

振动试验中的 等效技术



国防工业出版社

振动试验中的等效技术

〔美〕W. C. 法可涵 著

姚起帆 译 王幼复 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是美国国防部、海军研究试验室振动与冲击资料中心(DDC) 1970年前后编辑出版的《振动与冲击专题丛书》之九(SVM-9)。

本书全面介绍了振动等效方法研究方面的各种理论和方法,包括累积损伤等效、量值等效及机械阻抗等效理论,重点介绍各种等效方法及其对振动试验的应用问题。振动等效方法对于振动试验、设计计算、振动测量数据的归纳整理都有重要价值。

本书可供从事动强度方面的研究、设计与试验人员以及从事疲劳研究工作人员参考,还可供高等学校强度专业师生参考。

EQUIVALENCE TECHNIQUES FOR VIBRATION TESTING

Warren C. Fackler

The Shock and Vibration Information Center United
States Department of Defense 1972

*

振动试验中的等效技术

[美]W. C. 法可函 著

姚起杭 译

王幼复 校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张5 103千字

1979年11月第一版 1979年11月第一次印刷 印数: 0,001—6,000册

统一书号: 15034 1868 定价: 0.55元

译 者 的 话

美国国防部、海军研究试验室振动与冲击资料中心(DDC)1970年前后编辑出版了共分九个专题的《振动与冲击专题丛书》，W. C. 法可涵的著作“振动试验中的等效技术”是其中的第九个专题(SVM-9)。

振动等效问题涉及的面较广，但本书主要是从环境振动研究的角度介绍了下列三个主要的方面：

1. 同类型振动的等效问题，国内称之为加速振动试验方法。
2. 不同类型的振动等效问题，主要是正弦—随机振动等效问题。
3. 机械阻抗等效方法，即振动试验夹具的机械阻抗模拟问题。

本书对1971年以前国外在上述三个方面的研究成果介绍得比较全面，同时作者对疲劳累积损伤理论亦有详细说明，因此它对于国内开展振动等效问题研究以及应用振动等效方法解决测量数据转换、加速振动试验、设计代替性的正弦等效试验等方面均具有一定的参考价值。

但本书也存在一些不足之处，例如对加速振动试验的提法不够全面，应用应力 $S-N$ 曲线的斜率参数考虑振动等效问题不够恰当，局限于研究正弦—宽带随机的等效问题并且也只着眼于振动疲劳等效和振动试验方面等等。

译 者

目 录

第一章 引言	1
第二章 累积损伤理论概述	5
2.1 疲劳和累积损伤	6
2.2 等效理论基础	12
迈因纳方法	12
柯特-多兰理论	17
香利1 $\times$ 及2 $\times$ 方法	21
2.3 累积损伤处理	25
线性累积损伤理论	26
非线性累积损伤理论	28
唯象(现象逻辑)理论	29
第三章 累积损伤等效	33
3.1 基本想法	33
损伤机理	34
载荷-寿命关系式	35
3.2 试验时间折算	38
简单谱等效	41
复杂谱等效	49
时间折算实践	52
3.3 不同试验类型的等效	54
初步说明	54
迈尔斯方法	54
斯佩司及鲁尔司方法	58
寇瑞德及伦尼方法	64
玛茵司方法	67
霍尔及沃特曼方法	69
焦克斯方法	72
不同试验类型等效实践	78

第四章 量值等效	81
4.1 基本想法	81
4.2 应力等效	82
等均方根值响应	83
等峰值分布	87
扫描随机	90
4.3 失灵等效	97
4.4 量值等效的应用	99
第五章 相互作用等效	101
5.1 基本想法	101
5.2 阻抗等效	104
基本概念	104
例子	109
响应控制	111
输入功率控制	113
输入力控制	116
声振试验	118
第六章 对振动试验的应用	120
6.1 基本想法	120
6.2 实际考虑	121
6.3 等效技术选择	123
使用环境的确定	124
典型的使用环境	127
对许用(容许性)要求的处理	127
组合等效型式的应用	128
6.4 等效与试验	129
试验精度	129
试验应用	131
第七章 结论	134
附录: 符号与注释	138
参考资料	142

第一章 引言

实验室振动试验已开始应用等效技术来规定和模拟使用振动环境，本专题的主要目的即是要对此技术作出恰当的概述，同时，作者也试图对迄今为止的所有有关振动等效方法方面的零散资料进行一次全面系统的考察。

“振动等效”概念通常会在下列情况下用到：(a)利用不同的方法导出试验量值时，(b)规定模拟使用振动条件的环境试验时，(c)复现准确的损伤过程时。在产品设计和性能评价试验中等效概念也被用来确定代替性的振动载荷。根据以上解释可见，一般而言，振动等效问题乃包含于振动模拟技术之中，并非只局限于不完全成功的随机—正弦等效问题[●]，后者早在五十年代中期就有人试图加以解决。

根据赖以确定等效性的基础，可将各种振动等效技术归结为两类问题，如图 1-1 所示：第一类等效理论是给出确定的损伤准则并使不同振动经历产生的总损伤量相等来建立等效性，这一类等效方法包括的损伤或者可以累积并最终导致破坏，或者可将损伤表示成试件响应中某些参数值的函数。第二类等效问题包括一些用以改善试验真实性的方法，它们是通过研究通常存在的试件与支持结构间的相互作用问题而提出的。

● 按文意，这里主要指正弦—随机失灵等效问题。——译者

基于累积损伤的等效技术主要是根据各种材料疲劳理论导出,第二章即研究导出累积损伤等效方法的有关理论。第三章给出了进行试验时间折算和变化试验型式的各种等效方法。第四章介绍基于损伤量值的等效方法,其中包括使试件的主要响应特性,诸如运动或工作失灵特性相等而得出的等效方法。第五章处理相互作用等效问题,但该章的主要内容还是讨论那些应用机械阻抗概念来改进试验真实性的常用方法。一般而言,机械阻抗等效很难实现,因为实际环境中激励力的数据或是不易得到或者难以利用。该章的重点不过是向读者强调一下,如果在处理试验和等效问题时不考虑试件与支持结构间的相互作用可能会产生的问题。第六章讨论振动等效技术的应用以及如何利用等效概念去解决各种振动试验问题。尽管本书经常提到“试验”一词,但重点还是处理环境数据的转换问题。本章的目的之一也是要分析各种与振动模拟和振动试验有关的主要工作过程,同时讨论这些过程间的相互关系,并指出利用等效技术确定这些关系的具体方式。

将振动等效技术应用于实际的试验程序即表示已采用了一定的工程判断和经验方法,并且也表明宁愿接受某种不够精确的结果⁽¹⁾。但即使已经确认这种不精确性比起当前某些常用的试验方法所导致的不精确性要小,也仍然还是有人要对振动等效技术的应用提出异议。

本书的内容既包括对振动等效技术的全面评述,也包括介绍有关各种有价值文献的检索结果。主要资料来源概括如下:

1. 直至 1970 年为止的所有非保密的振动与冲击公报

(SVB)。

2. 1958 年至 1971 年 2 月为止的应用科学与技术索引 (ASTI)。

3. 由国防资料中心 (DDC) 进行的至 1970 年 3 月为止的 20 年文献检索。

4. 由国家航空与宇宙航行局 (NASA) 进行的至 1970 年 3 月为止的 20 年文献检索。

5. 1969 年 1 月至 1971 年 3 月为止的振动与冲击文摘 (SVD)。

6. 在有关评论性文献中引用的参考资料。

7. 对从事振动试验方面工作的 186 位作者和工程师进行书面调查中得到的有关资料。

作者对本丛书涉及的各种文献，论文或报告均进行了阅读和注释，这些文献来源甚广，有很多还是来自国外。不难看出，大部分文献的作者均假定读者已经了解疲劳损伤和机械阻抗方面的知识，但本丛书仍包含有可供某些读者了解这方面内容的基本理论。

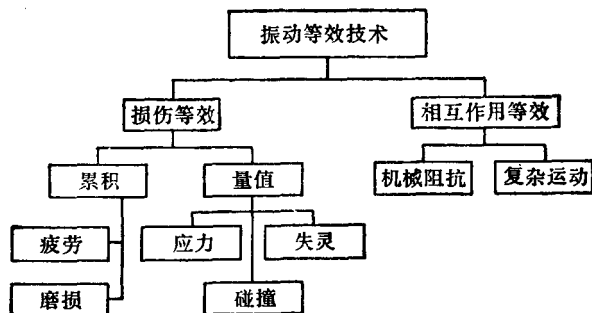


图1-1 振动等效类别

对从事有关振动试验工作的作者和工程师进行书面调查，得到了满意的回答。已引用的几篇书面意见即反应了这些人士的普遍看法，同时还考察了若干尚未发表的备忘录、论文和报告，但列出的书目仅限于已公开发表的资料。

在检查和比较许多作者的著作时，始终存在着下述困难，即某些著作符号应用前后不符，有的甚至对于一些重要符号的意义亦未交待清楚，为避免上述问题，本文采用了一种通用符号记法，它们始终保持一致并概括说明在附录中。

本书对于各种振动等效方法及其应用的考察力图完整、全面，但如果某些有价值的论文或报告竟被忽略，则如蒙指出，作者当欣然采纳。

第二章 累积损伤理论概述

有必要让读者了解疲劳理论的基本内容，因为它是赖以建立累积损伤等效方法的基础。其中，尤为重要的是有关疲劳和累积损伤过程方面的概念。当然，有经验的读者都知道，只要有关材料特性事实上主要是依赖于一些变化不大的变量时，便可以假定它们具有某种简单的特定数值，许多手册、技术论文和厂家说明书就是这样处理问题的。例如在各种材料的机械特性数据表中就列出了相应的极限强度数据，这类简单数据对于大部分工程应用已比较恰当，但也不能一概而论。譬如说，对于预期将承受迅速变化载荷的结构——如飞机的起落架——其设计者如果不了解有关材料的极限强度在高应变速率下将会增加的特点，他就可能把各方面都符合标准仅极限强度数据看来偏低的材料弃而不用。还可以列举其它许多例子，像温度与材料展性和蠕变的关系等。不过，此地主要关心的还是那些与振动等效技术有关的材料特性。

本章第一节首先简略介绍疲劳理论和累积损伤概念，对象为初学者，熟悉疲劳问题的读者对此可略而不阅。

第二节详细叙述了三种累积损伤理论，它们的重要性在于：通常应用的各种累积损伤等效公式均可基于这三种理论之一或数种导出，但有基础的读者对此节亦可略而不阅。

本章最后一节，按类型列出了各种疲劳理论，它们是作者为准备本书进行文献检索过程中了解到的。作者将这些理

论区分为线性理论、非线性理论、现象逻辑(唯象)理论等三种类型。此外,也对它们进行了简要说明,并指出相应的参考资料来源。对有志于研究较复杂的等效技术的读者,本节仅提供了一个基础。读者如果希望得到有关疲劳损伤问题的更详细的介绍还可以去参考许多出色的文献,如本书列出的参考资料〔2〕至〔5〕。

2.1 疲劳和累积损伤

所谓疲劳就是由载荷重复作用导致的损伤累积过程。其中,载荷一词系指作用在所研究结构上的力或力系,这些力可以通过将其量值和方向用某种已知的或测量的时间关系式表示出来。载荷作用将使结构变形并产生相应的应力分布型式,下面根据应力和应力循环来研究材料的疲劳特性时,即意指在所研究结构上实际已经受有载荷分布。这样,应用载荷一词就意味着已由作用力产生了完全确定的应力和变形——不论这种作用力相对于被研究结构而言是外力还是内力,也不管它们是由动量变化产生,还是由热膨胀造成或是由任何其它动力源所引起。

所谓载荷,可以包括某种简单载荷的一次或多次作用,也可以包括几个特定载荷的连续作用,也可以是一个或多个简单载荷(或连续载荷)作用的迭加,还可以是随机变化的载荷与简单或连续载荷作用的迭加,当然也可以是完全随机变化的载荷。材料的疲劳寿命即与上述各种载荷的状况有关,许多作者已研究了这种关系的性质,并试图给出一种可以适应于各种载荷型式的疲劳模式。常用的疲劳理论大多以累积损伤概念为依据。所谓累积损伤概念就是指:每一次载荷循

环都产生附加的损伤，它们累积起来，直至达到某一损伤量值后，试件就发生破坏。

有关疲劳损伤方面的史料表明，结构重复受载引起的疲劳破坏问题在1800年之前尚未受到认真注意^[4]，甚至那时许多工程师还不能接受下述观点：即较小的重复载荷甚至包括高于目前所谓持久极限的载荷，能够产生损伤累积并导致破坏，虽然目前疲劳破坏在使用中已经经常出现，而且也是引起绝大部分机械断裂的原因^[6]。

可将整个疲劳过程划分为下列两个阶段，即裂纹产生阶段和裂纹扩展阶段^[7]。各种预计疲劳寿命的理论彼此间的差别也在于对上述两阶段的处理各不相同。本章下节将研究这些理论间的差别。这里仅仅指出：某些理论可适用于损伤累积的两个阶段，而另一些理论则是用不同的模型来分别处理它们。

根据载荷作用产生的应力和在该载荷作用下发生破坏的循环次数，可以相对于每一组给定的条件绘出类似于图 2-1 所示之关系曲线。这条曲线表示实验数据的平均值，通常是以对数坐标画出。这种对数曲线在一定范围内可以近似用一条直线表示，如图 2-2 中的曲线 A 或 B 那样，它们通称为

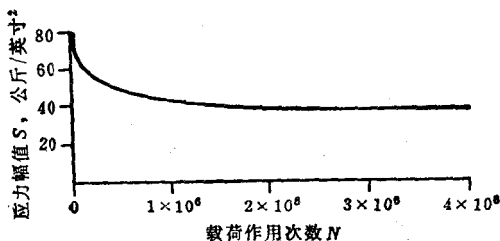


图2-1 应力量值与载荷作用次数的关系

$S-N$ 曲线。这里 S 表示应力幅度， N 表示在相应等幅载荷作用下产生破坏的期望循环次数。

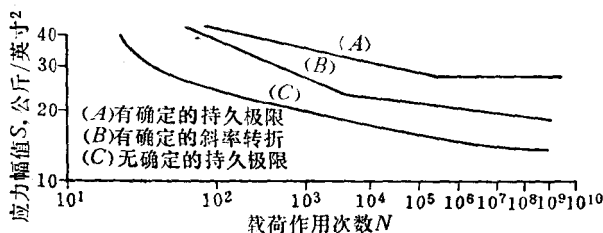


图2-2 典型的 $S-N$ 曲线

在一定应力作用下材料所耐受的循环次数称为疲劳寿命，其值与相应的载荷量值有关。如果材料经受的重复应力值低于某特定值后不再发生破坏，便将该特定应力值称为它的持久极限。不过，曲线 B 或 C 代表的材料则没有确定的持久极限，对于这类不能明显确定其持久极限的材料，通常是选取 $N = 10^7$ 次循环处对应的应力值作为其持久极限。

用实验确定 $S-N$ 曲线时，一般都需要非常注意的控制诸如试件几何形状、加载、温度及合金成分等因素的一致性，但即使如此，在一定载荷量值下，试验数据仍可能相差达 10 倍或 100 倍之多。针对这种情况，为使所得 $S-N$ 曲线具有确定的意义，就必须同时给出平均值和相应的标准差或者给出在一定应力量值下的破坏概率^[8]。

在选用 $S-N$ 曲线时，还必须注意到有关的其它各种因素，以保证所用材料数据及其散布范围符合于所研究的情况。

不同温度下的材料疲劳破坏过程亦不相同。一般而言，降低温度会使产生裂纹所需的载荷循环次数增加，而在较高

温度下，裂纹一旦产生就会很快扩展，达到破坏时的相应裂纹长度亦较短。提高温度会增加裂纹的传播速率，这就像是蠕变过程加速了疲劳损伤的进程一样。温度对疲劳寿命的影响示于图 2-3 中。

试件的几何形状，特别是内侧锐角、孔、切口或其它它可能产生应力集中的形式，均会明显改变试件的疲劳特性。应力集中可能使材料在相应区域内经受到重复塑性应变，而此种塑性应变区域即可能转变成最初的疲劳裂纹源，继续作用载荷，裂纹就在材料中传播直至产生早期的疲劳破坏。图 2-4 示出了切口对试件疲劳寿命的影响。对于具有切口或其它应力增长形式的试件，在选择其 $S-N$ 数据时必须注意到相应的应力增长作用^[6,10]。

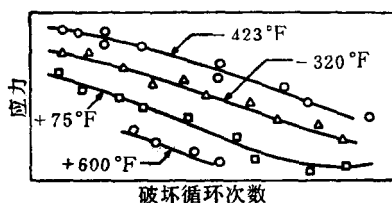


图2-3 疲劳寿命随试验温度的变化
(对于大部分金属的典型曲线)^[8]

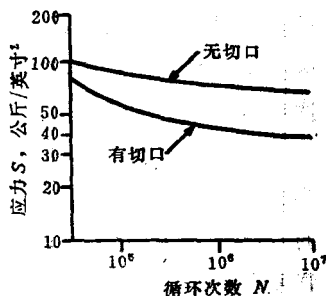


图2-4 在旋转梁试件中由于切口而导致疲劳寿命降低的典型曲线

实验的 $S-N$ 曲线还与作用载荷的性质有关，绝大多数疲劳实验是以使试件产生零平均应力的方式对试件重复加载。在图 2-5 中，当 $\Delta S = 0$ 即出现零平均应力情况，这时， $S_{\max} = -S_{\min}$ 。如果由于预载或出现残余应力而产生了平均应力 ΔS ，便会出现通常称为波动应力的情况，此时 $S = \Delta S + S_{(交变)}$ 。当平均应力的绝对值相当小时，它对疲劳寿命的影响

响也很小, 所谓“相当小”已大致确定为是指平均应力小于

交变应力幅值 $\frac{1}{3}$ 的情

况⁽⁸⁾, 若平均应力大于等于交变应力, 即

$$|\Delta S| \geq |S_{(\text{交变})}| \quad (2-1)$$

便称之为脉动应力, 有

时是用 $S_{\max}$ 与 $S_{\min}$ 之比来表示的。

对压缩平均应力或压缩残余应力应当作用一个产生相应张应力的预载来消除。但实践中常常有意采用压缩平均应力设计, 以提高关键结构或部件的疲劳寿命。因为这样可使结构在给定载荷下产生较小的张应力, 以降低因反复受拉而使疲劳裂纹张开的趋势。

通常, 对于 $S-N$ 曲线的绝大部分有用范围, 都可以近似绘成双对数坐标图中的直线, 这样的近似处理实际上是可行的, 因为: (a) 当不计载荷作用速率时, 极低周破坏接近于静强度破坏状态; (b) $S-N$ 曲线的高周部分精度很差, 以致不宜应用, 因为在此区域内应力量值的微小差异就能导致 N 值的很大变化。不宜应用高周部分的另一个原因是: 低于 $S-N$ 曲线的应力也能提供损伤累积作用⁽¹¹⁾。

鉴于对疲劳损伤机理还不完全清楚, 即使是很简单的试验, 完全依据基本疲劳特性来确定累积损伤有时也是成问题的。弗瑞敦萨尔⁽¹²⁾近似将循环应力幅值的影响划分为三类:

1. 对于 $N < 10^5$ 次的高应力范围, 破坏特征表现为晶体严重破碎并丧失方向性, 同时出现硬化现象。

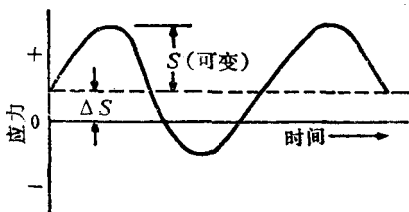


图2-5 由循环载荷产生的应力

2. 对于 $10^5 < N < 10^7$ 次, 即所谓真正的疲劳应力范围, 其破坏特征是出现反复滑移, 并由此种滑移集聚形成具有轻微硬化的滑移带。

3. 对于 $N > 10^7$ 次的所谓“安全”应力范围, 在此范围内出现大片的分布滑移, 但既无硬化现象亦无显著的毛孔或微裂纹构造出现。

图 2-6 示出了简化的 $S-N$ 曲线, 此对数 $S-N$ 曲线的斜率亦在图中示出, 该曲线可写为

$$b \log S = \log C_1 - \log N \quad (2-2)$$

式中 C_1 是一个可由已知参考条件加以确定的常数。经常将方程(2-2)写成以下形式, 即

$$NS^b = C_1 \quad (2-3)$$

式中指数 b 对各种材料大约可假定取 5 到 20 不等, 如果再进行进一步研究 N 随 S 的变化关系, 可以写为

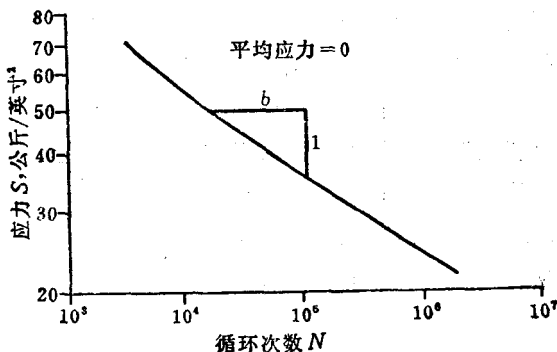


图2-6 7075铝的 $S-N$ 曲线

● 此处及式 (2-2) 中 C_1 , 原文为 C , 为了使之与式 (2-3) 符号一致, 改译为 C_1 。——译者