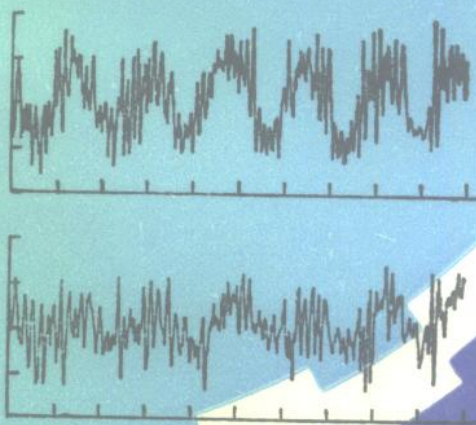


机械系统的载荷识别方法与应用

吴 淼 黄 民 编著



中国矿业大学出版社

机械系统的载荷识别 方法与应用

吴 森 黄 民 编著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

机械动态设计是机械现代设计方法的一个重要分支,在机械动态设计中,载荷谱的确定是一个非常重要的问题。本书论述了机械系统载荷识别的方法及其应用,主要内容包括:载荷谱的概念及其应用、模态分析的理论基础、动态载荷的识别和计权方法、同态滤波技术、倒谱分析技术在载荷识别中的应用及载荷识别的工程实例。本书理论分析简明扼要,理论与实际紧密结合,通俗易懂,实用性强,可供从事动态设计、研究、应用的专家、工程技术人员、教师、研究生等阅读参考。

责任编辑 朱守昌

技术设计 许秀荣

机械系统的载荷识别方法与应用

吴 森 黄 民 编著

中国矿业大学出版社出版发行

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 6.0 字数 150 千字

1995 年 12 月第一版 1995 年 12 月第一次印刷

印数 1—2000 册

ISBN7 - 81040 - 456 - 3

TH·12

定价:9.00 元

前 言

机械动态设计是机械现代化设计方法的一个重要分支。它是当前机械设计方面正在探索和发展的新领域,曾被列为国家自然科学基金重点资助项目。

在机械动态设计中,载荷谱的确定是一个非常重要的问题。随着数字处理技术和计算机技术的飞速发展与普及,载荷谱识别技术及其统计精度得到了大幅度地提高,并逐步应用到各个领域,例如宇航中的“湍流谱”、舰船工程中的“海浪谱”、汽车工程中的“路面谱”、建筑工程中的“地震谱”以及工程机械中的“作业谱”等。载荷谱的测定方法一般有两种,即直接测定与间接测定(或识别)法。但在实际工程中,结构所受的外载荷往往很难直接测定,甚至不可能直接测定。同时对于机械工程来说,绝大多数机器的工作载荷谱,目前还无法用理论或经验的方法计算得到,只能用测试或识别的方法才能取得实际载荷谱。因而,载荷谱测试和识别方法的研究便成为当前工程实用和学术研究中急待解决的问题,对其进行深入的探讨和研究,显得日益重要。这一技术在最近几年有了较大的发展,但由于实际载荷及工况的复杂性,因而还有不少问题尚需进一步研究,目前在这方面的研究论述和著作还很缺少。为此,作者综合了近几年完成的国家攻关项目,博士点基金项目、煤炭基金项目等多项课题的研究成果和所发表的论文资料,并适当参考国内、外有关学术著作和研究成果,撰写了该书,目的在于能够较为系统和全面地介绍有关载荷谱识别的理论和方法,反映这一技术的发展状况。同时本书结合较多的应用实例,力求使得读者对于各类识别方法能有一个较为深入和准确的理解和应用。

全书共分九章,第一、二章为基本理论和基础知识,第三、四、五、六、七、八章为各类载荷谱识别法及其应用技术介绍,第九章为

国家“八五”攻关项目中有关载荷谱的测试和识别的实际例子。本书第二~九章,由吴森同志执笔,前言和第一章由黄民同志执笔,全书的后期审核和校对工作,由黄民同志完成。

在本书的编写和出版过程中,得到了我们的导师魏任之教授的热情指导和帮助,同时也得到了张永忠教授、柳昌庆教授的大力支持和关怀,还得到中国矿业大学校学科办、矿山机械工程系、矿大出版社有关领导和同志们的支持和帮助,我们衷心地向以上的老师、领导和同志们表示谢意!

鉴于水平有限,再加之时间仓促,书中难免有错误和不足之处,诚请读者指正。

作 者

1995年11月

目 录

1 载荷谱的概念及其应用	(1)
1.1 载荷谱的概念	(1)
1.2 载荷谱的应用	(2)
1.3 载荷谱的采集与载荷识别的概念	(6)
2 模态分析的理论基础	(8)
2.1 引言	(8)
2.2 多自由度系统模态分析的理论基础	(9)
2.3 多自由度系统实模态分析	(16)
2.4 多自由度系统复模态分析	(20)
3 动态载荷的频域识别方法	(33)
3.1 频响函数矩阵求逆法	(33)
3.2 模态坐标转换法	(44)
4 动态载荷识别的时域方法	(51)
4.1 基本原理	(51)
4.2 动态载荷识别步骤	(56)
4.3 动态载荷时域识别方法的仿真实例	(58)
5 动态载荷识别的计权加速度方法	(62)
5.1 计权加速度方法的数学模型	(62)
5.2 有效计数 w_i 的时域确定方法	(65)
5.3 有效计权 w_i 的频域确定方法	(67)
5.4 离散系统的验证实例	(69)
5.5 连续系统的验证实例	(73)
5.6 基于振型计权加速度方法	(77)
6 用反滤波方法识别载荷谱	(92)
6.1 问题的提出	(92)

6.2	反滤波因子的概念	(94)
6.3	反滤波的实现方法	(94)
6.4	频域反滤波方法的计算机验证	(102)
6.5	频域反滤波方法的实验验证	(106)
7	同态滤波技术在载荷识别中的应用	(111)
7.1	同态滤波的基本概念	(112)
7.2	解相乘同态系统	(115)
7.3	解卷积同态系统	(116)
7.4	倒谱技术应用中的几个具体问题	(119)
7.5	复倒谱的计算机实现	(130)
7.6	同态滤波的计算机模拟验证	(132)
7.7	同态滤波技术用于识别载荷谱的实验验证	(140)
8	已知传递函数时,倒谱分析技术在	
	载荷识别中的应用	(146)
8.1	倒谱的付氏变换数学表达式	(146)
8.2	已知传递函数时,倒谱分析用于载荷识别的原理	(147)
8.3	计算机的模拟验证	(149)
8.4	已知传递函数时,利用倒谱求输入载荷的实验验证	(149)
9	载荷识别的工程实例——掘进机的载荷测试与识别 ..	(158)
9.1	AM50 掘进机典型载荷谱的测试方法	(158)
9.2	传感器的标定	(160)
9.3	载荷信号的频率谱分析	(163)
9.4	切割头结构传递函数对力谱、加速度谱的影响	(171)
9.5	三向力谱的识别	(172)
	参考文献	(181)

1 载荷谱的概念及其应用

1.1 载荷谱的概念

机器系统大多作用着随机载荷,其时间历程具有统计规律性,当其为平稳随机过程时,便可在时域、频域及幅值域内进行分析,并通过下面一些统计特征量对其进行描述,即:

在时域有:载荷的均值、有效值、方差、自相关函数、互相关函数等;

在频域有:载荷的自功率谱密度函数、互功率谱密度函数等;

在幅值域有:概率密度函数、概率分布函数等等;

表示上述统计特征量的数据、曲线、图表等统称为载荷谱。

随着数字处理技术的飞速发展及普及,载荷谱研究的技术水平和统计精度得到了迅速的和大幅度的提高,并使得载荷谱技术在许多领域获得了日益广泛的应用,例如宇航中的“湍流谱”,舰船工程中的“海浪谱”,汽车工程中的“路面谱”,建筑工程中的“地震谱”以及工程机械中的“作业谱”等等。

通常,载荷谱从随机载荷的幅值分布和频率结构两个方面对其加以表述:用概率统计方法将不同大小载荷幅值出现的次数统计出来,绘成载荷幅值频次图以及累积频次图(统计方法有很多种,此处不加详述),如图 1-1 所示。其中 $x(t)$ 为载荷时间历程曲线, n 为载荷频次, N 为总频次数。图 1-2 所示为功率谱密度函数形式的载荷谱,用以描述载荷 $x(t)$ 的频率结构。

比较两种载荷谱的形式,前者统计了载荷幅值超过某一量值的次数,只计及载荷的极值,显然丢失了加载的次序和分频的信

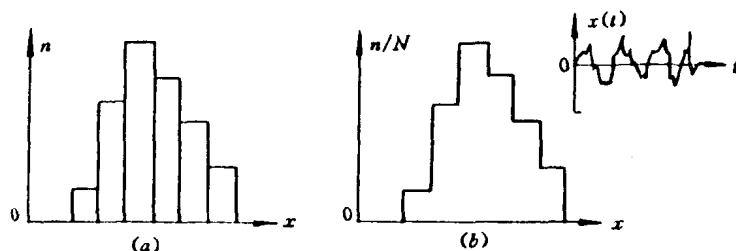


图 1-1 载荷频次图与累积频次图



图 1-2 载荷功率谱

息。而功率谱形式的载荷谱是从载荷幅值的均方值随频率分布上来描述,保留了载荷的几乎全部信息,是一种建立在 FFT(快速傅利叶变换)分析技术基础上,比较精确、严密的随机载荷统计方法。因此,近年来较多地采用功率谱形式的载荷谱。

1.2 载荷谱的应用

1.2.1 载荷谱是机械设计的原始依据

不言而喻,对任何机械来说,载荷谱都是进行机械结构设计的原始依据。如用于煤矿的掘进机,其工作时切割头承受着较大的三向力和切割转矩,因而只有已知各典型工况时的三向力谱及转矩谱,才能确定并优化掘进机各部件的结构设计(如切割臂的结构、

切割电机的功率等)。

1.2.2 载荷谱是室内疲劳模拟实验的依据

在宇航、机械、汽车等制造业中,对产品的设计、疲劳强度检验以及寿命预估等,都需要作随机环境模拟实验,而在实验室内以载荷谱形式模拟“再现”现场的随机环境条件,与在现场条件下进行的样机寿命实验相比,这种模拟实验既可靠又经济。

目前,室内疲劳模拟实验大致分为以下四种:

1 等幅载荷试验

这是最早提出的一种疲劳模拟试验方法。在试验中,实际载荷时间历程被仅用一个造成损害最大的代表性载荷所代替,并在试验中保持载荷的幅值不变,为了缩短时间,常采用加大载荷数量级的强化试验方法。这种方法的优点是简便迅速,但是也有很大缺点:首先,由于所采用的平均载荷不能代表实际的随机载荷,试验结果与实际出入较大;其次,载荷强化后,会引起实际上并不会发生的结构内部的早期破坏。

2 程序载荷试验

这是一种有效而经济的方法,至今仍为国内外广泛采用。程序载荷试验的依据是,由全部峰值按真实次序排列的载荷时间历程代替实际的时间历程,两者造成的疲劳损伤度相同,而与相邻峰值间经过的时间无关。这种方法是用若干个幅值不同的等幅载荷,按一定顺序加载,来模拟实验载荷试验。按规定的程序加载一遍后,再重复进行若干遍,直至达到一定循环次数。为了获得若干个幅值不同的等幅载荷,以模拟实际载荷,必须对采集的载荷时间历程进行分级统计计数,以得到载荷分布的概率密度函数,经统计后推断出累积频次曲线图,这曲线经合成、扩展便得到工作载荷谱,将其分段、近似等处理,便得到程序载荷谱。可见,这种方法需对载荷幅值进行分级统计(一般称为计数法,目前已发展有各种计数方法),来获得载荷谱。

但这种试验技术也有缺点：研究表明，加载的次序，载荷分级数等因素对疲劳寿命是有影响的；另外，程序载荷是分散的按一定的载荷级分段进行的，而实际载荷是连续的、随机变化的，因此，这种实验方法只能是一种近似的方法。

3 随机载荷试验

近年来，由于随机过程理论的发展，随机数据的处理能在计算机上得到快速实现，同时随着电液伺服技术的发展，在理论上和试验设备上都为一种更接近于实际的疲劳模拟试验技术——随机载荷试验技术的出现和发展提供了条件。

这种方法是根据现场实测的载荷信号 $x(t)$ 进行谱分析获得现场载荷功率谱估计，经过修正与强化处理，制定出载荷的标准功率谱 $\overline{G_x(f)}$ ，做为加载的依据。如图 1-3 所示为该系统的原理框图，传感器实测出的振动信号 $x(t)$ ，经变换得到其功率谱的估计 $G_x(f)$ 将其与标准功率谱 $\overline{G_x(f)}$ 比较，得到差值 $\Delta G(f)$ ，将差值返回时域，给出时间函数的误差变化，再激励振动台消除这一误差。经过若干次反复，其模拟精度可达 ± 1.5 dB 以上。

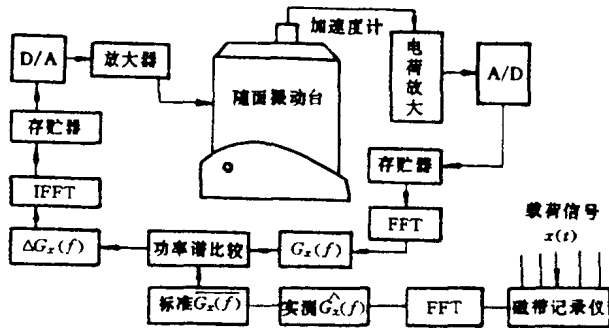


图 1-3 随机环境模拟系统

功率谱密度函数描述了载荷的频率结构,经傅氏反变换可得时域的自相关函数,如果是高斯过程还可得到幅域的概率密度函数,可见功率谱可以保留全部信息,与计数法相比,要精确、严密得多。由于这种方法能更为精确地模拟实际随机载荷,尤其是高频瞬变载荷,因而更为接近实际状况,所以近年来这种试验方法得到很快发展,但这种方法技术难度较大,仪器设备较复杂,试验成本较高。

4 实际载荷试验

这种方法与随机载荷试验方法相近,即把各典型工况的载荷时间历程,用磁带记录下来,然后在实验室重放以直接控制激振器加载。这种方法能完全再现实际载荷,精度高,不受现场条件限制,但记录的试验时间毕竟有限。

1.2.3 载荷是对结构进行动力修改与优化的依据

现代机器朝着高速、重载、低噪声和高可靠性等方面发展。要求机器工作时,在实际载荷作用下,机器的噪声、强度、变形以及振动等方面都达到人们的要求,即机器应能满足对其动态性能的要求。一般所指的机器的动态性能主要是机器在工作时的振动性能,即机器工作时对其内外载荷激振的响应。

有限元分析技术及试验模态分析技术的发展为研究机器的动态特性提供了有力手段,通过计算机分析与实验研究,人们可以相当精确地了解机器的动态特性参数(如固有频率、振型、刚度、阻尼等)。同时,很多高级的结构动态分析软件还能使得人们在掌握结构动态特性之后仿真出结构对外载荷的响应,从而对结构的某些参数进行修改与优化。例如,可将已知的载荷功率谱施加于计算机结构模型的某个节点上,并仿真出结构其他的节点的响应功率谱,从而判断结构的修改是否合理和有利,是否使得机器的动态特性得到了优化。因此,掌握了机器的载荷谱就可以利用上述技术对机

器的结构进行修改与优化,直至令人满意为止。

1.3 载荷谱的采集与载荷识别的概念

为获得载荷谱,必须先采集载荷的时间历程。同时为了使获得的载荷谱具有典型性、概括性和集中性,采集的时间历程必须具有足够的代表性,尽可能在统计上令可能发生的重要事件得到充分地呈现,因此,在载荷时间历程的采集中,应注意如下几点:

A 必须选择具有代表性的工况,并包括一些在使用过程中遇到的或可能遇到的特殊情况;

B 确定各典型工况在使用期间所占的比值;

C 在相同的测试条件下应重复测量三次以上,以提高统计数的精度。

测定结构动力载荷(或即外载荷)的方法一般有两种,即直接测定与间接测定(或称为识别)法,前者是通过直接测定载荷本身或测量与载荷有关的参数来得到载荷的大小。例如:高压容器中由于压力脉动而产生的动载荷,可通过直接测定容器内的压强脉动而确定;高架冷却塔的风力脉动载荷,可通过直接测量风速的脉动而确定。总之,用某种传感器直接测出载荷信号或与其有关的参数,并将其转化为电量,记录在某种仪器内(如磁带机),经过后续一系列处理,即可得到载荷谱。

但对于很多实际工程结构,在工作过程中,其所受的外载荷往往很难直接测量,甚至是不可能直接测量。例如,火箭在飞行时所受的推力脉动载荷,建筑物承受的地震力,汽车行驶时所受的路面激励力等。还有一些机械如煤矿采掘用的掘进机、采煤机,由于井下条件恶劣,许多仪器受到防爆要求的限制,也难以直接测定。

鉴于上述情况,人们便自然地寄希望于寻求一种间接测量法,于是就有了载荷识别法,这种方法主要是指通过测定结构的响应

(如位移、速度、加速度、应变等等,这些响应应是容易测出的),然后根据已知的结构动态特性,来识别结构动力载荷。这是一种结构动力学中逆问题的处理方法,称为结构载荷识别如图 1-4 所示。

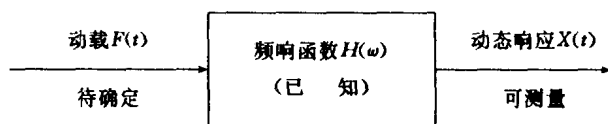


图 1-4 载荷与系统传递特性及响应之间的关系

有限元技术与试验模态分析技术的发展,为载荷识别创造了良好的条件,目前采用模态分析方法可使模态参数的辨识精度达到在 1 Hz 内分辨出几个模态。但结构载荷识别技术还远落后于模态参数辨识技术的进展,尚有一些问题需进一步研究,识别的精度亦有待于进一步提高。

2 模态分析的理论基础

2.1 引言

由于目前已有的各种动态载荷的识别方法在很大程度上是以模态分析理论为基础的,因此,为了方便读者,本章将对模态分析的基本理论做一简要介绍。

模态分析是机械和结构动力学中一种极为重要的分析方法。模态分析的基本思想是将描述机械结构动态性能的矩阵方程解耦,从而使 N 自由度系统的动力学特性可以用单自由度系统来表示。模态分析的核心内容是确定用以描述结构系统动态特性的固有频率、阻尼和振型等模态参数。

由于模态分析技术是以试验实测数据为依据的,随着现代计算机和信号分析与处理技术的迅速发展,尤其是 FFT 的应用和计算机软件的开发,使其精度和可靠性得以大幅度提高。近十余年来,模态分析理论吸取了振动理论、信号分析、数据处理、数理统计及自动控制的有关理论,结合自身内容的发展,形成了一套独特的理论,为模态分析及参数辨识技术的发展奠定了理论基础。

自动控制理论中的传递函数(或频率响应函数)概念的引入,对模态分析理论的发展起着很大的推动作用。传递函数反映系统的输入与输出之间的关系,反映系统的固有特性,是系统在频域中的一个重要特征量,亦是频域中识别模态参数的依据。因此,对传递函数的特性分析,并建立它与模态参数之间的关系,是模态分析理论中的一个重要内容。

实际的工程结构均可视为有阻尼的多自由度系统。因此,多自

由度系统将是我們研究的主要对象。对多自由度系统而言,不仅使分析的复杂性增加了,而且还具有单自由度系统所没有的特性。结构参数,输入力及输出响应常用矩阵来描述,因此矩阵分析方法是我們应用的主要手段。为节约篇幅起见,本章将主要介绍多自由度的模态分析理论。

模态分析的经典定义是:将线性定常系统振动微分方程组中的物理坐标变换为模态坐标,使方程组解耦,成为一组以模态坐标及模态参数描述的独立方程,以便求出系统的模态参数。坐标变换的变换矩阵为模态矩阵,其每列为模态振型。由于采用模态截断的处理方法,可使方程数大为减少,从而大大节省了计算机时,减少了机器容量,降低了计算成本。这对大型复杂结构的振动分析带来很大的好处。

实际结构振动时,由于阻尼的分散性,各点的振动除了振幅不同外,振动相位亦不同。这就使系统的特征频率及特征向量成为复数,从而形成所谓“复模态”。复模态的性质与实模态不同,后者是前者的一种特例。因此复模态比实模态更具有一般性。对复模态的分析研究将是本章的又一个重要内容。

模态分析可以在频域中进行,亦可在时域中进行。时域分析的理论基础较广,其数学模型的建立(数学建模)是时域分析的理论基础。

模态分析的最终目标是识别出系统的模态参数,为结构系统的振动特性分析、振动故障诊断及预报以及结构动态特性的优化设计提供依据。因此模态参数辨识是模态分析理论的重要内容,有关模态参数辨识的理论及方法读者可参阅^[1]。

2.2 多自由度系统模态分析的理论基础

由于各种载荷识别的方法在很大程度上是以模态分析理论为

其理论基础。因此,本节将简单介绍多自由度系统模态分析的基本理论及方法,我们以 N 自由度的比例阻尼系统作为对象加以讨论,其结果可以很方便地推广到其它阻尼系统。

对于 N 自由度线性定常系统,其运动微分方程为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (2-1)$$

式中, M, C, K 分别为系统的质量、阻尼及刚度矩阵。通常, M 及 K 矩阵为实系数对称矩阵,而其中质量矩阵 M 是正定矩阵,刚度矩阵 K 对于无刚体运动的约束系统是正定的;对于有刚体运动的自由系统则是半正定的。当阻尼为比例阻尼时,阻尼矩阵 C 为对称矩阵。 M, K, C 矩阵均为 $(N \times N)$ 阶矩阵。式中, X 及 F 分别为系统各点的位移响应向量及激励力向量。

$$X = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{Bmatrix}_{N \times 1}, F = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \end{Bmatrix}_{N \times 1}$$

式(2-1)是用物理坐标 $X, \dot{X}, \ddot{X}$ 描述的运动方程组,是一组耦合方程。当系统自由度很大时,求解十分困难。将上述耦合方程变成非耦合的、独立的微分方程组,这就是模态分析所要解决的根本问题。模态分析方法就是以无阻尼系统的各阶主振型所对应的模态坐标来代替物理坐标,使微分方程解耦,变成各个独立微分方程,从而求出系统的各阶模态参数。

对式(2-1)两边进行拉氏变换,可得

$$(s^2 M + s C + K)X(s) = F(s) \quad (2-2)$$

其中

$$s = \sigma + j\tau, s^* = \sigma - j\tau \quad (2-3)$$

为拉氏变换因子, $X(s)$ 及 $F(s)$ 分别为位移响应与激励力的拉氏变换(初始条件为零)