

基于 Python 的 ABAQUS 二次开发在飞机蒙皮 锤铆中的应用*

陈彦海, 秦运海, 姜春英, 康玉祥, 叶长龙

(沈阳航空航天大学机电学院, 沈阳 110136)

[摘要] 在飞机蒙皮锤铆中, 铆钉的变形需要几十次冲击才能实现, 锤铆活塞初速度载荷加载循环问题为分析过程带来了困难。提出利用 ABAQUS 中 Python 极强的扩展性, 通过二次开发得到连续锤铆过程自动分析的软件方法。通过对初速度、分析时间、冲击次数等输入参数的调整, 自动完成锤铆仿真分析, 使铆钉达到变形要求。与手动单次迭代方法比较, 所提出的软件方法及相应仿真程序在保证铆头成型要求情况下极大地提高了锤铆仿真分析的效率, 为后续研究工艺参数优化与铆接质量评价等问题带来指导与便利。与锤铆工艺试验的对比分析, 验证了仿真结果的正确性。

关键词: 锤铆; ABAQUS 二次开发; 飞机蒙皮; 仿真分析; 有限元模型

Application of ABAQUS Secondary Development Based on Python in Aircraft Skin Hammer Riveting

CHEN Yanhai, QIN Yunhai, JIANG Chunying, KANG Yuxiang, YE Changlong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] In the aircraft skin hammer riveting, the deformation of the rivet needs several tens of impacts to realize, and the problem of the initial speed loading cycle of the hammer rivet piston brings difficulties to the analysis process. This paper proposes a software method of automatic analysis of continuous hammer and rivet process by secondary development using the extremely extensibility of Python in ABAQUS. Through the adjustment of input parameters such as initial speed, analysis time and impact times, the hammer and rivet simulation analysis is completed automatically to make the rivet meet the deformation requirements. Compared with the manual single iteration method, the proposed software method and the corresponding simulation program greatly improve the efficiency of hammer riveting simulation analysis under the condition of guaranteeing the heading forming, and bring about the further research on the process parameters optimization and riveting quality evaluation guidance and convenience. Compared with the hammer riveting technology test, the simulation results verify the correctness.

Keywords: Hammer riveting; ABAQUS secondary development; Aircraft skin; Simulation analysis; Finite element model

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.16.096

在飞机蒙皮铆接技术中, 锤铆是用一个小冲击力循环累计施加到铆钉使之变形的过程。根据锤铆铆接工艺和铆枪结构原理, 铆钉的塑性变形是由铆枪的活塞循环碰撞冲锤而多次冲击铆钉产生的, 铆枪活塞的冲击速度直接影响铆钉的变形量。

针对飞机蒙皮铆接仿真技术, 国内外学者做了深入研究。Blanchot 等^[1]提出了铆钉铆接的 3 种有限元模型;

Zhang 等^[2]使用 ABAQUS 软件模拟了压铆过程; 刘平等^[3]对压铆过程阶段划分并进行仿真分析; 郭庆等^[4]利用 SolidWorks 和 COSMOS 软件研究了铆钉的应力集中系数; Manes 等^[5]和 Atre 等^[6]研究了铆接件疲劳寿命的主要影响因素。针对锤铆工艺, 应用有限元仿真技术的研究成果有限。Kadam^[7]和 Bloxson^[8]对气动铆枪等气动冲击工具进行研究, 模拟其工作原理, 建立了冲击工具的数学模型; Li 等^[9]建立了机器人铆接系统锤铆过程的动力学模型, 分析了铆钉的塑性变形; 曲巍

* 基金项目: 沈阳市科技计划项目(F16-216-6-00)。

崑等^[10]利用 ABAQUS 软件进行了锤铆过程的仿真分析,其中对于几十次初速度加载采用手动操作,一次完整铆钉变形分析,需要不断的数据导入,过程烦琐,分析效率低。本文采用 Python 脚本语言,对 ABAQUS 软件二次开发,建立了活塞初速度连续加载锤铆自动仿真分析程序,通过对初速度、分析时间、冲击次数等输入参数的调整,可自动完成锤铆分析过程,极大地提高锤铆分析过程的效率。与锤铆工艺试验的对比分析,验证了仿真结果的正确性。

1 锤铆冲击系统组成

根据锤铆工艺,锤铆冲击系统可以进行简化,如图 1 所示,本文应用的冲击系统的冲锤、铆钉与顶把 3 部分紧密接触。通过控制电磁阀的通断控制压缩空气进入铆枪,活塞两端产生压力差,使活塞加速运动,达到最大初速度 v_0 时,与冲锤碰撞,受撞击后的冲锤获得动能,冲击铆钉使其变形,活塞往复运动,冲锤不断冲击铆钉,以达到铆钉变形要求。根据锤铆工艺,铆钉完成变形,需要活塞几十次的累计撞击。系统组成尺寸数据如图 2 所示。

2 锤铆仿真程序二次开发

2.1 锤铆过程分析

根据锤铆工艺,铆钉完成变形,需要活塞几十次的累计撞击,由于 ABAQUS 每次分析只能在初始分析步 (Initial) 中施加一次初速度载荷,所以,需要相应的几十次手动迭代分析才能完成铆钉的变形。即从第 2 次分析开始,后续分析模型的初始状态是前一次的结果状态,需要手动操作完成对每次分析结果数据的处理与导入。

针对上述手动迭代分析问题的不足,本文提出了一种基于锤铆工艺过程的自动计算机软件方法。先建立一

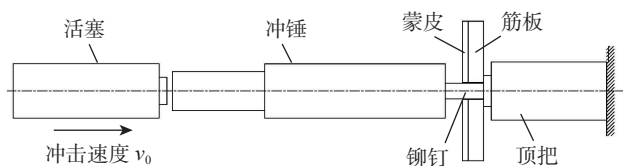


图1 锤铆冲击系统
Fig.1 Hammer riveting impact system

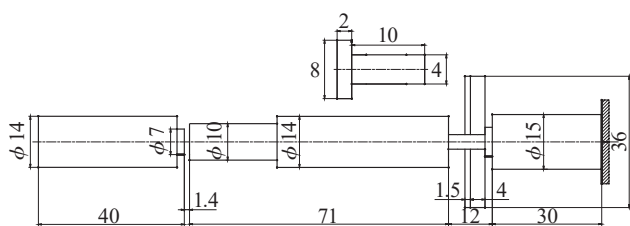


图2 冲击系统尺寸图
Fig.2 Impact system dimension drawing

次冲击的分析模型,从第 2 次开始,将前一次的分析结果导入作为后一次分析的初始状态,进行循环。图 3 为二次开发流程图。

2.2 软件开发基础

ABAQUS/CAE 前后处理脚本接口是基于 Python 语言的扩展,使用户可以直接与求解内核交互,因此可以用 Python 脚本自动化创建、重复、修改模型,用于运行分析任务。ABAQUS 分析模型,主要分为模型数据库 mdb、结果数据库 odb 和图形显示界面元素 session,如图 4 所示。

在建模过程中主要是对 mdb、session 进行操作,而在第 2 次及以后冲击分析导入初始状态时,需要对 odb 文件操作,读入相关结果数据。

ABAQUS 可以录制用户在图形界面中的各种操作,转换为 Python 脚本程序,为二次开发带来便利。本文第 1、2 次冲击分析的程序生成就是按照上述思路方法完成的。

2.3 建立第 1 次冲击模型

锤铆过程为动态问题,采用 ABAQUS/ Explicit 求解器,为了提高分析效率,采用 1/2 模型进行分析,建立锤铆有限元模型,如图 5 所示。模型中的相关参数见表 1。

第 1 次冲击建模关键在于:

(1) 尽可能减少图形界面选择。

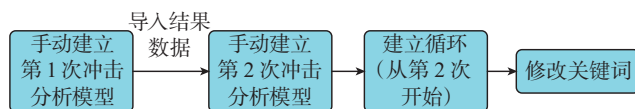


图3 二次开发流程图

Fig.3 Secondary development flow chart

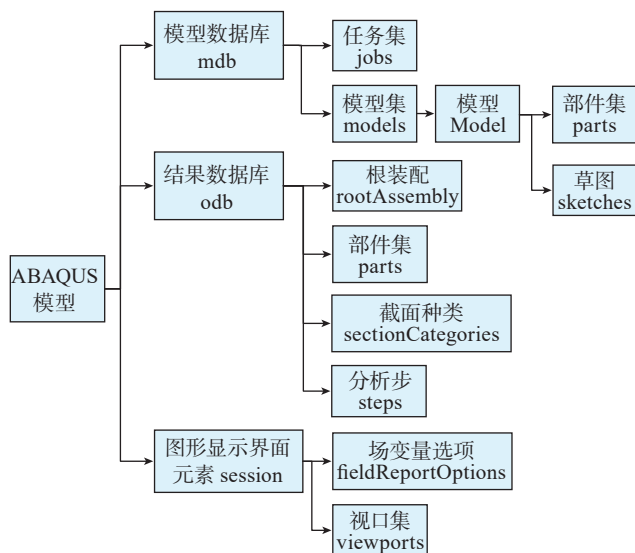


图4 ABAQUS分析模型

Fig.4 ABAQUS analysis model

在建模过程中,通过建立选择集,实现参数化选择。选择集作为部件属性,会随着模型的导入而传递。表2所示为其中部分关键选择集。

(2) 重启动设置。

只有在建立分析步时,开启重启动设置,才能实现在后续分析结果的数据导入。重启动 Python 语言如下:

```
mdb.models['Model-1'].steps['Step-1'].Restart(numberIntervals=1, overlay=ON, timeMarks=ON)
```

(3) 接触类型。

在进行接触类型定义时,选择通用接触类型,否则

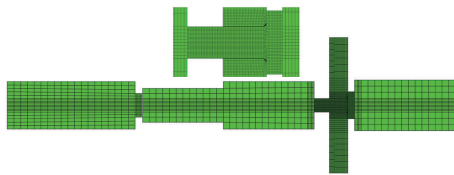


图5 锤铆有限元模型

Fig.5 Hammer riveting finite element model

表1 模型及其材料参数

名称	模型中名字	牌号	密度 / (kg·m ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比	塑性强化性能 A/MPa	塑性强化性能 B/MPa	塑性强化性能 n/MPa
铆钉	Rivet	2017-T4	2.80 × 10 ³	7.24 × 10 ⁴	0.33	134.9	583.2	0.254
蒙皮	Al_2024	2024-T4	2.77 × 10 ³	7.31 × 10 ⁴	0.33	190.0	580.2	0.260
筋板	Al_7050	7050-T736	2.79 × 10 ³	7.10 × 10 ⁴	0.33	352.5	353.0	0.288
活塞	Plunger	304	8.03 × 10 ³	1.94 × 10 ⁵	0.29	—	—	—
冲锤	Punch	304	8.03 × 10 ³	1.94 × 10 ⁵	0.29	—	—	—
顶把	Prop_bar	304	8.03 × 10 ³	1.94 × 10 ⁵	0.29	—	—	—

表2 部分关键选择集

部件	选择集名字	说明
Rivet	Rivet_midgeo	铆钉 1/2 模型对称约束中间面
	Rivet_geo	铆钉几何体,用于装配时选择
	Rivet_ele	用于后续分析中装配的选择集
	Rivet_endnode	输出铆钉上一节点信息
Al_2024	Al_2024_fixednode	蒙皮固定边界条件加载集
	Al_2024_midnode	蒙皮对称约束加载集
Al_7050	Al_7050_fixednode	筋板固定边界条件加载集
	Al_7050_midnode	筋板对称约束加载集
Plunger	Plunger_Allnode	活塞所有节点集,用于初速度加载
Punch	Punch_midnode	冲锤对称约束加载集
Prop_bar	Prop_bar_fixednode	顶把固定边界条件加载集

在后续循环中无法传递。

2.4 建立第2次冲击模型

由于第1次冲击,铆钉等部件存在应力应变,第2次冲击模型的建立要基于第1次冲击分析的结果数据,建模过程流程图如图6所示。

同样采用 ABAQUS/Explicit 求解器,建立第2次冲击分析模型。关键步骤如下:

(1) 新建模型是在第1次冲击分析模型的工程下,与第1次分析模型同级。

(2) 导入部件时,是从第1次分析结果数据库 odb 文件导入。其中,部件名要与第1次分析中的部件名一致,变形配置要选择“导入变形后的构型”,如图7所示。

(3) 复制对象时选择材料、截面、相互作用属性,并选择从第1次分析模型中导入。

(4) 建立分析步时,同样要设置重启动。

(5) 定义输出,应与第1次分析模型定义的相同。

(6) 相互作用选择通用接触类型。

(7) 通过定义预定义场的初始状态,输入第1次结果数据库中的应力应变数据。如表3所示,定义部件的初始状态。

(8) 在导入部件时,第1次冲击分析时建立的选择集,作为部件属性传递,在建模过程中,通过“选择集”进行选择,不能通过模型界面交互选择。

(9) 建模完成后,新建任务(Job)进行分析。Job 名称应包含数字,便于循环,如:“Job_rivet_002”。

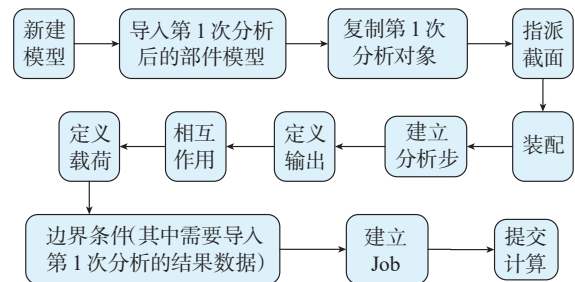


图6 建模过程流程图

Fig.6 Modeling process flow chart

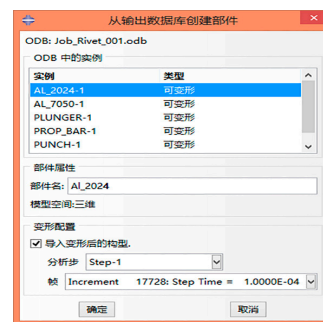


图7 导入部件时的选择

Fig.7 Selection when importing parts

表3 定义部件的初始状态

预定义场	部件	说明
Initial_Rivet	Rivet	从第1次(前一次)Job输入
Initial_2024	AI_2024	从第1次(前一次)Job输入
Initial_7050	AI_7050	从第1次(前一次)Job输入
Initial_Plunger	Plunger	从第1次(前一次)Job输入
Initial_Punch	Punch	从第1次(前一次)Job输入
Initial_bar	Prop_bar	从第1次(前一次)Job输入

2.5 建立循环程序

在第2次冲击分析结束后,应用 Python 脚本语言,对其增加循环,以实现连续自动建模与分析过程。

如图8所示为锤铆自动仿真分析流程图。

自动程序编写关键在于:

(1) 部件导入和预定义场初始状态输入时,从前一次 Job 中导入。

(2) 复制对象到当前模型中。

(3) 新建分析步以变量命名,如:

“Step_+str(i)”。

(4) 新建 Job 以变量命名,如:

“Job_Rivet_00'+str(i)”。

如图9所示为锤铆自动仿真分析循环部分程序。

对每次分析最后的提交程序进行修改,添加等待完成和保存命令。命令如下:

```
mdb.jobs['Job_Rivet_00'+str(i)].submit()
mdb.jobs['Job_Rivet_00'+str(i)].waitForComp-
```

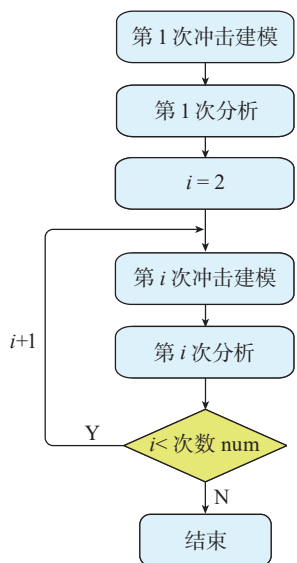


图8 锤铆自动仿真分析流程图

Fig.8 Hammer riveting automatic simulation analysis flow chart

```
mdb.Job(name='Job_Rivet_00'+str(i), model='Model-1', description='', type=ANALYSIS, atTime=None,
waitMinutes=0, waitHours=0, queue=None, memory=None, memoryUnits=PERCENTAGE,
explicitPrecision=SINGLE, nodalOutputPrecision=SINGLE, echoPrint=OFF, modelPrint=OFF,
contactPrint=OFF, historyPrint=OFF, userSubroutine='', scratch='', resultsFormat=ODB,
parallelizationMethodExplicit=DOMAIN, numDomains=1, activateLoadBalancing=False,
multiprocessingMode=DEFAULT, numCpus=1)
mdb.jobs['Job_Rivet_00'+str(i)].submit()
#提交分析
mdb.jobs['Job_Rivet_00'+str(i)].waitForCompletion()
#等待分析结束
#进入循环
num=50
#冲击次数
for i in range(num):
    #循环程序
    mdb.Model(name='Step_'+str(i), modelType=STANDARD_EXPLICIT)
    #模型 "Step_i" 已创建
    a = mdb.models['Step_'+str(i)].rootAssembly
    session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
    session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step='Initial')
    session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.setValues(mesh=OFF)
    session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.meshOptions.setValues(meshTechnique=OFF)
    session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.geometryOptions.setValues(referenceRepresentation=ON)
    session.openOdb('Job_Rivet_00'+str(i-1)+'.odb')
    #前1次分析结果
```

图9 锤铆自动仿真分析循环部分程序

Fig.9 Hammer riveting automatic simulation analysis cycle part of the program

tion()

```
mdb.save()
```

3 锤铆仿真应用与试验

根据锤铆工艺,基于建立的仿真程序进行仿真分析并进行锤铆试验,分析仿真与试验结果,验证仿真方法的正确性。

根据曲巍巍等^[10],气压在0.2~0.6MPa时,活塞初速度 v_0 约为6~12m/s,本文以0.5MPa时,活塞10m/s的初速度进行锤铆仿真分析与工艺试验。

根据HB—Z 223.3—2003标准,对仿真和试验的铆钉进行镦头成型合格性判定。铆钉镦头尺寸: $h_{min}=0.4d, D=(1.5 \pm 0.1)d$ 。

3.1 锤铆仿真应用

根据锤铆工艺进行初步锤铆试验,利用冲击力传感器采集锤铆过程的冲击力。截取两次冲击数据进行分析,如图10所示,基于MATLAB软件分析得到一次冲击完成时间即一次波峰发生时间约为(0.2722~0.2697) $s=0.0025s$ 。为确保仿真分析时一次冲击的完成,确定一次冲击的分析时间 $t=0.0035s$ 。

根据建立的锤铆仿真分析程序,建立锤铆有限元分析模型,如图11所示,程序建立的分析模型,模型部分输入参数如表4所示。

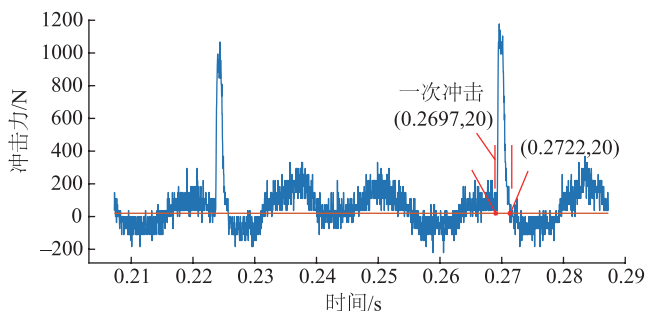


图10 一次冲击时间分析

Fig.10 An impact time analysis

运行程序,进行自动锤铆仿真,使建模分析过程自动运行,得到仿真结果。分析发现,在冲击次数达到25次时,铆钉墩头尺寸 $D=6.43\text{mm}$, $H=1.58\text{mm}$,达到变形要求,铆接合格,图12所示为铆钉变形图。

3.2 锤铆工艺试验

根据锤铆工艺,基于双三坐标机器人平台进行铆接试验,并对锤铆冲击力进行采集,铆接试验平台如图13所示。

调整铆枪输入气压至 0.5MPa ,进行锤铆工艺试验,通过调整施铆时间,达到铆钉变形要求,并采集锤铆时的冲击力。图14为采集到的锤铆冲击力,通过分析: 0.5MPa 铆枪输入气压下,施铆时间为 1.08s ,锤铆次数达到25次时。图15为铆钉墩头成形图。

通过测量,施铆后墩头平均尺寸 $D=6.39\text{mm}$, $H=1.62\text{mm}$,铆钉变形达到要求,墩头合格。分析发现,相同气压时,在满足铆钉变形要求下,仿真和试验所得的冲击次数相同,验证了仿真分析方法的正确性。

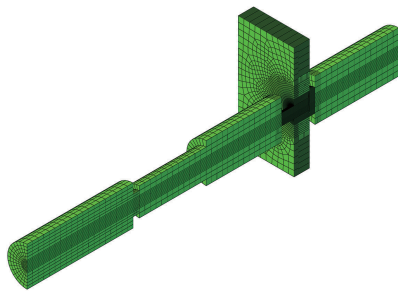


图11 锤铆有限元分析模型

Fig11 Hammer rivets finite element analysis model

表4 模型输入参数

分析参数	数值	说明
分析时间 t/s	0.0035	每次冲击时间
冲击次数 (num)	25	总铆钉变形需要的冲击次数
初速度 $v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	10	活塞碰撞冲锤时的速度

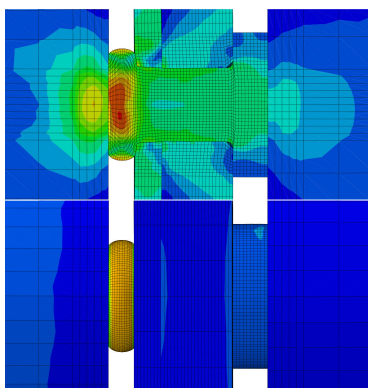


图12 铆钉变形图

Fig.12 Rivet deformation diagram

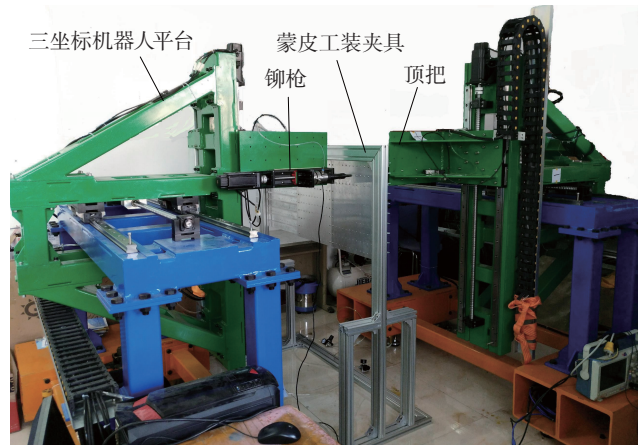


图13 铆接试验平台

Fig.13 Riveting experimental platform

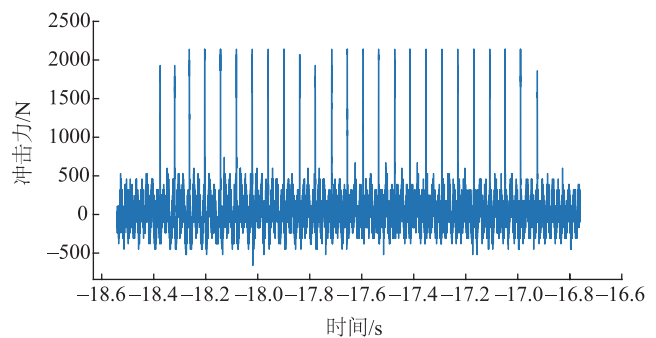


图14 锤铆冲击力采集

Fig.14 Hammer impact force collection



图15 铆钉墩头成形

Fig.15 Rivet piers forming

4 结论

(1)使用Python对ABAQUS前处理进行二次开发,建立锤铆铆接连续仿真程序,较手动迭代锤铆仿真过程,极大地降低了锤铆模拟过程的工作量。使得用户可以根据不同的输入参数进行调整分析。

(2)基于三坐标机器人试验平台进行了锤铆工艺试验,根据建立的仿真程序进行了仿真分析,分析仿真结果与试验结果,验证了仿真方法的正确性。

(3)通过对锤铆工艺仿真分析,得到在一定活塞初速度(输入气压)时,达到铆钉变形所需的冲击次数。为深入研究锤铆工艺提供高效的方法。

(4)本文提出了基于Python脚本语言对ABAQUS二次开发的思路与过程,为循环加载及结果数据的导入等相关工程问题提供重要的借鉴与指导。

参考文献

- [1] BLANCHOT V, DAIDIE A. Riveted assembly modelling: study and numerical characterisation of a riveting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 180(1-3): 201-209.
- [2] ZHANG K F, CHENG H, LI Y. Riveting process modeling and simulating for deformation analysis of aircraft's thin-walled sheet-metal parts[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(3): 369-377.
- [3] 刘平, 张开富, 李原. 铆接变形及其有限元分析[J]. 航空制造技术, 2008, 51(22): 94-97.
- LIU Ping, ZHANG Kaifu, LI Yuan. Riveting deformation and finite element analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(22): 94-97.
- [4] 郭庆, 蒋万青. 基于 CAD-CAE 计算铆钉连接件疲劳寿命[J]. 机械设计, 2007, 24(4): 261-265.
- GUO Qing, JIANG Wanqing. Calculation of fatigue life of rivet connection based on CAD-CAE[J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(4): 261-265.
- [5] MANES A, GIGLIO M, VIGANO F. Effect of riveting process parameters on the local stress field of a T-joint[J]. International Journal of Mechanical Science, 2011, 53(12): 1039-1049.
- [6] ATRE A, JOHNSON W S. 3D FEA simulations to assess residual stresses in riveting process[J]. Journal of ASTM International, 2005, 3(3): 1-10.
- [7] KADAM R. Vibration characterization and numerical modeling of a pneumatic impact hammer[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.
- [8] BLOXSOM W. Modeling of the reciprocating, pneumatic impact hammer[D]. Las Vegas: University of Nevada, 2003.
- [9] LI Y W, XI F F, BEHDINAN K. Dynamic modeling and simulation of percussive impact riveting for robotic automation[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2010, 5(2): 1090-1097.
- [10] 曲巍巍, 石鑫, 董辉跃, 等. 气动锤铆过程仿真分析与试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(8): 1411-1418.
- QU Weiwei, SHI Xin, DONG Huiyue, et al. Simulation analysis and test of dynamic hammer riveting process[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014, 48(8): 1411-1418.

通讯作者: 姜春英, 博士, 副教授, 研究方向为飞机蒙皮铆接技术, E-mail: jiangchunying@hotmail.com。

(责编 铃兰)

(上接第 84 页)

参考文献

- [1] 齐予, 易亨瑜. 国外机载激光武器技术进展 [C]// 2012 国防空天信息技术前沿论坛. 西安, 2010.
- QI Yu, YI Hengyu. Technology progress of foreign airborne laser weapon[C]//Forum of 2010 Frontiers in defense, aerospace and information technology. Xi'an, 2010.
- [2] VORONTSOV M. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): system architecture and wave front control concept[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5895(1): 1-9.
- [3] TYSON R K. Principles of adaptive optics[M]. Boston: Academic Press, 1997.
- [4] U.S. Department of Defense. Model designation of military aerospace vehicles: DoD 4120.15-L [S]. Washington: U.S.Department of Defense, 2004.
- [5] 李新阳, 姜文汉, 王春红, 等. 自适应光学系统中的自适应

控制算法研究[J]. 光学学报, 2001, 21(3): 283-291.

LI Xinyang, JIANG Wenhan, WANG Chunhong, et al. Analysis of an adaptive control algorithm used in an adaptive optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(3): 283-291.

[6] 杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统几种随机并行优化控制算法比较[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 11-16.

YANG Huizhen, LI Xinyang, JIANG Wenhan. Comparison of several stochastic parallel optimization control algorithms for adaptive optics system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 11-16.

[7] KAZAURA K, OMAE K, SUZUKI T, et al. Enhancing performance of next generation FSO communication systems using soft computing based predictions[J]. Optical Express, 2006, 14(12): 4958-4968.

[8] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2005.

[9] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. A new theory of optical scintillation for moderate to strong fluctuations[J]. Optical Pulse and Beam Propagation, 1999, 3609: 90-100.

[10] TATARSKII V. Some new aspects in the problem of waves and turbulence[J]. Radio Sciences, 1987, 22(6): 859-865.

[11] PHILLIPS R L, ANDREWS L C. Universal statistical model for irradiance fluctuations in a turbulent medium[J]. Journal of the Optical Society of America, 1982, 72(7): 864-870.

[12] 张逸新, 王高刚. 斜程大气传输激光束的平均光强与短期光束扩展[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 167-170.

ZHANG Yixin, WANG Gaogang. Average intensity and short-term beam spread of a laser beam propagating in a slant-path atmosphere[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 167-170.

[13] ANDREWS L C. Special functions of mathematics for engineers[M]. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1998.

[14] 段梦云, 艾勇, 熊准, 等. 激光大气传输室内模拟研究[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(3): 188-193.

DUAN Mengyun, AI Yong, XIONG Zhun, et al. Simulation of laser atmospheric transmission in laboratory[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 9(3): 188-193.

[15] 周朴, 刘泽金, 许晓军, 等. 自适应锁相光纤激光阵列的湍流大气传输性能[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1442-1447.

ZHOU Pu, LIU Zejin, XU Xiaojun, et al. Propagation performance of adaptive phase-locked fiber laser array in turbulent atmosphere[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(6): 1442-1447.

[16] 程利群, 景文博, 王晓曼. 夏克-哈特曼波前传感器光斑质心探测方法比较与分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(3): 23-26.

CHENG Liqun, JING Wenbo, WANG Xiaoman. Comparison and analysis of shack-hartmann wave-front sensor spot centroid detection methods[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 37(3): 23-26.

[17] 范玲, 乔春红, 冯晓星, 等. 基于 SPGD 算法的激光大气传输湍流效应校正的初步研究[J]. 大气与环境光学学报, 2009, 4(3): 183-189.

FAN Ling, QIAO Chunhong, FENG Xiaoxing, et al. Elementary study on turbulence effects resulted from laser propagation in the atmosphere based on the stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2009, 4(3): 183-189.

通讯作者: 王秋实, 工学博士、工程师, 研究方向为精密光学检测、激光系统设计和自适应光束质量校正等, E-mail: wangqiushi210@mails.ucas.ac.cn。

(责编 铃兰)