



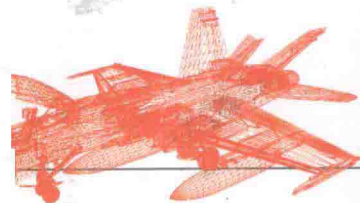
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

航空、航天、航海系列

TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION

飞行器结构动力学

主编 余旭东



西北工业大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

飞行器结构动力学

主 编 余旭东

编著者 余旭东 吴 斌 徐 超
文立华 校金友

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书结合飞行器结构动力分析,系统地阐述了飞行器结构动力学的基本概念、基本理论、基本分析方法及其工程应用。全书分为基础理论和专业内容两大部分,共有10章。基础理论部分由第1~5章组成,阐述单自由度系统的振动、多自由度系统的振动、连续弹性系统的振动和随机振动。专业内容部分由第6~10章组成,阐述飞行器结构动力学建模、飞行器结构模态分析、飞行器结构动力响应分析、结构耦合动力学和振动控制。

本书可作为航空、航天、机械等专业本科生和研究生的教材,也可供从事与飞行器设计与工程相关工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞行器结构动力学/余旭东主编. —西安:西北工业大学出版社,2012.1
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-5612-3305-4

I. ①飞… II. ①余… III. ①飞行器—结构动力学—高等学校—教材 IV. ①V414

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第010164号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpu.com

印刷者:陕西天元印务有限责任公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:16.25

字数:393千字

版次:2012年2月第1版 2012年2月第1次印刷

定价:35.00元

前 言

飞行器结构动力学是飞行器设计与工程的一项重要的重要内容,也是飞行器设计学科中重要的专业基础知识。实践表明,如何保证飞行器具有优良的动态特性往往成为飞行器设计与工程的关键技术之一。为了适应培养飞行器设计与分析人才的需要,本书为读者提供飞行器结构动力学分析的基本知识,着重阐述飞行器结构动力学的基本概念、基本理论、基本分析方法及其工程应用,使读者初步具备解决飞行器结构动力学问题的能力。

本书的特点是在保证结构动力学基本理论的系统性、完整性的基础上,努力结合飞行器的实际,介绍与飞行器设计、分析密切相关的实用的结构动力学知识。全书共 10 章,分为基础理论和专业内容两大部分。基础理论部分由第 1~5 章组成,内容包括绪论、单自由度系统的振动、多自由度系统的振动、连续弹性体系统的振动和随机振动。专业内容部分由第 6~10 章组成,内容包括飞行器结构动力学建模、飞行器结构模态分析、飞行器结构动力响应分析、结构耦合动力学和结构振动控制。基础理论部分供本科生学习,专业内容部分供研究生使用。本书也可供从事与飞行器设计与工程相关工作的工程技术人员参考。

全书由余旭东担任主编。具体编写分工为:第 2,3,5 章和第 8.7 节由吴斌编写,第 4,7,8 章(第 8.7 节除外)由文立华与校金友编写,第 9,10 章由徐超编写,第 1,6 章由余旭东编写。

由于本书涉及面广,加上水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,敬请读者和专家批评、指正。

编著者

2011 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 飞行器结构动力学的目的与内容	1
1.2 结构动力问题的基本特点	7
1.3 基本研究方法与分析模型	7
1.4 振动的分类	9
1.5 简谐振动与谐波分析.....	11
习题	18
第 2 章 单自由度系统的振动	19
2.1 无阻尼自由振动.....	19
2.2 有阻尼自由振动.....	26
2.3 单自由度系统的强迫振动.....	29
2.4 任意激励的强迫振动.....	40
2.5 阻尼理论.....	46
习题	48
第 3 章 多自由度系统的振动	51
3.1 运动方程的建立.....	51
3.2 无阻尼自由振动.....	59
3.3 半正定系统.....	70
3.4 固有频率的近似解法.....	74
3.5 系统对初始条件的响应.....	78
3.6 多自由度系统的阻尼.....	81
3.7 有阻尼强迫振动.....	85
习题	86
第 4 章 连续弹性体系统的振动	89
4.1 杆的纵向振动.....	89
4.2 梁的横向振动.....	93
4.3 圆轴的自由扭转振动.....	96
4.4 主振型的正交性.....	98

4.5	连续弹性体的无阻尼强迫振动	99
4.6	矩形薄板的横向振动	102
	习题	106
第5章	随机振动	110
5.1	随机过程及其分类	110
5.2	随机过程的基本统计特性	114
5.3	单自由度线性系统的随机响应	124
	习题	134
第6章	飞行器结构动力学建模	135
6.1	引言	135
6.2	结构动力学有限元运动方程	141
6.3	结构动力学模型的减缩	146
6.4	结构动力学模型的修改	151
第7章	飞行器结构模态分析	160
7.1	引言	160
7.2	特征值问题的基本解法	161
7.3	大型系统特征值问题的解法	169
7.4	子结构模态综合法	173
7.5	飞行器模态特征分析	183
7.6	提高模态分析精度的措施	185
第8章	飞行器结构动力响应分析	186
8.1	概述	186
8.2	直接积分法	188
8.3	模态叠加法	193
8.4	状态空间法	198
8.5	时域解法的选择	199
8.6	结构动力响应分析的频域法	200
8.7	冲击响应谱概念及应用	208
第9章	结构耦合动力学	216
9.1	细长体气动弹性问题	216
9.2	飞行器颤振问题	220

9.3 POGO 振动问题	227
第 10 章 结构振动控制	232
10.1 引言.....	232
10.2 黏弹性阻尼减振技术.....	232
10.3 主动振动控制技术.....	243
参考文献.....	251

第 1 章 绪 论

飞行器结构动力学是一门在飞行器设计中受到普遍重视的且仍处于不断发展中的学科。本章主要阐述飞行器结构动力学的研究目的、内容、方法及其特点,并且介绍振动的分类及简谐振动。请读者注意本章中介绍的一些基本概念、基本思想方法和简谐振动问题,均为后面各章学习打下了基础。

1.1 飞行器结构动力学的目的与内容

1.1.1 飞行器结构动力学的目的

飞行器结构是构成飞行器的基础。因为飞行器结构的主要功能之一是承受和传递作用在它上面的各种载荷,所以本书中所谓“结构”,指的是受力结构,是指能承受和传递载荷,并能保持足够的强度和刚度的零、部件的总称。随着飞行速度、加速度、高度和航程的不断增加,现代飞行器结构的使用环境是十分复杂的。仅就力学环境来讲,现代飞行器结构不仅承受静力载荷和热载荷,而且承受动力载荷(简称**动载荷**)。静力载荷是不随时间变化的稳定的作用力。飞行器的热载荷是由于飞行中气动加热、结构内外环境传递的热所产生的结构温度变化、温度交变和温度场环境的总称。动载荷是随时间变化的速变力。作用在飞行器上的动载荷是复杂的,它分为作用力随时间周期变化的周期载荷、作用力在很短时间内急剧变化的瞬态(冲击)载荷和载荷值只能用统计的方法进行定义的随机载荷等情况。飞行器在动载荷作用下会产生振动现象。所谓“**振动**”,就是物体或某种状态随时间往复变化的现象。在这种往复运动变化的现象中,单位时间内运动重复的次数叫做频率,运动重复一次所需要的时间间隔称为周期。

实际上,无论是在装卸、运输还是在发射、飞行过程中,飞行器都可能产生振动或噪声。凡是能产生振动的研究对象统称为**结构动力系统**,简称**系统**。飞行器结构就是一种典型的动力系统。对于引起系统振动的动载荷,例如外加的动态力或位移、初始干扰等统称为**激励**或**输入**;系统在输入下产生的效果称为系统的**动态响应**,简称**响应**,也称为**输出**,例如振动中产生的位移、速度、加速度、应力等。飞行器设计中,系统与激励(输入)、响应(输出)的关系如图 1.1.1 所示。“系统”“输入”“输出”是结构动力学研究的 3 个要素。

飞行器结构所具有的固有的动力学特性(例如固有频率与主振型)只与系统的固有质量和刚度特性有关,而与振动的初始条件无关,称之为系统的动态固有特性或振动固有特性。飞行器结构的动态特性中最基本的两个就是自由振动特性和强迫振动特性。

前者反映了系统的固有特性,后者还与外激励有关。关于动力系统自由振动与强迫振动的概

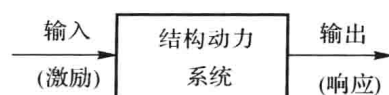


图 1.1.1 动力学系统与激励、响应的关系

念,可参阅本书的第2章与第3章。在飞行器设计中,如果飞行器的结构不合理,动态特性不好,工作中的动响应过大,就会使飞行器工作过程中产生过大的结构动应力或变形,造成结构破坏或者使飞行器内部设备工作失灵,也可能引起结构颤振、发散等动力学不稳定现象,使结构迅速破坏。因此,结构动力学分析与设计工作在飞行器设计中是一个不可缺失的重要设计环节,受到普遍重视。

飞行器结构动力学的目的就是研究关于飞行器结构动力系统振动固有特性及它在外激励作用下产生动响应的基本理论和分析方法,使飞行器结构具有优良的动力学特性,以保证其结构安全、可靠。本书为读者提供飞行器结构动力学分析的基本知识,着重阐述基本理论与基本的分析方法,使读者初步具备解决飞行器结构动力学问题的能力。

1.1.2 飞行器结构动力学的内容

飞行器设计中遇到的结构动力学问题是很复杂的。图1.1.2表示了空间运载器系统的某些结构动力学问题。一般说来,在结构动力学研究的3个要素中,已知任意两个要素求解第三个要素都属于结构动力学的研究范畴。例如:

已知动力系统和动载荷求系统的响应,称为响应预测或振动分析。

已知动力系统与系统的响应来反求系统的输入,称为载荷辨识或动环境预示。

在动载荷与系统响应均为已知的情况下,确定系统的动力学参数或模型,称为参数辨识或系统辨识。此类问题的另一种提法是在一定的动载荷条件下,如何来设计系统的特性,使得系统的响应满足指定的设计要求,这就是所谓的结构动力学设计。

在上述3类问题中,第一类问题通常称为正问题,第二、三类问题称为反问题,本书着重介绍正问题。研究的基本内容分为两个大类:固有特性问题和响应问题。

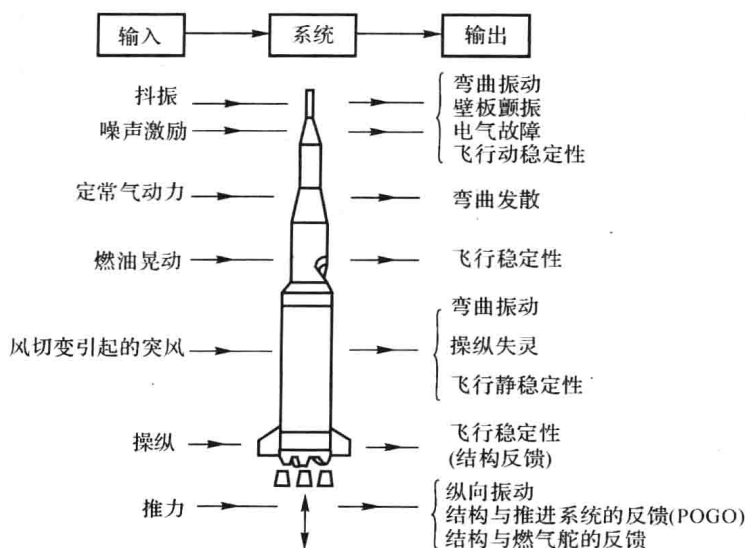


图 1.1.2 空间运载器系统的某些结构动力学问题

长期以来,飞行器结构设计主要是按静力分析或静强度要求进行结构分析和试验检验,然后再对其中预计会承受动载荷的结构件进行动力学分析(包括固有特性分析、动力响应分析以及相应的动强度和动力稳定性分析等)和某些动力学试验来校核改进。人们一般把这种方法简称为“静强度设计动强度校核”的设计方法。随着动力学研究与设计技术的发展,并且鉴于

某些飞行器结构在使用中暴露出来的振动故障较多,人们已经认识到上述方法不能有效地保证各类飞行器结构都具有良好的安全性与可靠性。随之提出:对于那些主要承受动载荷的设计情况,应当采用动力学的方法分析确定其结构设计参数,当然与此同时也应满足其他方面的要求(例如质量要求)。这就是所谓飞行器结构动力学设计的概念,也称为结构动态设计。对于结构动力学设计,原则上主要包含以下内容:

(1)在给定固有频率要求或动响应要求,或者频率、响应同时要求的情况下,对结构构型或布局进行设计优选。

(2)在确定布局及构型后进行结构动力分析,对相关结构设计参数进行设计优选。

(3)在基本设计参数确定之后,如有必要还应进行质量、刚度及阻尼附加的设计优选,或附加其他类型的振动控制措施。此项内容一般纳入结构振动控制的研究范畴。

本书在介绍结构动力学基本内容的基础上,尽量结合飞行器结构动力学设计的需要,提供必要的分析、计算和设计方法。

1.1.3 飞行器设计中的主要结构动力学问题

飞行器设计中遇到的结构动力学问题是很复杂的,在实际工程中主要会遇到以下几种问题。

1. 飞行器动载荷分析或动环境预示

飞行器所处的动环境是比较复杂而恶劣的。这一方面表现在激励源多而复杂,这些激励有规律性的,也有随机性的。另一方面是由于实际环境往往有几种激励同时作用,为了保证飞行器结构的可靠性,应该分析这些激励的性质、大小和变化规律,以确定设计时必需的动载荷。例如在设计运载火箭时,结构对起飞时或助推器发动机工作时造成的冲击力、气动力及声激励的响应,通常是确定火箭结构的重要因素之一。在飞行器结构动力设计中,一般要反复进行动载荷分析或动环境预示。

(1) 振动与冲击环境。

1) 发动机的振动与冲击。此种载荷主要分两类。一类为活塞式螺旋桨发动机产生的机械往复作用,一般说来扰动频率的主值是螺旋桨的转数,扰动力大小由发动机功率、设计与生产水平来定。它往往是统计值,由试验测定。此类激励还应注意桨叶扰动频率、桨叶颤振和发动机的低频摆动。另一类为喷气发动机的喷气扰动。它主要是由于燃烧室的不稳定燃烧产生的高频或低频振荡频率和喷气流经尾喷管使喷管振动产生的。尾喷管振动主要以强噪声和喷管振动形式出现。对于复合发动机,例如涡轮螺旋桨或涡轮喷气发动机,机械往复扰动或喷气扰动均应考虑,但扰动频率稍偏低一些。

一般说来,动力系统产生的激励通常均可由周期性运动扰动规律来确定。但是,发动机启动时,应考虑冲击影响。例如,在考虑火箭启动产生的冲击振动时,最重要的因素是峰值幅度和到达峰值的时间。某些固体火箭发动机熄火前,也可能出现峰值。对于这些扰动情况必须靠试验测量确定。

2) 运载中的振动与冲击。飞行器的运输一般采用专用车辆、火车、飞机、船舶等,在整个运输过程中,可能碰到各种振动和冲击现象。

火车运输主要是由于车厢、铁轨的振动和撞击所产生的动力学环境,而冲击一般是由于铁轨叉道和启动、刹车所致。通常冲击作用不如振动重要。在对飞行器局部支承部位和装箱、运

输固定装置设计时,应当考虑此项载荷。

对于汽车运输,整体飞行器一般用拖车来进行。汽车整体振动主要取决于车辆的吊挂弹簧系统、行驶道路的不平度、车辆行驶速度及其载重量。车辆的振动载荷对于飞行器的局部支撑区、横向导管、紧固连接件等特别重要。

空运情况下主要考虑飞机起飞和降落时产生的振动与冲击。

飞行器装在船舶上是随船舶运动的,船只在海浪中主要产生侧向摆动、俯仰振动、浮沉振动。一般船舶激励是一种极低频扰动,只有在船舶作大幅度倒退或在浅水区急速转弯时,船上的螺旋桨扰动才危及整个船的环境,此时扰动频率大致为螺旋桨频率。

3)气动力扰动源。这里讨论的扰动气动力是指随机的或振动的非定常气动力。定性地说,可以归纳为下述几种扰动源:

- ①紊流附面层里或尾迹中涡流的压力起伏作用引起扰动。
- ②气动面的颤振或周期振动所产生的动不稳定性。
- ③气流引射与紊流尾迹。
- ④通过空腔或收缩部的气流变化。
- ⑤振动冲击波扰动。
- ⑥抖振和分离流扰动。
- ⑦激波和附面层干扰。

这些非定常扰动大部分出现在马赫数(Ma)等于1附近和动压最大的时候。因此,研究重点为跨声速区、动压最大、高速再入等情况。

4)其他振动。这些振动源主要表现在发射释放机构(例如爆炸螺栓、拉断销钉、释放弹簧等),发动机摆动、推力调整,级间分离、反推火箭、泄气火箭,推进剂晃动等。

(2)噪声环境。飞行器上产生噪声的主要因素是发动机的进气道、燃烧室、螺旋桨、叶栅、喷气流、附面层扰动、激波振荡等。

统计结果表明,各种噪声源的扰动强度大致的量级如图 1.1.3 所示。

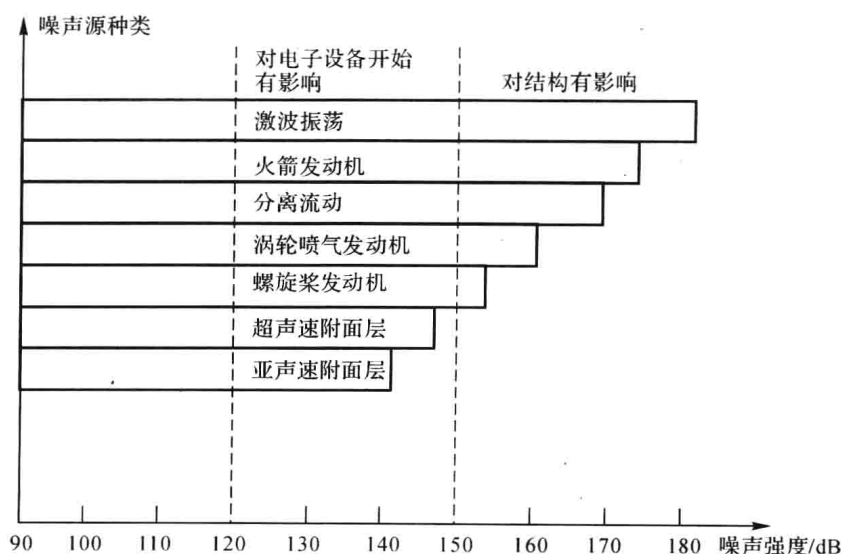


图 1.1.3 各种噪声源可能的强度

1) 喷气噪声。喷气噪声是飞行器最普遍、最强的噪声源。发动机喷流声压力最大值可以达到 170 dB 以上。从大量的喷气发动机噪声研究中可以发现,亚声速与超声速时情况是有区别的,超声速时噪声总能量比亚声速时大得多,相差至少半个数量级。

喷气噪声的频率范围在 0~20 000 Hz 之间,但最大声压级一般在 500~10 000 Hz 之间。在地下井中,由于喷气流井道共鸣,噪声能量聚集,强度增加,可视井壁吸能材料而定,一般增加 20% 左右。噪声压强随频率 f 的变化大致如图 1.1.4 所示。由图可见,一般小型喷管的最强值在 5 000 Hz 附近,大型喷管的最强值在 500 Hz 附近。

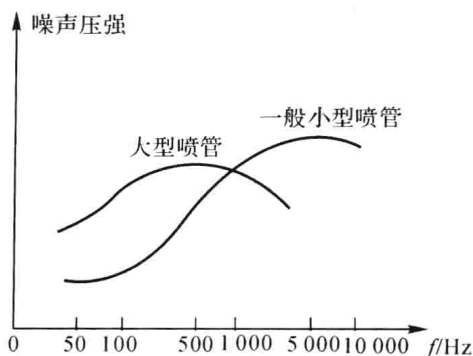


图 1.1.4 喷气噪声的频谱趋势

2) 附面层噪声。附面层噪声是由于附面层内紊流压力脉动产生的声幅射所致,其能量来自附面层气流。因此,它的强度与飞行时的动压关系密切。在低空作高速飞行时,附面层噪声往往是一个很严重的问题。根据噪声载荷随 Ma 的变化规律可知,在 Ma 为 1.0 附近,噪声均方根脉动压力 $\sqrt{p'}$ 与气流动压 q 之比 ($\sqrt{p'}/q$) 最大。但是飞行器再入大气层时,虽然比值小但动压非常大,所以噪声载荷的绝对值很大,通常超过助推段。

3) 激波振荡噪声。激波振荡噪声主要是由于强激波在飞行器局部区域的跳动所致。图 1.1.5 中示出了一种典型飞行器的激波系。由图 1.1.3 可以看出激波振荡噪声是噪声中量级最高的。例如,一些分离部位结构处往往比较严重,最强的声压级甚至可以超过 180 dB。这种现象在跨声速下以及高超声速钝体情况下比较严重。在 Ma 为 1.0 附近,翼面很容易产生强激波振荡,即所谓跨声速嗡鸣噪声。因此,在飞行器设计中,除了从阻力角度考虑之外,从噪声角度考虑也应尽快地跨越跨声速区,以防止因激波振荡和干扰而危及飞行器结构和工作环境。

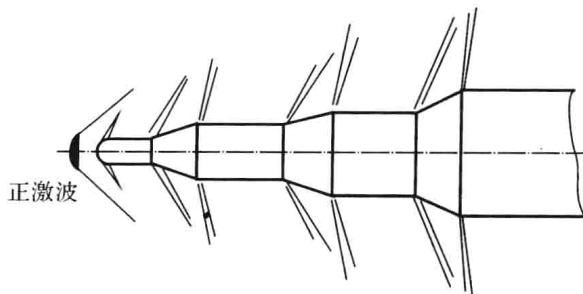


图 1.1.5 典型飞行器的激波系

4)分离流噪声。在紊流附面层后,在尾部膨胀波后,在空腔和凹部之后等,往往出现分离流动。在分离流中存在大量涡流,使压力波动产生噪声。

通常附面层分离流频率较高,在1 000 Hz附近能量较大,而底部涡流分离和激波分离流大部分能量在10~20 Hz之间,只有很少能量在1 000 Hz以上。

2. 结构振动固有特性分析

由于飞行器结构与内部装载的仪器设备都有自身的固有特性,因而无论是结构的动响应分析、动稳定性分析,还是结构与飞行器其他系统(例如控制系统、燃料输送系统、发射架系统)的干扰耦合振动分析,往往都是以结构振动固有特性分析为基础的。结构振动固有特性设计不好,表明飞行器的质量、刚度、阻尼的大小、分布不合理,在外激励下会产生过大的动响应,飞行器内部设备得不到合适的工作环境。因此,此项工作的精确程度严重影响到飞行器设计的质量。

结构振动固有特性分析的主要内容包括:结构动力模型的拟定;结构振动固有频率、主振型和模态阻尼的分析。通常将分析结果通过试验加以验证,反复修改模型、选择正确的分析方法,使理论分析结果与试验结果一致。本书只研究模型拟定与分析方法,对试验研究不作介绍。

3. 结构动态响应分析

飞行器结构动态响应分析是一项复杂的工作。一方面,飞行器结构本身复杂,内部设备多且固定方式复杂,使分析模型自由度很大,容易出现各种耦合振动现象。另一方面,飞行器载荷的多样性和复杂性,难以准确确定。因此,实际上此项工作是反复进行的。

结构动态响应分析是确定结构在外激励下产生的输出。这种激励与输出(响应)可以是力、位移或加速度。掌握这些参量在飞行器工作过程中随时间变化的历程和规律是对结构进行强度、刚度与舱内设备空间余量设计的必要条件,同时在很大程度上影响着飞行器敏感元件合理位置和固定方式的设计。因此,此项内容是飞行器结构动力学中十分活跃的研究领域之一。

结构动态响应分析的主要内容:结构瞬态响应分析,结构频率响应分析,结构冲击响应谱分析,结构噪声响应分析,结构随机振动响应分析,结构耦合振动响应分析等。

4. 气动弹性分析

此项研究的目的是使飞行器避免发生结构动力不稳定现象。这种现象中最具代表的是颤振现象。当飞行器在飞行中受到外激励作用产生振动时,随着弹性变形的不断变化,必然会引起附加的空气动力。在空气动力、结构变形引起的弹性恢复力和振动伴随的惯性力的联合作用下,当飞行速度达到某一特定值时,由于结构刚度不足,会出现结构(例如空气动力面)振幅迅速扩大而在几秒钟内破坏的危险现象,这就是颤振。

气动弹性分析的内容很多,主要有以下几点:

(1)结构的静气动弹性分析,包括飞行器机体的气动发散分析,副翼或舵面反效分析,主翼或尾翼的气动发散分析。

(2)结构的颤振分析,包括飞行器机体、翼面或蒙皮的颤振分析。

(3)考虑控制稳定系统或颤振特性影响的伺服气动弹性分析。

此外,还有飞行器结构与其他系统的动力学耦合振动问题(例如飞行器结构与推进系统耦合产生的POGO问题),飞行器振动控制问题(例如减振、隔振问题),流体燃料火箭的燃油晃动问题等。

1.2 结构动力问题的基本特点

结构动力问题与结构静力问题相比存在很大的差别。结构动力问题的基本特点主要表现在以下两个方面。

1. 结构动力问题都包含时间变量

静载荷是不随时间变化的稳态力,静力问题具有单一的解答。动力问题则不同,动载荷(输入)是速变力,因此,在动力分析中,输入(激励)的大小、方向甚至作用点,一般都是随时间而变化的。这就决定了动力系统的输出(响应)也随时间而变化,使动力问题不像静力问题那样具有单一的解答,我们必须在动载荷作用的时间范围内求解结构响应的时间历程。这时,在结构的响应历程内,结构中的内力、变形除了与载荷大小有关外,还与载荷作用方式、载荷随时间的变化规律、结构的边界条件以及结构的固有特性、阻尼特性有关。此外,对于动力学问题,不仅要知道边界条件,还要知道初始条件。显然,时间变量是结构动力问题的基本变量之一,这使得动力分析比静力分析更加复杂。

2. 惯性力的存在

结构动力的突出特征是存在振动现象。在振动过程中组成结构的质点具有加速度,从而在结构中产生了惯性力。如图 1.2.1(a)所示,一个均匀简支梁在动载荷 $P(t)$ 作用下所产生的梁的位移响应历程与加速度有关,梁中的弯矩、剪力不仅要平衡外载荷 $P(t)$,而且要平衡振动中梁的加速度所引起的惯性力。可是,如果同一个简支梁所承受的是静载荷,如图 1.2.1(b)所示,则其弯矩、剪力及挠曲线形状在给定的边界条件下其解是单一的。与动载荷情况相比,该梁的解只取决于给定的静载荷 P 。所以惯性力的存在是动力学问题的又一特性。由理论力学质点动力学可知,随时变化的惯性力项的出现,使质点振动的运动方程为二阶常系数线性微分方程(在微幅振动条件下),这也就在一定程度上确定了运动方程的形式和求解的特点。因此,在结构动力学中,必须十分重视结构的质量大小与分布情况,注意研究振动中惯性力的状况。

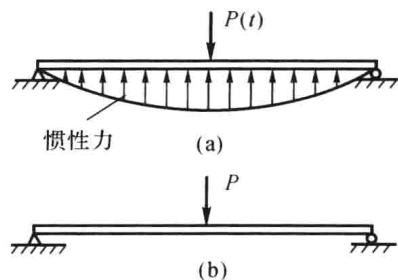


图 1.2.1 简支梁的受载

1.3 基本研究方法与分析模型

1. 基本研究方法

结构动力学的研究方法可分为分析的方法(结构动力分析)和试验的方法(结构动力试验)两大类。对大多数工程问题来说,两种方法是相辅相成的,缺一不可。结构动力试验包括模态试验、动力学环境试验、模拟试验等,例如飞机的全机地面共振试验,运载火箭的整体模态分析试验(特性试验),小型战术导弹的全弹振动试验、冲击试验等。这些试验既可以直接考核产品的动力学性能,也为结构动力分析(包括动力模型的建立)提供必要的验证和数据。

结构动力分析的方法是先确定外激励的性质、大小与变化规律,确定初始条件,再将飞行器的实际结构经过去粗取精、去伪存真的过程,简化成结构动力分析模型(物理模型),进而研究建立起与之相应的振动微分方程(运动方程),即数学模型。在此基础上可采用合理的方法

求解,并通过试验验证所得解的正确性。

2. 结构动力学分析模型

由于飞行器结构十分复杂,结构动力学同其他学科一样,不可能将原始结构拿来分析计算,必须根据分析的目的、要求的计算精度、结构的受力传力特点、现有的计算条件来分析结构各部分在振动中的作用,综合简化成正确反映结构动态特性的力学(物理)模型即分析模型。

一般说来,力学模型可分为连续系统(或称分布参数系统)模型与离散系统或称集中参数系统模型,实际模型有时还可能是它们的复合模型。例如图 1.3.1(a)表示一支承在运输托架上的弹体细长的导弹。初步分析它的固有频率与主振型时,由于弹体细长,翼面小而轻,初步建模时可以简化为图 1.3.1(b)所示的弹性梁模型。这种模型质量、刚度、阻尼都是连续分布的,属于连续系统模型。它可以看作是由无数个质点借弹性与阻尼联系组成的,每个质点都具有独立的自由度,所以连续系统模型有无穷多自由度。

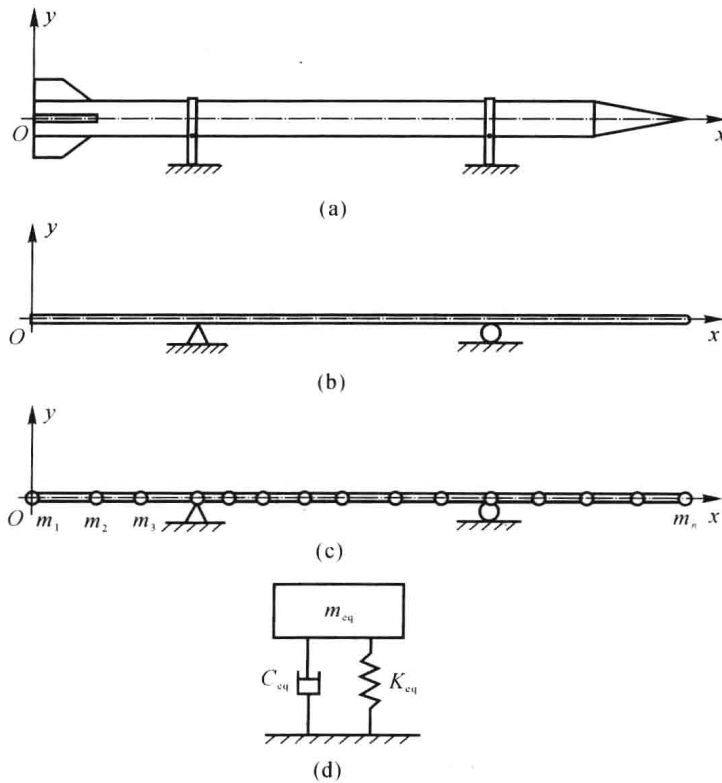


图 1.3.1 动力学分析模型示意图

如果把图 1.3.1(a)所示的原始结构分成若干段,将每段壳体作为梁处理,并且将每段梁的质量和内部设备、有效载荷等效地集中到梁的两端点形成一系列集中质量点 $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$,于是就形成了图 1.3.1(c)所示的模型。这种模型是人为地将质量、刚度分割开、离散化,称为离散系统模型。结构的有限元动力模型就属于这种模型。它的自由度是有限的。

如果应用振动理论可以得到此系统的等效质量 m_{eq} 、等效刚度 K_{eq} 与等效阻尼系数 C_{eq} ,就可以进一步将系统简化成图 1.3.1(d)所示的单自由度系统,它是最简单的动力系统模型。

由上述讨论可知,同一实际结构,根据分析的目的、内容、精度要求,可以简化成不同的模

型。构成结构动力学模型,除了外激励外,还必须包含质量、弹性、阻尼三大要素。对于集中质量系统,这些要素可以具体化为质量件、弹性件与阻尼件。如何合理拟定分析模型,将在第6章中重点介绍。

质量件是离散系统中产生惯性力、储存动能的功能件,通常假定它是刚体,它具有惯性。弹性件是系统中产生弹性恢复力、提供结构刚度、储存势能的功能件,一般假定它的质量略去不计,本书还假定弹性件服从胡克定律,也就是说它是线性的。阻尼件是系统中产生阻尼力,使能量从动力系统中耗散出去的功能件。本书假定阻尼件既不具备惯性,也不具备弹性且多采用阻尼力与运动速度成正比的线性阻尼——“黏性阻尼”。

当弹性件、阻尼件均为线性,系统在平衡位置附近作微幅振动时,离散系统的运动方程可用线性常微分方程表达。对于线性的连续系统,其运动方程可用线性偏微分方程描述。上述系统称为线性系统,其振动称为线性振动。凡是不能简化为线性系统的动力系统,都称为非线性系统,此类系统的振动称为非线性振动。

如果一个结构动力系统的各个特性参数(质量、刚度、阻尼系数等)都不随时间而变化,即它们不是时间的显函数,这种系统就称为常参数系统(或不变系统),反之,称为变参数系统(或参变系统)。常参数系统的运动用常系数微分方程来描述,而描述变参数系统则需要用变系数微分方程。

严格地讲,实际的结构动力系统的弹性力、阻尼力往往不完全符合线性模型。不过在许多情形下,只要振幅微小,按照线性弹簧和线性阻尼的假设,采用线性系统模型就可以得出工程应用中足够准确的有用结论。但是在自然界和科学研究中,有的振动过程如果不考虑非线性,振动现象就无法说明,问题也不可能解决。一个实际的结构动力系统究竟应该采用哪一种模型,必须根据具体情况进行具体分析,并且通过科学实验加以验证。

1.4 振动的分类

对于振动现象,由于观察与研究的角度不同,有不同的分类方法。

1. 按照振动系统的自由度数目分类

动力系统的自由度,是指在振动过程的任何瞬时,为完全确定系统所处的空间位置和运动状态所必需的最少独立坐标数目。

(1)单自由度系统的振动——在系统振动过程中任何瞬时用—一个独立坐标就能确定系统空间位置和运动状态的振动。

(2)多自由度系统的振动——在系统振动过程中任何瞬时用多个独立坐标才能确定系统空间位置和运动状态的振动。

(3)连续体振动——在系统振动过程中任何瞬时需用无穷多个独立坐标才能确定系统空间位置和运动状态的振动。

2. 按照振动的输入特性(激励)或控制方式分类

(1)自由振动。自由振动是系统受初始干扰产生的振动,或者外激励力消失后存在的振动。由于自由振动的频率及振动形态只取决于系统的弹性和惯性性能,而与外激励无关,能够最本地反映系统的动力特性,是研究其他各种振动的基础,因此,研究飞行器结构的自由振动特性,具有重要的理论和实际意义。

(2)强迫振动。强迫振动是系统在外激励作用下“被迫地”产生的振动。强迫振动中的频率及振幅不仅取决于系统本身的弹性、惯性、阻尼特性,而且与外激励的特性有关。例如,当飞行器发动机工作时,由于旋转部分偏心,或者燃烧不稳定,往往会形成周期性的激励力,从而激起飞行器结构、发动机或操纵系统的强迫振动。

(3)自激振动。自激振动是由于输入、输出间有反馈现象并且有能量补充而产生的振动。这时激励是受系统本身控制的,在适当的反馈作用下,系统会自动地激起定幅振动,但一旦振动被抑止,激励也随之消失。

(4)参数振动。参数振动是系统自身参数变化激发的振动。如果振动的激励方式是通过周期性地或随机地改变系统的质量或弹性等特性参数来实现的,则这时所引起的振动称为参数振动。火箭发动机燃烧不稳定产生的干扰,就可能激起燃烧室或发动机架的参数振动。

3. 按照振动的输出(响应)性质分类

(1)确定性振动。一个确定性系统(指系统特性是确定性的,不论它是常参数系统还是变参数系统),在受到确定性激励时,响应也是确定性的。这类振动称为确定性振动,亦称为定则振动。这种振动包括简谐振动、周期振动、瞬态振动等。

(2)随机振动。一个系统,即使是确定性系统,在受到随机激励时,系统的响应亦将是随机的。这类振动称为随机振动。对这种振动不能用简单函数或简单函数组合来表述其运动规律,而只能用统计的方法来研究其规律。

4. 按照系统振动的运动规律分类

(1)周期振动。周期振动的振动量(如位移、速度、加速度等)是时间的周期函数。如果振动量用 $x(t)$ 表示,时间用 t 表示,那么周期振动可用下列运动方程描述:

$$x(t) = x(t + nT) \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.4.1)$$

式中, T 为周期,表示振动往复一次所需的时间间隔,常用 s(秒)为单位。 $1/T = f$ 称为频率,表示单位时间(s)内振动循环次数,单位为 Hz(赫)。显然,这种振动每经过一个周期后,运动是重复前一周期的全过程,如图 1.4.1 所示便是一个例子。

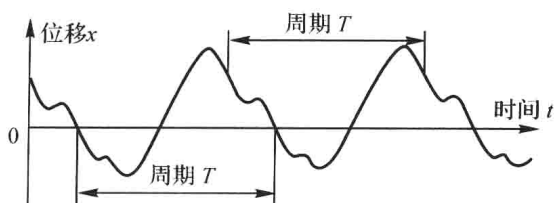


图 1.4.1 周期性振动

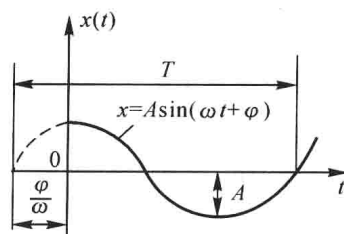


图 1.4.2 简谐振动

如果周期振动量 $x(t)$ 是时间的正弦或余弦函数(见图 1.4.2),则该振动叫简谐振动或谐和振动。简谐振动典型的运动方程由下式表述:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.4.2)$$

式中 A ——振幅,表示振动中的最大位移量;

ω ——圆频率或角频率,表示频率 f 的 2π 倍,单位为弧度/秒(rad/s),即

$$\omega = 2\pi f \quad (1.4.3)$$

φ ——初相位。