

Loading Techniques for Fatigue Test

疲劳试验加载方法

张学成 于立娟/著

非
外
借



科学出版社

疲劳试验加载方法

张学成 于立娟 著

科学出版社

内 容 简 介

本书对疲劳试验装备中的试样加载技术进行理论阐述、技术探讨和相关设备分析,具体内容包括疲劳试验与机械振动、驱动系统与作动器技术、杆件单一载荷疲劳试验的共振加载、超声疲劳试验系统和应用示例。本书主要探讨交变载荷的施加手段问题,获得满意的试验加载效果,实现振动疲劳试验系统准确、高效、节能、低成本的目标。

本书特别适合从事试验技术装备设计、制造和使用的技术人员作为参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

疲劳试验加载方法/张学成,于立娟著. —北京:科学出版社,2017.11
ISBN 978-7-03-053973-1

I. ①疲… II. ①张… ②于… III. ①疲劳试验—载荷 IV. ①TB302.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第169132号

责任编辑:张震姜红/责任校对:杜子昂

责任印制:吴兆东/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2017年11月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年1月第二次印刷 印张:15 1/2

字数:312 000

定价:99.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

众所周知,疲劳是一种由脉动应力引起的隐形且不可能完全避免的有害现象,影响构件结构设计和使用寿命。构件或产品疲劳试验在寿命估计及产品可靠性方面起着关键的作用,是单一材料试验无法代替的。

材料力学中关于疲劳试验的教材、专著很少,理论、计算、方法、实例为一体的专门论述疲劳试验加载方法的专著很难寻到。该书展现了作者在几十年相关研究和实践工作中,形成的独特观点、方法和工程上的应用思考。

疲劳试验的种类和要求很广泛,根据力学原理,遵循试件本身规律完成疲劳试验过程,即寻求最恰当的试验加载方法是该书的关键,以能量消耗最低作为优先技术目标。全书在材料、零件、机构三个层级的试验对象上就交变载荷的施加方法展开论述,旨在以最低的代价获得最满意的试验效果,为制造和使用疲劳试验设备达到准确、高效、节能、低成本的目标提供技术参考。

该书提出并诠释了若干不同的方法和概念,作者不再拘泥于传统的设计方法,将现代的伺服技术、数字技术、电子技术、通信技术、传感技术、软件分析方法等融合贯穿于疲劳试验加载方法的全过程中,如平面运动微摩擦静压支承技术、捆绑式直线电动机动静态加载方法、变频电动机节能及其电子飞轮技术、伺服电动机驱动液压泵的闭环控制方法、大型动态压剪试验机中重型移动件的液压弹性夹持原理、超大力值作用下的构件疲劳试验、液压脉动油源高频加载技术、脉动式梁的共振弯曲疲劳试验加载方法、径向可调式惯性激振器的应用、超声疲劳试验技术及其扩展应用等。

该书诠释了作者几十年教学、科研和工程实践方面的心血与经验,出版后将为中国试验机行业在疲劳试验技术发展和人才培养方面起到积极的促进作用。我与作者多年合作共事,深知该书并未涵盖作者材料力学性能试验的全部思想,愿作者在下一部书稿中不吝分享。



2017年3月

前 言

根据相关统计结果, 70%以上的机器故障是由疲劳造成的, 因此研究疲劳以及防止和消除疲劳的有害作用, 始终是科学家和工程师最重要的任务之一。在传统意义的认知上, 疲劳试验通常是费时、费力、费钱而又不得不做的工作。一般规定疲劳试验的交变载荷循环次数不小于 10^7 次, 而试件承受的载荷往往与机架和激振力水平相关, 故设备的造价和使用成本很高, 由此导致的为节省成本而取消或者简化试验并引起事故发生的现象层出不穷。

随着社会和经济技术的发展进步, 新的甚至是私人定制式的多样化、个性化的工业产品越来越多, 消费者永远都是希望以尽量低的价格享受安全可靠的产品, 如何在短时间、低成本下实现高性能是进行疲劳试验必须要解决的矛盾。而试验, 尤其是疲劳试验是评估产品承受载荷能力必不可少的最重要、最可信的技术手段。

本质上, 疲劳试验是振动理论和方法的工程应用, 以交变载荷(或者运动)为目标的疲劳试验过程是强迫振动的过程。关于疲劳试验和振动理论专门的、成熟的理论体系和技术方法体现在专著、教材和研究论文中。现代工程力学的理论和技术方法的发展, 为疲劳试验的工程应用奠定了坚实的理论和方法基础。例如, 有限元分析方法结合计算机技术, 为复杂形状构件甚至整机在复杂受力状态下进行力学性能计算, 尤其是模态分析, 提供了十分方便而又精确的技术支持。如何运用振动理论解决疲劳试验工程中的技术问题, 主要是加载方法、激振器和结构设计, 尤其是节能问题, 是本书写作的主要内容。运用振动理论和方法的成果与结论, 设计试验构件或者试验装置, 达到在最短的时间内、以最小的代价获得有效的试验结果的目的, 是本书写作的宗旨。

疲劳试验加载方法严格说是一个工程技术问题。作者在解决、处理工程技术问题时崇尚八字原则: 简单、灵活、实用、美观, 即以最简单的方式灵活地运用各种方法, 把解决问题作为目标, 获得实用而不失美学效果的解决结果。本书试图遵循这些解决工程技术问题的基本原则, 将作者的观点——低能耗、简化机器

结构、快速试验——推演至整个疲劳试验方法体系中，并给出理论推导、方法论证、结构原理与应用示例。希望需要对试件、构件乃至整台机器进行疲劳试验，而没有现成技术方法和设备可选择的工程师、用户以及试验装备的研究开发者，在设计疲劳试验机时可以从本书中得到启发。

作 者

2016年仲夏完稿于吉林大学

目 录

序

前言

1 疲劳试验与机械振动	1
1.1 疲劳现象及其影响	1
1.2 疲劳试验系统	2
1.2.1 疲劳试验的目的和内容	2
1.2.2 疲劳试验的加载方法和形式	3
1.2.3 疲劳试验机加载系统原理	5
1.2.4 疲劳试验中的能量转换与回收利用	6
1.2.5 激振器	7
1.2.6 从试样到整机的疲劳试验	10
1.3 试件的机械振动与疲劳试验	12
1.3.1 单自由度强迫振动	13
1.3.2 多自由度振动系统	14
1.3.3 有限元模型与有限元方法	16
1.4 试验系统的能量规律	16
1.4.1 振动体的能耗	16
1.4.2 阻尼的作用与能量消耗	20
1.5 本章小结	22
参考文献	23
2 驱动系统与作动器技术	24
2.1 液压脉动装置	25
2.1.1 单作用式液压脉动油源	25
2.1.2 双作用式液压脉动油源	30
2.1.3 动态力自平衡液压脉动油源	31
2.1.4 液压脉动油源的能量利用与储能	33
2.1.5 作动器	36
2.1.6 大规格交变载荷试验动力源设计方案	37
2.1.7 扭转脉动疲劳试验机设计示例	40

2.2 无阀电液伺服驱动系统	40
2.2.1 工作原理	41
2.2.2 基本结构形式	42
2.2.3 泄漏补偿	44
2.2.4 流量与稳定性	44
2.2.5 系统散热问题	48
2.2.6 动态性能分析	48
2.3 电液伺服控制与静压支承技术	63
2.3.1 电液伺服液压油源的能量与负载	63
2.3.2 静压支承液压作动器	64
2.3.3 微摩擦平面静压支承技术	66
2.4 机械式直线作动器	70
2.4.1 机械式作动器的形式	71
2.4.2 作动器的组合	72
2.5 往复运动电动机	74
2.5.1 往复运动电动机的工作原理	74
2.5.2 往复运动电动机在疲劳试验机中的应用示例	75
2.6 电磁作动器	76
2.7 本章小结	77
参考文献	78
3 杆件单一载荷疲劳试验的共振加载	80
3.1 杆件的振动模态	80
3.1.1 梁的弯曲	80
3.1.2 杆件的纵向振动	83
3.1.3 轴的扭转振动	88
3.2 管道的弯曲振动与疲劳试验加载方法	88
3.2.1 功能与用途	89
3.2.2 基本工作原理	89
3.2.3 适应性调整	92
3.2.4 主要特点与效果	93
3.2.5 应用示例	93
3.3 杆件的共振弯曲振动与疲劳试验加载方法	98
3.3.1 曲轴弯曲共振疲劳试验	98
3.3.2 螺栓连接疲劳试验	101
3.3.3 铁路轨枕脉动疲劳试验	101

3.4 扭转共振疲劳试验加载	111
3.4.1 两端大质量杆的共振扭转	111
3.4.2 一端固定一端自由杆的扭转振动	114
3.4.3 内力系扭转振动	116
3.5 杆件的轴向振动与疲劳试验加载方法	117
3.5.1 杆件的共振疲劳试验基本原理	117
3.5.2 柴油发动机连杆拉压疲劳试验加载方案	118
3.6 本章小结	121
参考文献	121
4 超声疲劳试验系统	123
4.1 超声疲劳试验的基本原理与应用	124
4.1.1 无限自由度连续系统的振动	124
4.1.2 超声疲劳试验原理	125
4.1.3 超声疲劳试验机	126
4.1.4 试验对象	128
4.1.5 应变与裂纹监测	129
4.1.6 超声疲劳试验的发展与应用	129
4.1.7 超声电源与超声换能器	131
4.1.8 变幅杆	138
4.1.9 试件	143
4.1.10 试件状态检测	145
4.2 超声共振疲劳试验	148
4.2.1 轴向共振疲劳试验	148
4.2.2 其他加载形式的超声疲劳试验	158
4.3 准专用试件的超声疲劳试验	158
4.3.1 谐振方程与求解	159
4.3.2 谐振长度等参数的有限元分析	159
4.3.3 试件的安装紧固方法	160
4.4 超声脉动疲劳的实现	164
4.4.1 双周疲劳试验	164
4.4.2 纵向脉动超声疲劳有限元分析	166
4.4.3 机械加工精度对谐振频率的影响	169
4.5 本章小结	171
参考文献	172

5 应用示例	174
5.1 脉动疲劳试验机	175
5.1.1 低频脉动疲劳试验机	175
5.1.2 高频脉动疲劳试验机	180
5.2 机械式疲劳试验机	182
5.2.1 曲柄滑块机构的运动与动力分析	182
5.2.2 变频电动机节能与飞轮的运用	192
5.2.3 几个关键技术问题与解决措施	192
5.2.4 电子机械式疲劳试验机的两种设计示例	197
5.3 大型动态压剪试验机	198
5.3.1 动态压剪疲劳试验机的技术难题	200
5.3.2 直驱式容积伺服动态压剪试验机	207
5.4 电动式动静试验机	218
5.4.1 采用永磁同步直线电动机的动静试验机	218
5.4.2 采用振荡直线电动机驱动的疲劳试验的设计示例	231
5.4.3 单自由度强迫振动系统的加载应用	235
5.5 本章小结	236
参考文献	237
后记	238

1 疲劳试验与机械振动

一切人造的或者自然的、物化的器件、工具、装置和结构都会以某种方式承受力负载。凡属承受力负载的物件，其所能承受的负载极限、负载方式，以及承受这些负载的延续时间周期是应当让使用者知晓的技术指标内容。疲劳试验是人们获知这些技术指标的重要的、必要的手段。而工程上的疲劳试验往往是模拟实际中的载荷作用形式，通过尽量简单的途径和手段，在尽可能短的时间内，激发物件的失效，获知材料或试件的物理性能知识的试验过程。实际上施加载荷的方式与机械振动是密不可分的，甚至可以说，疲劳试验是机械振动技术和理论的应用。

1.1 疲劳现象及其影响

美国材料与试验协会（American Society for Testing and Materials, ASTM）在“疲劳试验及数据统计分析之有关术语的标准定义”（ASTM E206—72）中对疲劳所作的定义：在某点或某些点承受扰动应力，且在足够多的循环扰动作用之后形成裂纹或完全断裂的材料中所发生的局部的、永久结构变化的发展过程，称为疲劳。在工程领域，迄今为止人们对传统强度（静载荷作用、无缺陷材料的强度）的认识已相当深刻，实践经验也十分丰富^[1]。对于疲劳问题，尽管自 19 世纪中叶以来人们为认识和控制疲劳破坏进行了不懈的努力，在疲劳现象的观察、疲劳机理的认识、疲劳规律的研究、疲劳寿命的预测和抗疲劳设计技术的发展等方面都积累了丰富的知识，但是在疲劳问题的研究中存在影响因素多、试验条件差异大、数据随时间变化规律不显著等问题，因此很多复杂的疲劳现象还有待进一步深入研究。疲劳和疲劳破坏在机器设备失效或者故障中占 70% 以上^[2]。疲劳现象是在交变应力作用下，材料、构件或者一切部件从微观裂纹产生、扩展以至破坏的过程，最常见的破坏形式是断裂。充分利用疲劳规律对机器设备正常发挥功能、保证性能十分重要，又由于疲劳行为过程的复杂性，所以疲劳一直以来都是科学家和工程师研究的热点科学问题之一。

文献[3]指出，零件在服役过程中承受着周期性的交变载荷作用，通常疲劳裂纹是破坏的先导。影响强度特性的主要因素包括材料性质和制造工艺、零件的结构、加载方式、与零件相接触的介质等，而疲劳破坏的影响远远大于上述形式。材料或者零件等的疲劳极限是一项重要的力学性能指标，不仅与材料的成分、组

织结构、热处理和冷加工规范、试验温度等有关，而且与试件尺寸、应力状态、应力集中、试件表面状况、粗糙程度、试验介质、与其他零件的相互配合等有关。另外，在疲劳试验时，若疲劳特性为离散分布，则情况更加复杂。由于影响疲劳强度的因素繁多，有必要研究相应的疲劳试验方法。

为了防止结构过早疲劳破坏，必须弄清楚结构材料的抗疲劳特性^[2]。因此，研究人员需开展小到 10^{-7} mm 原子尺度，大至数米的工程结构的尺度范围的疲劳行为研究，以进一步确定与疲劳破坏有关的主要因素和机理。小尺度研究是从材料性能来预测事件的结果，而大尺度研究的目的是检验设计，两者都是必要的。飞机压力座舱破坏试验、汽车整机振动疲劳试验等都是大尺度研究的例子。对于工程上的构件，如果都制成双份，其中一份仅用于试验，尽管在航天工程上有应用，但是这对于一般的项目成本未免过于昂贵。为了更经济地解决工程问题，应当在正确的物理尺度范围内进行研究，小尺度试验最多的应用就是材料本身的疲劳性能试验，通常都制作成标准试样，以便对比分析。

经验对于任何工程实践都是非常重要的，由经验得来的规律、总结的资料是工程师进行结构设计的最直接的依据。虽然在很多情况下，经验规律具有一定的局限性。

可以把拉伸强度和疲劳强度间的近似关系看作这些经验规律中的主要规律之一^[2]，疲劳强度是循环约百万次而不疲劳破坏的循环应力幅值。材料的疲劳强度除以拉伸强度通常称为疲劳比，对于各种钢，疲劳比为 0.4~0.6；对于各种铝合金，疲劳比为 0.25~0.5。由于各种合金疲劳比的分散度很大，设计计算时，一般取比较低的保守数值，但实践证明，此时的许用应力显著下降。当考虑带有缺口或其他应力集中因素的形状时，就会发现许用应力还要进一步降低，疲劳比的概念不再适用。由于分散度较大，如果取疲劳强度下限值，设计是不可靠的，而取上限值显然不经济，而且新的结构、新的材料、新的条件依靠经验解决不了问题，目前力学性能的确定只能来源于试验数据。

1.2 疲劳试验系统

1.2.1 疲劳试验的目的和内容

1.2.1.1 疲劳试验的目的

疲劳试验的根本目的是使产品在良好经济性的条件下，在服役寿命周期内保证工作的可靠性。材料、构件或者产品的力学性能都有自己的研究考察内容和衡量指标，而且这些指标在已有的知识范围内都标准化了。疲劳性能是最重要的力学性能，其性能指标已经形成一套完整的体系，这些指标基本上都是通过试验获

得的。文献[4]阐明了疲劳试验的重要性和主要内容：在载荷谱、介质、湿度等尽可能接近使用条件的情况下进行试验，是改进力学性能测定方法的重要内容。这样，既可以取得提高疲劳强度的论证资料，又可以显著削减实物试验的工作量，为判断零件的疲劳强度创造前提。

1.2.1.2 疲劳试验的内容

疲劳试验的内容是通过试验方法和过程测定如下参数：疲劳极限；疲劳寿命；对应力集中的敏感性；循环载荷的损伤度；裂纹生长速率；出现裂纹前的循环数；剩余寿命的长短；滞后回线特性；循环加载过程中试样变形的变化；裂纹张开位移的变化；对介质、温度、频率、非对称循环、过载、尺寸效应等的敏感性。

材料力学在疲劳破坏方面的研究有以下几方面：

(1) 规定疲劳破坏的力学准则，与此相关，在试验过程中确定受力、变形和能量的特性；

(2) 研究损伤的累积，与此相关，实行各种载荷谱的程序加载和随机加载；

(3) 在恒幅、程序和随机载荷作用下获取疲劳特性和疲劳寿命；

(4) 研究恒幅载荷和变幅载荷作用下的裂纹发展动力学；

(5) 研究发现疲劳损伤的物理方法（X射线透视、超声探伤、磁力探伤等）；

(6) 在各种不同的应力集中、非对称循环和介质作用下测定疲劳强度特性。

疲劳特性用于：选择金属的成分、结构、强化方法和加工方法；明确生产工艺的影响；设计机器零部件；按疲劳性质检查成品和半成品的金属质量；确定疲劳破坏的部位和制定修复工艺；确定零件的使用寿命；确定检查和探伤的周期；确定经过一段工作后或产生疲劳损伤时的剩余强度；检验重要零件使用前的状况等。

所有疲劳试验系统，不管复杂程度如何，总是由一些相同的基本作用单元组成^[4]，包括施加载荷的载荷传递系统、控制器、检测系统以及数据采集与处理系统。载荷传递系统包括机架、夹头、试样和传动（或加载）系统。需要特别指出的是机架刚性问题，根据经验，所有连接接头处都应该施加预紧力，其大小不小于机架承载的额定值；使用时一般为额定静载荷的 25%~50%，最大不超过 67%。这些经验值在没有试验数据的条件下应该重视和遵守。根据作者的研究，以刚性为主要考虑因素，在保证机架性能和控制器与读出装置的性能及功能前提下，以动力供应为目的的加载系统是疲劳试验机工作性能的决定性因素。这也是本书专门探讨加载问题的主要原因。

1.2.2 疲劳试验的加载方法和形式

1.2.2.1 应力循环

疲劳试验是对试件施加交变载荷的过程，在一个加载周期过程中交变应力值

顺次变化的总和称为应力循环^[3]。图 1-1 为不同形式的应力循环图，应力可能是同方向的，也可能是变方向的。

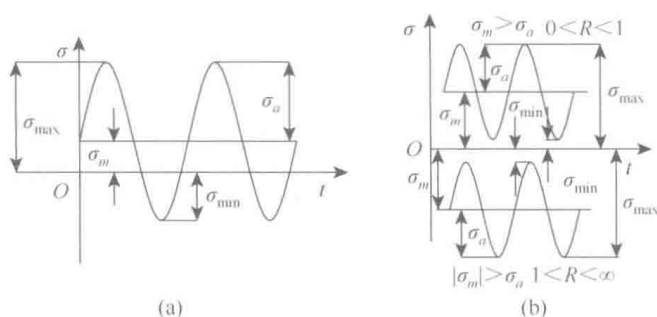


图 1-1 应力循环图

(a) 变号应力循环；(b) 同号应力循环

一个循环中应力值的变化规律用下述方程式表示

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a f(t) \quad (1-1)$$

式中， σ_m 为平均应力； σ_a 为应力幅值； $f(t)$ 为应力随时间的变化规律。

表征循环载荷的最重要参数是最大应力

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a \quad (1-2)$$

最小应力

$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (1-3)$$

不对称系数

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (1-4)$$

疲劳试验时应力振幅变化的主要形式，或施加的应力变化形式如图 1-2 所示。

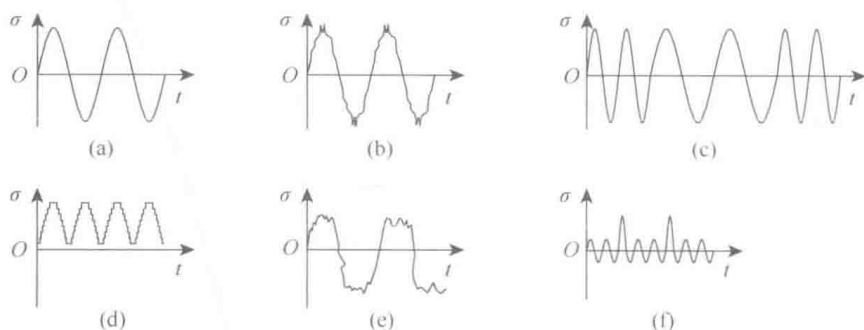


图 1-2 循环应力振幅变化的各种形式

(a) 常振幅正弦（简谐的）加载循环；(b) 双谐循环；(c) 变频循环（循环周期变化）；(d) 程序加载循环；(e) 使用载荷谱复现（其 σ_a 随时间变化， σ_a 低的循环可以省去，也可以保留）；(f) 带有至少一次过载的简谐循环

1.2.2.2 加载方式

为了使试样在试验中能够重现使用条件下零件工作的应力状态，并在试样或

零件中重现使用情况下的断裂形式,应该在试验时选择适当的加载方式,如图 1-3 所示。主要的加载方式^[3]有:①圆试样纯弯旋转弯曲;②圆试样和非圆试样纯弯平面弯曲;③圆试样悬臂旋转弯曲;④圆试样和非圆试样悬臂平面弯曲;⑤圆试样和非圆试样悬臂力面旋转弯曲;⑥圆试样和非圆试样交变拉压;⑦圆试样交变扭转。

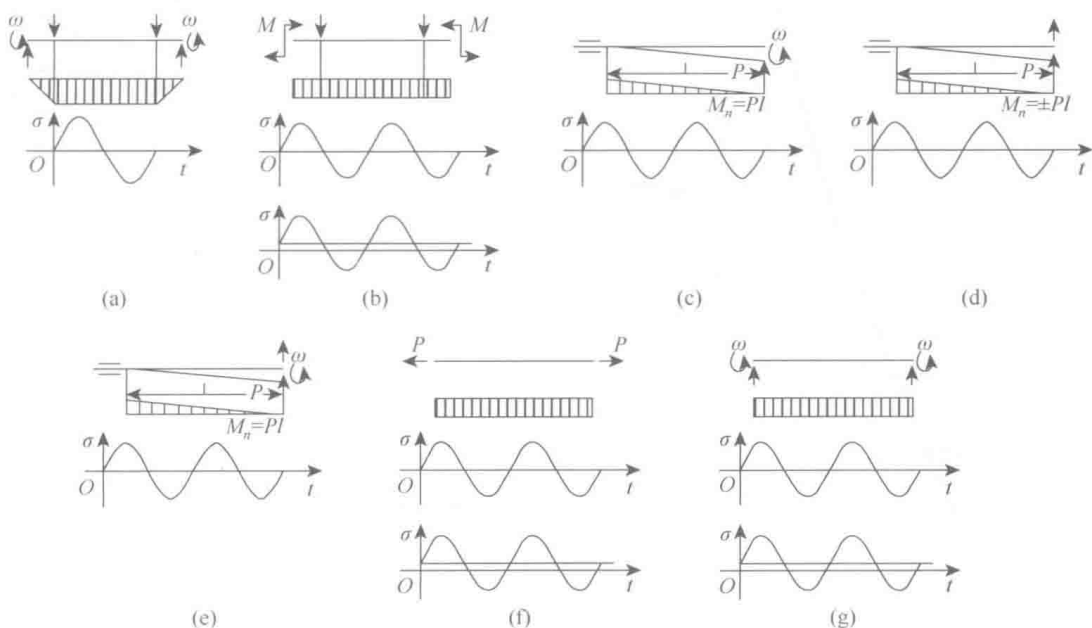


图 1-3 疲劳试验加载方式示意图

(a) 圆试样纯弯旋转弯曲 ($\sigma_a = M_n/W_a$, $W_a = \pi d^3/32$); (b) 圆试样和非圆试样纯弯平面弯曲 ($\sigma_m = M_m/W_a$, $\sigma_a = M_a/W_a$, $W_a = \pi d^3/32$, $W_g = Bh^2/6$); (c) 圆试样悬臂旋转弯曲 ($\sigma_a = M_n/W_a$, $W_a = \pi d^3/32$); (d) 圆试样和非圆试样悬臂平面弯曲 ($\sigma_a = M_a/W_a$, $W_a = \pi d^3/32$, $W_g = Bh^2/6$); (e) 圆试样和非圆试样悬臂力面旋转弯曲 ($\sigma_a = M_n/W_a$, $W_a = \pi d^3/32$); (f) 圆试样和非圆试样交变拉压 ($\sigma_T = P_T/F$, $\sigma_a = P_a/F$, $F = \pi d^2/4$, $F = Bh$); (g) 圆试样交变扭转 ($\tau = M_t/W_p$, $W_p = \pi d^3/16$)

1.2.2.3 加载控制

加载控制一般有两种情况,即载荷控制和变形控制,大部分情况是载荷(力值)控制方式。加载波形常用正弦波、三角波、矩形波,确定了在最大应力状态下载荷的停留时间,对试验结果的影响主要体现在高温、疲劳+蠕变的复合条件下,尤其是振幅加大时。加载可能是不对称的,试验机必须能够调节不对称系数,以满足试验对不对称系数 R 的要求。

1.2.3 疲劳试验机加载系统原理

疲劳试验机的种类繁多,图 1-4 为几种疲劳试验机的举例。决定载荷传递系统和整个试验系统的关键是加载系统,虽然其他系统也很重要,但本书不予讨论。加载系统的主要功能是从控制器上接收一个随时间变化的信号(程序),把这个信号转变成一个力或位移的激励,并把这个激励如实地传递到接受疲劳试验的试样

上。为扩大适用范围,加载系统最好能够响应各种不同的信号输入,简单的如正弦信号,复杂的如载荷谱信号。但实际中,为了不同的目的,加载系统可以有多种不同的形式,可以是复杂的,也可以是简单的;可以是经济的,也可以是昂贵的。

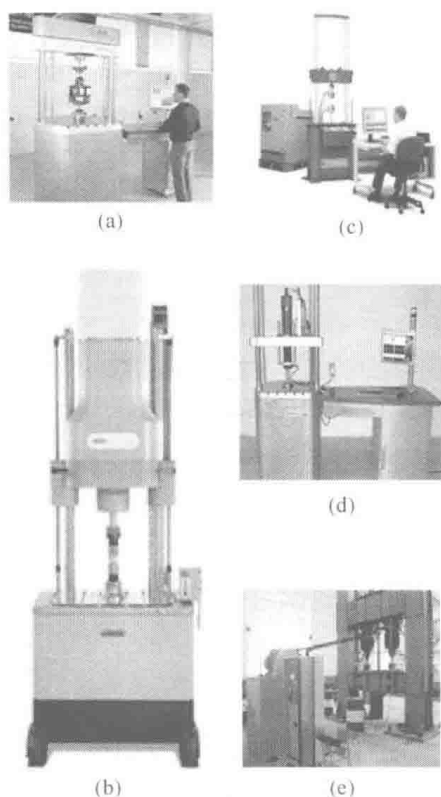


图 1-4 几种疲劳试验机举例

根据图 1-3,将加载按三种通用的载荷类型(轴向加载、弯曲和扭转)进行分类,是合乎逻辑的。它们可以独立使用,也可以组合使用。

疲劳试验加载所需要的交变激振力来源于激振器,常见的激振器有机械式、电磁式、液压式等不同形式。根据试验的不同需要可以采用相应的加载和激振方式,相关内容将在后续内容中论述。

1.2.4 疲劳试验中的能量转换与回收利用

试验对于产品是为了保证产品质量而必须进行的工作,但它自身并不产生直接效益,相反试验增加了产品成本,这一点对于疲劳试验尤为明显。假设一台疲劳试验机功率 100kW ,若按照试验周期为连续工作 1 周计算,需要消耗的能量为 $16800\text{kW}\cdot\text{h}$ 。按 $2\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计算,产生的电费将达 3.36 万元。所以对于疲劳试验,研究节能方法是十分必要的。

按照试验时对试样激振所需的能量利用情况,疲劳试验系统有三类^[4]:①回收系统,即卸载过程中试样的应变能可以全部或者部分返回加载系统中并加以利用;②共振系统,激振频率接近固有频率时,激振力被放大;③非回收系统,试样卸载时释放的应变能变成其他形式能量浪费掉了。按照本书的宗旨,着力于探讨实现前两类能量利用状况,尽可能避开最后一种情况。

如何能够实现能量回收,对于疲劳试验机主要取决于加载系统(或者激振器)及驱动控制方法和技术。能量回收和利用的方法传统上常用机械飞轮储能原理工作,例如,利用曲柄偏心机构的疲劳试验机,工作时由偏心轮的转动将回转运动转变为往复直线运动,实现对试样的直线加载。在试样属于弹性变形情况下,卸载时试样会释放应变能,并同时储存在具有较大转动惯量的转动件(飞轮)中。被储存的应变能在下一个加载周期再被应用上。随着电子技术的发展,近年来出

现了电子飞轮技术^[5]，这是一种运用电力电子技术将试验过程中试样释放的应变能转化为电能储存，然后在下一个加载周期重新被利用的技术方法。能量回收利用对于疲劳试验机相当重要，相关内容将在后续章节详细研究。

共振试验系统可分为亚共振和共振两类^[4]，图 1-5 为共振疲劳试验机的共振曲线。在曲线倾斜上升区段的 A 点附近区域工作的共振系统为亚共振系统，其特征是单位频率变化引起的载荷变化较小，即图中 $\Delta P_A/\Delta f$ 较小；在图中曲线顶点 B 附近区域工作的共振系统为共振系统，其特征是单位频率变化引起的载荷变化较大，即图中 $\Delta P_B/\Delta f$ 较大。虽然在 B 点附近区域可以获得较大的力值放大倍数，但是对于阻尼很小的系统应当尽可能避开。对于疲劳试验试件的刚度在出现疲劳裂纹时会变化，因此共振频率也会变化。如果阻尼足够大，工作于 B 点是合理的。对于高于共振频率（图中 C 点）区域工作的情况也不少。例如，带有长且柔的液压管路及柔性试样的液压脉动激振器可以超过共振点 B 而工作于 C 点。总之，利用共振系统特征工作，主要目的有两个：一是利用较小的激振力获得较大的应力幅值；二是试验速度加快，通常共振频率都比较高。

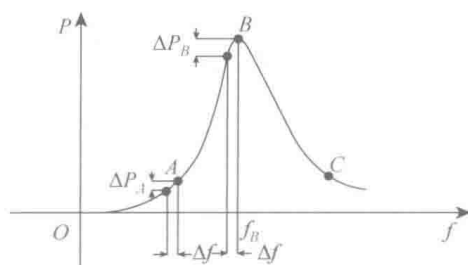


图 1-5 共振疲劳试验机的共振曲线

非能量回收疲劳试验系统最典型的例子是电液伺服控制系统。由于向系统提供动力的液压源是定量、定压的系统，也称为恒功率系统，即无论负载如何变化，即使是空载时系统的输入能量都不变。在这种系统中，试件释放的应变能也不能回收，更谈不上利用。不但如此，还要专门消耗能量用来给工作系统散热。

毕竟疲劳试验机是处于长期工作状态的，即使是小功率的情况，激振系统的能耗也是不容忽视的，更何况大功率的情况，不但浪费损耗，还需要配置冷却系统。因此，即使对于非能量回收系统，在保持其优点的前提下，转变成能量回收系统具有不言而喻的意义。

1.2.5 激振器

激振器是疲劳试验的基本动力装置，传统的激振器包括电磁激振器、液压脉动激振器等，近年来发展了电动缸、直线电动机、容积伺服等动态加载技术。下面简单介绍几种常用的激振器。