
运载火箭虚结构 模态试验处理技术

Processing of Pseudo-Structure
Modal Testing of Launch-Vehicle

张德文 [美] 魏阜旋 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

V475
1014



NUAA2010015544

V475
1014-1

国防科技图书出版基金资助

运载火箭虚结构 模态试验处理技术

张德文 [美]魏阜旋 著



国防工业出版社

·北京·

2010015544

图书在版编目 (CIP) 数据

运载火箭虚结构模态试验处理技术 / 张德文,
[美]魏卓旋著. —北京: 国防工业出版社, 2009. 9
ISBN 978-7-118-06335-6

I. 运... II. ①张... ②魏... III. 运载火箭-结构试验
IV. V475.1-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 068305 号



国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 10 $\frac{7}{8}$ 字数 274 千字

2009 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

3328100102

De-Wen Zhang

Fu-Shang Wei

Processing of Pseudo- Structure Modal Testing of Launch-Vehicle

National Defense Industry Press

Beijing, China

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

(按姓氏笔画排序) 李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 傅惠民

前 言

在实际工程,特别是航天工程中,经常会出现或者是越来越希望解决如下3类技术问题:

(1) 虚构造结构模态试验处理技术。由于多种原因,无法做整体(全)结构的模态试验,如现有振动试验塔容不下越来越大的运载器/有效载荷进行全尺寸模态试验,只能将全结构分解成各个部件,然后对各个部件分别进行模态试验。这样就要求根据各个部件的试验数据,来获取到整体结构的试验模态参数。这就是大家熟悉的试验模态综合技术。这时被试结构为非真实的整体结构,故称为“虚构造结构”。还有一类问题是,必须依靠虚构造结构模态试验来解决的,如未来与空间站对接的各种新航天器,已经无法与空间站对接后进行地面模态试验了,在“轨道模态试验”未成功前,只能利用后续新航天器(部件)的模态试验数据与保存的空间站(部件)的地面模态试验数据,通过试验模态综合技术来获得“空间站/新航天器”组合结构的试验模态参数。

(2) 虚边界结构模态试验处理技术。在航天工程中,被迫使用虚构造结构模态处理技术途径的原因之一,是现有试验塔容不下越来越大的运载器进行模态试验,重新造塔,其造价又太高。在不重新造塔的前提下,无非有两个途径:一是使用虚构造结构模态试验的途径;二是在某合适场地内,将整体结构固定在某刚性或弹性基底上进行模态试验。这样,原本的自由—自由模态试验就变成了约束状态下的模态试验。这时,结构还是真实的,只是边界状态不真实了,这是一种“虚边界”结构。虚边界结构模态试验的问题还有不少,如某个局部小型约束部件,为了避免试验夹具(它

被要求模拟约束边界的刚度特性)的设计、制造,将它悬吊起来做自由—自由模态试验。这时,原本为约束边界的结构就变成自由边界结构了。现在的问题,是如何根据虚边界结构的模态试验数据得到真实边界条件下的试验模态参数。这就是常说的“边界转换”问题,也就是本书所说的虚边界结构模态试验处理。

(3) 虚材料结构模态试验处理技术。由于各种原因,被试结构的部分或全部材料都是非真实的。如火箭在做模态试验时不允许加注真实的液氢液氧,必须采用其他的“介质”(如水)来代替。这就要求利用非真实(虚)材料结构的模态试验数据辨识出真实材料下的试验模态参数。

将以上3类问题统称为虚结构模态试验技术,解决这3类问题的原理分别是试验模态综合技术、边界转换法和修改结构的重分析法。这3种技术曾引起包括作者在内的众多学者的兴趣,时至今日,这3个领域仍是热门课题,特别是对试验模态综合技术和修改结构重分析法的研究更是方兴未艾。然而,详细而又系统地总结、介绍这3种原理在3类虚结构模态试验中应用的专著目前还未出版。为了满足广大读者对这方面知识的需求,作者撰写了这本书,并力求反映当前国内外的较新研究成果。但由于作者精力有限,许多学者的最新成果还不可能包括在内,特表歉意。全书共分为6章和4个附录。

第1章概括了3种虚结构模态试验处理技术的概貌、作用和原理,以及相关技术的重要性。

第2章论述了作者初步创立的实用完备模态空间理论。该理论可以解决因模态截尾误差引起精度低的一系列理论问题和工程问题。

第3章介绍了非奇异动柔度矩阵和奇异动柔度矩阵的一种混合幂级数展开式的各种计算公式,以及详细讨论了加速尾部幂级数收敛的混合移频技术。该移频技术是加速收敛方面的一项突破性进展,它使得动柔度矩阵的近似展开式几乎可以逼近精确的动柔度矩阵。该动柔度矩阵使得许多动力学问题的解变得简单而精

确,因为它实质上克服了模态截尾所带来的误差影响。

第4章至第6章,叙述三类虚结构模态试验处理技术,这是本书的主体内容。

4个附录介绍和列出了此书命题中很有用的一些数学方法与公式,如混合移频技术在奇异动柔度矩阵展开式中的应用,以及重根下的摄动法等。

如前所述,本书所介绍的3项主体技术正在日新月异地发展,会不断有新方法涌现,本书不可能将它们一一包括在内。本书主要是为在第一线工作的广大分析与试验工程师撰写的,所以大部分数学描述较为通俗,即不求数学上的完美无缺,只求方法上有根有据(技术上的不成熟之处已专门做了说明),以便工程师们阅读。由于本书是一本小型学术专著,不可能将有关的各种方法都包括在内,如摄动法中求解各阶摄动量的“模态法”已有专著做了详尽介绍,故本书仅论述了“直接求解法”的步骤,对“模态法”有兴趣的读者,可参阅所列参考文献。

为了保证本书的质量,特邀南京航空航天大学陈国平教授撰写4.4节“阻尼结构试验模态综合”初稿,然后由作者和北京强度环境研究所的王建民研究员分别对其中4.4.1节、4.4.2节和4.4.3节进行了详尽地改写与补充。

由于作者水平有限,书中难免会有疏漏和不妥之处,敬请广大读者不吝指教。

张德文

2008年5月于中国运载火箭技术研究院
北京强度环境研究所

[美]魏阜旋

美国凯门航太公司

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 虚构造结构模态试验的处理	2
1.2 虚边界结构模态试验的处理	3
1.3 虚材料结构模态试验的处理	4
1.4 模态截尾	5
1.4.1 实用完备模态空间	6
1.4.2 剩余动柔度	7
1.5 扩阶与缩聚	8
1.6 模型修正与相关	9
参考文献	10
第 2 章 实用完备模态空间理论	15
2.1 空间的生成	15
2.2 等价性证明	17
2.3 等效性证明	18
2.4 改进的实用完备空间	21
2.4.1 逐步分解法	21
2.4.2 优化正交法	25
参考文献	28
第 3 章 动柔度矩阵	30
3.1 概述	30
3.2 非奇异动柔度矩阵 $F(\omega)$	32

3.2.1	$F(\omega)$ 计算式	32
3.2.2	收敛性	35
3.3	移频技术	35
3.3.1	统一移频	35
3.3.2	激励移频	37
3.3.3	系统移频	39
3.3.4	混合移频	42
3.3.5	迭代收敛及加速算法	46
3.4	$F(\omega)$ 的精确式	49
3.4.1	精确动柔度式	49
3.4.2	简化动柔度式	49
3.5	$F(\omega)$ 的高精度式	52
3.5.1	高精度动柔度式	53
3.5.2	剩余柔度计算	55
3.6	奇异动柔度矩阵 $F(\lambda)$	57
3.6.1	数学基础	57
3.6.2	扰动动柔度矩阵	60
3.6.3	过渡动柔度矩阵	65
	参考文献	70
第4章	虚构造结构模态试验处理技术	72
4.1	概述	72
4.2	试验模态基综合技术	75
4.2.1	自由界面情况	75
4.2.2	固定界面情况	87
4.3	试验/理论模态基综合技术	95
4.3.1	完备模态基综合技术	96
4.3.2	精确拟固定界面法	111

4.3.3	试验模态综合动柔度法	113
4.3.4	误差分析与精度改进	121
4.4	阻尼结构试验模态综合	125
4.4.1	滞后阻尼系统	126
4.4.2	粘性阻尼系统	135
4.4.3	实空间解耦模态综合法	151
4.5	连接子结构与试验建模	159
4.5.1	连接子结构概念	159
4.5.2	结构边界支撑参数的辨识	162
4.5.3	基于子结构模型辨识界面参数	169
4.6	测量模态的扩阶与减缩	178
4.6.1	迭代法	179
4.6.2	误差极小法	180
4.6.3	最优拟合法	181
4.6.4	转角分量的确定	183
4.6.5	普遍完备模态型减缩	183
4.6.6	阻尼系统减缩技术	188
	参考文献	203
第5章	虚边界结构模态试验处理技术	211
5.1	概述	211
5.2	从自由—自由试验提取约束结构模态	212
5.2.1	附加质量法	212
5.2.2	剩余柔度法	217
5.2.3	动柔度法	221
5.2.4	具有弹性支撑的约束结构模态辨识	223
5.2.5	完备模态基技术	236
5.3	从约束试验提取自由结构模态	238

5.3.1	有关技术回顾	238
5.3.2	释放约束位移法	240
5.3.3	释放约束力法	248
5.3.4	基于试验/理论信息的技术	252
	参考文献	255
第 6 章	虚材料结构模态试验处理技术	259
6.1	概述	259
6.2	矩阵梯度法	260
6.3	矩阵摄动法	262
6.4	直接特征值分析法	269
6.4.1	基本公式	269
6.4.2	改善精度	271
6.4.3	频率行列式	273
6.4.4	试凑—迭代法	276
6.5	模态法	278
6.5.1	非完备模态法	279
6.5.2	完备模态法	288
6.6	基向量组合法	294
6.6.1	原理(静力重分析)	294
6.6.2	基向量组合法的推广	298
6.6.3	摄动基向量组合法	301
6.6.4	最新进展(动柔度法)	302
6.6.5	误差估计	310
	参考文献	312
	附录	314
附录 A	刚体模态校正	314

附录 B 特征灵敏度	315
附录 C 任意阶摄动量的统一计算式	319
附录 D 重根下的摄动法	321
参考文献	324

Contents

CHAPTER 1	General Exposition and Argumentation	1
1.1	Modal Testing of Structure with Pseudo- Construction	2
1.2	Modal Testing of Structure with Pseudo- boundary	3
1.3	Modal Testing of Structure with Pseudo- Material	4
1.4	Modal Truncation	5
1.4.1	Practical Complete Modal Space	6
1.4.2	Residual Dynamic Flexibility	7
1.5	Model Expansion and Reduction	8
1.6	Model Updating and Correlation	9
	References	10
CHAPTER 2	Practical Complete Modal Space	15
2.1	Generation of Space	15
2.2	Demonstration of Equivalent	17
2.3	Demonstration of Equal Effectiveness	18
2.4	Improved Complete Modal Space	21
2.4.1	Successive Decomposition Technique	21
2.4.2	Optimal Orthogonalization Method	25
	References	28
CHAPTER 3	Dynamic Flexibility Matrices	30
3.1	Outline	30

3.2	Non-singular Dynamic Flexibility Matrix	
	$F(\omega)$	32
3.2.1	Computational Formula of $F(\omega)$	32
3.2.2	Convergence	35
3.3	Frequency Shifting Techniques	35
3.3.1	Uniform Frequency Shifting Method	35
3.3.2	Excitation Frequency Shifting Method	37
3.3.3	System Frequency Shifting Method	39
3.3.4	Hybrid Frequency Shifting Method	42
3.3.5	Iterative and Accelerated Convergence Algorithm	46
3.4	Accurate Formula of $F(\omega)$	49
3.4.1	Accurate Dynamic Flexibility Formula	49
3.4.2	Simplified Dynamic Flexibility Formula	49
3.5	High Precision Formula of $F(\omega)$	52
3.5.1	High Precision Dynamic Flexibility Formula	53
3.5.2	Residual Flexibility Method	55
3.6	Singular Dynamic Flexibility Matrix $F(\lambda)$	57
3.6.1	Mathematical Basis	57
3.6.2	Perturbed Dynamic Flexibility Matrix	60
3.6.3	Interim Dynamic Flexibility Matrix	65
	References	70

CHAPTER 4 Modal Testing of Structure with

Pseudo-Construction	72
---------------------------	----