

Abaqus质量缩放及其结果准确性的评估

赵益兴

上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海

收稿日期: 2023年2月7日; 录用日期: 2023年3月8日; 发布日期: 2023年3月15日

摘要

Abaqus质量缩放的目的是为了减少或者节约计算时间。主要表现在, 在显式动力学的求解过程中, 实际中的一秒或者零点几秒就需要花费计算机更长的时间进行运算, 无法满足实际工程或研究的需要。有时可以适当扩大研究对象的质量, 来达到减少计算机运行计算的时间。通过简单例子来揭示质量缩放意义和对结果正确性进行评估。最后对质量缩放的范围和相关设置进行介绍。

关键词

Abaqus, 质量缩放, 时间, 评估

Abaqus Mass Scaling and Evaluation of the Accuracy of Its Results

Yixing Zhao

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Feb. 7th, 2023; accepted: Mar. 8th, 2023; published: Mar. 15th, 2023

Abstract

The purpose of Abaqus mass scaling is to reduce or save calculation time. The main performance is that in the process of solving the explicit dynamics, it takes longer time for the computer to operate in one second or a few seconds in practice, which cannot meet the needs of actual engineering or research. Sometimes the quality of the research object can be appropriately expanded to reduce the time of computer operation and calculation. This paper presents the significance of quality scaling and evaluates the correctness of the results through simple examples. The range of mass scaling and related settings is also introduced.

Keywords

Abaqus, Mass Scaling, Time, Evaluation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在实际工程应用中,常常会遇到接触、碰撞等高度非线性情形,而工业仿真软件 Abaqus 中的显式动力学的优势正是解决此类问题。或当 Abaqus 中的隐式动力学在仿真计算时无法收敛,利用显式动力学将问题以准静态方式进行模拟就不存在收敛问题。然而,为了得到稳定、可靠的结果。显示动力学求解时采用非常小的时间增量,进而产生巨大的计算成本。因此,提高加载速率与质量放大经常用来提升计算效率。当增加加载速率以模拟准静态问题时,在模拟中计算的材料应变率会因增加加载速率下所采用的相同因素而人为升高。如果材质对速率不敏感,则这无关紧要。如果对应变率敏感性进行建模,可能会导致错误的解决方案。如果考虑到速率的依赖性,通常需要在其自然时间段内分析模型。这可以通过质量缩放来实现。杜文嫚[1]等人基于 Radioss 这种非线性求解器,仿真结果通过采用传统的质量缩放技术进行控制,表明可以在控制计算精度的前提下,提高求解效率。陶德峰[2]等人基于 ABAQUS 显式动力学建立风电锁紧盘有限元模型,将质量放大 106 倍时,相关计算结果仍然有较高的精度。祖汪明[3]等人基于 ANSYS-DYNA 中的显式动力学,研究对象为斜横轧,运用质量缩放的方法,验证结果的可靠性。钱东升[4]等人研究了质量缩放法在环件轧制三维有限元模拟中的运用。虽然研究者对质量缩放法在不同对象上有所研究,但是对质量缩放法的适用范围和应用场合介绍不多。本文基于 Abaqus 中的显式动力学,通过无质量缩放和有质量缩放两种情况进行对比分析,证实了通过 Abaqus 质量缩放手段,放大物体一定质量可以在保证计算精度的同时达到减少计算时间的目的。并对质量缩放的准确性进行评估。最后对质量缩放的相关理论,适用场合及注意事项进行了较为详细的介绍。这些处理方法和相关理论,为今后进行 Abaqus 显式动力学分析具有重要的意义。

2. 有无质量缩放的对比

通过建立两个相同的长方体模型,一个没有考虑质量缩放,另一个考虑了质量缩放。进行仿真和对比分析[5][6][7][8]。

长方体的长宽高分别为 30 mm, 20 mm, 40 mm。采用结构性网格。材料为各向同性材料钢,密度输入值为 7.89×10^{-9} 。泊松比为 0.3,杨氏模量为 200,000 Mpa。分析步中选择显示动力学,时间为(Time period): 0.2 s。在历史输出中输出能量: ALLAE (伪能), ALLIE (整个系统的应变能), ALLKE (整个系统的动能)。在长方体的一端施加固定约束,另一端通过在端面中心点设立参考点 rp 和面建立耦合约束,并且通过该面上的参考点沿 Y 轴负方向施加 1.2 mm 的位移量,如图 1 所示。加载幅值按照表格形式,设置为时间为 0 时,幅值为 0。时间为 0.2 s 时,幅值为 1。最后建立位移和支反力的关系曲线图,并比较两者(无质量缩放和有质量缩放)曲线的差异大小。

第一个模型不存在质量缩放,命名为: Job-no-scale。第二个模型存在质量缩放,命名为 Job-scale。通过模型的复制,建立第二个相同模型,在分析步中选择质量缩放-Use scaling definitions below,选择半

自动质量缩放，质量缩放系数为 100。即质量放大为原来的 100 倍，加载速度变为原来的 10 倍，计算时间变为原来的 1/10。图 2 中最后运算结束所需要的 CPU Time 为 110 s，图 3 中最后运算结束所需要的 CPU Time 为 11.1 s，约为前者所需要时间的 1/10。相关原理可由等式(1)(2)得出。

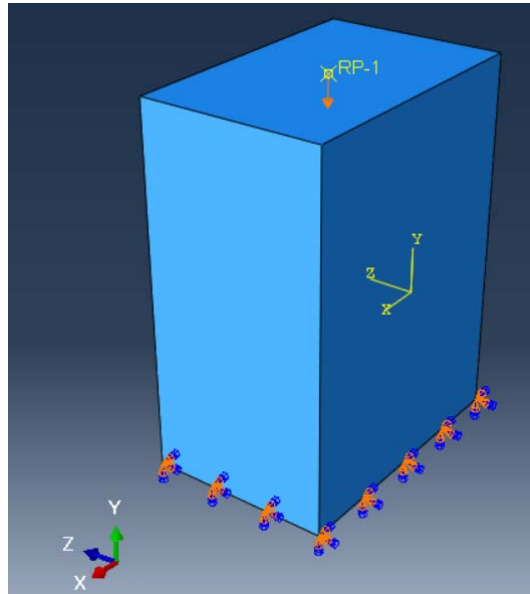


Figure 1. Boundary conditions and load application
图 1. 边界条件与载荷的施加

Job: Job-no-scale Status: Completed

Step	Increment	Total Time	CPU Time	Step Time	Stable Time Inc	Kinetic Energy	Total Energy
1	379512	0.16	87.8	0.16	4.21288e-07	0.0011792	2707.3
1	403479	0.17	93.3	0.17	4.21288e-07	0.00128746	3240.57
1	427447	0.18	98.9	0.18	4.21288e-07	0.00110954	3832.54
1	451414	0.19	104.4	0.19	4.21288e-07	0.00118108	4485.06
1	475381	0.2	110	0.2	4.21288e-07	0.00116176	5198.19

Figure 2. Output value without mass scaling
图 2. 无质量缩放下的输出值

Job: Job-scale Status: Completed

Step	Increment	Total Time	CPU Time	Step Time	Stable Time Inc	Kinetic Energy	Total Energy
1	37983	0.16	8.9	0.16	4.21319e-06	0.117116	127.431
1	40355	0.170003	9.4	0.170003	4.21319e-06	0.117004	159.872
1	42726	0.180002	10	0.180002	4.21319e-06	0.117038	198.513
1	45097	0.19	10.5	0.19	4.21319e-06	0.117024	244.041
1	47469	0.2	11.1	0.2	4.21319e-06	0.117023	296.605

Figure 3. Output value with mass scaling
图 3. 有质量缩放下的输出值

由图 4 和图 5 的应力云图可知，在无质量缩放下，最小应力为 $3.919e+03$ ，最大应力为 $7.154e+03$ 。在考虑质量缩放下，最小应力为 $3.913e+03$ ，最大应力为 $7.156e+03$ 。图 6 和图 7 分别列出了放大前和放大后参考点处位移和支反力的关系曲线图。在图 6 中，放大前，两者曲线(无质量缩放和考虑质量缩放)几乎重合。然而在图 7 中，横坐标放大 $0.555/0.4 = 1.3875$ 倍，纵坐标放大 $1.750/0.5 = 3.5$ 倍后，两者曲线

存在一定差距。为了进一步验证采用质量缩放后是否满足实际工程的需求,将能量 ALLAE: 伪能, ALLIE: 整个系统的内能, ALLKE: 整个系统的动能导出, 然后计算 ALLKE/ALLIE 是否小于 5%。如图 8 可知, 作出了 ALLAE, ALLIE, ALLKE 三者的能量随时间的关系曲线图, 经过计算可知, 满足要求。

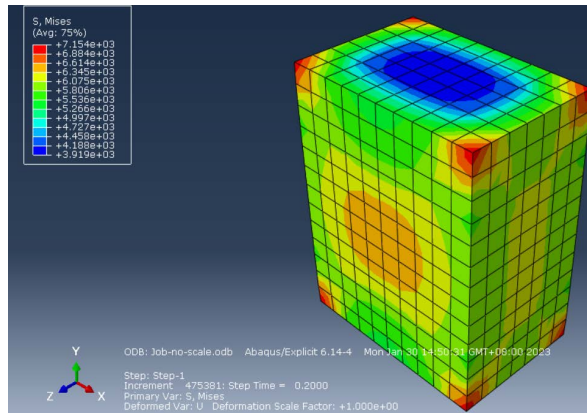


Figure 4. Stress nephogram without mass scaling
图 4. 无质量缩放下的应力云图

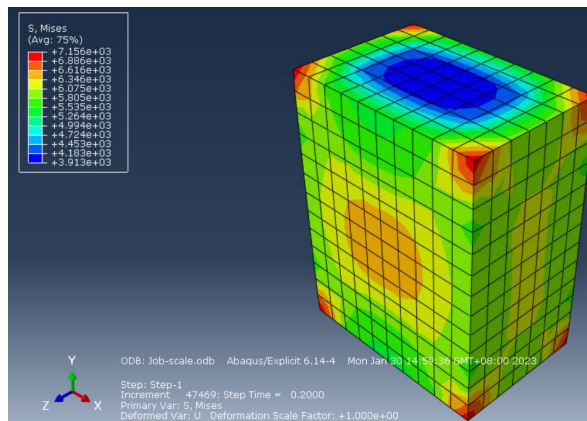


Figure 5. Stress nephogram with mass scaling
图 5. 有质量缩放下的应力云图

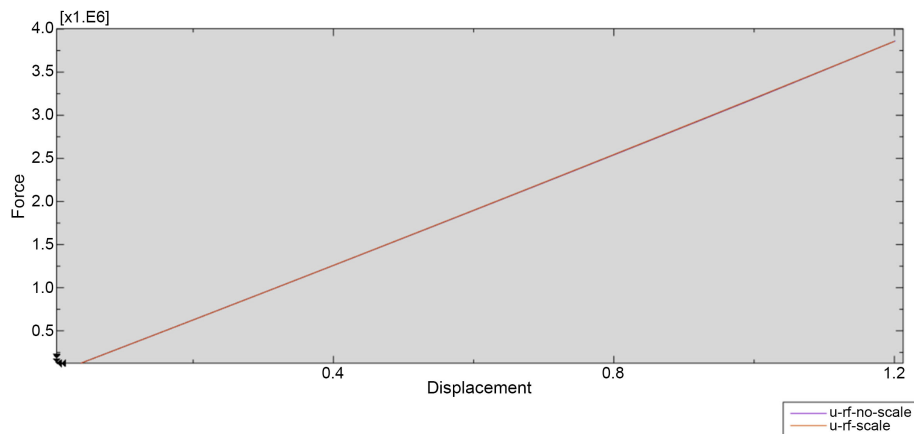


Figure 6. Change curve of displacement and force at reference point (before magnification)
图 6. 参考点处位移和支反力的变化曲线(放大前)

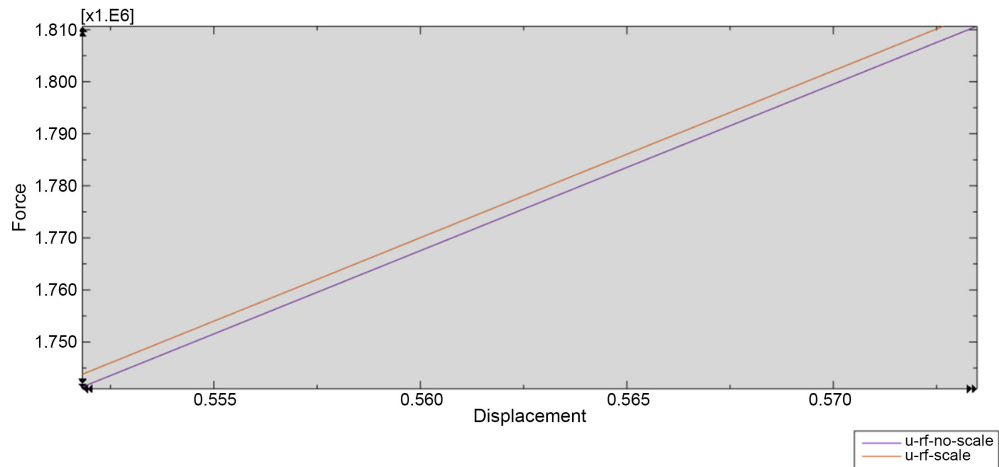


Figure 7. Change curve of displacement and force at reference point (after magnification)

图 7. 参考点处位移和支反力的变化曲线(放大后)

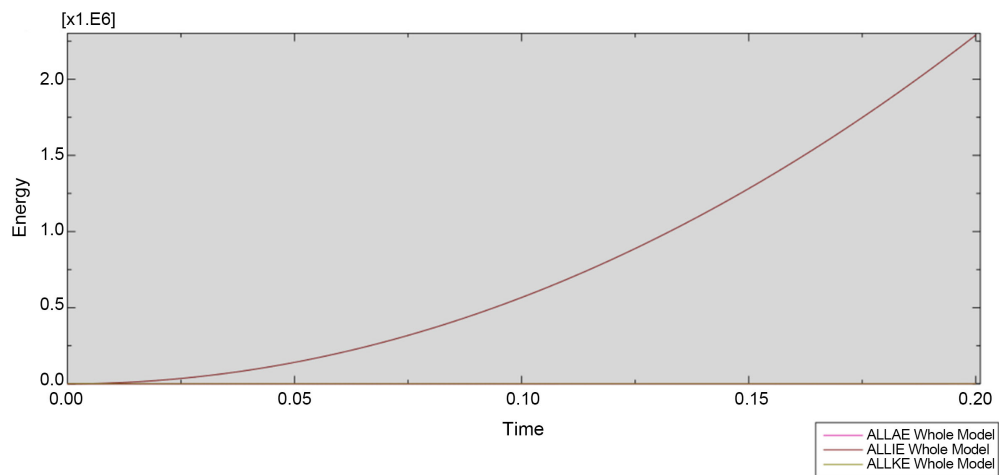


Figure 8. Curve of time and energy

图 8. 时间和能量的关系曲线图

3. 质量缩放的应用场合

显式动力学程序中的稳定性极限估计可以表示为

$$\Delta t = \left(\frac{L^e}{C_d} \right), \quad (1)$$

其中 L^e 为最小特征元素长度， C_d 代表材料的膨胀波速，线性弹性材料中的膨胀波速(泊松比等于零)为

$$C_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2)$$

其中 E 为弹性模量， ρ 为材料密度。如果我们人为增加材料密度为 f^2 ，则波速增加 f 倍，稳定时间增量增加 f 倍。通过质量缩放人为地增加稳定时间增量，减少计算时间。我们可以在其自然时间段内分析模型。质量缩放对惯性效应的影响与人为增加加载速率的影响相同。因此，过度的质量缩放会导致错误的解决方案。

3.1. 受质量缩放影响的种类

质量、旋转惯性、刚性和无限元；梁和壳的转动惯量；体积粘度和质量比例阻尼。

3.2. 不受质量缩放影响的种类

重力荷载；绝热热计算；全耦合热应力分析中的热溶液响应；状态方程材料；
流体和流体链接属性；弹簧和缓冲器元件。

3.3. 固定质量比例

准静态分析的质量缩放通常在步骤开始时对整个模型进行一次。定义固定质量比例的一种方法是通过指定质量比例因子。指定模型中每个单元的密度增加 f^2 倍。因此，单元稳定时间减少 f 倍。

3.4. 可变质量缩放

在某些情况下，在准静态分析的步骤中，需要周期性地对元素进行质量缩放。

如果某些元件经历如此大的变形，以致其稳定时间增量急剧减少，则可能会出现这种情况。可变质量缩放选项提供了此功能，在步骤中定期执行质量缩放计算指定质量矩阵的更新频率

可变质量缩放可用于将质量矩阵缩放到固定质量缩放之上。通常，通过指定目标稳定时间增量来定义可变质量比例。与固定质量缩放一样，您可以选择缩放所有单元(均匀或非均匀)或仅缩放低于目标的单元。或者，全自动可变质量缩放可用于散装金属轧制问题。质量比例因子基于网格几何和初始条件计算，并在整个分析过程中进行调整。

可变质量缩放可以独立缩放模型的选定区域，当模型的不同区域具有不同的刚度和质量属性时非常有用，每个单元集只允许一个固定和一个可变质量比例因子定义。具有多个固定或可变质量比例定义的单元将导致错误消息。

多步分析中的质量标度下，固定质量缩放定义不会在步骤之间保留，但缩放质量矩阵会保留，使用无参数的 MASS SCALING 选项可重置整个质量矩阵。当准静态步骤之后是动态情况时，效果显著。

每个步骤都保留可变质量比例定义。当前步骤中的任何可变质量比例定义都会使得删除先前步骤中的所有可变质量比例要从前面的步骤中删除可变质量缩放，使用不带参数的 variable mass scaling (可变质量缩放)选项。停用可变质量缩放并不会阻止缩放质量继续进行后续步骤。为了返回初始质量矩阵，还必须重新初始化质量(例如，包括没有参数的质量缩放选项)。

避免在多步骤分析中不是第一步开始时，由于质量缩放而导致元素质量发生非常大的变化。质量计算中产生的精度问题可能导致错误或误导性结果。如果需要进行较大的更改，请执行以下操作：首先插入一个新步骤，将元素体量重新初始化为其原始值。然后在随后的步骤中，添加质量缩放定义以将元素质量缩放到所需值。

4. 结论

过高的加载速率会产生具有显著惯性效应的解决方案。一般准则是将加载速率限制在材料波速的 1% 以下，施加荷载和边界条件从零开始也会促进准静态响应。使用 SMOOTHSTEP 振幅定义。质量缩放可用于处理与速率相关的材料行为，允许在其自然时间段内对过程进行建模。能量平衡可用于帮助评估给定的解决方案是否代表对施加负载的准静态响应。由于结果可能强烈依赖于过程速度(通过质量缩放进行实际或人为调整)，因此确保过度的人为过程速度缩放不会产生不切实际的结果是至关重要。为了确认 Abaqus 结果是可以信赖的，可以将问题的简化版本作为 Abaqus/Standard 中的静态分析进行研究，以进行

比较。最后查看整个系统的动能 ALLKE 和整个系统的内能 ALLIE 的比值是否小于 5%以内且结果曲线没有震荡。为此目的, 创建一个合适的简化测试用例的最简单方法通常是定义部分问题的二维示例。

本文通过 Abaqus 质量缩放手段, 结果首先表明了当质量放大为原来的 n 倍, 计算时间变为原来的 $1/n$, 该结论也与质量缩放的相关理论相吻合。其次, 本文对比下二者的仿真结果都可以在工程上予以接受。因为它满足了整个系统的动能 ALLKE 和整个系统的内能 ALLIE 的比值小于 5%, 且在如图 8 中的时间和能量关系曲线图中曲线光滑无震荡的条件。最后该方法可以在 Abaqus 显式动力学中, 求解非线性动力学问题和准静态问题的研究中加以合理使用, 达到既能减少计算时间, 又能保证运算精度, 满足实际工程应用。

参考文献

- [1] 杜文嫚, 王晨, 高永强, 张珊珊, 李倩, 孙国良. 高级质量缩放技术在通信设备抗震时程分析中的应用[C]// 保定泰尔通信设备抗震研究所. 2019Altair 技术大会论文集. 2019: 1325-1331.
- [2] 陶德峰, 王建梅, 唐亮, 康建峰. 质量缩放在风电锁紧盘装配分析中的应用[J]. 太原科技大学学报, 2013, 34(1): 32-36.
- [3] 祖汪明, 束学道, 彭文飞. 质量缩放技术在楔横轧有限元模拟中的应用[J]. 冶金设备, 2008(3): 1-4+13.
- [4] 钱东升, 华林, 左治江, 袁银良. 环件轧制三维有限元模拟中质量缩放方法的运用[J]. 塑性工程学报, 2005(5): 86-91+100.
- [5] 常海啸, 韩超, 梁友涛, 武小一. 基于显式动力学的控制臂球销脱出力仿真分析[J]. 计算机辅助工程, 2022, 31(1): 20-23.
- [6] 唐鹏, 袁琼. 摩擦离合器黏滑振动特性的显式动力学分析[J]. 现代制造工程, 2021(3): 138-145.
- [7] 张宇, 王晓亮. 基于显式动力学的软式飞艇流固耦合计算框架[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(3): 311-319.
- [8] 姜小丽. 基于显式弹塑性车辆悬架系统结构优化设计[J]. 现代制造工程, 2017(9): 59-67.