DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.242

基于ABAQUS的构架疲劳强度高效分析方法与可视化研究

高　瑞，米彩盈
（西南交通大学 机械工程学院，四川 成都 610031）

摘　要：对CAE软件进行后处理二次开发是评估铁道车辆焊接构架疲劳强度的一种高效方法。文章以ABAQUS为平台，采用Python语言和ABAQUS/GUI工具包开发构架疲劳强度评估程序，对结果文件中的数据进行快速提取与处理，建立母材与焊缝局部坐标系，基于DVS 1612标准获得评估点在局部坐标系下的综合材料利用度并写入结果文件，实现构架疲劳强度快速分析与可视化。该方法为评估构架疲劳强度提供一种高效、可行的方法，也为ABAQUS后处理二次开发在其他领域的应用提供指导和参考。

关键词：ABAQUS二次开发；Python；构架；疲劳强度；DVS 1612标准；可视化

中图分类号：U270.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2024)03-0099-09

0　引言

转向架构架是铁道车辆的主要承载部件，承受和传递各方向的载荷。由于焊缝缺陷、应力集中、残余应力等因素，构架焊缝区域承受交变动态载荷的能力低于母材，交变动态载荷作用下的疲劳失效几乎是焊接构架唯一的失效形式[1]。因此，在设计阶段采用先进、高效的方法对构架进行疲劳强度评估有重要的工程意义。ABAQUS是一款功能强大的有限元模拟分析软件，除了具有数值模拟与求解能力外，还提供了丰富的基于Python语言的API接口，分析人员可利用CAE分析各阶段的二次开发，大大提高分析效率，实现手动操作无法完成的任务。合理使用CAE软件后处理二次开发技术，是一种便捷、高效分析焊接构架疲劳强度的方法。

近年来，对基于多轴准则的疲劳强度评估方法的研究愈发成熟。DIN 15018标准[2]、FKM指南[3]、DVS 1612标准[4]认为应充分考虑三向应力和其综合效果对疲劳强度的影响。文献[5]根据模型评估点几何特征，建立焊缝局部坐标系，研究了基于DVS 1612标准的多轴准则方法与ERRI报告中单轴等效应力评估方法的差异，指出ERRI方法的局限性。文献[6]使用DVS 1612标准的评估方法对构架进行疲劳强度评估，并对应力集中区域进行焊接接头优化和局部结构优化，提高结构疲劳强度并实现轻量化。文献[7]提出了一种焊缝局部坐标系的简易建立方法，与按照焊缝真实几何特征建立局部坐标系的方法进行对比，并根据DVS 1612标准评估焊接构架疲劳强度，证实了该简易方法的计算精度可信。

以往的构架结构强度评估研究主要使用ANSYS软件。文献[8]阐述了提取ANSYS结果文件应力数据的方法，特别是对ANSYS结果文件的操作方法进行了详细说明，最后基于ERRI方法评估疲劳强度并实现可视化。文献[9]基于DVS 1608与DVS 1612标准对铁道车辆车体进行疲劳强度分析，使用ANSYS的二次开发语言APDL编写脚本，对结果文件进行数据提取与写入，实现疲劳强度评估结果的可视化。文献[10]使用APDL语言编写了针对构架横向止挡的局部参数分析脚本，实现了横向止挡支撑筋板的参数化建模与结构优化。

虽然近年来基于多轴准则的疲劳强度评估方法已逐渐成熟，但对焊接构架疲劳强度的研究主要集中在使用ANSYS软件。相较于ANSYS软件，ABAQUS的优势

通信作者：高　瑞，男，硕士研究生，主要从事机车车辆构架强度与ABAQUS二次开发的研究；E-mail: 1036817326@qq.com

引用格式：高瑞, 米彩盈. 基于ABAQUS的构架疲劳强度高效分析方法与可视化研究[J]. 机车电传动, 2024(3): 99-107.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.242.

Citation：GAO Rui, MI Caiying. Research on efficient analysis method and visualization for fatigue strength of welded frames based on ABAQUS[J]. Electric drive for locomotives, 2024(3): 99-107. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.242.

在于其二次开发语言Python的极强可扩展性以及丰富的API接口[11]。在默认条件下，ABAQUS结果文件只存储节点对应的单元积分点处的应力数据，没有直接存储节点应力数据，且由于有限元模型中单元编号与节点编号的不确定性，导致结果文件中所有积分点应力数据均是乱序存放，同一节点的积分点数据不连续存储，遍历所有节点逐点提取数据的方式效率极低[12]。

本文研究运用Python语言编程实现了ABAQUS结果文件中节点数据的快速提取，并将单元积分点应力分量数据转化为节点应力分量数据，进一步计算得到节点主应力与主方向。基于DVS 1612标准的分析方法与流程，编程实现构架母材与焊缝区域的疲劳强度评估，将评估结果写入结果文件实现疲劳强度的可视化。本研究的目的在于通过对ABAQUS后处理二次开发的应用，高效评估铁道车辆焊接构架的疲劳强度，为提高结构的可靠性和安全性提供一种先进可行的方法。

1 结果文件操作与应力数据计算

ABAQUS求解会产生多个文件，ODB文件是计算结果数据库文件，评估构架疲劳强度所需的应力与坐标数据以二进制形式存放其中，可通过Python脚本对结果数据库进行数据访问与写入。

基于多轴准测的疲劳强度评估需要节点局部坐标系下的应力分量，首先要得到全局坐标系的节点应力分量，再经过坐标变换得到局部坐标系下的应力数据。积分点应力分量数据需经过复杂的计算过程，才能得到全局坐标系下的节点应力分量、主应力与主方向。

1.1 ABAQUS结果文件数据结构

ODB结果文件中的成员变量可分为两大类：模型数据与结果数据。使用openOdb方法可以打开现有输出数据库，其结构层次如图1所示。

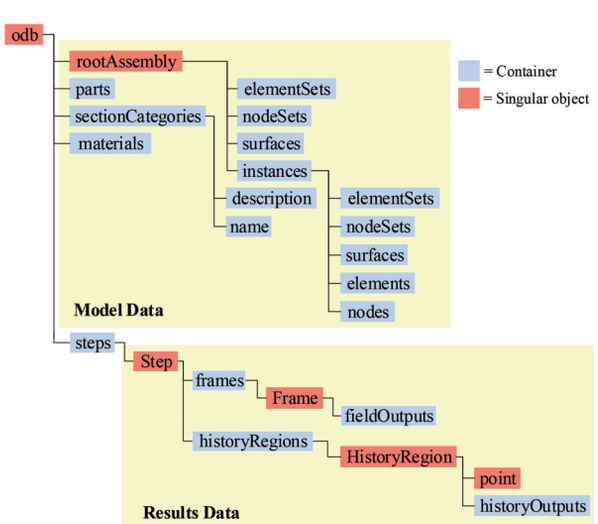


图1 ODB文件的数据结构

Fig. 1 Data structure of ODB files

模型数据保存了有限元模型的大部分信息，向下移动对象模型时，可以访问到它们的成员变量。

结果数据描述分析结果，同模型数据一样，其中包含众多成员变量。应力与位移数据均存于场输出fieldOutputs中，fieldOutputs中的成员变量可以使用prettyPrint方法打印查看，打印输出模型某分析步最后一帧的fieldOutputs如下：

{'S': 'FieldOutput object',

'U': 'FieldOutput object',

'UR': 'FieldOutput object'}

其中"S"为应力场输出数据，继续打印应力场输出"S"，部分结果如下：

({'baseElementTypes': 'tuple object',

'bulkDataBlocks': 'Sequence object',

...

'values': 'FieldValueArray object'})

节点编号与应力数据存于"values"与"bulkDataBlocks"中，区别在于前者是逐点存储，后者基于单元类型成块存储。进行数据高效提取应使用合适的方法提取"bulkDataBlocks"中的数据。

1.2 数据高效提取方法

"bulkDataBlocks"中元素的数据类型均是Numpy库的ndarray。Numpy是一个开源的Python科学计算库，用于快速处理任意维度的矩阵，可进行各种矩阵运算。ndarray是一个快速且灵活的大数据容器，提取数据与后续计算操作均是对ndarray对象进行的。可采用两种方法进行数据提取：

方法一：使用ABAQUS提供的getSubset函数。getSubset函数是fieldOutputs的成员函数，其作用是获取某集合的场输出。该方法有多个重载版本，每个版本所需的参数不同，例如使用节点集合版本，所需参数为提取的节点集合与提取位置，需在前处理时设置要提取数据的节点集合，并在调用函数时指定提取位置为单元节点处，其返回值依然是一个fieldOutputs类型的变量。使用prettyPrint函数打印返回值中的"bulkDataBlocks"成员对象，部分结果如下：

({'baseElementType': ' ',

...

'data': 'ndarray object',

...

'nodeLabels': 'ndarray object'})

积分点外推至节点的应力分量数据存放在"data"中，"data"的维度为积分点数量×6，节点编号存放于"nodeLabels"，其维度为积分点数量×1，两者均是ndarray类型的数据且一一对应。例如，编号为“1”的节点对应4个积分点，其应力分量在"data"中的下标位置为[10，60，110，300]，则"nodeLabels"中对应下标位

置的元素均为节点编号“1”。如果节点集合中节点所属的单元类型不唯一，"bulkDataBlocks"中会有多个元素，虽然函数返回值中"bulkDataBlocks"的"baseElementType"变量为空，但事实上，"bulkDataBlocks"中元素的数量即为提取数据的节点集合中节点所属单元种类的数量，此时要拼接所有元素中的"data"数据与"nodeLabels"数据。

方法二：判断应力场输出中"bulkDataBlocks"的单元类型"baseElementType"，如果为实体单元则提取并进行拼接。对构架进行前处理时，不仅会使用实体单元，而且会用到大量的梁单元与弹簧单元，但是疲劳强度评估仅针对构架主体即实体单元进行，因此可以直接判断应力场输出数据块的单元类型并进行提取。例如，需要提取数据的单元类型为['C3D8R'，'C3D8'，'C3D6'，'C3D4']，当"baseElementType"为其中一种时，则提取"data"与"nodeLabels"中的数据并分别进行拼接。

相较于逐点提取的方式，方法一与方法二均是极高效的方法，但两种方法在具体使用时存在一些区别：使用方法一，应在前处理中默认应力结果输出位置为积分点，由于使用了getSubset函数，其提取效率较方法二略有降低；使用方法二，需要在前处理中将应力结果输出位置设置为节点，否则"nodeLabels"会为空，方法二实际上是将积分点应力外推至节点的步骤前移至求解阶段，这会造成ODB结果文件大小较使用方法一时有所增加。为进一步提高疲劳评估效率，本研究使用方法二。

1.3　节点唯一应力数据获取方法

积分点外推至节点的应力数据转换为节点唯一应力数据是ABAQUS后处理二次开发中的一个难点。结果文件中应力数据乱序且不连续存储，但应力数据块与节点编号数据块的元素是一一对应的，该关联关系是计算节点唯一应力分量的关键。

计算程序流程如图2所示。使用unique方法对完成提取与拼接后的节点编号数据块进行去重与排序，得到list1，同时返回节点编号数据块中各元素，得到list2。使用bincount方法处理list2，得到list2中各元素的重复次数list3。bincount方法可以设置一个权重参数，使用默认设置的作用是统计重复次数，当权重参数设置为应力数据块中的一组应力分量即数据块一列数据时，可得到每个节点对应的积分点外推应力之和list4，将list4与list3逐元素相除，得到一个工况所有节点的一组应力分量。遍历全部工况的6组应力分量，按照对称矩阵形式重新排列，最终将得到一个巨大的多维矩阵，其维度为工况数量×节点数量×3×3。

1.4　节点主应力和主方向计算方法

ODB结果文件中没有以数据块形式存储主应力，

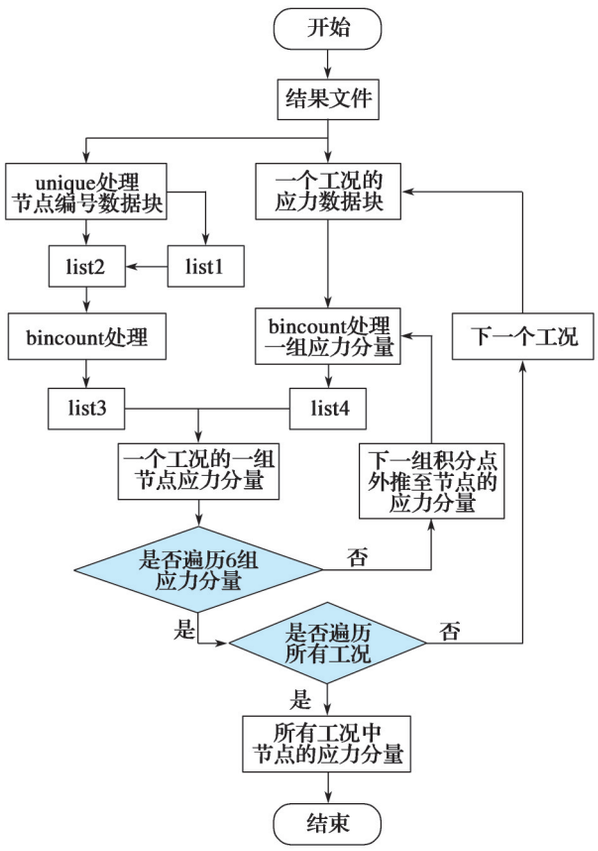


图2　节点应力分量计算程序流程

Fig. 2　Process flow of node stress component calculation program

因此只能以逐点提取的方式获取。在得到各节点应力分量后，直接计算节点主应力、主方向显然是更高效的方法。

实对称矩阵可被对角化，即存在一个正交矩阵使得其转置与原矩阵的乘积为对角矩阵。这个对角矩阵的对角元素即为原矩阵的特征值，而正交矩阵的列向量即为对应的特征向量。

对于空间应力状态，应力分量矩阵是一个实对称矩阵，其特征值就是3个主应力，对应的特征向量就是主应力的方向。因此，可通过对应力分量矩阵进行特征值分解，直接获得主应力与主方向。

Numpy支持使用矩阵向量化的处理方式，可以一次性得到所有节点的主应力与主方向，在处理大量节点应力数据时能显著提高计算效率。

1.5　数据写入方法

评估所需的各种数据获取完成后，才能进行正式评估，将评估结果正确写入结果文件是可视化的前提。结果数据写入必须依托于新的fieldOutput对象，使用FieldOutput构造函数可以创建新fieldOutput对象，参数包括：场输出名称、描述、变量类型。使用addData方法可以向fieldOutput对象写入数据，参数包括：写入位置、指定节点集合和数据集。材料利用度的变量类型为标量，写入位置为节点处。

2 DVS 1612标准疲劳强度评定方法

DVS 1612标准认为，平行焊缝方向、垂直于焊缝方向的正应力与沿焊缝方向的剪应力对结构疲劳失效均有贡献。因此应先建立局部坐标系，进而计算局部坐标系下的应力分量。基于各工况节点的最大主应力方向建立了母材区域局部坐标系[13]，基于焊缝几何形状建立了焊缝局部坐标系，焊缝可分为直线型与曲线型两类。完成应力分量的坐标变换后，再根据DVS 1612标准计算出各方向的许用应力、材料利用度与综合利用度。

2.1 直线型焊缝局部坐标系

直线型焊缝如图3所示，定义评估点为点B，其前后相邻的焊缝评估点为点A与点C，取直线ABC以外的点D为参考点。此时，评估点B局部坐标系的x'轴沿焊缝方向，y'轴垂直于焊缝方向并位于BCD平面，z'轴垂直于BCD平面。局部坐标系方向向量为：

$$\boldsymbol{O'X'}=(x_C-x_B,y_C-y_B,z_C-z_B) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{O'Z'}=(x_D-x_B,y_D-y_B,z_D-z_B)\times\boldsymbol{O'X'} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{O'Y'}=\boldsymbol{O'X'}\times\boldsymbol{O'Z'} \tag{3}$$

式中：x_B，y_B，z_B为节点B在全局坐标系下的坐标值；x_C，y_C，z_C为节点C在全局坐标系下的坐标值；x_D，y_D，z_D为节点D在全局坐标系下的坐标值。

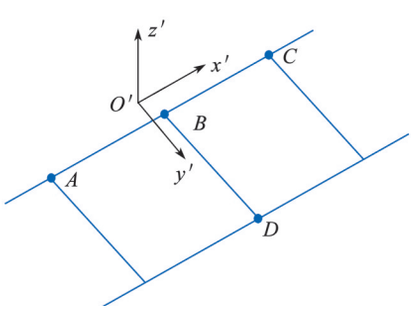


图3 直线型焊缝

Fig. 3 Straight weld

2.2 曲线型焊缝局部坐标系

计算曲线型焊缝局部坐标系时，常用的工程方法是计算当前评估点与前后两点形成圆的圆心位置，以评估点位置的切线方向为x'轴方向，评估点所在的半径方向为y'轴方向，z'轴同时垂直于x'轴与y'轴。曲线型焊缝如图4所示，定义评估点为点F，其前后相邻的评估点为点E与点G，点E、F、G 3点确定圆的圆心为点H。

设以点H为球心且过E、F、G 3点的球面的一般方程与标准方程为：

$$x^2+y^2+z^2+Ax+By+Cz+D=0 \tag{4}$$

$$(x+\frac{A}{2})^2+(y+\frac{B}{2})^2+(z+\frac{C}{2})^2=\frac{A^2+B^2+C^2-4D}{4} \tag{5}$$

式中：A、B、C、D为未知参数。

由式(5)可得圆心点H在全局坐标系下的坐标如下：

$$x_H=-\frac{A}{2},y_H=-\frac{B}{2},z_H=-\frac{C}{2} \tag{6}$$

由几何关系可知，点E、F、G 3点所在平面的法向量$\boldsymbol{v}$垂直于$\boldsymbol{HF}$，向量$\boldsymbol{v}$由向量$\boldsymbol{EF}$与向量$\boldsymbol{FG}$的向量积确定：

$$\boldsymbol{v}=(x_E-x_F,y_E-y_F,z_E-z_F)\times(x_F-x_G,y_F-y_G,z_F-z_G) \tag{7}$$

$$(x_H-x_F,y_H-y_F,z_H-z_F)\cdot\boldsymbol{v}=0 \tag{8}$$

式中：x_E，y_E，z_E为节点E在全局坐标系下的坐标值；x_F，y_F，z_F为节点F在全局坐标系下的坐标值；x_G，y_G，z_G为节点G在全局坐标系下的坐标值。

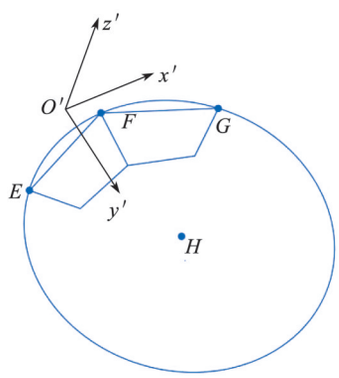


图4 曲线型焊缝

Fig. 4 Curved weld

设$\boldsymbol{v}=(a_1,a_2,a_3)$，将$E$、$F$、$G$ 3点坐标代入式(4)并与式(8)联立得到式(9)。

$$\begin{bmatrix} x_E & y_E & z_E & 1 \\ x_F & y_F & z_F & 1 \\ x_G & y_G & z_G & 1 \\ \frac{a_1}{2} & \frac{a_2}{2} & \frac{a_3}{2} & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -(x_E^2+y_E^2+z_E^2) \\ -(x_F^2+y_F^2+z_F^2) \\ -(x_G^2+y_G^2+z_G^2) \\ -(a_1x_F+a_2y_F+a_3z_F) \end{bmatrix} \tag{9}$$

由式(9)计算出未知参数A、B、C、D，即得到圆心点H的坐标，评估点F的局部坐标系方向向量由式(10)~式(12)计算。

$$\boldsymbol{O'Y'}=(x_H-x_F,y_H-y_F,z_H-z_F) \tag{10}$$

$$\boldsymbol{O'Z'}=\boldsymbol{O'Y'}\times(x_G-x_F,y_G-y_F,z_G-z_F) \tag{11}$$

$$\boldsymbol{O'X'}=\boldsymbol{O'Z'}\times\boldsymbol{O'Y'} \tag{12}$$

2.3 局部坐标系下的应力分量

节点在全局坐标系下的应力分量有正应力分量σ_x、σ_y、σ_z，剪应力分量σ_{xy}、σ_{yz}、σ_{xz}，由式(13)转换为局部坐标系下的应力分量。

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x'} & \sigma_{x'y'} & \sigma_{x'z'} \\ \sigma_{y'x'} & \sigma_{y'} & \sigma_{y'z'} \\ \sigma_{z'x'} & \sigma_{z'y'} & \sigma_{z'} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_2 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} \tag{13}$$

式中：l_1，m_1，n_1为局部坐标系x'轴与全局坐标系3个

坐标轴夹角的方向余弦；l_2，m_2，n_2为局部坐标系y'轴与全局坐标系3个坐标轴夹角的方向余弦；l_3，m_3，n_3为局部坐标系z'轴与全局坐标系3个坐标轴夹角的方向余弦。

2.4　DVS 1612标准

得到节点在局部坐标系下各工况的应力分量后，可获得节点应力分量的最大值($\sigma_{x',\max}$，$\sigma_{y',\max}$，$\sigma_{x'y',\max}$)与最小值($\sigma_{x',\min}$，$\sigma_{y',\min}$，$\sigma_{x'y',\min}$)。DVS 1612标准提供了许用应力计算方法，当平均应力$\sigma_m \geqslant 0$时，许用正应力σ_{zul}为

$$\sigma_{zul}(R_\sigma)=150\times 1.04^{-x}\frac{2(1-0.3R_\sigma)}{1.3(1-R_\sigma)} \tag{14}$$

式中：x为接头形式与等级确定的参数；R_σ为应力比。

当平均应力$\sigma_m \leqslant 0$时，许用正应力σ_{zul}为

$$\sigma_{zul}(R_\sigma)=150\times 1.04^{-x}\frac{2}{1-\kappa} \tag{15}$$

式中：κ为正应力呈压应力特征时的应力比，其数值为$1/R_\sigma$。

剪应力许用应力τ_{zul}为

$$\tau_{zul}(R_\tau)=\tau_{zul,R=-1}\frac{2(1-0.17R_\tau)}{1.17(1-R_\tau)} \tag{16}$$

式中：$\tau_{zul,\ R=-1}$为应力比为−1时的剪应力疲劳极限；R_τ为应力比。

DVS 1612标准仅提供了S355与S235两种材料的MKJ疲劳曲线图，当材料为以上两种材料以外的钢材时，许用应力需按一定要求进行插值。

标准还规定许用应力需按式(17)、式(18)进行板厚影响修正。

$$\sigma_{zul,t}=\sigma_{zul}(R_\sigma)\cdot\left(\frac{10}{t}\right)^{0.1} \tag{17}$$

$$\tau_{zul,t}=\tau_{zul}(R_\sigma)\cdot\left(\frac{10}{t}\right)^{0.1} \tag{18}$$

式中：t为板材厚度。

评估点各方向材料利用度与综合利用度应满足式(19)~式(22)。

$$D_{\sigma x'}=\left|\frac{\sigma_{x',\max}}{\sigma_{x',zul,t}}\right|\leqslant 1.0 \tag{19}$$

$$D_{\sigma y'}=\left|\frac{\sigma_{y',\max}}{\sigma_{y',zul,t}}\right|\leqslant 1.0 \tag{20}$$

$$D_{\sigma x'y'}=\left|\frac{\sigma_{x'y',\max}}{\tau_{zul,t}}\right|\leqslant 1.0 \tag{21}$$

$$D_{sum}=\left[\left(D_{\sigma x'}^2+D_{\sigma y'}^2-D_{\sigma x'}\cdot D_{\sigma y'}+D_{\sigma x'y'}^2\right)\times\frac{1}{1.1}\right]^{\frac{1}{2}}\leqslant 1.0 \tag{22}$$

式中：$D_{\sigma x'}$、$D_{\sigma y'}$、$D_{\sigma x'y'}$分别为评估点在局部坐标系x'轴、y'轴、z'轴方向的材料利用度；D_{sum}为评估点综合材料利用度。

3　疲劳强度分析程序设计

按照前述的数据提取写入方法、应力计算方法和DVS 1612标准编写构架疲劳强度评估程序。程序由应力数据提取与计算模块、疲劳强度评估模块和交互模块构成，母材与焊缝的等级参数作为全局变量以供调用。应力数据提取与计算模块、疲劳强度评估模块包含于内核文件，交互模块由界面文件与注册文件组成。

3.1　应力数据提取与计算模块

应力数据提取与计算模块负责处理结果文件，最终向后续模块传递3组应力数据和1组节点编号数据，包括节点在全局坐标系下的应力分量、主应力与主方向、有序排列且去重的节点编号。模块工作流程图如图5所示。

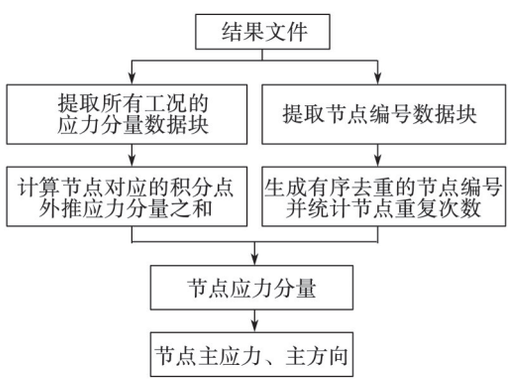


图5　应力数据提取与计算模块工作流程

Fig. 5　Process flow of stress data extraction and calculation module

3.2　疲劳强度评估模块

疲劳强度评估模块分为母材评估与焊缝评估两部分，工作流程如图6所示。该模块接收的参数除应力数据提取与计算模块传递的数据外，还需要母材与焊缝的等级信息、焊缝评估点与应力提取点集合信息。最终向结果文件写入疲劳强度分析结果并打印参与评估的每条焊缝的材料利用度特征图。

DVS 1612标准规定，焊缝评估点的名义应力需外推1.0~1.5倍板厚的距离进行提取。因此在前处理阶段除了建立焊缝评估点集合外，还需建立应力提取点集合。提取点除了提供评估所需应力，还可以作为直线段焊缝的参考点，参与焊缝局部坐标系的计算。

在保证网格尺寸、网格质量与应力外推的条件下，焊缝分布密集区域进行网格划分时可能会出现三棱柱单元，导致焊缝评估点与应力提取点无法一一对应，如图7所示。对此，在计算焊缝区域材料利用度时应增加判断逻辑：对于一个评估点对应两个提取点的情况，

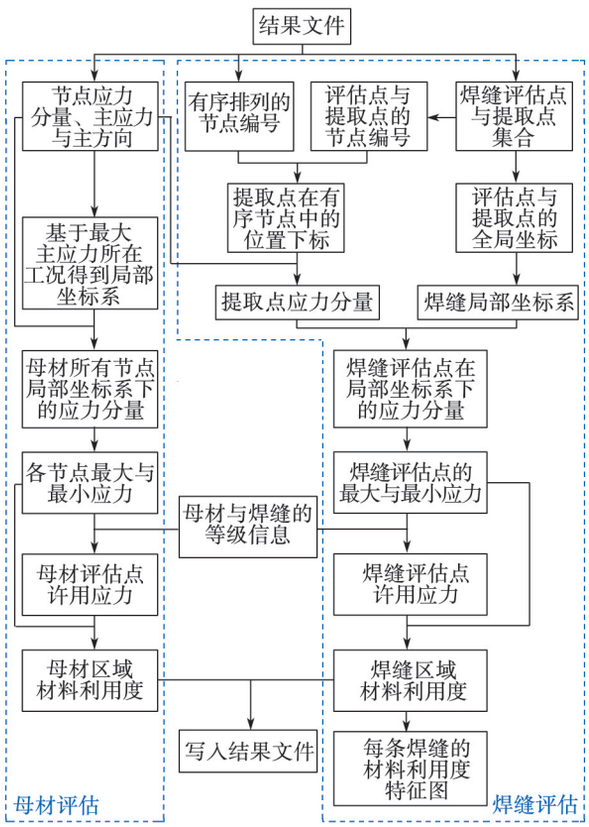


图6　疲劳强度评估模块工作流程

Fig. 6　Process flow of fatigue strength assessment module

评估点应力分量取两个提取点应力分量的平均值；当两个评估点对应一个提取点时，两个评估点的应力分量都取该提取点应力分量。另外，还应考虑到在焊缝首尾就出现三棱柱单元与连续出现两个三棱柱单元的特殊情况。

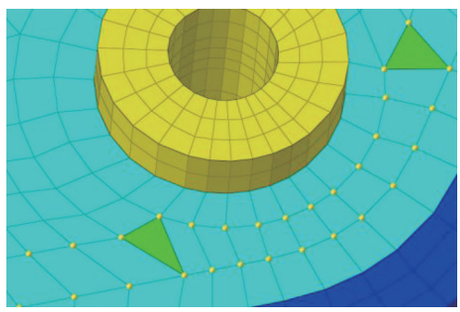


图7　焊缝评估点与应力提取点不一一对应

Fig. 7　Weld evaluation points not in one-to-one correspondence with stress extraction points

3.3　交互模块

交互模块由界面文件与注册文件构成，使用ABAQUS/GUI工具包编程实现。界面文件的功能包括：添加窗口中的各种控件，如“Run”按钮、“取消”按钮、图片、各种数据的输入框与控制流程等。注册文件的功能包括：将界面文件中的参数输入框与内核文件中的函数参数相关联、设置参数默认值、判断输入参数的合法性等[14]。

界面详情如图8所示。界面上半部提供DVS 1612焊缝分级对照表；左下角的焊缝信息表格支持读取文本文件实现焊缝信息录入，也可手动输入或修改焊缝信息；右下角可输入母材的材料信息并指定结果文件路径，参与评估的焊缝材料利用度特征图存于该路径下。



图8　交互界面

Fig. 8　Interactive interface

4　算例

4.1　构架有限元模型与疲劳载荷工况

某地铁车辆转向架焊接构架有限元模型如图9所示。构架主体部分采用六面体与四面体网格进行划分，一系悬挂、抗侧滚扭杆、横向减振器座等结构使用弹簧单元与梁单元模拟。依据国际铁路联盟标准UIC 615-4[15]和欧洲标准EN 13749[16]确定65种疲劳载荷工况，各载荷根据具体工况以面载荷和节点载荷作用于相关位置。建立各焊缝的评估点与外推点集合，焊缝、焊缝评估点与外推点分布如图10所示。

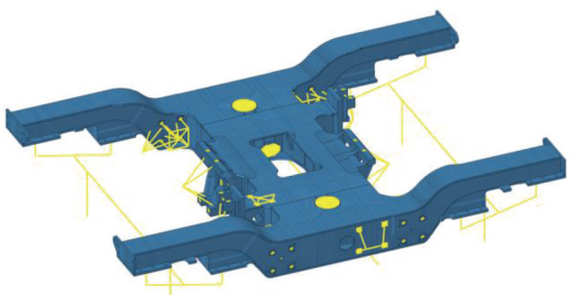


图9　焊接构架有限元模型

Fig. 9　Finite element model of welded frame

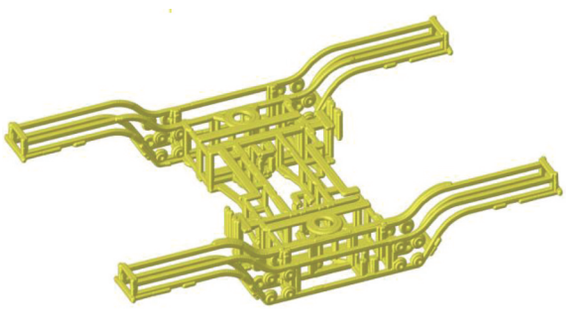


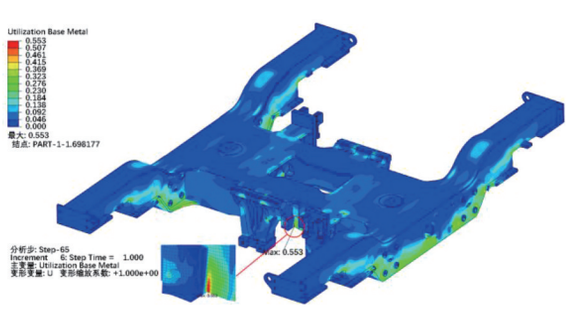
图10　构架焊缝、焊缝评估点与外推点分布

Fig. 10　Distribution of welding seams, evaluation points and extrapolation points in the welded frame

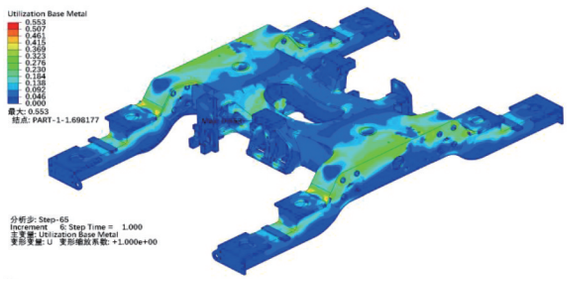
4.2　疲劳强度计算结果

使用疲劳强度分析程序对结果文件进行处理，得到65种疲劳载荷工况作用下的构架母材和焊缝区域的材料利用度分布，如图11和图12所示。

图11表明，侧梁立板与下盖板弯曲区域有较大的母材材料利用度分布，分析焊缝区域疲劳强度时应充分关注侧梁立板与下盖板焊缝区域的材料利用度分布。



(a) 母材区域(+z方向)材料利用度分布



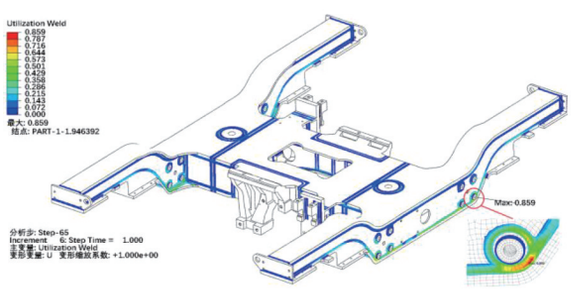
(b) 母材区域(−z方向)材料利用度分布

图11　构架母材区域材料利用度分布

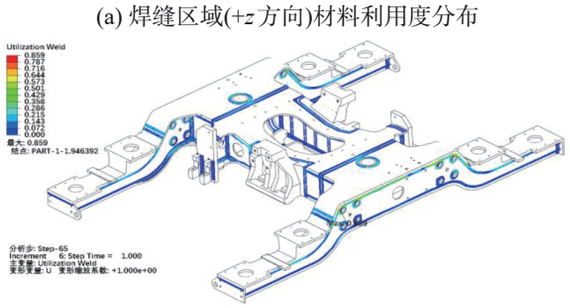
Fig. 11　Distribution of material utilization in the base material area of the frame

母材最大材料利用度为0.553，出现在电机吊座与牵引拉杆座的过渡区域。

图12表明，侧梁立板角焊缝有较大的材料利用度值，最大材料利用度为0.859，位于侧梁外侧立板与下盖板角焊缝的弯曲区域。该焊缝的材料利用度具体特征如图13所示，平行于焊缝方向的材料利用度$D_{\sigma x'}$对综合材料利用度D_{sum}影响最大。



(a) 焊缝区域(+z方向)材料利用度分布



(b) 焊缝区域(−z方向)材料利用度分布

图12　构架焊缝区域材料利用度分布

Fig. 12　Distribution of material utilization in the weld area of the frame

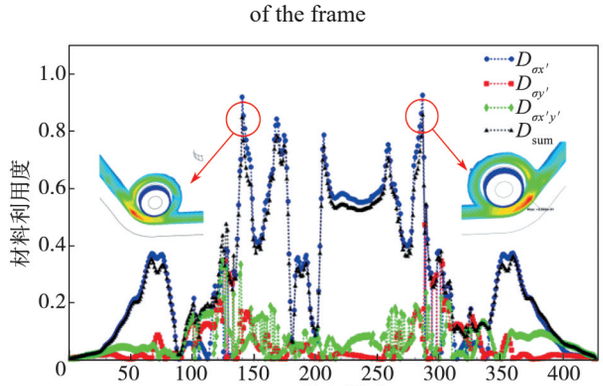


图13　侧梁立板角焊缝材料利用度

Fig. 13　Material utilization of fillet welds on vertical plates of side beam

5 结语

本文基于ABAQUS后处理二次开发技术和DVS 1612标准的疲劳强度评定方法，使用Python语言编程，实现了焊接构架疲劳强度快速评估与可视化，得出以下结论：

①对于ABAQUS结果文件数据提取，提出了两种高效提取方法，可根据分析需求与计算资源选择合适的方法。

②提出一种快速计算ODB结果文件中节点应力分量数据的方法，有效解决进行ABAQUS后处理二次开发时获取节点位置分析结果困难的问题。

③构架电机吊座与牵引拉杆座的过渡区域、侧梁立板与下盖板的母材材料利用度与焊接区域的材料利用度表现出较高水平，在疲劳强度评估与日常运营时应重点关注这些区域的结构安全性。

④基于ABAQUS后处理二次开发的构架疲劳强度分析方法可极大提高疲劳强度分析效率。

参考文献：

[1] 周张义, 杨欣. 转向架焊接构架名义应力容许疲劳强度数据构建研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(7): 57-65.
ZHOU Zhangyi, YANG Xin. Study on establishment of nominal stress permissible fatigue strength data for bogie welded frame[J]. Journal of the China railway society, 2019, 41(7): 57-65.

[2] Deutsches Institut für Normung. Cranes steel structures verification and analyses: DIN 15018-1[S]. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1984.

[3] RENNERT R, MASCHINENBAU F. Analytical strength assessment of components: FKM guideline[M]. 6th ed. Frankfurt: VDMA-Verlag, 2012.

[4] DVS Media. Design and endumnce strength assessment of welded joints with steels in rail-vehicle construction: DVS 1612[S]. Düsseldorf: DVS Media, 2014.

[5] 安琪, 赵华, 刘志远, 等. 基于多轴准则的焊接构架疲劳强度分析方法[J]. 机车电传动, 2019(1): 72-77.
AN Qi, ZHAO Hua, LIU Zhiyuan, et al. Fatigue strength analysis method for welded frame based on multiaxial criteria[J]. Electric drive for locomotives, 2019(1): 72-77.

[6] 梁昊, 米彩盈. 转向架构架局部结构优化与轻量化研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 121-125.
LIANG Hao, MI Caiying. Research on local structure optimization and lightweight improvement of bogie frame[J]. Electric drive for locomotives, 2020(1): 121-125.

[7] 于春洋, 王悦东, 程亚军, 等. 基于DVS 1612标准的焊接构架疲劳强度数值解法研究[J]. 铁道机车车辆, 2022, 42(4): 90-95.
YU Chunyang, WANG Yuedong, CHENG Yajun, et al. Research on numerical solution of fatigue strength of welded frame based on DVS 1612 standard[J]. Railway locomotive & car, 2022, 42(4): 90-95.

[8] 凌扬超, 米彩盈. 基于ANSYS结果文件的结构强度可视化研究[J]. 机车电传动, 2013(5): 88-90.
LING Yangchao, MI Caiying. Visualization of structure strength based on ANSYS result file[J]. Electric drive for locomotives, 2013(5): 88-90.

[9] 王湘银, 金希红. 铁道车辆车体焊接结构疲劳强度分析方法与可视化研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2019, 42(2): 23-26.
WANG Xiangyin, JIN Xihong. Research on fatigue strength analysis method and visualization of welded structure of railway vehicle car body[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2019, 42(2): 23-26.

[10] 王林海, 米彩盈, 方华伟, 等. 基于APDL语言的转向架构架结构局部参数化优化[J]. 机车电传动, 2019(1): 64-67.
WANG Linhai, MI Caiying, FANG Huawei, et al. Parametric structure optimization of bogie frame part based on APDL[J]. Electric drive for locomotives, 2019(1): 64-67.

[11] 苏景鹤, 江丙云. ABAQUS Python二次开发攻略[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
SU Jinghe, JIANG Bingyun. ABAQUS-Python secondary development strategy[M]. Beijing: The People's Posts & Telecommunications Press, 2016.

[12] 周明珏, 王相玉. ABAQUS二次开发手册[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
ZHOU Mingjue, WANG Xiangyu. ABAQUS secondary development manual[M]. Beijing: Science Press, 2021.

[13] 银豪, 张开林, 汪慧明. 基于多轴理论的构架结构疲劳评估系统开发[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(2): 70-75.
YIN Hao, ZHANG Kailin, WANG Huiming. Development of fatigue assessment system of frame structure based on multi-axis theory[J]. Machine building & automation, 2021, 50(2): 70-75.

[14] 王鹰宇. Abaqus GUI工具包用户手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
WANG Yingyu. Abaqus GUI toolkit user's guide[M]. Beijing: China Machine Press, 2018.

[15] UIC. Motive power units - bogies and running gear - bogie-frame structure strength tests: UIC 615-4-2003[S]. Paris: UIC, 2003.

[16] European Committee for Standardization(CEN). Railway applications-wheelsets and bogies-method of specifying the structural requirements of bogie frames: EN 13749: 2021 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2021.

Research on efficient analysis method and visualization for fatigue strength of welded frames based on ABAQUS

GAO Rui, MI Caiying

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Conducting secondary development on CAE software for post-processing stands as an efficacious approach to evaluate fatigue strength in welded frames of railway vehicles. This paper presents a fatigue strength evaluation program for welded frames, employing ABAQUS as the platform and utilizing Python language along with the ABAQUS/GUI toolkit. This program is devised to rapidly extract data from result files, process them, establish local coordinate systems of base metal and welds, and generate comprehensive material utilizations at evaluation points in the local coordinate systems based on the DVS 1612 standard, and write them into result files, enabling rapid analysis and visualization of fatigue strength in welded frames. The proposed approach offers an efficient and feasible way for evaluating fatigue strength in welded frames. This study provides valuable insights for extending the applications of ABAQUS secondary development for post-processing in other domains.

Keywords: ABAQUS secondary development; Python; frame; fatigue strength; DVS 1612 standard; visualization

收稿日期：2023-08-30；修回日期：2023-11-15