大小

装置总加载/kg	加载部位/kg		
	搁脚板	靠背	座框
113.5	12	24.5	77

由于所需测的力中，部分力的方向在不断变化，也为方便后续操作，将对这些力的分量进行测量，并且忽略危险杆件自身的重力。

对于危险杆件铰接件来讲，其一端固定，另一端铰接，则其所受的外力，可通过转动副进行测量，结果如图 6 所示。

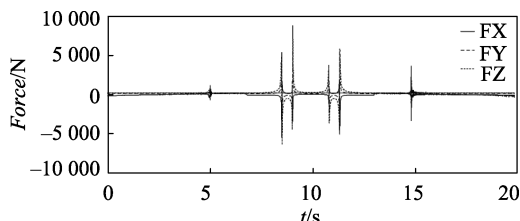


图 6 铰接件的载荷分量变化曲线

由图 6 可以看出铰接件所受外部载荷最大为 8 601 N，其中 x 轴方向上的分力在前后的波动较大。

由上图可以看出铰接件所受外部载荷最大为 8 601 N，其中 x 轴方向上的分力在前后的波动较大。

对于支撑杆，其受力相对复杂，其上下为铰接，中部可与限位钉接触。上、下铰接与铰接件的测量相同，仍通过转动副进行分力的测量，其变化载荷曲线在此不一一展示，只是大致分析：即支撑杆的铰接孔所受外力在 x 和 y 轴的分力波动较大，并且上下部铰链所对应的载荷分量大致方向对称，其中上部的最大载荷为 5 419 N，下部的最大载荷为 4 575 N；在 z 轴上的力有一定的波动，但是幅值较小。

与限位钉相互作用的力，通过设置接触来测量，因为其方向与接触面始终垂直，只需测量其合力。其结果如图 7 所示。

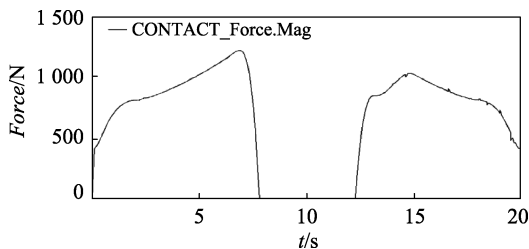


图 7 支撑杆中部接触力载荷变化曲线

由图 7 可以看出，支撑杆和限位钉有一段时间是分离的，并且该接触力在相互作用时的载荷波动较大，最大为 1 220.7 N。

由仿真结果得出：

(1) 铰链所承载荷的变化趋势大致相同，并且在前后对称，这是由于该沙发椅采取“分动”的运动方式，会有限位钉限制运动，因此，受力会有突变，这与实际

情况大致相同；

(2) 该循环载荷并非脉动循环载荷，因此采用脉动循环载荷分析整机或者某个部件的疲劳寿命，可能会严重影响结果的精度。

4 危险杆件的疲劳寿命分析

疲劳寿命分析方法有应力应变强度法、局部应力应变法及名义应力法等^[10]。本研究利用基于局部应力应变法的 DesignLife 软件进行结构疲劳分析，采用 Brown-Miller 准则计算每种循环的损伤，最后利用 Miner 法则进行疲劳累积损伤寿命估算。

4.1 静力学分析

本研究将支撑杆和铰接件的三维模型导入到 ANSYS 中建立有限元模型，由于不考虑重力的作用，在静力学分析时，根据上述分析，施加每一个坐标轴方向上的单位载荷，并且每个分力对应一个载荷步。对于铰接件则有 3 个载荷步，支撑杆则有 7 个载荷步，得到其包含应力应变信息的结果文件。

4.2 铰接件的疲劳寿命分析

笔者将上述载荷文件保存为 .dac 格式，与静力学分析的结果文件 .srt 一起导入到 DesignLife，结果如图 8(a)所示。为了作为对比，本研究在 Workbench 中，利用脉动循环进行寿命分析，结果如图 8(b)所示。

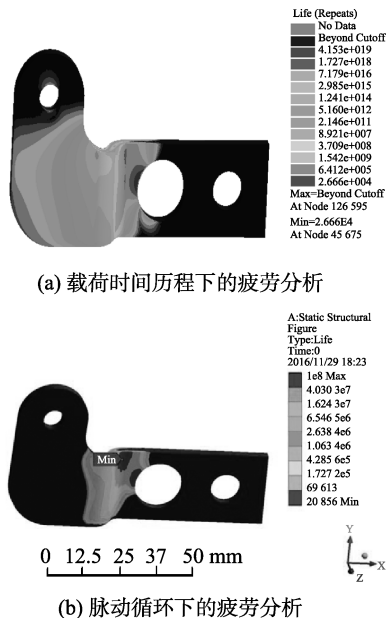


图 8 铰接件的疲劳寿命

由图 8(a)可以看出铰接件的最小寿命为 26 660 次。根据 QB/T 4191-2011 测试标准，该类座椅的设计寿命为 25 000 次，即该杆是可靠的；

由图 8(b)可知该杆件寿命为 20 856 次, 会发生疲劳破坏。

4.3 支撑杆的疲劳寿命分析

本研究将上述载荷文件与有限元结果文件导入到 DesignLife 中, 其结果如图 9 所示。

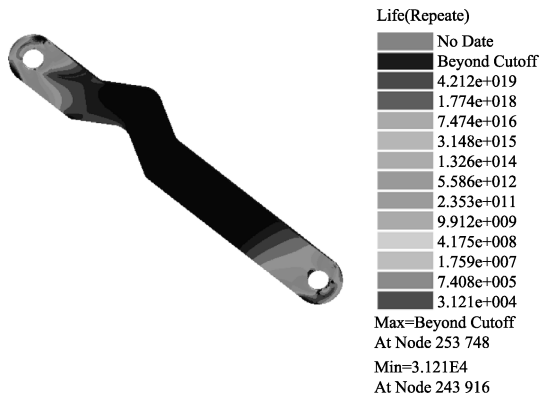


图 9 支撑杆的疲劳寿命

由图 9 可以看出, 支撑杆的最小寿命为 31 210 次, 符合标准, 该杆件是可靠的。

5 实物样机制作及测试

本研究根据设计的三维模型进行实物样机制作, 并参照 QB/T 4191-2011 测试标准进行测试。以下将对沙发椅机械装置进行冲击测试和疲劳测试。

5.1 冲击测试

为了测试其在实际使用或可预见的合理误用情况下椅座的抗冲击能力, 结合 QB/T 4191-2011 测试标准, 在冲击测试中, 将座椅底部固定, 在距离座框正上方 406 mm 处, 让重量为 90 kg 的冲击包自由跌落, 冲击坐框 (测试时座框上面放置海绵)。

测试情况如图 10 所示。



图 10 冲击测试

经过 30 次冲击测试, 观察座椅变形情况。由结果可知: 沙发椅的整体结构并没有发生破坏, 符合 QB/T 4191-2011 的测试标准。

5.2 疲劳测试

为了评定装置抗疲劳特性, 也为了验证上述的分析是否符合实际, 笔者通过循环试验来模拟装置的功能姿态转变过程。

测试情况如图 11 所示。



图 11 疲劳测试

测试中, 本研究分别在靠背, 椅座和搁脚上添加质量为 24.5 kg, 77 kg 和 12 kg, 总计为 113.5 kg 的砝码。按照坐姿、休闲姿、躺姿、休闲姿、坐姿的顺序启闭座椅装置, 加载频率为 1~3 次循环/min, 总共测试 25 000 次循环。测试结果: 在上述载荷下, 整体结构没有损坏, 功能也没有失效, 符合 QB/T 4191-2011 的测试标准。证明了脉动循环载荷下疲劳分析的不准确性, 也验证了本文分析方法的准确性。

6 结束语

通过对沙发椅整机的疲劳寿命研究, 本研究现得出结论如下:

(1) 本研究基于人机工程学设计了一款休闲椅, 完成了三维建模, 并在虚拟样机中完成建模, 验证了该模型的基本性能参数, 符合实际;

(2) 本研究在对整体沙发椅进行瞬态动力学分析的基础上, 找出应力较大的两根杆件, 联合 ADAMS、ANSYS 和 DesignLife 进行疲劳寿命分析, 并且对其中一根杆件进行疲劳分析对比;

(3) 制作样机, 进行测试, 结果表明用脉动循环载荷来进行疲劳分析会影响分析精度, 但是, 之间的关系仍需进一步探究, 也说明本研究疲劳分析方法可有效反映沙发椅的使用寿命;

(下转第 1161 页)

本文引用格式:

胡 冲, 胡 凯, 应富强, 等. 基于载荷时间历程的休闲椅机械装置的疲劳分析[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1133-1137, 1161.

HU Chong, HU Kai, YING Fu-qiang, et al. Fatigue analysis of leisure chair mechanical device based on the load time history [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(10): 1133-1137, 1161.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>