

机械模态分析

〔日〕 大久保信行

MODAL
ANALYSIS

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书系统地论述了机械模态分析的基本理论和试验方法，并结合实例介绍了它在各个方面的应用。

原书共分七章。首先介绍了机械振动分析的一般理论；接着详细地论述了模态分析的现状、模态分析的应用方法；最后，在第五章到第七章，列举了“在电气机械中的应用”、“在机床中的应用”以及“在工程机械中的应用”实例。

本书可供高等院校理工专业高年级学生、研究生、教师以及从事船舶、汽车、机床、电气机械、工程机械、飞机、导弹、航天器等研究、设计、试验、制造部门工作的工程技术人员参考使用。

机械模态分析

[日]大久保信行 著

尹传家 译 徐 敏 校

*

上海交通大学出版社出版
(上海淮海中路 1984 弄 19 号)

常熟文化印刷厂印刷

新华书店上海发行所发行 各地新华书店经售

*

开本：787×1092 毫米 1/32 印张：8.125 字数：181,000

1985 年 9 月第一版 1985 年 9 月第一次印刷

印数：1—5000 本

统一书号：15324·156 科技新书目：112-249

定价：1.60 元

序

张阿舟

设计是艺术还是科学?是否可以这样说,随着科学技术的发展,设计工作的科学性迅速在增长。机械类的结构强度设计正在由以静强度为主要准则向具有良好动态特性为设计要求的方向过渡。模态分析理论,特别是近年来在电子计算机科学和技术的刺激下形成的试验模态分析或称模态识别技术,是当前动强度领域的一个主要组成部分。国内对模态分析的理论和应用研究,也处在方兴未艾的阶段。从事这方面工作的科技人员都迫切地希望能有一本系统的和反映最新水平的专著。

上海交通大学徐敏副教授在1983年去日本时,见到了日本中央大学的大久保信行副教授,并征得他的同意,将他的1982年出版的《机械模态分析》一书译成中文在我国出版;回国后立即落实由曾译过《振动工程大全》的尹传家工程师进行翻译,现在,已与读者见面,质量、速度、效率都十分令人赞叹。

这本书系统地介绍了模态分析、应用方法等方面的基础理论,浅显易懂;提供了该技术在电气机械、机床、工程机械等方面的应用实例,便于借鉴。在模态分析方面反映了八十年代初期的水平。

我相信国内的同行们一定会喜欢这本书,从中受到启示,获得裨益,把本职工作做得更好。“他山之石,可以攻玉”,这

本书对我国在模态分析领域赶超世界先进水平将会起到良好的促进作用。

译 序

多年来,设计机械均把静强度作为主要准则,因此往往出现保守设计的情况,致使产品的重量加大,成本增高。近年来,随着机械性能和机械效率的提高,出现了机械高速化、轻量化、大型化、复杂化的趋势。因此,在设计时,不但要考虑机械的静强度,而且还应当考虑机械的动态特性。尤其是七十年代以后,由于电子计算机应用的普及以及快速 Fourier 变换(FFT)算法的出现和应用,使模态分析方法得到了迅速发展。小型计算机的发展和应用,能在试验室或者现场进行机械模态分析。本书所述的测量、分析机械动特性的模态分析方法几乎可适用于各种机械工程行业,例如船舶、海洋平台、汽车、机床、电气机械、工程机械、飞机、导弹、航天器等。

本书反映了振动测试技术和理论分析在解决实际问题中目前所能达到的水平,勾划出所涉及的设计、计算、试验、校正、模化等工作步骤,介绍了有关的理论和方法。以往,这些内容散见于各种文献和资料,在国内尚没有出版过一本类似这样的书籍进行这方面的系统论述和举例。本书总的篇幅不大,但涉及的面较广,收集的资料较多,讲述比较浅近易懂,在第五章至第七章还列举了若干典型实例。

本书中译本的尽快出版,对于目前国内各高等院校、研究设计部门、工矿企业等单位已经陆续广泛开展的模态分析工作,无疑将有很大的促进和帮助作用;同时,提供给广大在职的工程技术人员阅读,从而对了解和应用模态分析技术解决

结构振动问题具有一个较系统的概念。

在本书翻译、审校、编辑与出版过程中，我们得到了多方面的指导、关心和帮助，其中有南京航空学院张阿舟教授(并为本书出版写序)、浙江大学程耀东副教授、南京航空学院赵淳生博士以及其他有关同志。在此，我们表示真诚的感谢。

本书的出版，力求做到准确无误地用中文表达原书的意思，但由于我们的水平所限，肯定有错误和不妥之处，祈请读者给予批评指正，不胜感激。

译 校 者

1984年2月5日

前 言

本书阐述近几年来迅速发展的“通过试验确定机械动态特性的模态分析技术及其应用方法”。该方法与有限元法一样,由于其应用范围广、使用价值很高,因此,作者认为:凡与机械有关的工程技术人员均应熟悉它。

可是,迄今为止所发表的与模态分析有关的文献,几乎都是片断的,而缺乏从它的基础到应用的系统论述。

因此,为了获得对模态分析的正确理解,作者决心将其基础理论和应用方法及其某些实例,编写成一本书。模态分析所涉及的技术内容比较广泛,难以在本书中对所有的方面均加以详细的说明,但是,可以相信:只要阅读了本书,必定能够对模态分析有所理解,并能加以实际应用。

本书以机械系的大学生、研究生以及企事业单位的工程技术人员为对象,力求写得通俗易懂。因此,有些地方缺乏数学上的严密性,望读者予以谅解。

由于模态分析现在仍处在发展阶段,新的方法会不断出现,同时涉及的因素又较多,所以这里仅给读者提供必要的知识。有兴趣的读者,可参考书末所列的文献。

在本书的编写过程中,曾听取了许多宝贵的建议,这对克服编写工作中的困难增添了信心和勇气,在此除了感谢 D. Brown 教授(美国 Cincinnati 大学)、R.Snoeys 教授(比利时 Leuven 的 Katholieke 大学)、M.Weck 教授(西德 Aachen TH)以及 M. Richardson 博士(美国结构测量系统公司)之外,同

时还要对作者在留学初期进修模态分析的老师 J. Tlustý 教授(加拿大 McMaster 大学)所给予的教导致以崇高的敬意。

本书亦用到了由通产省工业技术院机械技术研究所、机械振兴协会技术研究所、横河 Hewlett-Packard 公司、日本系统技术公司、东阳通商公司、东京电子公司以及很多企业单位提供的珍贵资料,在此向这些部门和单位一并表示谢意。

还有东京芝浦电气公司综合技术研究所的野際靖男先生对本书的第五章“在电气机械中的应用”、小松制作所公司(株)技术研究所的村井秀兒先生对第七章“在工程机械中的应用”的编写都给予了大力协助,在此也深表谢意。

最后,本书得以能尽快出版,还应对中央大学出版社各部门表示衷心的感谢。

大久保信行

九八一年十二月

目 录

第一章	绪论	1
第二章	机械的振动分析	7
2.1	单自由度质量-弹簧系统的振动	7
2.2	多自由度质量-弹簧系统的振动	20
2.3	有限元法的振动分析	31
2.4	基于传递函数测量的模态分析	35
第三章	模态分析的现状	48
3.1	机械的激振方法	49
3.2	响应测量方法	57
3.3	利用数字处理技术测量传递函数	63
3.4	通过曲线拟合计算模态参数	84
3.4.1	单自由度系统的曲线拟合	87
3.4.2	多自由度系统的曲线拟合	102
3.4.3	振动模态及其活动图形	119
第四章	模态分析的应用方法	123
4.1	组合系统分析法	125
4.2	模态综合法	141
4.3	灵敏度分析法	150
4.4	系统识别法	154
4.5	有限元法和试验模态分析	163
第五章	在电气机械中的应用	176
5.1	风扇的应用举例	179
5.2	音箱的应用举例	182

5.3	压缩机的应用举例	183
5.4	打印机的应用举例	184
第六章	在机床中的应用	189
6.1	表面光洁度	189
6.2	高频振动	193
6.3	立式铣床的应用举例	199
6.4	数控车床的应用举例	206
6.5	平面磨床的应用举例	211
第七章	在工程机械中的应用	216
7.1	动态设计分析方法	217
7.2	铲土机的应用举例	225
7.3	翻斗汽车的应用举例	233
参考文献		244
后记		248

第一章 绪 论

以前,一直把强度视为最重要的课题,按照在使用条件下不致破坏的准则来设计和制造机械。因此,对于作用在机械上的载荷,尽量加大安全系数,把机械设计得很笨重,因而往往出现保守设计的情况。在这种情况下,由于仅考虑静载荷,其结果使得机械的重量增加,而从成本方面考虑也不恰当,这样的设计不能认为是合理的设计。

然而,最近以来,尤其是石油危机出现之后,随着机械性能和机械效率的提高,同时也出现了要求降低成本的呼声,于是,在设计时,不仅要考虑静态强度问题,而且还应当考虑动态特性。为了使机械在极高速度下能工作,必须尽可能地设计得轻一些;但是,由于轻量化引起结构产生振动,从而噪声加大,事与愿违,出现了相反的结果。

由于这种情况,在设计上开发了动态特性的分析方法。不言而喻,近年来大型计算机的迅速发展,使得能够进行复杂的计算,以前不能研究的庞大的数值分析,现在一般都可完成了。

数值分析的典型方法是有限元法。在用这种方法设计机械时,如果有了图形,即有了机械尺寸这种几何数据,再加上该机械的静态特性、应力分析、热分析就能直接计算出动态特性。

然而,尤其在动态特性分析中,机械的阻尼特性是很重要的,按照现在的技术水平还难以从图形上求得,同时也不能进

• | •

行精确的动态分析,因此,期望有新的方法。

随着小型计算机的发展,根据 Cooley 和 Tukey 在 1965 年发表的快速 Fourier 变换方法,对试验测量的动态信号既能快速地又能实时地进行处理,同时还相继发表了试验测量机械动特性、直到能进行分析的方法。其中最先进的方法就是本书所述的模态分析方法。

该试验方法当然不能象有限元法那样,只要有了图形,不进行试验也能分析动特性,而必须进行几种试验,测量它们的动特性。很显然,这些试验所得到的数据具有较高的可靠性,再应用新的模态分析方法,对样机进行结构修改,便能定性地、定量地预测它具有良好的动特性,这样,只要少量的试验便能达到有效的设计。因此,在现阶段,无论从设计成本方面,还是从数据可靠性方面考虑,模态分析及其应用均称得上是最有效的设计方法。

此外,该试验方法不仅对设计新的机械,而且对现有机产生任何不平衡振动时进行故障诊断也是非常有效的。这种故障在设计阶段是没有预料到的,而在机械使用时经常出现。

在详细叙述模态分析之前,试对机械动态特性的测量过程作一般性的研究。

首先,要进行的的就是分析机械在典型的使用条件下工作时所产生的振动。为此,在机械上安装若干个响应传感器(测量加速度、速度或者位移),将其输出进行 Fourier 变换,便知在何种频率分量点上产生多大的响应。例如,图 1.0-1(c) 就是其典型结果。

根据机械在运转中的振动分析,首先,能够对是否产生过大的振动作出评价;其次,能够推算出该机械在哪些频率下易于产生振动,即确定机械的固有频率。在本例中,认为它们在

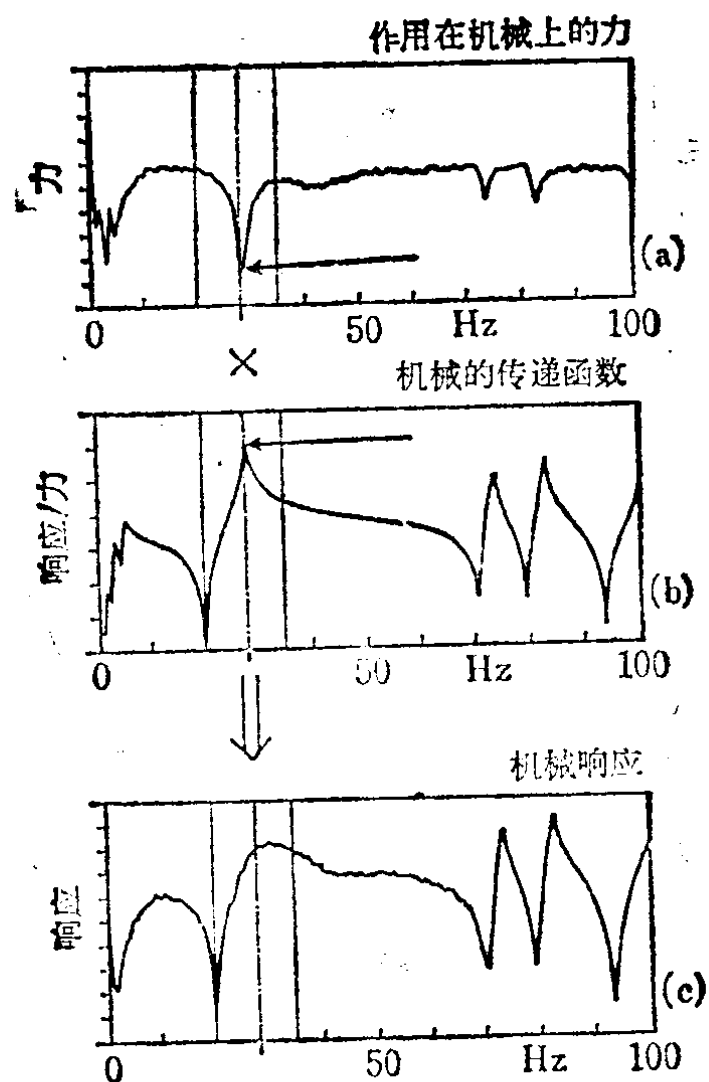


图 1.0-1 机械的振动^[1]

10、30、75、85Hz 附近。如果对机械的动特性已经掌握了足够的资料,就无需进行以上的分析。当然,想知道所测出的振动是如何产生的,尚需作进一步的研究。

现在,如图 1.0-2 所示,画出机械动态特性的框图,它揭示了机械在运转中受到例如回转部件的不平衡质量引起的惯性力、来自机械外部的振动等等原因所引起的外力,以及机械对这些外力产生的响应。用各自的时间函数表示这些关系,设外力为 $x(t)$, 响应为 $y(t)$, 则机械的动特性表示为 $h(t)$ (系统

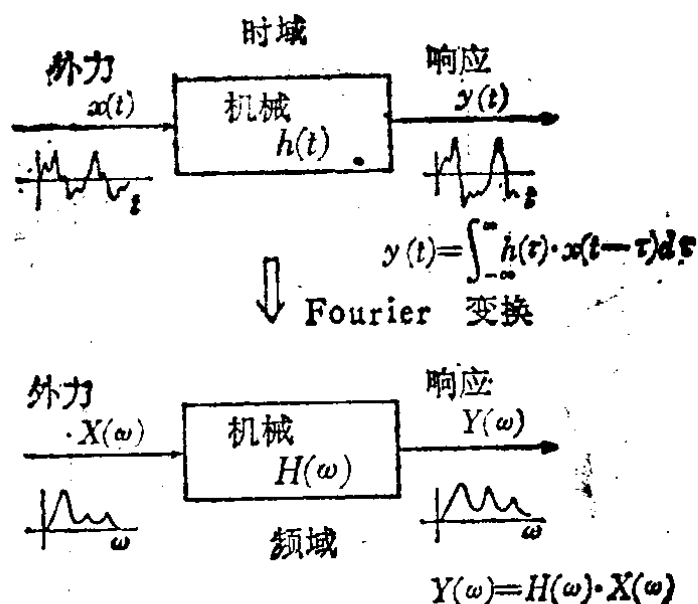


图 1.0-2 机械的传递函数

对单位脉冲外力的响应函数), 如下式所示:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x(t-\tau) d\tau \quad (1.0-1)$$

写成卷积的形式。

如将上式变为频域函数, 即进行 Fourier 变换, 可以用比较简单的形式表示。设外力、响应以及机械的动特性分别为 $X(\omega)$ 、 $Y(\omega)$ 、 $H(\omega)$, 众所周知, 作为卷积积分的结果, 则可以表示为

$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot X(\omega) \quad (1.0-2)$$

这样看来, 机械在运转中的振动分析就是观测响应函数 $Y(\omega)$ 。当然, 它依赖于作用在机械上的外力。由于图 1.0-1 的响应 (c) 实际上等于作用在机械上的外力 (a) 与机械动特性 (b) 的乘积。有时, 在偶然的使用条件下, 当 30Hz 附近的外力很小时, 就其响应来说, 问题不大。然而, 若使用条件发生变化, 振动分量的外力增大, 显然, 振动响应则变得很大。为了正确地掌握机械的动特性, 而使用条件又往往是变化的, 要观测此时

的响应,虽是必要的,然而实际上尚存在不少困难。

因此,为正确地掌握机械的动特性,考虑在各种使用条件下,显示各种响应,为了深入进行分析,由图 1.0-2 可知,机械的动特性需要测量 $H(\omega)$ 。为了求 $H(\omega)$,必须同时测量作用在机械上的外力及其相应的响应,并可按下式

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (1.0-3)$$

进行计算。

上式在本书所述的模态分析中是极为重要的概念,其中 H 称为机械的传递函数 (Transfer function) 或称频响函数 (Frequency response function)。

一旦求得传递函数,便有很多个应用。譬如,能计算出在任意外力作用下的机械响应,以及根据测量的机械响应反过来能计算出在机械上有多大的外力在作用着。

然而,只测量传递函数,对机械动特性的设计还不够完全。于是,在传递函数中,往往观测:即使只有很小外力作用也会产生很大振动的固有频率,此时,应当分析机械的什么部分坏了。因此,在该固有频率下,应当测量机械的各个部分的变形,并将其称为机械的振动模态,这在了解机械的动态特性方面,是很重要的资料。

为了求得机械的振动模态,要对结构上测量振动模态的各点,反复地测量如上所述的外力与响应之间的传递函数。

有关求固有频率和振动模态的理论方法将在以后的章节中加以叙述。人们把这样的测量和分析机械动态特性的方法称为模态分析。

模态分析的基本概念很久以前就有人研究过,而现在的分析形式则是 1970 年以后才出现的。这首先,由于上述的

Fourier 变换能够在短时间内快速完成变换,其次是由于小型计算机的价格低廉,其尺寸小,可在试验室内很方便地使用,还有数字计算技术的发展等原因。尤其是近几年模态分析的迅速发展,几乎用于各种机械工业部门,例如汽车、机床、电气机械、飞行器等,对于从事机械工程的技术人员均不可缺少它。

此外,由于模态分析技术正在迅速发展,其定义尚有些不太明确的方面。在本书中是指:在机械上各点人为地对机械施加激振力,同时测量其响应,由此求出机械上各点的传递函数,最终计算出固有频率和振动模态等数据(称为模态参数)的方法,并限于信号处理的模态分析。

基于最近的模态分析的结果,为了得到较好的动态特性,正在着手发展利用计算机的预测模拟法,本书的后半部分将对此方法予以详细叙述。

第二章 机械的振动分析

用模态分析,在对机械的动态特性进行试验测量、分析之前,需要预先知道:数学上是怎样表示机械动特性的,它们具有怎样的性质。

为了用数学表示机械的动特性,通常采用:假定机械是由集中质量和连接它们的弹簧组成的质量-弹簧系统模型、或由分布质量和梁结构组成的柔性模型(receptance model)、或由有限个三角形或者四角形有限元等所组成的有限元法等。

2.1 单自由度质量-弹簧系统的振动

数学上,最简单地表示机械结构的就是图 2.1-1 所示的

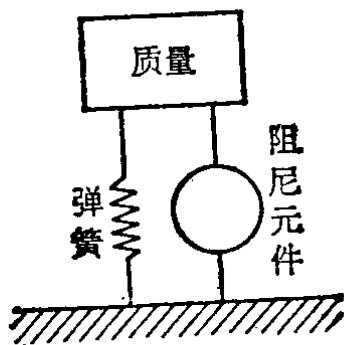


图 2.1-1 单自由度质量-弹簧系统

一个质量以弹簧和阻尼元件支承的系统。讨论该系统的振动,是不难理解模态分析理论的。

此时,问题在于如何用数学形式表示阻尼。实际阻尼的产生,其机理是非常复杂的,可分类如下: