



石来德 编著

同济大学出版社

机械的 有限寿命设计 和试验

内 容 提 要

本书系统地叙述了机械的有限寿命设计理论和实验方法。全书共分四章,内容有动载荷信号的处理与分析;材料和机件在动载荷作用下的抗力指标;疲劳损伤理论和几种常用的机械寿命设计的方法;最后简要地介绍了机件室内模拟疲劳寿命试验的要求和设备。

本书可作为大学本科和研究生的教材或教学参考书,可供各类从事机械设计、材料科学的技术人员阅读和参考。

责任编辑 冯时庆

封面设计 李志云

机械的有限寿命设计和试验

石来德 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

吴县人民印刷二厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 8 字数: 232 千字

1990 年 10 月第一版 1990 年 11 月第一次印刷

印数 1—2400 定价: 5.60 元

ISBN 7-5608-0586-3/TH·13

前 言

本书是在为几个工程机械产品结构件寿命估算的基础之上编写而成的,根据寿命估算的要求将载荷信号的处理和分析、材料和机件抵抗动载荷的能力及疲劳损伤理论结合在一起,并通过介绍几种具体的寿命估算方法的应用,达到进一步深化的目的。最后简要地介绍了室内模拟加载试验的要求和加载装置。

在内容的叙述上,省略了繁杂的数学推导,着重说明有关理论、公式的物理意义和应用,试图从建立基本概念开始到工程应用为止,引出一条思路,达到举一反三的目的。

本书已在《建筑机械》杂志连载,《建筑机械》编辑部的主编张世英、编辑室主任仇林峰、编辑李一兰、翟会昆、杨小光等曾为书稿进行了精心的审查和修改。

书稿的内容也在几届研究生和大学本科专题讲座中进行了介绍,有关老师和研究生热心帮助收集过资料,并在几个产品的测试数据的处理中,做了有益的工作。

在课题研究的进行中,得到了徐州工程机械厂、柳州工程机械厂、长江挖掘机厂、华东建筑机械厂等领导和技术人员在经费和试验条件上的支持。

对于各方面给予的帮助和支持,在此表示衷心的感谢。

书中难免有错误之处,恳切希望读者给予批评指正

作者

1989年8月

绪 论

任何一种机械在设计时都要进行强度校核,即强度设计,它的任务是确定机件的断面尺寸,保证在各种工作条件下既能承受外载荷的作用,又能充分发挥材料的抗力指标。由于强度设计的重要性,使之成为人们研究的重要课题。随着力学、材料科学、试验技术和计算机技术的发展,已经形成了下列几类。

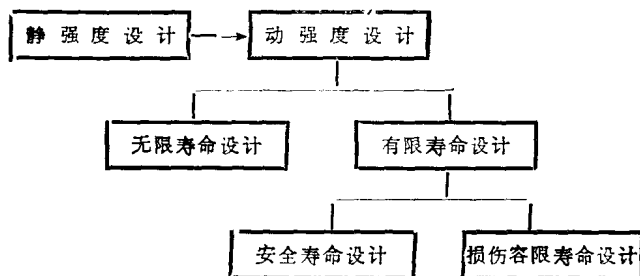


图 0-1

传统的机械强度设计都是以静力作为依据的,研究的内容是机件在静力作用下的应力状态、材料和机件在静力作用下的抗力指标及静力作用下的强度理论(强度判据)。设计的指导思想是:机件在最危险的工况条件下,在最大载荷的作用下,机件均不应破坏。它将动载荷的影响利用动荷系数 K 值转化为静载荷进行设计。但是,绝大部分机械都在运动,其载荷均在不断变化着,人们发现,尽管机件是在最大载荷作用下设计而成的,但在交变载荷的作用下仍然会断裂而失效。而且,有统计资料表明 80% 以上机件的断裂事故均为动载荷作用下使机件产生疲劳损伤而失效的。因而,从事材料科学和机械设计的人们不得不对材料或机件在动载荷作用下失效机理进行研究。出现了动强度设计方法。

动强度设计最初出现的是无限寿命设计,其指导思想是:机件在交变载荷的作用下,可以无限长时间的使用而不损坏。但是,近

代科学技术进步很快,产品的更新换代很快,在当代激烈的竞争中,新机种必然代替老机种。加之,任何一个机械,尽管其机件在交变载荷的作用下不致破坏,但是,由于摩擦、腐蚀也会使机械性能劣化,反映出产量降低、能耗增加、对环境的污染增大等。因而,再继续使用,显得极不合理,也必将被淘汰。如此等等,无限寿命设计在现代生产中似无必要。因此,人们开始研究有限寿命设计。

有限寿命设计的指导思想是:机件在规定的使用寿命期间不致因交变载荷的作用产生疲劳损伤而失效,同时又充分发挥材料的抗力性能,即材料在机件使用寿命达到时,已经开始逐步丧失工作能力,这种设计将比无限寿命设计节约大量的材料。

根据失效标准又可将有限寿命设计分为两大类:安全寿命设计和损伤容限寿命设计。

安全寿命设计的失效标准是:在规定的使用寿命期间内,不允许有可见裂纹产生,要求在使用寿命期间内工作可靠性达到很高的程度。因此,对于一些很重要的机件或失效会造成灾难性损失的机件,如飞机、航天器及核反应堆中的机件,均将采用安全寿命设计。

损伤容限寿命设计基于这样的认识,其一,疲劳损伤经历两个阶段:裂纹的形成和裂纹的扩展。因而,机件的寿命也将包括形成裂纹的寿命和裂纹扩展至断裂时的寿命;其二,经对机件微观观察,发现很多机件在承受载荷前就已经存在着由于材料本身缺陷和加工不当而产生的裂纹源,机件的寿命将取决于裂纹扩展过程的寿命,因而,损伤容限寿命设计的指导思想是:机件在规定的使用寿命期间内,允许出现裂纹,但是裂纹的长度和深度在规定的允许范围之内。对于一般的机件,采用这种设计方法是可取的,它将提高机械性能和重量比,节约可贵的材料。

静强度设计是大家熟知的。静强度设计的依据和过程可用下图集中地构画出来,见图 0-2。

由这个简图可见,静强度设计的依据为三大内容:载荷分析、材料的拉力指标和强度理论。载荷分析的结果获得最大载荷作用

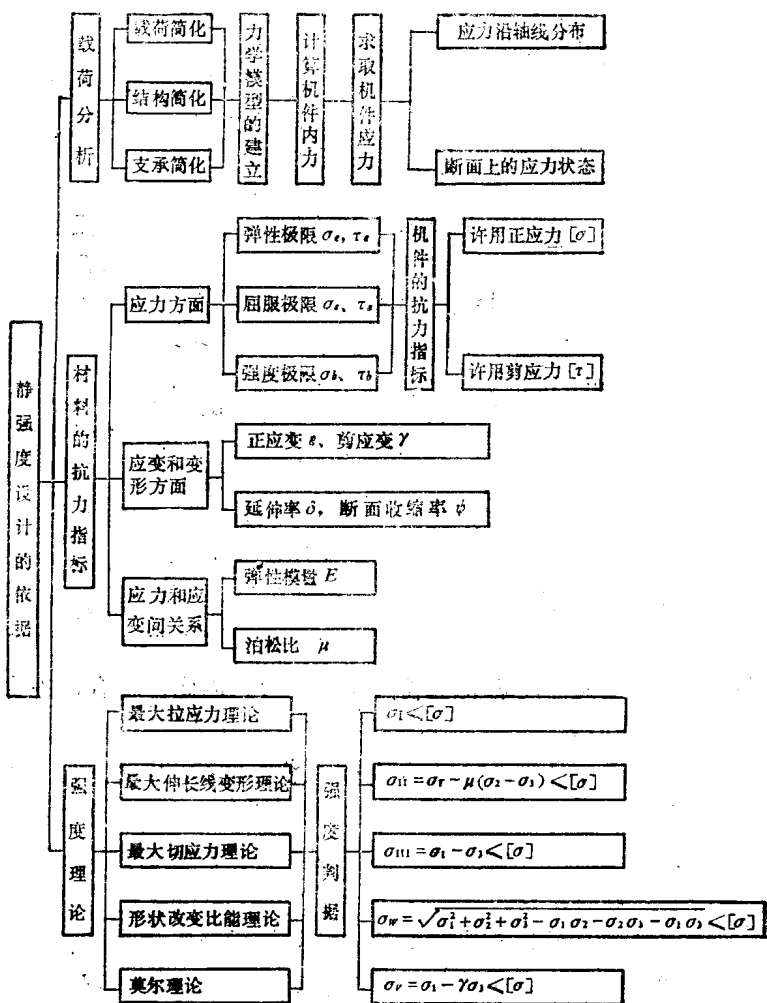


图 0-2

下机件的应力分布规律和断面的应力状态，知道了应力分布规律就可决定机件的危险断面，知道了断面上的应力状态就可选择合适的强度理论进行强度校核。材料的抗力指标是指材料在静载荷作用下抵抗静载的能力，设计中用得最多的是材料的屈服极限 σ_s 和 τ_s 、强度极限 σ_b 和 τ_b 。由于材料的抗力指标是标准试件在一定

条件下试验而得,而实际机件的形状、尺寸和表面状态和试件不一样,试验的环境和机件的工作环境不一样,机件承受的载荷也和试验载荷不一样,因此,在强度校核时,必须进行修正,在静强度设计中,通常用的方法是材料的屈服极限 $\sigma_s(\tau_s)$ 或强度极限 $\sigma_b(\tau_b)$ 除以安全系数获得许用应力 $[\sigma]$ 或 $[\tau]$,常称为机件的抗力指标。静强度理论是在研究机件在静载荷作用下一次性破坏机理的基础之上建立起来的,根据不同的应力状态和破坏机理的不同假设,提出了不同的理论,建立起进行静强度校核的判据。因而可以根据机件的应力状态和机件的抗力指标确定断面尺寸。

据此,我们也可以将有限寿命设计的依据归纳为三个方面:动载荷分析、材料和机件的抗力指标和动强度理论。在静强度设计中,尽管利用最大载荷进行设计,且将动载荷的影响利用动荷系数转化为静载荷,加大了设计载荷的强度。然而,它不能反映出载荷随时间变化的规律,不能反映出载荷变化幅值的大小及其出现的次数,不能反映出载荷的频率结构,因而也就无法知道载荷幅值大小及其出现的次数对机件的损伤作用,也就无法知道会不会存在引起机件产生大幅度响应的载荷频率分量。因此,在有限寿命设计中,除了要了解某一时刻的应力分布和应力状态外,还必须掌握应力或应变随时间变化的规律,并据此获得载荷、应力或应变的幅值分布和频率结构。因此,本书在介绍动载荷分析时,将包括下列内容:动载荷的类型及其特性;描述这些特性的特征参数以及获得这些特征参数的途径。

在有限寿命设计中,材料和机件的抗力指标是指材料和机件抵抗动载荷的能力,感兴趣的是材料在交变载荷作用下的应力寿命曲线、应变寿命曲线、等寿命曲线以及应力强度因子和裂纹扩展速率之间的关系曲线。材料的抗力指标是标准试件在特定的试验条件下而得的,因而,在寿命估算时,也应将上述与寿命有关的曲线进行修正,获得机件抵抗动载能力的曲线。

动强度理论是在研究机件在交变载荷作用下疲劳损伤机理的基础之上建立起来的,因此,又称疲劳损伤理论。它将动载荷和材

料抵抗动载荷的能力连系在一起,建立强度判据,估算机件的寿命或按照寿命的要求设计机件的断面尺寸。由于不同的学者在不同的条件下进行损伤机理的研究,根据试验结果,建立了各种各样的假设和推断,形成了数十种理论和设计方法。它们各有各的特点,各有各的不足之处,使用时有一定的局限性,从这个意义讲,寿命估算理论还远没有达到成熟的程度,因而成为当前国内外研究的重要课题,本书将在综合介绍各种疲劳损伤理论的基础之上,从三个方面来介绍常用的、也比较成熟的寿命设计的方法,即介绍用名义应力法预估机件的寿命、用局部应力应变法预估机件的寿命和用线弹性断裂力学理论估算机件的寿命。

寿命估算的理论和方法是在材料疲劳试验的基础之上建立起来的,其估算寿命的结果也应受到试验的检验,因此,疲劳试验是有限寿命设计的重要一环,材料的疲劳试验技术已在疲劳试验的手册中作了详尽的介绍,本书将简要介绍机件和整机的疲劳试验技术。机件的疲劳试验技术是可靠性试验技术的一种。最初是在实际作业场地上进行实地作业而完成的。由于环境和实际试验条件的影响,试验周期很长。随着测试技术、计算机技术和液压技术的发展,测量并记录机械实际作业载荷,分析并找出它的规律性以及再在实验室再现实际作业载荷及规律性已完全有可能,因此,现代的机件的寿命试验已经由现场逐步移到实验室进行,形成了机件甚至整机的室内模拟加载试验。本书的介绍也仅限于此。

有限寿命设计的目的是要使机件在规定的使用期间内运转正常,在达到预定的寿命时机件也应该失效了。那么根据上述的理论和方法设计的机件能不能达到这个要求呢?估算寿命的可靠性如何呢?在规定的使用寿命期间存活率是多少?损伤率是多少呢?这就要求对寿命估算的可靠性进行分析,分析影响寿命估算可靠性的因素。同时应该指出,在寿命设计时,也要根据机件的重要程度提出可靠性要求,如飞机上的重要机件,其寿命设计的可靠度要求达99.99%以上,但是,作为地面运行或工作的一般机械,这样的要求又太严格了,因而就显得经济性较差了。

有限寿命设计和试验的意义决定了国内外很多大学、研究院、所和工厂作为重要课题来研究并付诸于应用。很多大学把它列入了必修或选修课程，本书试图摸索一条思路，介绍一些原理和方法，起抛砖引玉的作用，对于设计中应用到的各种数据和图表限于篇幅不能一一介绍。

目 录

绪 论

第一章 动载荷分析..... 1

§1 动载荷的类型及其特性..... 1

§2 动载荷的时域分析.....13

§3 动载荷的幅值域分析.....20

§4 动载荷的频域分析.....44

§5 动载荷的时差域分析.....63

§6 获得载荷特征参数的数据处理系统.....76

§7 载荷谱的研究过程.....79

第二章 材料和机件抵抗动载的能力.....98

§1 材料的应力寿命曲线.....99

§2 材料的应变寿命曲线109

§3 材料的断裂韧性和裂纹扩展速率120

§4 机件的抗力指标134

第三章 有限寿命设计的理论与方法169

§1 疲劳累积损伤理论169

§2 名义应力法预估机件的寿命193

§3 局部应力应变法预估机件的寿命209

§4 利用裂缝扩展速率预估机件的寿命220

第四章 室内疲劳寿命试验233

§1 加载程序的确定234

§2 加载装置和控制系统240

第一章 动载荷分析

动载荷分析是有限寿命设计的依据之一。因此,掌握载荷的变化情况并找出其规律性是进行寿命设计的先决条件,也是寿命试验的先决条件。

严格地讲,载荷是指外载荷,它可以是拉力、压力、扭矩,对我们所研究的有限寿命而言,它又可以泛指为应力、应变等。事实上如果将外载荷当成激励来看,则应力或应变就是该激励的响应。当激励为 $x(t)$ 、响应为 $y(t)$ 时,则它们之间存在着:

$$y(t) = H(t)x(t)$$

$H(t)$ 为机件的传递函数,显然,知道了外载荷和传递函数就可求得机件上应力或应变响应;反过来知道了传递函数和响应值也就能求得外载荷,特别应该指出的是激励和响应并非是绝对的,就一个系统而言,某值可能是响应值,而对另一个系统而言,它可能是激励,如某装载机传动轴上的扭矩,对该传动轴而言,它是传动轴应力或变形的激励,而对传动系统而言,它是发动机通过变矩器传给传动轴的响应值。因此,我们这里讲的载荷分析是广义上的载荷分析。在有限寿命的设计中,特别感兴趣的是应力或应变。

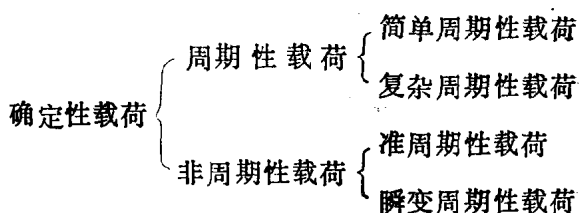
§1 动载荷的类型及其特性

动载荷通常可以分为两大类:确定性载荷和非确定性载荷,为了找出描述这些载荷的特征函数,首先得了解它们的特性,下面分别予以说明。

一、确定性载荷

确定性载荷是指那些能用确定的时间函数 $x(t)$ 来描述它的载

荷。常见的有如下几类:



1. 简单周期性载荷

简单周期性载荷通常是指正弦或余弦载荷, 它们的数学表达式为

$$\begin{aligned}
 x(t) &= x \sin(\omega t + \varphi) \\
 &= x \sin(2\pi f t + \varphi) \\
 \text{或} \quad x(t) &= x \cos(\omega t + \varphi) \\
 &= x \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (1-1)
 \end{aligned}$$

式中 x ——简单周期性载荷的幅值;

f ——频率, $f = \frac{1}{T}$;

T ——简单周期载荷的周期;

φ ——初始相位。

正弦周期载荷是最基本的时变载荷, 只要知道了它的振幅值、

频率和初始相位, 它的性质就可以用时变函数来描述。

正弦周期载荷是疲劳寿命研究的基础, 不论是材料的疲劳寿命曲线, 还是构件的疲劳寿命试验, 通常都是在正

弦周期性载荷的作用下获得

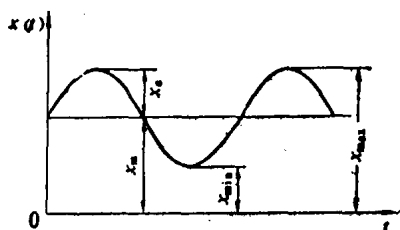


图 1-1

的或进行的。在实际载荷中, 经常在正弦周期载荷上叠加了静载荷 x_0 , 如图1-1所示。此时的时变函数为

$$x(t) = x_0 + x \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (1-2)$$

从幅值的大小看, 我们感兴趣的有如下几个参数

最大载荷值: $x_{\max}$

最小载荷值: $x_{\min}$

平均载荷值: x_m

$$x_m = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$$

载荷变化幅值: x_a

$$x_a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$$

循环特征值: $r = \frac{x_{\min}}{x_{\max}}$

$$1 > r \geq -1$$

载荷变化的范围: $2x_a$

在疲劳寿命设计中, 经常碰到这类载荷有三种情况, 列于表 1-1。

表 1-1

序 号	循 环 名 称	循 环 特 征	载 荷 特 点
1	对 称 循 环	$r = -1$	$x_{\max} = -x_{\min}$ $x_m = 0$ $x_a = x_{\max} = x_{\min}$
2	脉 动 循 环	$r = 0$	$x_{\max} = 2x_a$ $x_{\min} = 0$ $x_a = x_m = \frac{1}{2} x_{\max}$
3	不 对 称 循 环	$1 > r > -1$	$x_{\max} = x_m + x_a$ $x_{\min} = x_m - x_a$

2. 复杂周期性载荷

复杂周期性载荷的特点: 具有明显的周期性而又不是简单的正弦周期或余弦周期。它通常由多个简单的周期性载荷叠加而成, 其中有一个正弦周期性载荷的周期和该复杂周期性载荷的周期相等, 称为基波, 其频率称为基频, 其他各个正弦周期性载荷的频率和基频之比为有理数, 常为整倍数, 称为高次谐波。

这类载荷中最常见的有方波、三角波、锯齿波等等。它们的时

变函数可按富氏级数展开成

$$x(t) = x_0 + \sum_{n=1}^{\infty} x_n \sin(2\pi n f_1 t + \varphi_n) \quad (1-3)$$

既然复杂周期性载荷是由数个简单的正弦周期的载荷所组成,那么单从振幅的时间历程和幅值的大小来描述它的特性,就很不够,必须找出它是由那几个频率的正弦周期载荷所组成的?它们的幅值有多大?它们的初始相位该多大?而后以频率为横坐标、以幅值和相位为纵坐标,画出幅值频谱图和相位频谱图,这就是频谱分析。例如方波载荷,见图 1-2a) 所示,其时变函数为

$$x(t) = \begin{cases} h, & 0 < t < \frac{T}{2} \\ -h, & -\frac{T}{2} < t < 0 \\ 0, & t=0, \pm \frac{T}{2} \end{cases} \quad (1-4)$$

式中 T 为方波的周期; h 为方波的高度。经过富氏级数展开可表达为

$$x(t) = \frac{4h}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin[(2n-1)2\pi f_1 t]}{2n-1} \quad (1-5)$$

以 $n=1, 2, 3, \dots, n$ 代入上式可得

$$n=1 \text{ 时 } x_1(t) = \frac{4h}{\pi} \sin 2\pi f_1 t$$

$$n=2 \text{ 时 } x_2(t) = -\frac{4h}{3\pi} \sin(3 \times 2\pi f_1 t)$$

$$n=3 \text{ 时 } x_3(t) = \frac{4h}{5\pi} \sin(5 \times 2\pi f_1 t)$$

⋮

根据 $f_1, 3f_1, 5f_1 \dots$ 以及对应的载荷幅值 $\frac{4h}{\pi}, \frac{4h}{3\pi}, \frac{4h}{5\pi} \dots$

就获得如图 1-2b) 所示的频谱图。

由上述分析可以得到这样两条规律: 复杂周期性载荷的幅值频谱图是由离散的谱线组成, 每一根谱线代表着一个正弦周期载

荷分量;高次谐波的振幅随次数的增高总趋势减弱,当 n 取足够大值时,振幅相当小,在误差许可范围内,可以忽略几次以上的谐波项。

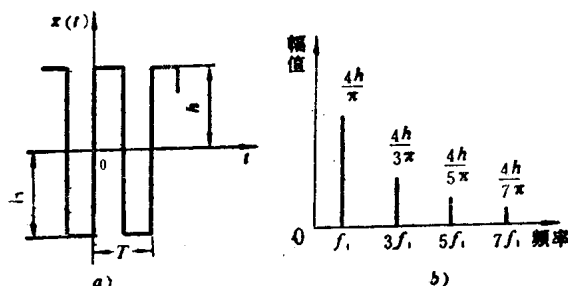


图 1-2

3. 准周期性载荷

准周期性载荷仍然是由多个简单的正弦周期性载荷组成, 它的时变函数仍然可以写为

$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} x_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n) \quad (1-6)$$

它和复杂周期性载荷相比主要区别在于: 组成复杂周期性载荷的各谐波频率之比是有理数, 且往往是基频的整数倍, 而组成准周期性载荷的各谐波频率之比不都是有理数。其中有些是无理数, 如:

$$x(t) = x_1 \sin(t + \varphi_1) + x_2 \sin(3t + \varphi_2) + x_3 \sin(\sqrt{50}t + \varphi) \quad (1-7)$$

式(1-7)中的某些频率比 $\frac{\sqrt{50}}{1}, \frac{\sqrt{50}}{3}$ 均不是有理数。因此, 由这些简单周期性载荷叠加起来的载荷将不再呈现周期性, 由于它仍然是数个谐波叠加起来的, 故也需要用频谱图来描述它的特性, 它的频谱图和复杂周期性载荷的频谱图一样, 也是离散的。

4. 瞬变载荷

在确定性载荷中, 除了周期性和准周期性载荷外的其他载荷均称为瞬变载荷, 它们的特点是: 仍然可以用时变函数式来描述, 它们的频谱不再是离散型的谱图, 而是一个连续型的谱图, 图1-3给出了几种常见的瞬变载荷的时变函数式、波形图和频谱图。它们

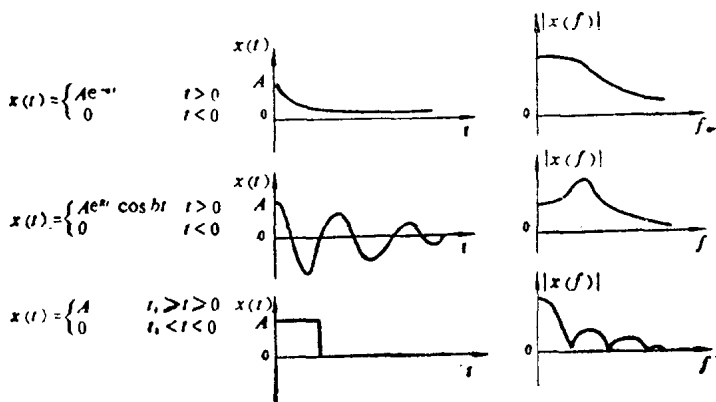


图 1-3

不能用富氏级数展开获得频谱图,而是用富氏积分来表达

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (1-8)$$

我们称这个过程为富里叶正变换,所得谱图称为富里叶谱,它也可以用复数的形式来表达,即

$$X(f) = |X(f)| e^{-j\theta(f)} \quad (1-9)$$

式中: $|X(f)|$ 是 $X(f)$ 的模, 而 $\theta(f)$ 是它的幅角或相角。因此, 它们的频谱分析也包含了两个部分: 幅值频谱和相位频谱分析。

应该指出: 通过富里叶逆变换, 可以将它们的频域函数变换为时域函数。

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi f t} df \quad (1-10)$$

二、随机载荷

前面所讲的载荷都有一个共同的特点, 载荷幅值随时间的变化是有规律的, 可以用一个时变函数式来描述它。但在实际工作中, 大部分建筑机械和其他作业机械, 工作中所碰到的载荷随时间变化是无规律的, 如装载机、推土机、挖掘机等机械在工作中的切削阻力, 拖拉机犁地的阻力, 道路路面给汽车的激励等都是这种状

况,它们无法用时变函数来描述它,我们称它们为非确定性载荷,由于载荷的大小出现无法预知,是随机的,因而也称它为随机载荷。

为了说明随机载荷的特性,必须首先交待清楚两个基本概念:随机载荷的总体和样本。

由于随机载荷无法用确定性的时变函数来描述它,因而测定载荷时,即使在相同的条件下进行,也无法得到相同的数据。因此,要得到精确的表征其特性的参数,必须进行无数次长时间的测量。以装载机切削阻力为例,装载机的作业对象是多种多样的,其切削阻力的变化也是多种多样的,要了解这种切削阻力变化的统计规律,必须对各种不同的作业对象进行测量,且每种作业对象必须作无限长时间的测量。我们将这种无数次测量所得的载荷时间历程的总和称为该载荷的总体,而将每一次测量所记录的载荷时间历程称为样本。由于总体是许多样本组合而得的,因而又称总体为集合体,简称为“集”。

应该指出,载荷的总体是不可能测得的,通常在一定的条件下测定载荷的样本来代替总体。

随机载荷可以分如下几类:

随机载荷	{	平稳随机载荷	{	各态历经的随机载荷
		非平稳随机载荷		非各态历经的随机载荷

1. 平稳随机载荷

平稳随机载荷可以由图1-4来定义,图中由无限多个样本组合成总体,该总体在任一时间 t_i 时的总体平均值可用下式来计算

$$\mu_x(t_i) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_i) \quad (1-11)$$

它在两个时刻 (t_i) 和 $(t_i + \tau)$ 时

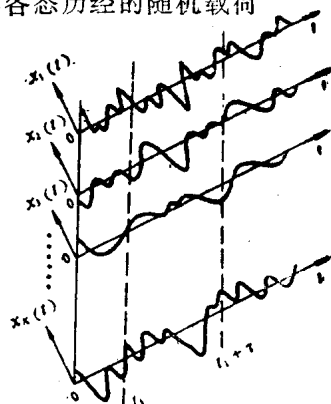


图 1-4