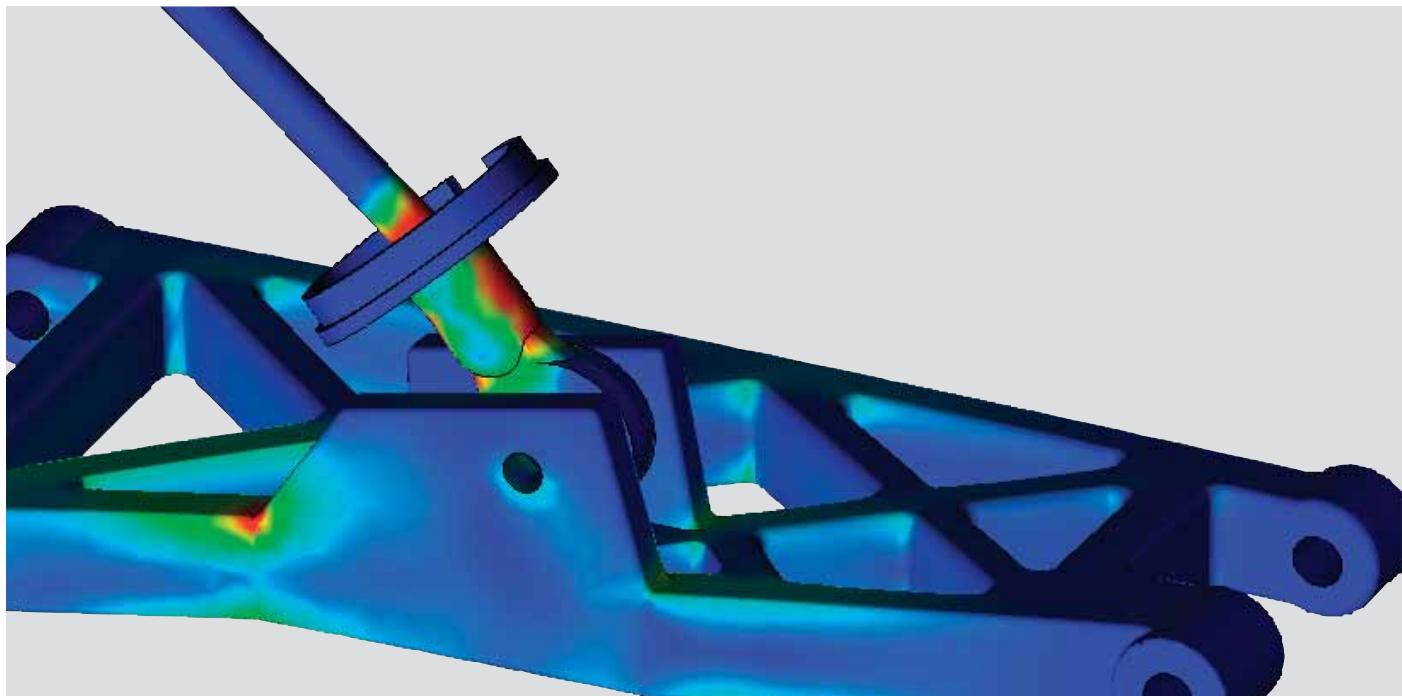


# 抗疲劳设计

## 摘要

1954 年，世界上第一款商业客机 de Havilland Comet 接连发生了两起坠毁事故，这使得“金属疲劳”一词出现在新闻头条中，引起公众持久的关注。这种飞机也是第一批使用增压舱的飞行器，采用的是方形窗口。增压效应和循环飞行载荷的联合作用导致窗角出现裂纹，随着时间的推移，这些裂纹逐渐变宽，最后导致机舱解体。Comet 空难夺去了 68 人的生命，这场悲剧无时无刻不在提醒着工程师创建安全、坚固的设计。



自此以后，人们发现疲劳是许多机械零部件（例如在高强度周期性循环载荷下运行的涡轮机和其他旋转设备）失效的罪魁祸首。

事实证明，有限元分析 (FEA) 是用于了解、预测和避免疲劳的首要工具。

## 什么是疲劳？

设计人员通常认为最重要的安全因素是零部件、装配体或产品的总体强度。为使设计达到总体强度，工程师需要使设计能够承载可能出现的极限载荷，并在此基础上再加上一个安全系数，以确保安全。

但是，在运行过程中，设计几乎不可能只承载静态载荷。在绝大多数的情况下，设计所承载的载荷呈周期性变化，反复作用，随着时间的推移，设计就会出现疲劳。

实际上，疲劳的定义为：“由单次作用不足以导致失效的载荷的循环或变化所引起的失效”。疲劳的征兆是局部区域的塑性变形所导致的裂纹。此类变形通常发生在零部件表面的应力集中部位，或者表面上或表面下业已存在但难以被检测到的缺陷部位。尽管我们很难甚至不可能在 FEA 中对此类缺陷进行建模，但材料中的变化永远都存在，很可能会有一些小缺陷。FEA 可以预测应力集中区域，并可以帮助设计工程师预测他们的设计在疲劳开始之前能持续工作多长时间。

疲劳的机制可以分成三个相互关联的过程：

1. 裂纹产生
2. 裂纹延伸
3. 断裂

FEA 应力分析可以预测裂纹的产生。许多其他技术，包括动态非线性有限元分析可以研究与裂纹的延伸相关的应变问题。由于设计工程师最希望从一开始就防止疲劳裂纹的出现，本白皮书主要从该角度对疲劳进行阐述。关于疲劳裂纹增长的讨论，请参阅附录 A。

---

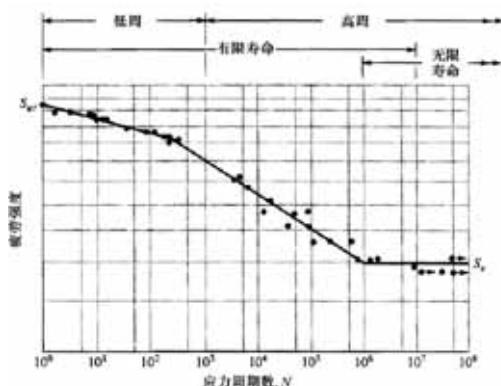
实际上，疲劳的定义为：“由单次作用不足以导致失效的载荷的循环或变化所引起的失效”。

## 确定材料的疲劳强度

裂纹开始出现的时间以及裂纹增长到足以导致零部件失效的时间由下面两个主要因素决定：零部件的材料和应力场。材料疲劳测试方法可以追溯到 19 世纪，由 August Wöhler 第一次系统地提出并进行了疲劳研究。标准实验室测试采用周期性载荷，例如旋转弯曲、悬臂弯曲、轴向推拉以及扭转循环。科学家和工程师将通过此类测试获得的数据绘制到图表上，得出每类应力与导致失效的周期重复次数之间的关系，或称 S-N 曲线。工程师可以从 S-N 曲线上得出在特定周期数下材料可以承受的应力水平。

该曲线分为高周疲劳和低周疲劳两个部分。一般来说，低周疲劳发生在 10,000 个周期之内。曲线的形状取决于所测试材料的类型。某些材料，例如低碳钢，在特定应力水平（称为耐疲劳度或疲劳极限）下的曲线比较平缓。不含铁的材料没有耐疲劳度极限。大体来说，只要在设计中注意应用应力不超过已知的耐疲劳度极限，零部件一般不会在工作中出现失效。但是，耐疲劳度极限的计算不能解决可能导致局部应力集中的问题，即应力水平看起来在正常的“安全”极限以内，但仍可能导致裂纹的问题。

材料疲劳测试方法可以追溯到 19 世纪，由 August Wöhler 第一次系统地提出并进行了疲劳研究。

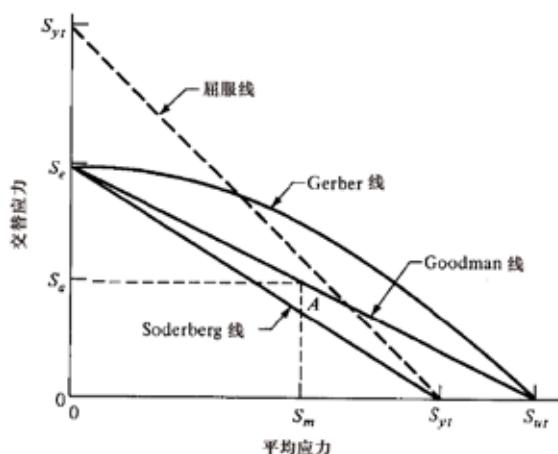


S-N (应力与周期) 曲线示例

与通过旋转弯曲测试确定的结果相同，疲劳载荷历史可以提供关于平均应力和交替应力的信息。测试显示，裂纹延伸的速度与载荷周期和载荷平均应力的应力比率有关。裂纹仅在张力载荷下才会延伸。因此，即使载荷周期在裂纹区域产生压缩应力，也不会导致更大的损坏。但是，如果平均应力显示整个应力周期都是张力，则整个周期都会导致损坏。

许多工况载荷历史中都会有非零的平均应力。人们发明了三种平均应力修正方法，可以省去必须在不同平均应力下进行疲劳测试的麻烦：

- Goodman 方法：通常适用于脆性材料
- Gerber 方法：通常适用于韧性材料
- Soderberg 方法：通常最保守



平均修正方法

企业希望也需要降低重量并减少材料的使用，同时避免因疲劳而导致的失效，这种失效即使不是致命的，代价也可能非常巨大。所有这些因素都表明在设计过程的初期进行疲劳工程研究愈加重要。

这三种方法都只能应用于所有相关联的 S-N 曲线都基于完全反转载荷的情况。而且，只有所应用疲劳载荷周期的平均应力与应力范围相比很大时，修正才有意义。上图显示了交替应力、材料应力极限和载荷平均应力之间的关系，该图称为 Goodman 图表。

实验数据显示，失效判据位于 Goodman 曲线和 Gerber 曲线之间。这样，就需要一种实用的方法基于这两种方法并使用最保守的结果来计算失效。

## 疲劳寿命的计算方法

对每个设计进行物理测试明显是不现实的。在多数应用中，疲劳安全寿命设计需要预测零部件的疲劳寿命，从而确定预测的工况载荷和材料。

计算机辅助工程 (CAE) 程序使用三种主要方法确定总体疲劳寿命。这些方法是：

### 应力寿命 (SN)

这种方法仅基于应力水平，只使用 Wöhler 方法。尽管不适用于包含塑性部位的零部件，低周疲劳的精确度也乏善可陈，但这种方法最容易实施，有丰富的数据可供使用，并且在高周疲劳中有良好的效果。

### 应变寿命 (EN)

这种方法可以对局部区域的塑性变形进行更详细的分析，非常适合低周疲劳应用。但是，结果存在一些不确定性。

### 线性弹性破坏力学 (LEFM)

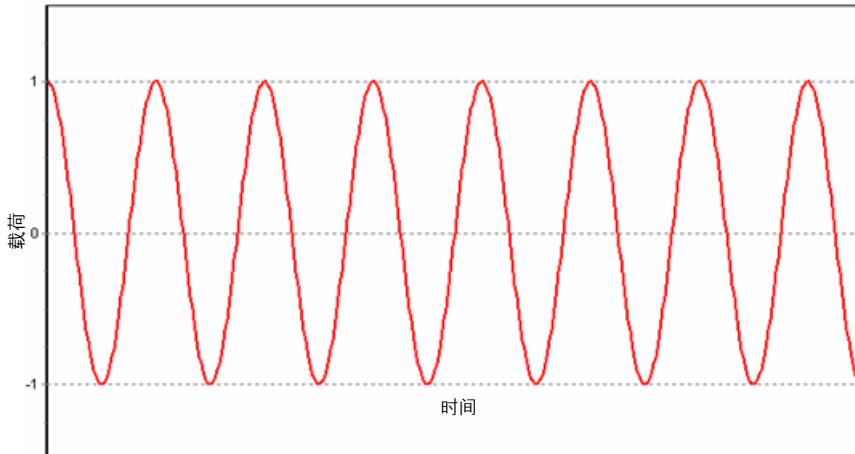
这种方法假设裂缝已经存在并且被检测到，然后根据应力强度预测裂缝的增长。借助计算机代码和定期检查，这种方法对大型结构很实用。

由于易于实施并且有大量的材料数据可用，SN 是最常用的方法。

## 设计人员使用 SN 方法计算疲劳寿命

在计算疲劳寿命时，应考虑等幅载荷和变幅载荷。下面是不同结果的简要说明。

### 等幅载荷：



等幅载荷

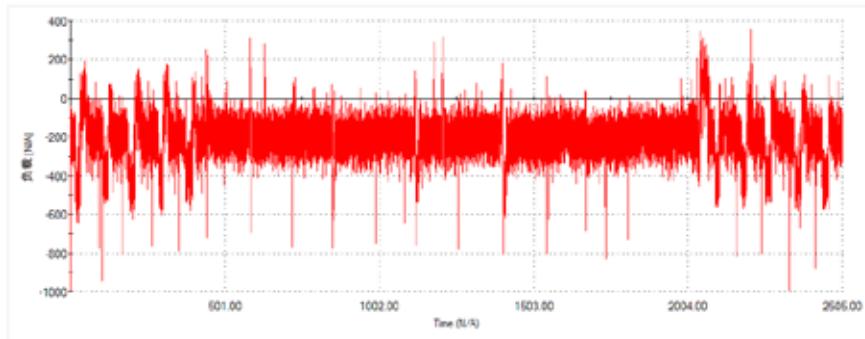
这种方法假设零部件在恒定的幅度、恒定的平均应力载荷周期下工作。通过使用 SN 曲线，设计人员可以快速计算导致零部件发生失效的此类周期数量。

对每个设计进行物理测试明显是不现实的。在多数应用中，疲劳安全寿命设计需要预测零部件的疲劳寿命，从而确定预测的工况载荷和材料。

在计算疲劳寿命时，应考虑等幅载荷。

而对于零部件需要在多种载荷下工作的情况，则可采用 Miner 规则来计算每种载荷情况的损坏结果，并将所有这些损坏结果合并起来获得一个总体的破坏值。其结果称为“损坏因子”，是一个失效分数值。零部件在  $D = 1.0$  时发生失效，因此，如果  $D = 0.35$ ，该零部件的寿命已经消耗了 35%。这一理论还认为由应力周期导致的损坏与损坏在载荷历史的哪个位置发生无关，并且损坏积累速度与应力水平无关。

### 变幅载荷：



变幅载荷

在真实的环境条件下，多数零部件承载的载荷历史是不断变化的，幅度和平均应力都是如此。因此，更为通用和现实的方法需要考虑变幅载荷，在这种情况下，应力尽管随着时间循环反复，但其幅度是变化的，这就有可能将应力分解成载荷“块”。在处理这种类型的载荷时，工程师使用一种称为“雨流法计数”的技术。附录 B 讨论如何研究 FEA 疲劳结果，它就雨流法计数提供了更多信息。

在通过 SN 方法研究疲劳方面，FEA 提供了一些非常优秀的工具，这是因为输入由线弹性应力场组成，并且 FEA 能够处理多种载荷情况交互作用的可能情形。如果要计算最坏情况的载荷环境（这是一种典型方法），系统可以提供大量不同的疲劳计算结果，包括寿命周期图、破坏图以及安全系数图。此外，FEA 可以提供较小主要交替应力除以较大主要交替应力的比率的图解（称为双轴性指示图），以及雨流矩阵图。后者是一个 3D 直方图，其中的 X 和 Y 轴代表交替应力和平均应力，Z 轴代表每个箱所计的周期数。

---

在通过 SN 方法研究疲劳方面，FEA 提供了一些非常优秀的工具，这是因为输入由线弹性应力场组成，并且 FEA 能够处理多种载荷情况交互作用的可能情形。

### 结论

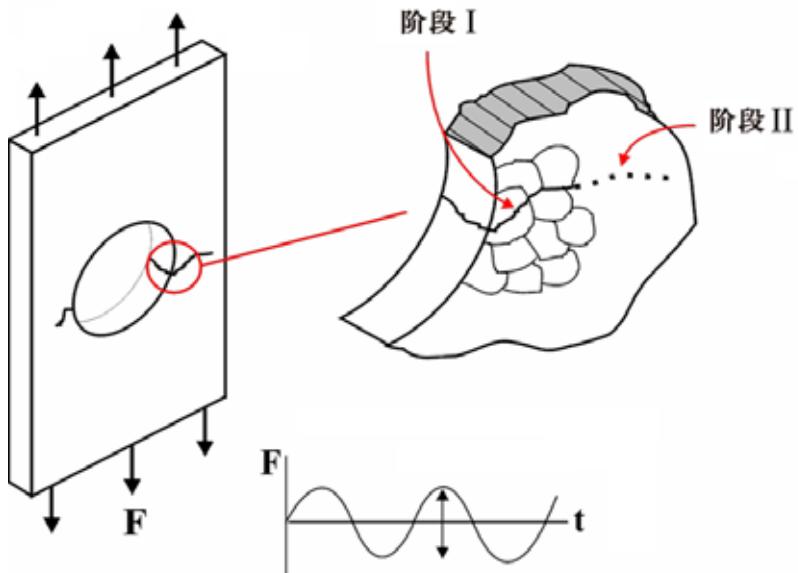
本白皮书所介绍的工具和方法可以帮助设计人员提高零部件的安全性，同时减少过度设计、笨重和高成本的设计。利用现今的技术来避免疲劳，常常可以预防巨大的灾难。随着技术的日益发展，疲劳安全设计不仅可以减少运行失效，使设计人员能够有更多的机会设计新的产品而不是解决旧问题。

## 附录 A — 裂纹增长

有两种物理机制会促使疲劳裂纹增长。在周期载荷下，材料晶粒微结构中的滑移面会前后移动，导致零部件表面上发生微小的挤出和侵入。这些挤出和侵入非常微小，肉眼无法察觉（高度只有 1 到 10 微米），但可以视为裂纹的起源（阶段 I）。

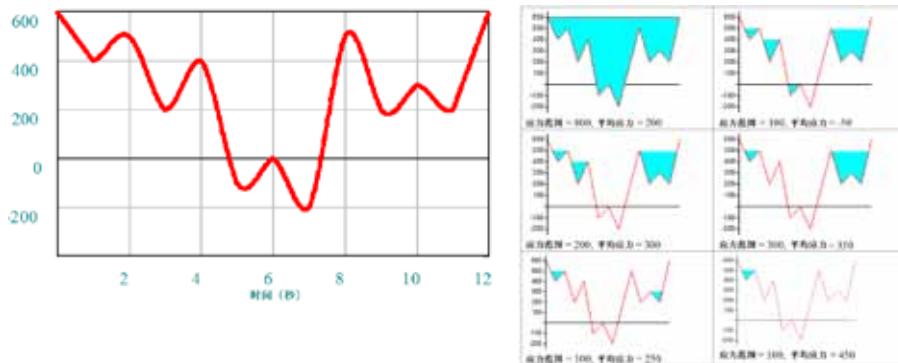
当阶段 I 的裂纹达到晶粒的边缘时，这种作用会转移到相邻的晶粒。阶段 I 的裂纹沿着最大剪切应力方向增长，与载荷作用方向成 45 度角。

在裂纹大约为三个晶粒大小的时候，裂纹行为会发生变化，因为此时裂纹已经足够大，能够形成几何应力集中（阶段 II）。阶段 II 的裂纹会在尖端形成一个张力塑性区域，此后，裂纹会沿垂直于载荷的方向增长。

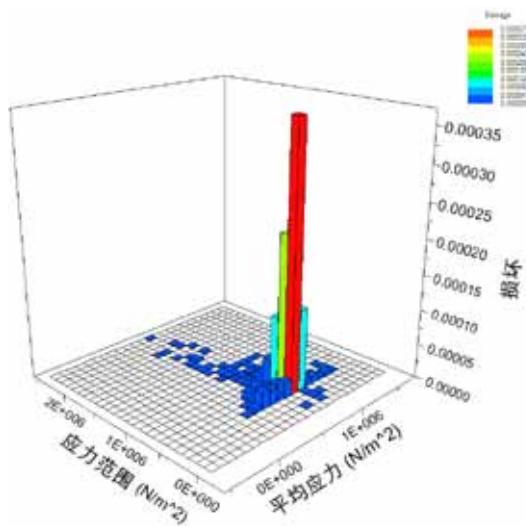


## 附录 B — 雨流法计数

采用图形表示变幅载荷并提取载荷历史的峰值和谷值，这样就能够确定应力范围及其相关联的平均应力。该图形可以显示最初“被雨水注满”的载荷历史。



应力范围及其相关联的平均应力由图形中显示的载荷历史确定。在载荷历史图中，载荷历史“被雨水注满”。在确定应力范围和平均应力后，“雨水”会从最低点排走。然后可继续确定其余被截留的每部分“雨水”的应力范围和平均值。根据所得到的结果，可以应用 Miner 规则，计算疲劳寿命。



雨流损坏矩阵

公司总部  
Dassault Systèmes  
SolidWorks Corp.  
300 Baker Avenue  
Concord, MA 01742 USA  
电话: +1-978-371-5011  
电子邮件: info@solidworks.com

亚太地区总部  
电话: +65 6511 7988  
电子邮件: infoap@solidworks.com  
大中国区  
电话: 400-818-0016  
电子邮件: infochina@solidworks.com

 SOLIDWORKS