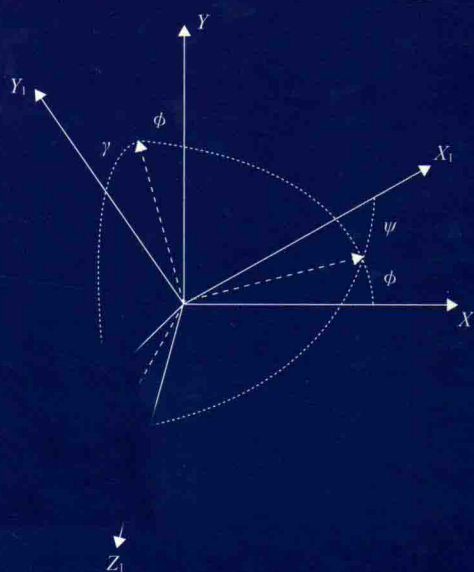




航天科技图书出版基金资助出版

运载火箭 动力学与控制

张卫东 等 编著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

运载火箭动力学与控制

张卫东 等 编著



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

运载火箭动力学与控制 / 张卫东等编著. -- 北京:
中国宇航出版社, 2015. 4

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0908 - 0

I. ①运… II. ①张… III. ①运载火箭-动力学-研
究 ②运载火箭-控制系统-研究 IV. ①V475.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 064219 号

责任编辑 曹晓勇

责任校对 祝延萍

封面设计 文道思

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2015 年 4 月第 1 版
2015 年 4 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 16.75

字数 400 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0908 - 0

定价 128.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于 2007 年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审 1~2 次,资助 10~20 项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站,点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址: <http://www.caphbook.com>

电话: (010) 68767205, 68768904

序

20 世纪中期以来，航天技术快速发展并日趋成熟，提升进入空间与开发利用空间的能力已成为各航天大国的国家战略。运载火箭将各类飞行器送入空间轨道，代表了进入空间的能力，决定了空间活动的规模，是实现国家空间战略的基础和保障。我国运载火箭的发展源于弹道导弹技术，依靠自己的力量，研制了十几型运载火箭，形成了型谱系列，保障了我国卫星、载人航天与月球探测等重大工程的实施，并进入国际商业发射服务市场。目前，我国新一代运载火箭研制进展顺利，即将实现首次飞行并投入使用。

现役长征系列运载火箭使用有毒有污染的推进剂，具有可靠性高、性价比高等特点，已实施近 200 次发射。新一代运载火箭使用无毒无污染推进剂，动力系统和控制系统全面改进，运载能力和可靠性都得到提升。

运载火箭一般由总体、结构、动力、控制、测量及发射支持等系统组成，其中控制系统是核心系统之一，通过控制系统保证运载火箭飞行中姿态稳定，并能够精确进入预定轨道。运载火箭作为其控制对象，有着自身显著特点。运载火箭为了达到较高速度，一般设计为两级或三级，具有较大的长细比，是复杂、随时间变化的“弹性”体，同时火箭穿越大气层时还会遇到复杂的气动载荷，此外还有贮箱内推进剂晃动、发动机推力摆动带来的影响等，这些复杂的动力学特性必须在控制系统设计中统筹考虑。我国早期导弹研制中发生的起飞数秒出现超出预定的较大姿态而失败的主要原因，就是未合理考虑弹体飞行弹性振动对控制系统的影响。新一代运载火箭采用液氧煤油发动机，尤其是捆绑固体或液体助推器后，全箭的结构动力学特性变得复杂，同时新型发动机摆动特性、伺服特性等对火箭的控制影响较大，对火箭导航、制导与控制的设计方法提出了新的要求，因此，方法要创新，技术要进步，才能研制出新一代运载火箭。

为了进一步总结运载火箭研制成果，尤其是新一代运载火箭研制经验以及突破的关键技术、建立和应用的设计方法等，有必要开展相关书籍的编写和出版，指导后续运载火箭的研制工作。目前运载火箭动力学与控制方面的书籍主要基于现役运载火箭研制基础，最近的一些关于动力学与控制方面的书籍则侧重于理论研究。本书的特点是理论与工程实践结合比较紧密，既有较为严密的理论体系，又能将动力学与控制的理论应用于我国新一代运载火箭工程研制实

践，并给出了运载火箭技术的最新发展与趋势。

《2011年中国的航天》白皮书中明确提出要加强航天运输系统建设，不断完善运载火箭型谱，提升进入空间的能力。近年来，载人航天与月球探测工程、二代导航工程、高分辨率对地观测系统等一批国家重大专项顺利实施，深入发展；空间基础设施、深空探测等支持我国航天未来发展的重大项目也列入日程。这对我国运载火箭的运载能力和可靠性等都提出了新的需求。《运载火箭动力学与控制》这部著作正是在航天事业蓬勃发展、对新一代运载火箭新需求旺盛的背景下编写的。本书凝练了新一代运载火箭研制过程中的创新成果和实践经验，为运载火箭动力学与控制的后续发展提供了支持。同时也希望随着我国新一代运载火箭研制的推进，有更多的著作编写、出版。

王礼恒

2014年9月

前 言

自1957年10月第一枚运载火箭升空至今,运载火箭经历了半个多世纪的发展,各主要航天强国均建立了完备的航天运输体系,通过捆绑不同数量的助推器和搭配不同上面级,形成了通用化和模块化的运载火箭系列。运载火箭的动力学建模和控制技术作为火箭技术的重要组成部分,在火箭诞生之初就得到了广泛研究。为适应复杂的火箭结构,满足多元化航天任务的需求,运载火箭控制系统也同样向着高精度、小型化、模块化和通用化方向发展。

目前世界上主流运载火箭包括美国的宇宙神系列、德尔它系列和欧洲的阿里安系列等,其共同特点是采用了冗余的捷联导航系统、最优线路自适应制导和适应不同捆绑模块及上面级模块的通用控制技术。我国现役运载火箭也正由平台—计算机制导向双捷联复合制导发展,同时开展了无毒无污染新一代运载火箭的研制,大量新方法和新技术正在被研究与应用,包括固体捆绑火箭的动力学建模和控制、最优制导和姿态控制方法等。

控制系统是运载火箭的“神经中枢”,是火箭稳定飞行和准确到达目标点的保障。火箭动力学研究火箭在各种力作用下的质心运动和绕质心运动的规律及特点,正确有效的动力学建模是开展控制系统设计的必要条件。本书在新一代运载火箭研制的背景下,结合编写人员长期的工程实践经验,系统而详尽地描述了具有一定通用性的运载火箭质心运动和绕质心运动的动力学建模过程,并介绍了相关工程控制方法。

全书共7章。第1章为概论,介绍了运载火箭动力学与控制的一般概念、组成及功能,并简述了其发展历程和发展趋势,由张卫东编写;第2章为常用坐标系及转换,介绍了本书中用到的基本坐标系及其转换关系,由刘玉玺、邱伟和陈韦贤编写;第3章为飞行动力学,描述火箭在飞行过程中的受力情况,并在此基础上介绍了火箭的质心动力学方程和轨道动力学方程,由丁秀峰、毛承元和林剑锋编写;第4章为运载火箭姿态动力学建模,论述了运载火箭姿态动力学建模过程,包括捆绑与非捆绑火箭的受力分析、液体晃动方程、质心动力学方程、绕质心动力学方程和发动机振动方程等,由刘玉玺、张开宝和梁建国编写;第5章为箭体动力学特性与控制,详细论述了运载火箭结构动力学特性、液体晃动特性、气动特性、纵向耦合振动特性及其对姿态控制的影响等,由张卫东、刘玉玺、狄文斌、陈雪巍、刘锦凡等编写;第6章为导航与制导控

制, 主要介绍运载火箭导航、制导和初始对准的原理与方法, 其中导航包括平台导航、捷联导航和组合导航, 制导包括摄动制导、迭代制导和动力显式制导, 初始对准包括基于平台和捷联的两种初始对准方法, 由毛承元、司成和邱伟编写; 第7章为运载火箭姿态控制, 包括捆绑、非捆绑火箭和上面级的姿态控制原理与方法, 以及火箭姿控对制导的适应性分析等, 由刘玉玺和杨赓编写。

本书可作为从事运载火箭总体和控制设计工作的工程技术人员和研究人员的参考书, 也可作为控制相关专业研究生和本科生的教材。

本书涉及专业面广、涵盖内容多, 由于编者水平和经验有限, 不足和错误之处在所难免, 敬请读者批评指正。

作 者

2014年6月

符 号

a —— 加速度；轨道半长轴
 a_3 —— 视加速引起的惯性力矩系数
 a_4 —— 姿态角加速引起的惯性力矩系数
 $a_{5i}, a''_{5i}, d_{3i}, d''_{3i},$
 $D_{1i}, D''_{3i}, D_{2i}, D_{3i}$ —— 弹性交连系数
 a_a —— 相对加速度
 a_e —— 牵连加速度
 a_c —— 哥氏加速度
 A —— 横截面积
 A_{mm}, B_{mm} —— 地球形状及密度有关的引力系数
 A_0 —— 火箭发射方位角
 b_1 —— 气动阻尼力矩系数
 b_2 —— 气动力矩系数
 b_3 —— 控制力矩系数
 b_{30} —— 发动机惯性力矩系数
 b_{4p} —— 晃动交连力矩系数
 b_{5p} —— 晃动质心交连系数
 b_{1i}, b_{2i} —— 附加气动力矩系数
 B_0 —— 发射点地理纬度
 C_1, c_{1i}, c_{2i} —— 附加气动力系数
 $C_{zy}^\alpha, C_{zz}^\beta, C_{vxx}$ —— 单位长度升力、侧向力、阻力系数
 $C_{zm}^\alpha, C_{z_1 z_1}^\beta, C_{xx}$ —— 单位长度法向、横向、轴向力系数
 $C_1, C_2 (\tilde{C}_2), C_3$ —— 攻角影响、重力、控制力系数
 C_{30} —— 发动机惯性力系数
 C_{10} —— 风干扰气动力系数
 C_{4p} —— 晃动力交连系数
 C_x —— 气动力阻力系数
 C_y^α —— 气动升力系数
 C_z^β —— 气动侧向力系数
 C_n^α —— 气动法向力系数

C —— 阻尼矩阵
 d_3 —— 滚动控制力矩系数
 d_1 —— 滚动阻尼力矩系数
 e —— 偏心率
 E —— 弹性模量
 $E_{ip}, E_{(i+n)p}$ —— 弹性晃动交连系数
 E_l —— 晃动交连系数
 F_c —— 控制力
 F'_{rel} —— 附加相对力
 F'_k —— 附加哥氏力
 $\bar{F}_x, \bar{F}_x$ —— 量化合成干扰力系数
 f —— 推力脉动频率
 g —— 引力加速度
 G —— 万有引力常数
 GM —— 地球引力常数
 h —— 飞行高度；动量矩
 h_{Ty}, h_{Tx} —— 质心横移
 I —— 惯量张量
 i —— 轨道倾角
 J —— 惯性矩 R
 J_2, J_4 —— 地球引力模型系数
 J_R —— 发动机摆动质量绕铰链轴的转动惯量
 K —— 刚度
 $K_{ip}, K_{(i+n)p}$ —— 晃动弹性交连系数
 L_K —— 气动参考长度
 l_R —— 发动机质心到铰链轴的距离
 m —— 质量
 $\dot{m}$ —— 推进剂秒耗量
 m_j —— 弹性振动质量
 m_R —— 发动机摇摆质量
 m_p —— 晃动质量
 M_{CT} —— 推力产生的控制力矩和干扰力矩
 M_c —— 哥氏力矩

- Ma —— 马赫数
 n —— 卫星沿轨道运行的平均速率
 p_0 —— 海平面大气压强
 p —— 大气压强; 压力
 P —— 发动机推力; 压力
 q —— 广义坐标; 动压
 Q —— 液体流量
 Q_x, Q_y, Q_z —— 速度系上的气动力
 $\bar{Q}_{iy}, \bar{Q}_{iz}$ —— 横向振动 i 阶广义干扰力系数
 R —— 液路阻力; 气动力
 $R_x(x), R_y(x), R_z(x)$ —— 绕辅助箭体系转角
 r —— 地心距
 $\vec{r}_e$ —— 质心到发动机喷口中心的矢量
 r_A, r_P —— 远地点、近地点地心距
 S_M —— 气动参考面积
 T —— 卫星轨道周期; 温度
 u, v, w —— 流体中 x, y, z 向的速度
 u_e, V_{ex} —— 发动机喷口截面平均排气速度
 $u_x(x), u_y(x), u_z(x)$ —— 辅助箭体系 x, y, z 方向 X 处弹性变形
 U —— 导引信号
 V —— 速度; 贮箱体积
 V_e —— 地球自转引起的牵连运动速度
 $W'(X_T)$ —— 姿态角测量元件安装处的振型斜率
 $W_{yi}(x), W_{zi}(x)$ —— 横向振动 i 阶 Y, Z 处振型
 $\dot{W}_{x1}$ —— 视加速度
 $\bar{X}_y$ —— 压心系数
 X_z, X_y —— 火箭质心、压心位置至理论尖端距离
 X_{zp} —— 晃动质量质心至火箭质心距离
 X, Y, Z —— 阻力、升力和侧向力 (气动力在速度系的分量)
 y_p, z_p —— 晃动位移
 α —— 攻角
 α_e —— 地球扁率
 α_w, β_w —— 风引起的附加攻角和附加侧滑角
 $\alpha_{\omega 1}, \beta_{\omega 1}$ —— 箭体旋转角速度引起的附加攻角和附加侧滑角
 α_ξ, β_ξ —— 弹性变形引起的附加攻角和附加侧滑角
 β —— 侧滑角
 γ —— 滚动角
 γ_V —— 速度倾角
 δ —— 发动机摆角
 $\delta_\varphi, \delta_\psi, \delta_\gamma$ —— 俯仰、偏航、滚动通道等效摆角
 ζ —— 模态阻尼比
 θ —— 弹道倾角
 λ —— 经度
 μ —— 泊松比
 $\varphi\xi$ —— 阻尼比
 ρ —— 密度
 σ —— 弹道偏角
 τ —— 切应力
 φ_e —— 地心纬度
 φ —— 俯仰角
 ψ —— 偏航角
 ω_e —— 地球旋转角速度
 ω —— 绕质心的转动角速度
 Ω —— 升交点赤经
 ω —— 近地点幅角
 ω_s —— 自振频率
 ω —— 频率
 Ω_{pj}, ζ_{pj} —— 贮箱等效晃动质量圆频率、阻尼系数
 Θ —— 当地弹道倾角
 下标
 v —— 速度坐标系
 $1, b$ —— 箭体坐标系
 g —— 发射坐标系
 a —— 地心发射惯性系

目 录

第 1 章 概 论	1
1.1 一般概念	1
1.1.1 运载火箭	1
1.1.2 运载火箭控制	3
1.1.3 运载火箭动力学	3
1.2 运载火箭飞行控制系统组成与功能	4
1.2.1 运载火箭飞行控制系统组成	4
1.2.2 运载火箭飞行控制系统功能及实现	5
1.2.3 运载火箭飞行控制系统的性能要求	8
1.3 运载火箭飞行控制系统的发展历程	9
1.3.1 动力学发展概述	9
1.3.2 国外运载火箭飞行控制系统发展历程	10
1.3.3 我国运载火箭飞行控制系统发展历程	12
1.4 运载火箭的发展趋势及对飞行控制系统的需求	14
1.4.1 运载火箭的发展趋势	14
1.4.2 飞行控制系统的发展方向与前景展望	17
第 2 章 常用坐标系及转换	20
2.1 常用坐标系	20
2.2 坐标系间的转换关系	23
第 3 章 飞行动力学	29
3.1 作用在火箭上的力和力矩	29
3.1.1 地球引力	29
3.1.2 气动力与气动力矩	32
3.1.3 发动机推力与力矩	34
3.2 火箭飞行动力学方程	37
3.2.1 质心动力学方程	37
3.2.2 绕质心动力学方程	38
3.3 轨道动力学方程	39

3.3.1 开普勒轨道方程	41
3.3.2 飞行轨道的确定	42
第4章 运载火箭姿态动力学建模	44
4.1 非捆绑运载火箭姿态动力学模型	44
4.1.1 火箭飞行中受到的力和力矩	51
4.1.2 液体晃动方程	59
4.1.3 弹性振动方程	60
4.1.4 质心动力学方程	61
4.1.5 绕质心动力学方程	62
4.1.6 非捆绑运载火箭姿态动力学方程	62
4.2 捆绑运载火箭姿态动力学模型	63
4.2.1 火箭飞行中受到的力和力矩	63
4.2.2 液体晃动方程	68
4.2.3 弹性振动方程	69
4.2.4 质心动力学方程	73
4.2.5 绕质心动力学方程	73
4.2.6 捆绑运载火箭姿态动力学方程	74
4.3 运载火箭姿态动力学模型特点	75
第5章 箭体动力学特性与控制	84
5.1 运载火箭结构动力学特性	84
5.1.1 非捆绑运载火箭结构动力学特性	84
5.1.2 捆绑运载火箭结构动力学特性	94
5.1.3 运载火箭结构动力学特性对姿态控制的影响	96
5.2 运载火箭液体晃动特性	103
5.2.1 运载火箭液体晃动的一般理论分析方法	103
5.2.2 贮箱液体晃动试验及防晃设计	114
5.2.3 液体晃动对姿态控制的影响	119
5.3 运载火箭气动特性	128
5.3.1 运载火箭气动外形设计与优化	128
5.3.2 运载火箭气动参数的理论计算与风洞试验	130
5.3.3 运载火箭气动外形对姿态控制的影响	135
5.4 运载火箭纵向耦合振动特性	141
5.4.1 运载火箭纵向耦合振动的机理	143
5.4.2 液氧煤油发动机运载火箭的 POGO 抑制难点	144
5.4.3 液路系统的频率特性	145
5.4.4 POGO 稳定性分析	151

5.4.5	POGO 的抑制措施	157
5.4.6	蓄压器对 POGO 的影响分析及其设计方法	159
5.4.7	运载火箭纵向耦合振动对姿态控制的影响	162
第 6 章 导航与制导控制		164
6.1	运载火箭的导航技术	164
6.1.1	概述	164
6.1.2	平台式惯性导航技术	164
6.1.3	捷联式惯性导航技术	166
6.1.4	组合导航技术	168
6.2	运载火箭的制导技术	171
6.2.1	概述	171
6.2.2	导引方法	172
6.2.3	关机控制	190
6.2.4	制导精度分析	192
6.3	运载火箭的初始对准	197
6.3.1	概述	197
6.3.2	平台式惯导的初始对准	198
6.3.3	捷联式惯导的初始对准	203
6.4	运载火箭导航制导技术发展趋势	208
6.4.1	高精度冗余惯组技术	208
6.4.2	最优自适应制导技术	209
6.4.3	全自主初始对准技术	209
第 7 章 运载火箭姿态控制		211
7.1	非捆绑运载火箭的姿态控制原理与方法	211
7.1.1	非捆绑运载火箭的控制原理	211
7.1.2	非捆绑运载火箭姿态控制典型方法	215
7.2	捆绑运载火箭的姿态控制原理与方法	217
7.2.1	助推布局对姿控的影响	217
7.2.2	捆绑运载火箭的控制原理	218
7.2.3	捆绑运载火箭姿态控制典型方法	219
7.3	运载火箭姿态控制能力分析	221
7.3.1	俯仰、偏航通道的控制能力分析	221
7.3.2	滚动通道的控制能力分析	222
7.4	运载火箭发动机摆动力矩计算方法	225
7.4.1	与发动机摆角无关的力矩	225
7.4.2	与发动机摆角有关的力矩	226

7.4.3 与发动机摇摆角速度有关的阻尼力矩	226
7.4.4 其他力矩项	226
7.5 运载火箭姿态控制对制导的适应性研究	227
7.5.1 迭代制导方法	227
7.5.2 姿态动力学全量模型	228
7.5.3 迭代制导与姿态控制的相互作用关系	229
7.5.4 姿态控制对迭代制导适应性仿真分析	230
7.6 大质心偏移上面级的姿态控制原理与方法	231
7.6.1 大质心偏移上面级的特点	231
7.6.2 大质心偏移上面级的控制原理	233
7.6.3 大质心偏移上面级姿态控制典型方法	234
7.7 运载火箭姿态控制方法的应用	241
7.7.1 运载火箭的减载控制	241
7.7.2 运载火箭的弹性自适应控制	242
7.7.3 运载火箭的解耦控制	245
7.8 运载火箭姿态控制技术发展趋势	248
参考文献	251

第 1 章 概 论

本章简要介绍运载火箭控制的基本概念，控制系统组成和功能，发展历程和发展趋势。控制系统是运载火箭的“神经中枢”，是火箭稳定飞行和准确到达目标点的保障，而动力学则是控制的基础，正确有效的动力学建模是开展控制系统设计的必要条件。

1.1 一般概念

1.1.1 运载火箭

运载火箭是指自身携带全部推进剂，依靠火箭发动机喷射工质产生推力，克服地球引力，将人造卫星、飞船及其他飞行器送入地球轨道或其他轨道的运载工具。火箭与飞机的最大差别是可不依赖空气在大气层外飞行。

现代火箭的基础是二战时期德国人冯·布劳恩设计的 V-2 火箭。二次世界大战后火箭技术迅速发展，1957 年 10 月苏联用卫星号运载火箭成功发射了第一颗人造地球卫星，1961 年 4 月用东方号运载火箭成功将首位航天员加加林送入太空。美国则在 1969 年 7 月用土星 5 号运载火箭发射了阿波罗 11 号飞船，实现了载人登月飞行。运载火箭及航天事业的迅猛发展，为人类的国防、科技和生产生活带来了很多便利，特别是在通信、气象预报、导航等方面。

以美国的宇宙神 5 火箭为例，运载火箭的各部分组成如图 1-1 所示，运载火箭一般为两级或三级构型，可捆绑或不捆绑助推器。火箭各级之间串联，下一级工作结束并分离后上一级开始工作，助推器则与捆绑芯级并联同时工作，助推器工作结束后与芯级分离。

按系统划分，运载火箭箭上系统可分为结构系统、动力系统、控制系统和测量系统四大系统。

结构系统是火箭各个受力和支承结构件的总成，包括推进剂贮箱、箱间段、级间段、尾段和仪器舱等。结构系统的功能是保证各部段有效连接、按要求贮存推进剂、保持良好气动外形、承受地面和飞行中的载荷，以及保护仪器设备、有效载荷等在可接受的环境范围内工作。

动力系统的功能是产生推力，使火箭产生运动。液体火箭的动力系统一般包括液体火箭发动机和推进剂增压及输送系统。液体火箭发动机将推进剂的化学能转换为动能，通过喷管喷射高温高压燃气产生反作用力，发动机喷管一般可摆动以便进行全箭姿态控制。增压和输送系统对推进剂贮箱进行增压，满足发动机泵的入口压力要求，将推进剂从贮箱输送至发动机。



图 1-1 美国宇宙神 5 运载火箭主要组成部段

控制系统是对火箭所有控制的总成，其作用是控制火箭姿态稳定，使其按所要求的弹道飞行，并控制发动机的关机，达到精确入轨的目标，控制系统包括导航、制导、姿态控制和时序指令四部分功能。导航系统实时获取火箭的飞行状态，包括速度、位置和姿态等，制导系统根据导航系统提供的实时状态及射前装订的目标状态，计算当前的弹道修正

量或最优推力矢量方向,姿态控制则根据制导系统的要求进行姿态定向控制,并克服飞行中的各种干扰保持火箭稳定,时序指令主要根据制导的点火关机特征点完成相应的箭上时间指令动作。

测量系统包括火箭的遥测系统、外弹道测量系统和安全控制系统。遥测系统的作用是把火箭飞行中的各项参数通过无线传输发送至地面站,为分析故障和分析飞行结果提供依据。外弹道测量则是通过地面对火箭的跟踪测量其飞行运动参数,目前主要有光学、无线电和卫星导航接收机三种类型。安全控制系统的作用是在火箭飞行过程中出现故障并可能危及地面安全时,能终止火箭的动力飞行并将其炸毁。

1.1.2 运载火箭控制

运载火箭的任务是将有效载荷送入预定轨道,并满足相应的人轨精度要求。由于目标轨道参数事先装订,而火箭在飞行过程中不可避免会受到各种内外干扰的影响,如高空风、火箭发动机推力偏差等,因此需要对火箭进行控制,保证火箭稳定飞行并尽量减小火箭的人轨精度偏差。

为达到精确控制的目的,首先需要精确获得火箭的实时状态信息,即进行导航。运载火箭的导航一般以惯性导航为主,其他如卫星导航、天文导航等为辅助。惯性导航的特点是全自主、高动态、信息齐全、短时间内精度高,缺点是误差随时间累积,长时间工作精度差,因此需要有其他导航方式补充。另外惯性导航还需要进行初始对准,也是导航系统功能的重要组成部分。

火箭的飞行是一个动态过程,而大部分运载火箭是静不稳定的,如同一个倒立摆,如不进行控制,稍有扰动就可能会姿态失稳,因此控制系统中一个重要的组成部分是姿态控制系统,一方面保持火箭的姿态稳定,另一方面将火箭的姿态快速准确调整到需要的姿态方向,满足制导控制的要求。姿态控制是基于绕质心动力学的力矩控制,一般通过火箭发动机的摇摆实现。

制导的作用是解决出现干扰时火箭偏离预定的轨迹后,如何保证精确入轨的问题。制导系统通过算法比较当前状态和目标状态或预定轨迹的差别,选取合适的路径,给出姿态控制要求,通过姿态控制系统控制火箭姿态,最终实现火箭的质心运动控制。

1.1.3 运载火箭动力学

动力学(Dynamics)是经典力学的一门分支,主要研究作用于物体的力与物体运动的关系,是研究对象运动特性并对其运动进行控制的基础。运载火箭的控制,主要包括导航、制导与姿态控制,与火箭相关的运动主要包括质心运动和绕质心运动。

质心运动动力学研究火箭在各种力的作用下的质心运动,主要关注火箭的速度和位置特性,是运载火箭弹道和制导设计的基础;绕质心运动动力学是姿态控制的基础,主要关注火箭的姿态角及其变化,而由于火箭是结构组成复杂的细长体,其箭体弹性也是动力学的重要组成部分,同样还有火箭的气动特性和贮箱推进剂的晃动特性等。