

普通高等教育航天类规划教材

结构耦合动力学

CONFIGURATION COUPLING DYNAMICS

中国航天工业总公司人事劳动教育局 组织编写

王其政 主编

宇航出版社



普通高等教育航天类规划教材

结构耦合动力学

中国航天工业总公司人事劳动教育局组织编写

王其政 黄怀德 姚德源 编著

宇航出版社

内 容 简 介

本书介绍系统工程一体化设计中的结构与结构、结构与非结构因素(流体声、气流、液流、控制、热、电磁等)相互作用的耦合动力学基本理论、方法及其应用。书中论述了结构与结构和流体声耦合,结构与气流耦合(气动弹性),结构与液流耦合(液动弹性),结构与控制、热、电磁耦合,结构耦合动力学统计能量分析(SEA)原理及其应用等内容。

本书为航空、航天、交通运输、建筑及有关工业系统工程、设计专业、力学专业研究生或本科生选修课教材。还可供有关理工科研究生和系统工程总体设计、动力学环境预示、动态分析、故障诊断与控制设计的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构耦合动力学/王其政等编著.-北京:宇航出版社,1999.5

ISBN 7-80144-102-8

I. 结… II. 王… III. 结构-耦合动力学-研究生教育-教材 IV. 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 05463 号

宇航出版社出版发行

北京市和平里滨河路 1 号(100013)

发行部地址:北京阜成路 8 号(100830)

北京市梨园彩印厂印刷

新华书店经销

1999 年 5 月第 1 版 1999 年 5 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:21.5 字数:536 千字

印数:1—1000 册

定价:38.00 元

中国航天工业总公司教材编审委员会名单

主任 陈求发

副主任 阚力强 郑仙兴 郭瑞霞

委员 薛成位 黄培康 韩锡礼 阮崇智 童 铠 穆 虹

万 达 刘家琦 贾世楼 郭铁良 姚洪庆 谢伟良

薛来宾 魏志敏 乔晓明 刘建华 刘以良 刘 杭

秘书长 魏志敏(兼)

副秘书长 刘 杭(兼)

出版说明

按照国家教委关于高等教育教材工作分工原则,中国航天工业总公司负责组织全国高等教育航天类专业教材的规划、编审和出版。根据航天教育发展规划,为适应航天事业发展的需要和满足航天专业教学的要求,中国航天工业总公司教材编审委员会负责组织编审、出版“九五”期间航天专业教材,分成航天器、导弹、飞行力学、发动机、控制与制导、空间电子学六类。适应的专业范围为:飞行器系统工程、飞行器总体设计、飞行器结构与强度、飞行器动力工程、飞行器制造工程、飞行器控制与制导、飞行器发射技术与装置、飞行器环境与模拟工程、飞行力学、宇航光电工程、空间工程和卫星与卫星应用等。

编委会为航天专业教材制订的出版原则是:

1. 教材应保证思想性、科学性、先进性和启发性,注意理论联系实际。内容的深度与广度应有利于培养学生的自学能力、创造能力及解决实际问题的能力。

2. 技术专家长期从事航天科研工作,学校教师长期从事教学,他们各自都积累了丰富的经验。为使教材既有一定的理论水平,又能很好地联系实际,因此,要求教材的编审必须坚持技术专家与学校教师相结合的原则。

3. 这套教材除作为本科、研究生教材外,也可作为航天领域工程技术人员继续教育的教学参考书以及有关科技人员的参考书。

限于水平和经验,航天专业教材的编审出版工作肯定有不少缺点和不足之处,欢迎使用教材的单位、广大教师、同学和有关技术人员提出宝贵意见,以进一步提高航天类专业教材的质量。

中国航天工业总公司人事劳动教育局

1997年8月

前 言

由于认识、技术与历史的原因,科学技术专业分支越来越多,越分越细,致使日常生活发生的一些现象及实际系统工程中出现的一些故障没有得到很好很及时的解释和排除。后来经过多方面不断努力才知道,这些现象和故障是不同学科和不同系统的不同因素相互耦合作用引起的。

随着国际竞争日趋激烈和经济效益需求增大,老式工业和新兴工业不断迅速发展,系统工程越来越大,新材料和结构层出不穷,其共同特点是尺寸大、形状复杂、环境恶劣、多功能、高强度、薄壁和轻质,并把结构材料利用到极限,因此对系统工程一体化计算机辅助设计和计算机辅助制造、可靠性、舒适性、运行精度等等方面都提出了更为严格和合理的要求。过去不曾考虑或者无法精确考虑的一些问题,目前就不能回避了。由于科学技术的进步、认识范围的扩大、高速大容量微型计算机和智能元件的出现等等,为解决多种因素耦合问题提供了基础。在这种情况下,为解决多种因素耦合问题的边缘前沿学科应运而生。

自 20 世纪 20 年代开始有目的研究结构与气流的耦合(气动弹性)问题以来,30 年代开始研究结构与液体(流)的耦合问题、结构与热的耦合问题;70 年代开始研究结构与控制的耦合问题;80 年代前期曾召开过两次国际耦合问题学术会议;在 80 年代中期美国 ASME 的一个应用力学学会曾预测结构耦合相互作用问题将继续是一个富有成果的研究领域。虽然有关分析处理耦合问题的文献日益增多,但至今国内外还没有一本系统介绍这方面的书籍。本书希望弥补这一缺憾。

很多因素耦合问题,涉及的学科多,知识广泛而精深,是一个非常广阔的天地,但篇幅和学时有限,因此有必要编一本针对系统工程一体化计算机辅助设计的,以固体结构为主的结构与非结构因素相互耦合作用的“结构耦合动力学”。本书稍微侧重一些有关结构与结构和非结构因素相互耦合作用的机理、基本概念、理论及工程处理方法,对某些非结构因素方面的知识,将直接引用其结果而略去冗长的推导过程(有兴趣的读者可再看有关方面的专著)。

本书将由浅入深,由少量耦合元素到多系统多元素耦合问题进行介绍和讨论。第 1 章主要对结构耦合动力学发展背景、概况、分类和前景作了概述;第 2 章对处理多种系统多种因素(结构与结构、结构与流体声场、声场与声场等)耦合的统计能量分析(SEA)原理和方法作了较为详细的介绍;第 3、4 章对结构与气流、结构与液流耦合问题处理方法作了介绍;第 5 章对结构与控制、气动弹性与控制、跷振(POGO)与控制、自适应结构、压电热弹性耦合动力学原理和处理方法作了介绍。

本书为航空、航天、交通运输、建筑及有关工业系统工程、设计专业、力学专业研究生或本科生选修课教材。还可供有关理工科研究生和系统工程总体设计、动力学环境预示、动态分析、故障诊断与控制设计的科技人员参考。结构振动与声学、流体力学、控制理论及概率数理统计等是学习本课程的先行基础课程。

本书除引用作者的科研成果外,还引用了国内外有关文献与学术会议交流成果,限于篇幅未能全部列出;中国振动工程学会结构动力学专业委员会主任委员、北京大学王大钧教授在百忙中审阅了全部书稿,提出许多有益建议,作者在此一并表示衷心感谢。

限于作者水平,错误与不妥之处在所难免,敬请读者批评指教。

作者

1998年2月

目 录

第 1 章	绪论	(1)
1.1	结构耦合动力学发展概况.....	(1)
1.2	发展前景、分类与综合.....	(3)
1.3	有关基本概念.....	(5)
第 2 章	结构耦合动力学统计能量分析(SEA)与应用	(10)
2.1	引言.....	(10)
2.2	统计能量分析原理.....	(13)
2.3	动力学系统 SEA 有关参数.....	(22)
2.4	结构振动与流体声的耦合作用.....	(70)
2.5	系统间相互作用与耦合损耗因子(CLF).....	(85)
2.6	统计能量分析参数测试方法.....	(140)
2.7	系统响应估计.....	(153)
2.8	统计能量分析程序与应用.....	(176)
第 3 章	结构与气流的耦合	(199)
3.1	引言.....	(199)
3.2	单自由度气动弹性与驰振(galloping)分析.....	(199)
3.3	双自由度气动弹性分析.....	(208)
3.4	细长体气动弹性分析.....	(211)
3.5	翼面颤振(flutter).....	(215)
3.6	壁板颤振.....	(217)
3.7	飞行器整体气动弹性分析.....	(221)
第 4 章	结构与液流的耦合	(226)
4.1	引言.....	(226)
4.2	输液(含液体流动的)管道振动.....	(226)
4.3	不同边界条件输液管道不稳定性振动.....	(229)
4.4	贮箱液体耦合质点弹簧模型.....	(234)
4.5	贮液圆柱壳与柔性防晃板分析.....	(239)
4.6	跷振(POGO)预测、辨识与参数估计.....	(251)
第 5 章	结构与控制的耦合	(298)
5.1	引言.....	(298)
5.2	结构随机干扰响应主动控制.....	(299)
5.3	典型结构的主动、被动与半主动控制.....	(304)
5.4	颤振主动抑制.....	(318)
5.5	跷振主动抑制.....	(320)
5.6	自适应结构.....	(323)
参考文献		(328)
名词术语索引		(331)

第 1 章 绪 论

1.1 结构耦合动力学发展概况

现实存在的问题多是耦合问题。结构耦合动力学主要是研究以某个固体结构系统为主的与其它结构和多种非结构因素相互耦合作用的一门学科。多种非结构因素包括:气声、液声、气流、液流、电、磁、热力学、控制等等。

非结构因素多是通过系统结构的变形而产生与结构相互耦合作用的,即不是独立的,不是可以分离的,否则就是结构的强迫响应问题了。

结构耦合动力学是一门边缘学科,尚处在发展之中。随着多种新工业的兴起和发展,也就不断出现一些结构耦合动力学事故和不尽人意的问題。因此就迫切需求组织、研究和解决这些问题,这样就导致结构耦合动力学的建立与发展。我们可以看到某些工业发展需求与结构耦合动力学的发展概况。

随着航空工业的兴起,首先就遇到了结构与气流的耦合——气动弹性问题^[1]:1903年兰利(Lanley)的单翼机首次作有动力的飞行试验时,发生了机翼的断裂,并骤然坠落在 Potomac 河中,其中气动弹性效应就起着决定性的作用;1912年 Handly Page 轰炸机发生了尾翼颤振而坠落;在 20 世纪 30~40 年代,英国的“蛾号”与“鸽号”飞机都曾因颤振失事;1940年 11 月 Tacoma 桥开放使用四个月,由于气动弹性激励而倒塌,是在相当低的风速(18m/s)下半小时后发生的。从这些事故研究中人们逐步认识到应把静强度的设计方法引伸到结构耦合动力学的设计方法。

工业不断发展,飞行器速度不断提高,进入超音速范围后,在 20 世纪 50 年代,仅美国军用飞机就出现了三次颤振事故,达到过去相同时期间隔内的最高次数。为了宏观控制并集中力量满足发展的需求,美国 NASA 专门成立了振动—颤振专业委员会,在该委员会指导下进行了大量系统的研究,总结经验,在 60 年代陆续编写了一批相应的飞行器结构设计规范。随着飞行器进入超音速和高超音速范围,在 60,70 年代高速飞行器出现了气动热弹性问题,自 70 年代以来,气动弹性—颤振主动控制的研究已逐步开展。

在 20 世纪 50 年代末 60 年代初,由于火箭技术的迅速发展,尤其是大推力发动机起飞时的喷气噪声、承受最大动压飞行及飞行器再入大气层时的气动噪声都是宽频带随机振源(频率范围为 20Hz~10kHz,声压级通常超过 160dB),这就对具有高结构系数(结构的面积与其质量之比)的结构(如蒙皮、壁板等)产生高达 50g 的均方响应加速度,并使飞行器舱内产生高声级的恶劣动力学环境,从而大大降低了整个系统的可靠性,这就是结构与气动声耦合动力学有关的动力学环境预示问题。

航天系统产品对于可靠性的要求与重要性是众所周知的。为保证系统的可靠性,就必须进行各项环境可靠性试验。为此还必须提前确定相应的环境(应力)条件。这就是在新型工程系统研制计划初期就必须提供出相应的动力学环境预示数据。但是在研制计划初期,系统结构的形式、尺寸、连接方式与材料参数、生产工艺和载荷都有着不确定性,而多种系统(包括结构、声

空间等)高阶模态参数对这些不确定性原始参数又非常敏感,所以在新型飞行器研制计划初期的短时间内就得提供较为精确的动力学环境预示数据,是一个极为困难的任务。相似系统外推法、传统模态法(含有限元法)和确定性方法已无能为力,这就需求动力学环境预示技术有一个突破性进展,而易于处理多种系统(结构、声空间等),相互耦合作用的统计能量分析(SEA, Statistical Energy Analysis)法就是在这种背景下逐渐形成并发展起来了^[2~8]。

70年代中期以后,对航天器系统(卫星等)的需求增大,航天器系统的研制周期缩短,发射卫星的数量增加,用户要求有更为精确的动力学环境,以降低商业卫星成本。此时期统计能量分析法经过进一步深入研究的扩展应用研究之后,在70年代末、80年代初,美国NASA的Goddard飞行中心与Lockheed公司等几个单位合作研制了“振声有效载荷环境预示系统(VAPEPS)”,欧州宇航局研制出了“通用SEA预示程序(GENSTEP)”。由于环境数据的精确提供,在设计上的好处和直接经济效益是非常可观的。

经过80年代的继续发展、研究和扩大应用,在80年代末美国的Cambridge Collaborative公司研制出了“统计能量分析(SEAM)”软件,McDonnell Douglas公司也研制出了“Cosmic SEA”软件。

在90年代初航天部七〇二所研制出了“声振环境预示系统(AVEPS2.00),其中含有多种系统级声振试验测量与计算结果对比分析。利用该系统不但可以进行声振环境预示,也可利用该系统对产品内部声振能量传递路线进行分析,该系统还可对动力系统的声振环境(包括噪声降低等)控制提供设计方法。目前该系统还在扩展、推广和应用。

随着导弹与航天工业的兴起与发展,除了上述结构与声、结构与气流耦合引发的问题之外,还遇到了结构与液流相互耦合引出的一系列事故问题,1957年开始的美国大力神I、II飞行试验起飞后102~140s之间曾测得大幅度的纵向振动,飞行任务失败;1960年以后的雷神/阿金纳飞行器,在其第一级主发动机关机(MECO)前20s左右都曾出现较大幅度的纵向振动,这种振动导致修改结构设计,增加了结构本身质量,但都降低了有效载荷,同时也使阿金纳级上的仪器设备需要按幅值较大的正弦振动环境试验重新作出鉴定;1961年发射的系列宇宙神火箭在起飞后11s左右或144s左右都曾检测到大幅度的纵向振动。虽然这种特殊振动现象,早已观测到,但真正第一次认识到这是一种结构耦合动力学不稳定性问题,还是发生在双子星座的助推运载器上,即在1964年4月发射的大力神/双子星座的飞行器上测得较大的纵向振动,致使宇航员视力模糊,感到不舒适。在此后美国开始把这种大幅度的动力学不稳定性纵向振动称之为“Pogo”(一种带有弹簧的单腿高跷),此处译为跷振^[9,10]。1968年4月土星5/阿波罗6的第一级上出现了跷振;1968年12月土星5/阿波罗8的第二级上也出现了跷振;1969年11月土星5/阿波罗12的第二级上仍发生幅度较大的跷振,很多人曾建议在阿波罗13上安装蓄压器抑制跷振,但没有被采纳;1970年4月土星5/阿波罗13第二级中心发动机系统性能降低很多,致使发动机早期关机。为此美国NASA总结经验,编写飞行器跷振设计规范。1970年美国开始研制航天飞机(Space Shuttle),同时也开展了有关跷振问题的广泛研究,包括跷振被动与主动抑制的研究。

在1962年法国开始研制钻石A火箭,1967年开始研制钻石B火箭,在以后的DMB1~DMB5飞行试验中,都曾检测到跷振现象,其频率在45Hz左右,其最大振幅为20~30g,导致运载器及卫星上的结构有不同程度的损坏,影响了主要任务的完成。1973年法国根据美国和本国运载器发生跷振的情况制定了阿里安(Ariane)运载火箭跷振研究规划。这个研究活动贯

穿在 1973~1981 年长达九年的包括整个运载火箭的研制和鉴定阶段。随着航天效益的竞争,要求增大有效载荷,又要减小结构重量,这就大大增加了结构的柔性。因此使空间复杂结构固有振动频率低而且密集,受干扰后,振动持续时间较长;另一方面这些结构系统的功能如姿态控制、观测仪器的指向、对接等都要求有很高的精度,(例如有 20m 尺寸的结构系统要求有微米级的精度)由于结构的柔性变形就引起了一系列的结构耦合动力学问题。这是不能回避的挑战。最好的对策就是对结构(扰动、振动响应、动力学不稳定性…)振动进行主动抑制或主动控制。这不但会克服由于模型简化、数值方法与计算、试验参数的误差和不确定性,也会大大提高工程结构系统抗干扰的能力,否则就会降低性能,严重时会出现严重事故,经济损失巨大。如 1958 年美国第一颗卫星探险者 1 号由于其四根鞭状天线的振动耗散能量而导致卫星翻滚,任务失败;1982 年美国发射的陆地卫星-4 的观测仪器旋转部分,受到太阳帆板驱动系统的干扰而产生微小振动,大大降低了图像质量;1982 年日本发射的技术试验卫星也由于挠性太阳帆板驱动系统和姿态控制系统之间的相互耦合干扰而没能达到预期的性能;美国的国际通讯卫星 5 号柔性太阳帆板高阶扭转频率与驱动系统发生谐振,曾导致太阳帆板停转或打滑。再如越来越多的国家都在为增加进行空间生产和科学研究,后来发现在这样的活动中,并不容易实现微重力环境,因为打一个“喷嚏”也会使轻而柔的整个空间站振动起来,这也就破坏了微重力环境,严重影响空间生产和试验结果。

以上例子都说明,工业不断发展,又不断出现新的问题,这就迫切需求用有关科学技术进行解决。为此,在 1982 年美国又专门设立了一个委员会——“结构与控制(耦合)相互作用分委员会”,开展了自适应结构和智能结构的研究,其成果应用于航天工业。

1.2 发展前景、分类与综合

合久必分,分久必合,这是历史发展规律之一。实际工程中出现的耦合问题,也是一些“合”的问题,然而由于技术上、认识范围扩大及工业需求精度的提高,众多解决耦合问题的边缘学科应运而生。为寻求耦合问题的共同点和特点^[11~13],1981 年 9 月在英国 SwanSea 大学召开了第一届国际耦合问题(Coupled Problems)会议;1984 年在意大利的威尼斯召开了第二届国际耦合问题的会议。这二次会议标志着耦合问题已引起了不同专业科学技术工作者的日益重视。1983 年秋,美国机械工程师协会(ASME)应用力学分会成立了一个“固体力学研究方向委员会”负责调查研究固体力学的研究方向和良机。这项工作得到美国国家科学基金会、国防部、能源部和航空航天局等单位的支持和资助,征求了力学界和工程界的许多专家的意见,然后由著名专家写出初稿,再征求有关专家意见,至 1985 年 7 月历时近二年时间共完成了 15 篇报告,其中一篇“结构动力学”报告认为,除了结构(几何与材料)非线性、优化和反问题(模态综合和系统辨识)外,结构相互作用问题将继续是一个富有成果的研究领域。

若考虑含有非常多因素的耦合问题,则涉及的学科多,知识面宽广而深邃,但受学时和篇幅所限,所以我们认为有必要主要是针对航空航天等有关工业系统工程一体化(计算机辅助)设计的以固体结构为主的结构与结构及非结构因素相互耦合作用的“结构耦合动力学”问题进行分类与综合。

按数学的观点,耦合问题的表达式,其本质是多个区域(或子系统)上的表达式,其中各类变量分别描述互不相同的物理现象,它们有二个共同点:一个区域的问题不能单独(解耦)求

解;非独立变量不能单独消去。例如结构与流体的耦合即如此,以位移为变量的固体区域和以压力为变量的流体区域是描述不同物理现象的,但在各方程中又同时出现,且无法事先消去,这就是典型的耦合问题。

为了便于学术交流和讨论问题,国际耦合问题会议仍按历史发展的观点把耦合问题分为八类:结构与流体;结构与结构;结构与岩土;结构与声场;结构与热场;结构与电磁场,流体与电磁场;结构与润滑;各种特性流体的耦合等等。

按(有限元)数值计算的观点,可把耦合问题分为两大类:类型 I —— 不同物理变量区域相互重叠(全部或局部)的那些耦合问题,如结构与热场的耦合;类型 II —— 在不同区域有不同物理性质的,如流固耦合,在不同区域有相互物理性质的结构与结构的耦合问题等。

实际上还不止上述类别,例如还应有结构与控制的耦合,还有其他观点的分类方法。总之分类的目的在于有利于解决实际问题,综合的目的也在于有利于解决实际问题。

自 20 世纪 60 年代初发展起来的处理结构与结构及非结构因素的多种子系统耦合问题的统计能量分析(SEA)方法,就是把各种子系统(区域可不重叠,完全重叠,局部重叠)的能量作为独立变量,而子系统的其它变量(如位移、压力等)都可从能量推导出来。而子系统间的耦合关系是通过一种称之为耦合损耗因子(CLF, Coupling Loss Factor)参数来表示的。统计能量分析方法特别适用于解决系统工程中具有高模态密度、稳态的子系统间耦合的动力学环境预示,噪声与振动控制及故障诊断问题等。

对输入参数 x 通过功能元件转换成输出参数 y ,可用算子数学符号 F 表示它们之间的解析关系

$$y = F(x) \quad (1.2-1)$$

x, y 是不同量纲的物理量,算子 F 的物理量纲可通过 x, y 的量纲确定。例如结构系统某点处规定方向的广义位移 q 与系统广义力 Q_s 之间的函数关系可表示为

$$Q_s = F_s(q) \quad (1.2-2)$$

式中 F_s 为结构算子,在最简单的情况下就是弹簧刚度。绕流物体的广义位移 q 与绕流物体表面上的气动力对应的广义力 Q_a 之间的函数关系可写为

$$Q_a = F_a(q) \quad (1.2-3)$$

类似优化控制力 Q_c 、各种阻尼力 Q_d 、电磁力 Q_g 、温度分部引起的热载荷 Q_h 、各种惯性力 Q_i 、液流动力 Q_l 等与结构广义位移 q 之间的数学关系可分别为

$$\begin{aligned} Q_c &= F_c(q) \quad , \quad Q_d = F_d(q) \quad , \quad Q_g = F_g(q) \\ Q_h &= F_h(q) \quad , \quad Q_i = F_i(q) \quad , \quad Q_l = F_l(q) \end{aligned} \quad (1.2-4)$$

这样连同式(1.2-3)、(1.2-4),一般结构耦合动力学问题可用算子形式表示为

$$\begin{aligned}
Q_s &= Q_a + Q_c + Q_d + Q_f + Q_g + Q_h + Q_i + Q_l \\
&= F_a(q) + F_c(q) + F_d(q) + Q_f + F_g(q) + F_h(q) + F_i(q) + F_l(q) \\
&= F_s(q)
\end{aligned}
\tag{1.2-5}$$

式中 Q_f 表示与系统无关的外扰动力(如突风等)。上式还可表示为

$$(F_s - F_a - F_c - F_d - F_g - F_h - F_i - F_l)(q) = Q_f \tag{1.2-6}$$

或

$$q = F_s^{-1}(F_a + F_c + F_d + F_g + F_h + F_i + F_l)(q) + F_s^{-1}(Q_f) \tag{1.2-7}$$

式中 F_s^{-1} 是结构算子的逆变换。具有唯一逆变换的算子称为正则算子,否则便是奇性算子。使算子成为奇性的那种参数就是该算子的临界特征值。当在式(1.2-6)或式(1.2-7)中忽略某些耦合因素时,就可简化为前述多种分类的简单的耦合问题了。

1.3 有关基本概念

本书主要侧重讨论以结构为主的结构与结构及多种非结构因素相互耦合作用的基本机制原理和耦合问题的基本分析方法。而关于单一学科的结构动力学、空气动力学、液流动力学、热力学、电磁学、现代控制论等专门知识在本书都不加详细介绍,只引用有关重要结果,感兴趣的读者可参考专著。但是有关共同的、少量重要的基本概念在本节作简要介绍还是有意义的^[5~7,14~16]。这些基本概念是:建模方法;结构耦合动力学系统方程一般解法;系统间耦合程度判据;能控、能观与能测;稳态性、稳定性与稳健性(Robustness 鲁棒性)等。

1.3.1 建模方法

研究结构耦合动力学,首先要建立数学模型。目前有两大类建模方法:第一类是从各部件或子系统的工作进行机理出发,列出有关各个变量之间的数学关系式;第二类是把系统看成一个黑箱,假定其可用某种数学方程来描述,然后根据其输入输出量的测试分析来辨识出数学模型,此即所谓反问题。由于反问题的非线性,反问题的解并不是唯一的,所以目前仍多用第一类建模方法。数学模型的“复杂化”或“简单化”都有可能与实际不符而导致不正确的结论。为能较快较好地建立数学模型,这里引用几条经验准则作为参考。

1) 必须定义该模型的“目的”;

2) 必须定义“系统的边界”;

3) 必须定义各个不同系统成分之间的“结构关系”,此要能最好地代表所期望的或观测的效应;

4) 在系统物理结构的基础上,定义一组所要的“系统变量”,如果发现某一个重要的量不能在系统变量中写出来,则要对 3) 的“结构关系”作出相应的修改;

5) 必须写出系统基本成分的数学描述的“基本方程”;

6) 在写出各成分的基本方程之后,再通过诸如牛顿定律、基尔霍夫定律、能量守恒定律等物理上的定律,把它们相互联系起来;

7) 再整理基本方程、连续性和相容性方程,把数学模型肯定下来;

8) 经过计算分析,对数学模型与实际系统结果进行比较,若符合较好,则建模成功,否则重复上述步骤进行修改。

1.3.2 结构动力学系统方程一般解法

结构耦合动力学方程如式(1.2-6)、(1.2-7)中出现的算子可以是代数表达式(矩阵形式)、微分和积分方程表达式或微积分方程表达式。它们的选用取决于结构耦合动力学中具体问题的提出和若干标准解法。

若选择如式(1.2-6)、(1.2-7)适用的解析解法时,首先应考虑到结构耦合动力系统(对象)一般都是连续的系统。对此只在极少数特殊情况下才能找到结构耦合动力学问题的精确解,并且这种精确解主要用来定性地评价实践中感兴趣的一些参数的相对影响。因此结构耦合动力学问题大多只能用数值近似解法,如有限元法、差分法、直接配置法、Calerkin法、Rayleigh—Ritz法、统计能量分析(SEA)法及状态空间法(可由广义坐标和形态函数配置法转换)等。

若用数值法求解结构耦合动力学系统的响应和控制问题,可得到非齐次方程组。此为求解几个未知数的方程组问题,按常规处理即可。若用数值法求解结构耦合动力学系统的固有振动和稳定性问题,可得到齐次方程组。在特殊静力和无阻尼固有振动情况下要求解的是实特征值问题,而在有阻尼固有振动和一般结构耦合动力学稳定性问题求解的是复数特征值问题,随着数字计算的发展,具体算法也非常之多,因篇幅有限不能一一列举,只在本书4.6.3节简要介绍一种适用性较广的求复数特征值的方法。

1.3.3 系统间耦合程度的判据

实际系统工程往往包含很多子系统(部件),因此数学模型中的参数大小可能相差很大,有时达到一个数量级,甚至几个数量级。这样就会造成病态方程和费解,通过摄动法可忽略建模中某些小参数的耦合,而达到降低模型阶次的目的。下面介绍二种弱耦合程度的判据。

不失一般性,现只考虑含二个子系统耦合的情况,设 x_i, u_i 为第 i 个子系统的状态和控制向量,分别有 A_i, B_i, A_{ij}, B_{ij} 矩阵,有状态空间变量方程

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & \epsilon A_{12} \\ \epsilon A_{21} & A_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & \epsilon B_{12} \\ \epsilon B_{21} & B_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (1.3.3-1)$$

当可忽略耦合作用($\epsilon = 0$)时,上式就可解耦成非耦合的二个独立的子系统,其设计与计算分析工作量就小多了。设状态矩阵 A 可分块成

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_{12} \\ A_{21} & A_2 \end{bmatrix} \quad (1.3.3-2)$$

已求得

$$\lambda_i\{\mathbf{A}_1\} = \{\lambda'_1, \lambda'_2 \cdots \lambda'_{n_1}\} \quad , \quad i = 1, 2, \cdots, n_1 \quad (1.3.3 - 3a)$$

$$\lambda_j\{\mathbf{A}_2\} = \{\lambda'_{m+1}, \lambda'_{m+2} \cdots \lambda'_n\} \quad , \quad j = n_1 + 1, n_1 + 2, \cdots, n \quad (1.3.3 - 3b)$$

$$\lambda_k\{\mathbf{A}\} = \{\lambda_1, \lambda_2 \cdots \lambda_n\} \quad , \quad k = 1, 2, \cdots, n \quad (1.3.3 - 3c)$$

分别为 \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 和 \mathbf{A} 的特征值。如果 $|\lambda_i\{\mathbf{A}_1\}| \ll |\lambda_j\{\mathbf{A}_2\}|$ ，定义

$$r = \max |\lambda_i\{\mathbf{A}_1\}| \quad , \quad i = 1, 2, \cdots, n_1 \quad (1.3.3 - 4a)$$

$$R = \max |\lambda_j\{\mathbf{A}_2\}| \quad , \quad j = 1, 2, \cdots, n \quad (1.3.3 - 4b)$$

式中 r, R 为二个半径，则 \mathbf{A}_1 的特征值都落在以 r 为半径的圆上和圆内，而 \mathbf{A}_2 的特征值则都落在以 R 为半径的圆上及圆外，如图 1.3-2。这时，如满足下列条件，就可认为二个子系统是“弱耦合”。

$$\frac{r}{R} \ll 1 \quad (1.3.3 - 5a)$$

$$\frac{n_1 \epsilon_{12} \epsilon_{21}}{R^2} \ll 1 \quad (1.3.3 - 5b)$$

式中 ϵ_{12} 及 ϵ_{21} 分别为子矩阵 \mathbf{A}_{12} 、 \mathbf{A}_{21} 的元素的最大模量

$$\epsilon_{12} = \max |(\mathbf{A}_{12})_{ij}| \quad , \quad i = 1, 2, \cdots, n_1, j = n_1 + 1, n_1 + 2, \cdots, n \quad (1.3.3 - 6a)$$

$$\epsilon_{21} = \max |(\mathbf{A}_{21})_{lk}| \quad , \quad k = 1, 2, \cdots, n_1, l = n_1 + 1, n_1 + 2, \cdots, n \quad (1.3.3 - 6b)$$

在本书第 2 章结构耦合动力学统计能量分析中的二个不同子系统 i 和子系统 j 之间的耦合关系，是通过一种无量纲的称作“耦合损耗因子 (CLF, Coupling Loss Factor)” η_{ij} 的大小来描述的。每个子系统本身都有一个无量纲的称作“内损耗因子 (ILF, Internal Loss Factor)” η_i 的大小来描述子系统储存能量损耗的。若 $\eta_{ij} \ll \eta_i$ ，则子系统 i 和子系统 j 之间是弱耦合的，此时虽然为弱耦合，但却不可忽略。

1.3.4 能控、能观与能测性

由于在结构耦合动力学系统分析和试验中都将涉及到测量和控制系统，所以在本节简要介绍能控、能观及能测性等现代控制论中的重要概念是有意义的。

现考虑用状态空间法表示的一线性定常系统

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (1.3.4 - 1a)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (1.3.4 - 1b)$$

式中 $\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y}$ 分别为 n 维状态， m 维控制和 r 维输出向量， $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ 分别为相应维数的常系数矩

阵。反映控制输入 u 对状态变量 x 制约能力的概念就是系统的能控性。反映由系统输出 y 来判断系统状态 x 的能力的概念就是能观性。

检查系统能控性能观性的判据是下列二个秩都等于 n

$$\text{rank}[BAB \cdots A^{n-1}B] = n \quad (1.3.4 - 2)$$

$$\text{rank}[C^T A^T C^T \cdots (A^T)^{n-1} C^T] = n \quad (1.3.4 - 3)$$

但要注意,这样的判据,一般只在维数较低(如小于10)时可用,对高维数的大系统需采用其它判据。简而言之,能控性反映控制输入 u 对系统状态的制约能力,能观性反映输出对系统状态的判断能力,而能测性反映某物理量能被直接(由敏感元件或量测仪表)量测的能力。能观性的对象是系统的状态,能测性的对象是系统中某单个物理量。系统的输出量 y 都是直接能测的变量,而状态变量不一定是直接能测的,若系统具有能观性,那末全部状态变量都可被直接测量得到或被估算得到。

1.3.5 稳态性、稳定性与稳健性(Robustness 鲁棒性)

研究结构耦合动力学的最终目的是要对系统工程中结构系统的动力响应进行控制并达到合理要求,使系统工程具有良好的稳态性、稳定性和稳健性(Robustness,鲁棒性)。

系统的输入信号与主反馈信号之差称为由输入端定义的系统误差。系统输出量的实际值与希望值之差称为由输出端定义的系统误差,实际这两种误差可以互相表示。系统误差是时间 t 的函数,记为 $e(t)$,那末控制系统的稳态误差就定义为 $e(t)$ 的稳态分量,记为 e_s 。如果当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e(t)$ 的极限存在,则定义

$$\text{稳态误差} = e_s = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \quad (1.3.5 - 1)$$

控制系统的稳态误差是系统控制准确度的一种度量,通常称之稳态性。确定性系统在不确定性有界扰动作用下的稳态误差数值,反映了系统的抗干扰能力。

如果确定性系统(含控制器)受到不确定性有界扰动,不论其初始偏差有多大,只当扰动取消后,都能以足够的准确度恢复到初始平衡状态,则称此确定性系统是稳定的系统。

对线性定常控制系统有状态空间方程

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ew \quad (1.3.5 - 2a)$$

$$y = Cx + Du + Pw \quad (1.3.5 - 2b)$$

$$e = y - y_a \quad (1.3.5 - 2c)$$

式中 w 为 q 维扰动向量,可能是不可测量的; y_a 为系统的期望参考输出, E, P 为相应维数的常数系数矩阵,其它符号同前述。如果对于常数系数矩阵 A, B, C 系统参数受到摄动变成 $A + \Delta A, B + \Delta B, C + \Delta C$, 其中

$$\Delta A \in \theta_e, \quad \Delta B \in \theta_e, \quad \Delta C \in \theta_e \quad (1.3.5 - 3a)$$

$$\theta_\epsilon = \{a \mid |a| < \epsilon, \epsilon > 0\} \quad (1.3.5 - 3b)$$

即 θ_ϵ 为一组可能的摄动值, ϵ 不一定是一个小数。如果能选出 ϵ , 使在任何初始条件下, 闭环系统都稳定, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}(t) = 0$; 而一个控制器如能使受参数摄动的系统在这种初始条件下既渐近稳定又可调节, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$, 则称此系统具有稳健性。简而言之, 可以认为不确定性系统(含控制器)在不确定性有界干扰下具有较好的稳定性能, 则称之为稳健性系统。