

结构动力学与运载火箭技术发展

徐庆红^{*,1)} 姜 杰[†] 王明宇^{*}

^{*}(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

[†](中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要 力学作为工程研究的基础学科, 在运载火箭的设计中起着至关重要的作用. 结构动力学作为分支学科之一在其中扮演着重要角色, 其发展水平很大程度上可反映火箭总体设计能力. 本文着眼于结构动力学与运载火箭技术的结合点, 简述其发展过程, 并对其进一步发展方向提出设想.

关键词 结构动力学, 运载火箭

中图分类号: V421 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-15-330

THE DEVELOPMENT OF STRUCTURE DYNAMICS AND THE LAUNCH VEHICLE TECHNOLOGY

XU Qinghong^{*,1)} JIANG Jie[†] WANG Mingyu^{*}

^{*}(Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China)

[†](China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract Mechanics, as the basic discipline of engineering sciences, plays a very important role in the design of the launch vehicle. Structure Dynamics, as an important part of mechanics, is especially important, and its developments reflect the level of the LV's (launch vehicle's) design in some extent. This paper discusses the interactions between structure dynamics and the launch vehicle technology, in the context of their development, and puts forward some proposals for the further development.

Key words structure dynamic, launch vehicle

引 言

工程设计的各个环节几乎都涉及力学知识的运用, 力学是近代工业的基础一说毫不为过. 在牛顿推出巨著《自然哲学的数学原理》的 17 世纪到 20 世纪相对论及量子力学问世之前的近 300 年, 经典力学得到快速发展. 期间涌现出众多著名的物理学及力学大师^[1], 他们提出的理论使人类更深刻认识和描述了客观世界, 解决了大量工程领域的实际问题, 并且至今仍指导人们开展相关的工作.

运载火箭设计制造是一项复杂而庞大的系统工程, 它是力学理论等为基础 (包括其他自然科学和管理科学理论), 涵盖了力学学科下的众多分支学科, 并结合工程实践经验, 开展大型、综合工程研制工作. 纵观世界各主要国家, 运载火箭设计制造无疑是最能体现现代工业发展水平的工作之一. 结构动力学是力学分支学科之一, 它的主要目的在于研究结构的动力学特性和动响应情况. 本文主要着眼于此, 阐述其发展历程及在火箭研制中的作用.

本文于 2015-12-03 收到.

1) E-mail: longcious@163.com

引用格式: 徐庆红, 姜杰, 王明宇. 结构动力学与运载火箭技术发展. 力学与实践, 2016, 38(1): 10-13

Xu Qinghong, Jiang Jie, Wang Mingyu. The development of structure dynamics and the launch vehicle technology. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(1): 10-13

1 经典力学发展历程

依据不同分类原则, 力学可以做不同类型划分. 按照研究的时代, 力学可分为经典力学和近代力学, 其中经典力学演进的三大体系, 包括: 牛顿力学、拉格朗日力学和哈密尔顿力学, 在时间上也有

先后顺序.

力学的发展与代数学、几何学等的发展密不可分, 三者相互促进共同发展. 牛顿将几何学看作力学, 达芬奇将力学看作数学. 有学者将三者视为一体, 只是反映不同方面, 三者之间密不可分.

表 1 经典力学及其数学基础

	静力学	经典力学		
		牛顿力学	拉格朗日力学	哈密尔顿力学
代数学基础	代数学	微积分	变分法	变分法
几何学基础	欧氏几何	解析几何	黎曼几何	黎曼几何
时间	公元前 3 世纪至 公元后 16 世纪	公元后 17 世纪	公元后 18 世纪	公元后 19 世纪

自 1687 年牛顿完成其《自然哲学的数学原理》, 经典力学大厦的整个框架基本构建完毕, 它的意义是深刻且深远的. 然而大厦远没有到竣工的程度, 牛顿力学只提供了分析质点受力与运动关系的方法, 对于复杂的力学系统, 甚至对于一个简单的刚体的运动方程也还没有弄清楚 (刚体运动方程是 1765 年由欧拉最后完成^[1]).

随着 18 世纪工业发展的需求, 分析工程机械的复杂力学问题成为力学工作者亟待解决的问题, 而多部件、连接、约束等典型的机械受力情况, 对于牛顿力学而言确实力有不逮. 1787 年, 拉格朗日出版了《分析力学》, 他引入广义坐标/约束力, 取消或代替了约束, 并建立方程求解. 拉格朗日力学具有更普遍的意义, 更广泛的适用范围, 这使解决大量约束的复杂系统力学问题成为可能, 所以有着“近代工业的力学”称谓.

拉格朗日力学同样是力学由矢量分析到标量分析的一个飞跃, 《分析力学》著作中没有一幅受力图. 拉格朗日的力学脱离了古典欧氏几何的束缚, 其引入的广义坐标实际上是最早的高维空间概念, 后来到 1854 年德国的数学家黎曼引入了黎曼几何 (现在以黎曼流形形式表述), 对力学上的广义坐标给出了一个比较深刻的解释, 所以可以说拉格朗日力学是流形上的力学. 力学由矢量分析到标量分析的变化, 是现代开展计算力学的重要前提之一.

哈密尔顿力学也是一种采用变分法、流形几何对力学问题进行描述的方法. 它也是标量力学, 并且自变量在方程中的某种对称性, 给求解的定性研究以很大便利, 业已成为现代有限元方法最主要的理论基础之一. 哈密尔顿力学的应用突破经典力学

范畴, 一定程度上也推动了量子力学的发展.

2 结构动力学与有限元法

根据研究的对象或范围分类, 力学一般可以分为固体力学、流体力学及一般力学等. 结构动力学属于固体力学 — 结构力学 — 结构动力学这一学科分支, 它的主要工作是研究各类结构的动力学特性以及在外载荷下的响应情况. 固体力学中的动力学侧重于结构局部小变形或内部应力响应等; 而一般力学中的动力学侧重于物体的整体运动.

无论牛顿力学还是拉格朗日力学、哈密尔顿力学都可用于描述结构动力学, 建立动力学方程, 如采用牛顿力学方法即可建立并求解如弹簧-振子类的简单系统动力学方程. 但实际工程结构往往不是单一的构件, 而是复杂的结构系统, 所以通常采用拉格朗日或哈密尔顿方法建立动力学方程并求解. 即便如此, 现实的很多问题亦难以得到求解.

结构动力学发展出多种方法, 然而工程中的很多问题并不追求精确解, 能够解决工程应用需求、满足一定精度范围的数值解是完全可以接受的. 计算机的出现增加了力学的研究手段, 即理论和计算. 最早计算机与结构分析结合形成了计算力学, 此后在弹道学、空气动力学及天体力学等领域迅速拓展.

有限元的产生和发展是计算力学成为力学一个独立分支学科的标志, 有限元的思想是把复杂的结构系统离散成一系列简单构件单元, 采用哈密尔顿法建立单元的动力学方程 (采用最小势能法可以建立静力方程). 由于单元有着相同或相似的形式, 所以单元方程除系数外形式完全相同, 这为程序化、自

动化地将各个单元组合成整体奠定了基础。而且单元的刚度矩阵和质量矩阵都是对称矩阵,使用合适的算法能够实现快速解算,很大程度上解决了结构力学复杂、计算量大的难题(20世纪50~90年代,计算机的能力相对于动力学计算的规模要求而言仍有很大的差距,力学工作者提出了动力学子结构模态综合方法^[2-3],在保留结构的动力学特性前提下,把模型从物理空间变换至模态空间,极大地缩减了自由度,减小了规模从而提高了计算效率)。所以有限元方法一出现即迅速在工程领域中普及应用,并成为分析结构力学最主要的手段。

一般认为20世纪50年代末美国的威尔逊完成其博士论文《二维结构的有限元分析》代表有限元方法正式形成,尽管之前有学者提出有限元思想并进行相关工作。威尔逊等又在1963年完成世界上第一个解决平面弹性力学问题的通用程序,其后有限元方法在理论和方法上得到进一步的发展、完善,大型通用有限元软件的出现又促进了推广应用,许多工程人员不懂有限元的基本理论,但经过培训,也能应用软件解决工程问题。

3 火箭设计中的动力学问题

航天工程领域作为最典型的技术密集型行业,几乎涉及力学的各个分支学科。火箭的弹道和姿控设计采用欧拉刚体动力学(火箭结构呈细长体,且在主动段飞行的弹道需考虑沿箭体轴向不同分布的气动载荷),此外还有空气动力学及材料力学等。

我国结构动力学最初运用在运载火箭设计上,主要是基于控制系统稳定性设计需求,获得箭体结构的动力学特性是保证飞行稳定的重要前提(自DF-2失利后,总体设计中姿控模型开始考虑弹体的弹性部分,并采用传递矩阵法获得结构弹性特性)。星箭动力学耦合分析是运载火箭提供的发射服务之一,用于预示卫星的动力学环境,判断二者是否兼容。关于结构载荷设计,由于之前火箭构型简单(无助推或助推芯级静定捆绑),采用较简单的基于“达朗贝尔”原理的经典截面算法可以获得内载荷(仅限于静载荷,计算动态载荷仍采用结构动力学方法)。而随着火箭结构设计的复杂性增加,如超静定的助推捆绑,越来越倾向采用结构动力学/有限元法计算箭体载荷,结构动力学在火箭设计中的应用有所拓展。

20世纪六、七十年代,国内外学者针对有限元法的研究和应用方兴未艾,一些从事力学工作的航天

工程人员逐渐考虑运用有限元法解决工程问题。美国航空航天局于1966年提出了发展世界上第一套通用型有限元软件Nastran的计划,成立于1963年的MSC公司参与了开发过程。1969年NASA推出了其第一个Nastran版本,称为COSMIC Nastran,之后MSC公司继续改良程序并在1971年推出了MSC Nastran。目前,MSC公司成长为世界上最大的CAE提供商之一,其产品如Nastran等在各国防研、工程领域中广泛应用。

据资料表明,国内航天界最晚至少在1973年即开展有限元的研究工作。中国运载火箭技术研究院总体部朱礼文、计算站朱凤石以及702所王龙生等三人合作进行理论研究、程序开发和计算等工作,并参与《强度手册》(1974年)相关内容编写^[4]。20世纪80年代初,总体部朱礼文、王其兴及15所王仙春、陈炯柏等又共同组织、参与有关研究工作。有限元在长征系列火箭的应用大概始于20世纪70年代中后期,长征三号火箭研制中采用有限元建立了基于二维平面梁的火箭动力学特性模型。20世纪80年代后期,针对长征二号E火箭捆绑连接复杂的结构形式^[5],引入了动力学子结构方法(模态综合法)。动力学子结构是20世纪60年代正式提出并发展起来的,当时属于结构动力学前沿研究。它的主要思想是将复杂结构划分为不同的部件,通过研究不同部件的动力学性能并将之综合组装,形成总体特性。该方法还有一明显优势是可以极大地减小计算量,通过部件从三维物理空间到模态空间的变换,截取模态空间少量自由度即可基本表征原模型特性,通过综合各个缩聚子结构,形成的模型自由度较原来大为减小,从而很大程度上解决了计算机能力的限制。长征二号F、长征三号乙等火箭研制继承了此方法,特别补充的是,以上的火箭有限元模型均通过自研程序完成。

20世纪90年代,总体部引入了MSC公司的通用有限元软件Patran/Nastran,并经过不断地摸索研究逐渐应用于型号之中^[6]。通用程序由于界面友好、建模简易规范以及理论要求相对较低等特点,在火箭动力学建模和分析中占据越来越重要的地位。基于Patran/Nastran的“纵横扭一体化建模方法”实现了不同模态形式的同一模型,现今新一代火箭的动力学建模均采用这一途径。

星箭动力学耦合分析是运载器提供发射服务的主要工作项目之一,作为国内外同行业通行的做

法, 耦合分析是根据星箭动力学模型组合形成耦合系统, 并在系统上施加对应的外力载荷, 计算星、箭重要位置的响应情况, 以判断两者兼容与否. 20 世纪 80 年代中后期由于长征火箭对外发射服务, 外方提出了进行星箭耦合分析工作的要求. 以此为契机, 国内工程人员迅速开展相关工作, 并取得重要成果. 由于在动力学建模理论和方法上具备较坚实基础, 工作重点当时主要聚焦在外载荷的获取. 这是一个动力学典型的逆问题, 已知响应和传递, 获取输入. 载荷识别工作根据飞行遥测数据及星箭动力学模型, 反向识别出外载荷模型. 囿于初期发射次数少, 用于解析的遥测数据相对也较少, 现役长征火箭外载荷模型确定也经历了一个过程并在 1990 年代中晚期最终成型.

理论、计算和试验同为工程中研究问题的 3 种重要手段, 火箭研制工作中最重要也是规模最大的试验之一——全箭模态试验, 主要是为获得火箭真实结构的动力学特性, 为理论及计算模型修正等提供依据. 模态试验是动力学另一个典型的逆问题, 与上述获取系统外激励不同, 它是已知响应和输入, 获取系统特性的反问题. 在特定位置施加确定的激励信号, 通过测量响应输出获得箭体的振动特性. 1962 年 DF-2 型火箭失利后, 国内即开展弹(箭)的模态试验以获取动力学特性, 之后到目前为止每个全新型号研制过程均做模态试验.

4 结论及展望

力学作为工程研究的基础学科, 在运载火箭的设计中起着至关重要的作用. 结构动力学作为分支学科之一在其中扮演着重要角色, 应用于包括动特性及稳定性设计、动力学耦合仿真以及载荷计算等方面, 结构动力学发展水平很大程度上可反映火箭总体设计能力.

经过几十年的研究和发展, 国内的相关专业取得了长足进步, 长征火箭的飞行记录以及历次对外发射服务的成功, 表明其专业能力已与国际基本接

轨. 然而从业人员也深刻地认识到, 其与国外先进水平仍存在较大差距, 因此有必要进一步加强专业建设. 从事相关专业的专家、学者在深入探讨后, 一般认为应至少从以下两方面开展工作:

(1) 深耕专业传统领域

虽然结构动力学体系在解决运载火箭设计传统领域方面基本完备, 但一些问题只停留在“知其然不知其所以然”的水平, 在理论基础或问题机理等方面仍停留在肤浅的认识, 而工程技术的精髓在于“深刻认识”. 其次原专业储备在前沿方向如带翼飞行器、重型火箭等设计中捉襟见肘, 因此在继承原专业体系的基础上进一步加深研究对于提升专业能力至关重要.

(2) 拓展专业新领域

在深耕传统领域的同时开展在新领域的创新, 可以完成之前无法胜任的工作, 如采用多体动力学进行包含姿控的闭环实时载荷仿真. 多体系统动力学以拉格朗日分析力学为理论基础, 适用于包含刚体、柔性体甚至液体的复杂机械系统的动力学仿真, 可实现飞行动力学、结构动力学、姿控响应等的耦合分析. 得益于现代计算能力的不断进步, 以及工程需求的驱动, 近年来多体系统动力学理论及工程软件发展迅猛. 专业新领域的拓展无论对于型号设计抑或专业建设都具有积极意义.

参 考 文 献

- 1 武际可. 力学史. 重庆: 重庆出版社, 2000
- 2 Craig RR, Bampton MCC. Coupling of substructures for dynamic analyses. *AIAA Journal*, 1968, 6(7): 1313-1319
- 3 王文亮, 杜作润. 结构振动与动态子结构方法. 上海: 复旦大学出版社, 1985
- 4 王毅, 朱礼文, 王明宇. 大型运载火箭动力学关键技术及其进展综述. *导弹与航天运载技术*, 2000, (1): 29-37
- 5 于海昌, 贾文成, 卫国等. 大型捆绑火箭模态试验/分析的相关性研究. *导弹与航天运载技术*, 1993, (2): 42-52
- 6 潘忠文, 曾耀祥, 廉永正等. 运载火箭结构动力学模拟技术研究进展. *力学进展*, 2012, 42(4): 406-415

(责任编辑: 刘希国)