



# 钢桥的疲劳分析

## 一. 概要

### 1. 分析概要

钢桥的疲劳裂纹一般是由焊接缺陷、结构的几何形状引起的应力集中、结构的应力变动幅度以及重复加载等原因引起的。重复加载会引起疲劳裂纹发展，严重时会引起结构破坏，因此对抗疲劳较弱的部位应进行分析确定其抗疲劳能力。

本例题中钢桥采用焊接和螺栓连接，分析采用S-N曲线方法即应力-寿命方法确定结构的疲劳寿命和损伤度。

### 2. 分析步骤

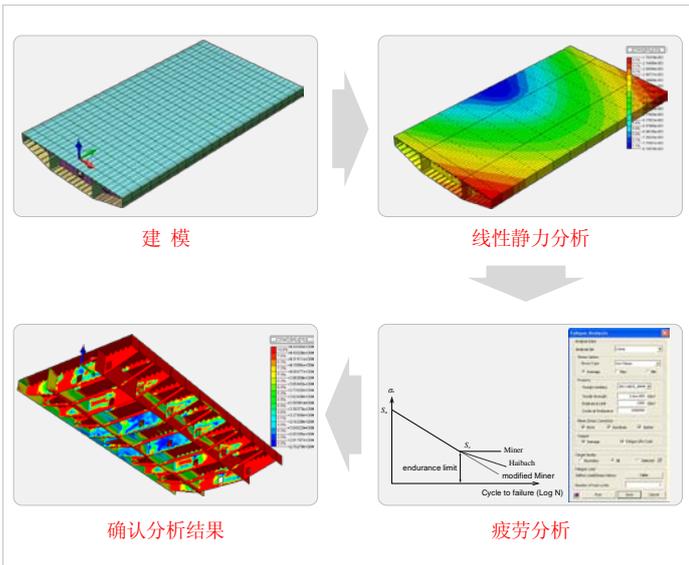
疲劳分析的步骤如下：

- 1) 首先做结构静力分析确定最大和最小应力的绝对值或者计算von Mises应力，从而获得应力幅。
- 2) 当作用应力为变幅时，使用可将各应力幅组成起来的雨流计数法(Rain flow counting)和S-N曲线计算。
- 3) 考虑平均应力的影响确定疲劳寿命和损伤度。

建模 → 线性静力分析 → 应力疲劳分析 → 确认分析结果

### 3. 疲劳分析的注意事项

分析类型应为线性分析，且只对使用各向同性弹性材料模型的结构做疲劳分析。线性分析后，使用得到的应力再做疲劳分析。



## 二. 疲劳分析的理论背景

### 1. 疲劳分析

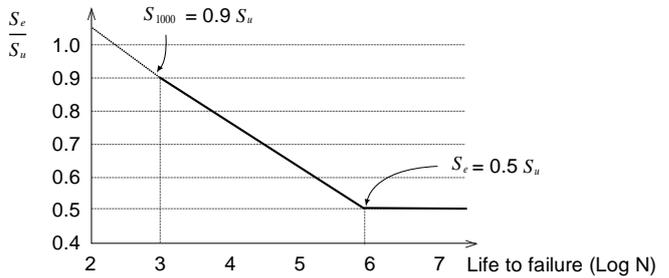
疲劳是指在小于构件的屈服强度的荷载反复作用下构件发生破坏的现象。疲劳分析的方法有应力-寿命法、应变-寿命法。应力寿命法具有计算简单和

分析速度快等特点。midas FEA中利用S-N曲线使用应力寿命法进行疲劳分析。

### 2. S-N 曲线

S-N曲线是等幅反复荷载作用下的应力幅(stress amplitude, S)与构件到达破坏时的循环次数(cycle to failure, N)的关系曲线。

在静力分析结果中取最大绝对应力(maximum absolute stress)和最小绝对应力(minimum absolute stress)或范梅塞斯应力(von Mises stress)计算应力幅(stress amplitude)，然后使用S-N曲线就可以知道发生疲劳破坏时的疲劳寿命和循环次数。



当没有输入材料的S-N曲线时，一般使用如上图所示的S-N曲线。上面的S-N曲线是连接90%最大应力幅( $S_u$ )重复1000次的点与疲劳极限应力幅 ( $S_e=0.5S_u$ )重复1,000,000次的点的曲线。

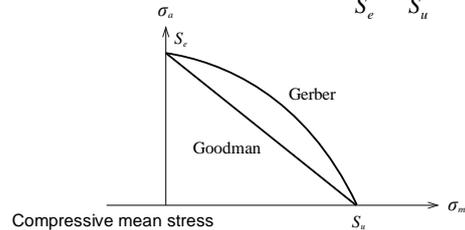
midas FEA中使用Miner准则的S-N曲线，即认为小于疲劳极限应力幅的反复应力对疲劳寿命没有影响。

### 3. 考虑平均应力的影响

即便作用在结构上的应力幅( $\sigma_a$ )相同，但是平均应力( $\sigma_m$ )不相同，结构的疲劳寿命也会不一样。平均应力越大，最大应力和疲劳极限应力就越小。为了考虑平均应力的这种影响，Goodman和Gerber分别建议采用下面公式。

$$\text{Goodman (England, 1899)} \quad \frac{\sigma_a}{S_e} + \left( \frac{\sigma_m}{S_u} \right)^2 = 1$$

$$\text{Gerber (Germany, 1874)} \quad \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1$$



### 4. 雨流计数法(Rain flow Counting)

S-N曲线是等幅(constant amplitude)应力作用下发生疲劳破坏时的反复作用次数的曲线。实际发生的应力一般具有变幅(variable amplitude)特性。

为了计算变幅应力作用下的疲劳损伤，需要将变幅应力转换为多个等幅应力的组合。midas FEA为了统计循环次数使用了雨流计数法。

### 5. 疲劳分析的步骤

重新整理midas FEA中疲劳分析的步骤如下:

1. 进行弹性分析后, 在后处理中查看应力数据。
2. 确认不利荷载工况下的主应力绝对值。
3. 使用应力集中系数调整弹性应力。
4. 使用雨流计数法分析荷载历程图形。
5. 使用修正系数调整S-N曲线中应力幅。
6. 考虑平均应力的影响计算损伤程度。
7. 使用Miner准则将损伤程度线性组合。
8. 计算所有位置的疲劳寿命或安全系数。

## 三. 建立基本模型

### 1. 打开结构模型

操作步骤

文件 > 打开...

1. 选择 [Fatigue\_Analysis.feb]

**横截面**

**三维板模型**

### ■ 分析概要

本例题是介绍疲劳分析的过程和查看结果的方法, 所以省略了建模的过程, 直接打开已经建立的模式。  
例题模型是使用钢桥面板的箱形桥梁, 跨度为27.5m, 用板单元模拟。桥幅宽度为15m, 梁高为2.5m, 横隔梁间距为5.0m, 上部U型加劲肋间距为0.64m。

### ■ 线性静力分析

线性静力分析采用的荷载有自重和二期恒载, 活荷载采用韩国车道荷载, 活荷载布置位置为跨中横隔梁发生最大弯矩位置时的最不利布置。

### ■ 疲劳分析

首先确定疲劳分析时使用的最大应力的类型、结构材料的S-N曲线、反复荷载的形状和大小。

### ■ 疲劳分析结果

确认考虑平均应力(Goodman, Gerber)或不考虑平均应力时的损伤程度和反复循环次数。即确认疲劳引起的损伤以及在疲劳荷载作用下发生疲劳破坏时循环次数(疲劳寿命)。

## 四. 线性静力分析

### 1. 设置分析工况

操作步骤

分析 > 分析工况...

1. 点击 [添加]
2. 名称: 输入 [Linear]
3. 在分析类型中选择 [线性静态]
4. 在初始单元和初始边界中勾选 [全部]
5. 鼠标按住荷载组拖放到使用位置
6. 勾选 [各荷载组为独立的荷载工况]
7. 点击 [确认]

### 各荷载组为独立的荷载工况选项说明:

分析工况中各荷载组决定疲劳分析时的变化历程曲线。各荷载组具有不同的荷载曲线和应力集中系数(stress concentration factor)并形成不同的荷载历程曲线(load history curve)。各荷载历程曲线通过线性组合形成一个荷载历程曲线, 所以分析时各荷载组应相互独立不关联。  
各荷载的变化历程曲线可以在疲劳分析的输入窗口中的疲劳荷载中定义。

操作步骤

分析 > 运行...

1. 选择 [Linear] 分析工况
2. 点击 [确认]

## ■ 定义分析工况的方法

midas FEA中使用S-N曲线的应力寿命方法进行疲劳分析，所有应变均为弹性应变，所以分析类型中应选择线性分析，并且只有定义了各向同性弹性材料的部分才能做疲劳分析。

## 五. 疲劳分析

### 1. 定义疲劳分析

操作步骤

后处理 > 疲劳分析...

1. 分析组 [Linear]
2. 应力类型 [范梅塞斯应力], [平均]
3. 杨氏模量 [mat1]
4. 抗拉强度: "360000 kN/m<sup>2</sup>"
5. 承载极限: "90000 kN/m<sup>2</sup>"
6. 承载循环: "1.0e6"
7. 勾选 "无", "Goodman" "Gerber"
8. 勾选 "破坏", "疲劳寿命周期"
9. 目标节点: 全部
10. 点击 "定义荷载/应力历史 [表格]"

### 分析工况

因为疲劳分析使用线性静力分析中的应力，所以在选择列表中显示的是静力分析工况。

### 应力选项

决定疲劳分析时的应力类型，可以选择范梅塞斯应力和主应力。

### 特性

该对话框中的材料特性对线性静力分析没有影响，需要输入疲劳分析所需的材料特性。可以输入的材料模型是各向同性弹性材料。

### 考虑平均应力

选择是否考虑平均应力的修正以及考虑平均应力的方法。

**不修正**：不考虑平均应力。

**Goodman**：按Goodman公式考虑平均应力。

**Gerber**：按Gerber公式考虑平均应力。

### 输出

选择要输出的疲劳分析的结果。

**损伤度**：输出疲劳引起的损伤度，单位是%。

**疲劳寿命周期**：输出疲劳寿命，用疲劳荷载的反复次数表示。

### 输出节点

选择输出疲劳分析结果的节点。

**边界**：模型表面的节点。

**全部**：所有节点。

**选择**：选择的网格组内的节点。

### 疲劳荷载

定义各荷载组的荷载变化历程曲线。程序将对各荷载历程曲线进行线性组合形成一个历程曲线。

**表格**：在表格中定义荷载历程曲线。

### ■ 对“应力选项”的说明

在应力选项中选择疲劳分析中使用的应力类型和节点上应力的计算方法。midas FEA的疲劳分析中使用的应力是节点应力。

有限元分析中的节点应力在单元之间是不连续的，即各单元在共享节点上的应力是不同的。程序中提供的节点应力的取值方法有绕节点平均法、取最大值法、取最小值法等。

应力类型提供范梅塞斯应力和主应力。

### 应力类型

#### ① 范梅塞斯

节点周围有四个单元时，取范梅塞斯准则的最大、最小应力。

#### ② 主应力

首先取主应力的绝对值，当选择最大值时取各最大值中的最大值；当选择最小值时取各最小值中的最小值。

### 应力值

#### ① 平均

取各单元在共享节点上的应力平均值(绕节点平均法)

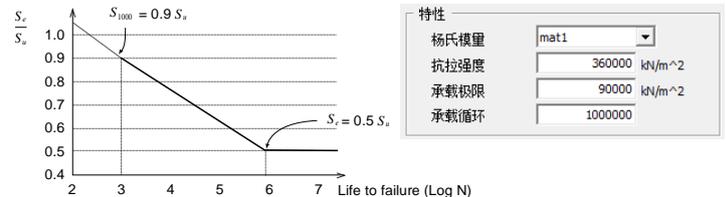
#### ② 最大/最小

取各单元在共享节点上的应力中最大/最小值。

### ■ 对“S-N 曲线”的说明

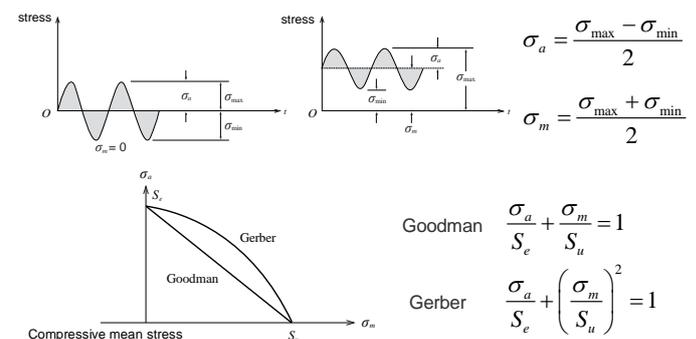
使用S-N曲线定义疲劳分析时反复荷载作用下产生的应力幅(S)与应力幅作用下发生疲劳的反复循环次数(N)之间的关系。

极限抗拉强度(Tensile Strength)应大于线性分析结果的应力和疲劳极限应力(Endurance Limit)。



### ■ 对“考虑平均应力修正”的说明

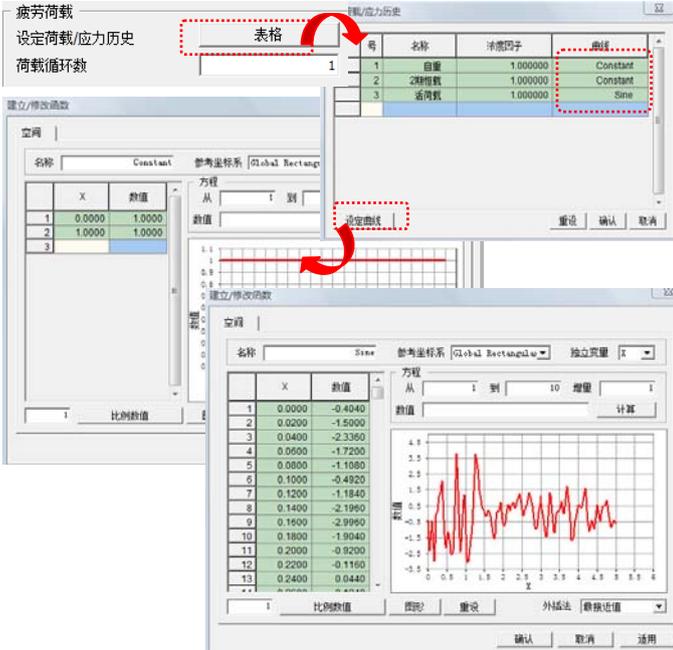
即便作用在结构上的应力幅( $\sigma_a$ )相同，但是平均应力( $\sigma_m$ )不同时，疲劳寿命也会不同。为了考虑平均应力对疲劳寿命的影响，Goodman和Gerber提出了下面的修正公式。



■ 对“疲劳荷载”的说明

疲劳荷载由几个疲劳荷载组构成，疲劳荷载组由线性分析中的荷载组的应力和用户定义的历程曲线构成。

线性分析的应力结果乘以历程曲线就是疲劳荷载组。多个疲劳荷载组将组成一个疲劳荷载，使用该疲劳荷载进行疲劳分析。



线性分析结果

疲劳分析结果



定义荷载谱/应力谱

通过定义集中系数、荷载组、曲线等定义疲劳荷载组。

定义荷载重复次数

输入疲劳荷载重复的次数。

■ 疲劳分析数据

疲劳分析中的数据整理如下：

1. 做疲劳分析的节点的线性分析应力结果
2. 节点的荷载谱
3. 荷载重复次数
4. 疲劳特性
5. 平均应力选项

六. 查看分析结果

1. 输出的分析结果内容

■ 树形菜单的后处理模式

完成疲劳分析后左侧树形菜单中将出现线性分析结果，其下面将生成“线性分析工况名称(疲劳)”目录，该目录下输出疲劳分析结果。

根据在“疲劳分析”对话框中选择的是否考虑平均应力以及输出选项内容的不同，树形菜单中将生成不同的结果目录。

寿命周期

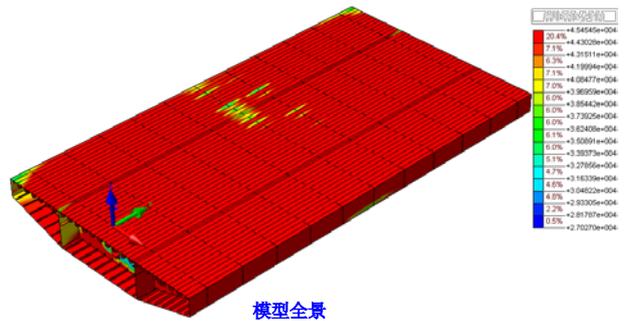
输出当前疲劳荷载作用下发生疲劳破坏的荷载重复次数。

损伤度

输出疲劳引起的损伤程度，用%表示。

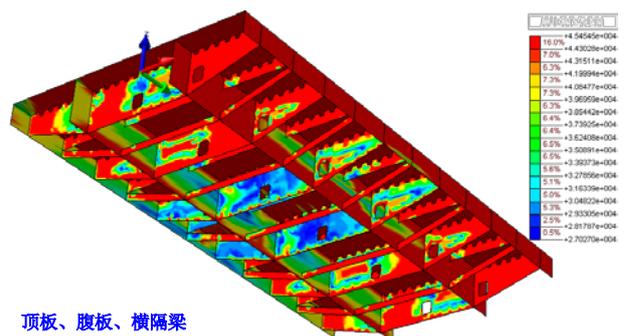
2. 寿命周期和损伤度

1) 寿命周期(不考虑平均应力)



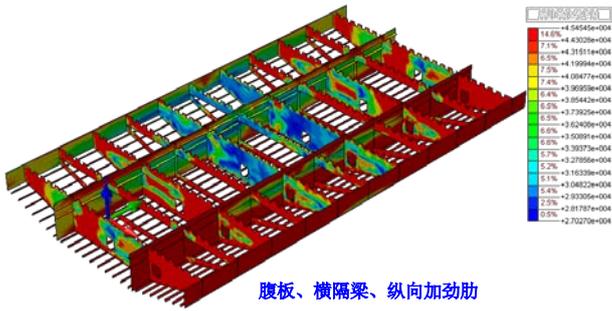
模型全景

2) 寿命周期(Goodman)

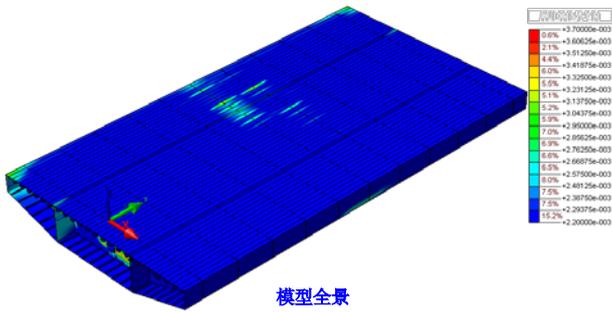


顶板、腹板、横隔梁

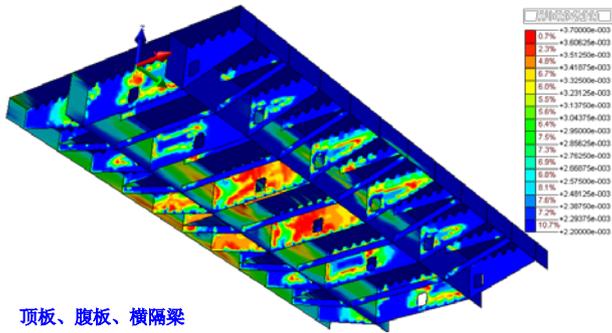
3) 寿命周期(Gerber)



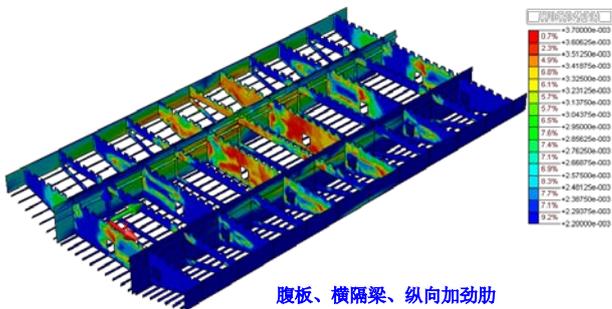
4) 损伤度(不考虑平均应力)



5) 损伤度(Goodman)



6) 损伤度(Gerber)



7) 考虑平均应力修正后的寿命周期和损伤度的最大、最小值

平均应力修正	寿命周期(次数)		损伤度(%)	
	最大	最小	最大	最小
不考虑	45,450	27,030	0.0037	0.0022
Goodman	45,450	27,030	0.0037	0.0022
Gerber	45,450	27,030	0.0037	0.0022

■ 结论

根据S-N曲线得到的疲劳分析结果，活荷载引起的应力幅较大的应力集中位置的疲劳寿命为27,030次，其它部位为45,450次，损伤程度的范围为0.0022%~0.0037%。

综上所述，在应力集中位置和承受持续的反复荷载的位置，需要详细分析在允许应力范围内荷载作用下的疲劳寿命和损伤程度，避免突然发生疲劳破坏。