

长征三号甲系列运载火箭高适应性发展 ——从总体与导航制导控制的视角

姜杰

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 从总体与导航制导控制的视角, 对长征三号甲系列运载火箭发展与成就进行了分析和小结。长征三号甲系列运载火箭, 在长征三号运载火箭解决我国发射高轨道卫星有无问题的基础上, 历经基本能力、适应能力、高适应能力的发展, 具备了高轨道大型卫星运载能力, 突破了从单一轨道面到三维空间各种轨道发射、从高轨卫星转移轨道到工作轨道发射、从地球轨道到地月轨道发射以及从航天技术试验到高可靠工程应用发射等关键技术, 使我国运载火箭整体能力取得了地球全轨道发射、星际轨道发射等跨越发展。航天重大工程和国际商业发射表明, 该系列运载火箭已进入世界高轨道航天器发射的运载火箭前列, 并奠定了进一步开拓发展的基础。

关键词: 运载火箭; 导航; 制导控制; 适应性

中图分类号: V57

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2023) 02-0023-04

High Adaptability Development of LM-3A Series Launch Vehicles: From the Aspects of Vehicle System and Its Guidance & Navigation Control

JIANG Jie

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: This paper analyzes and summarizes the development and achievements of LM-3A series from the aspects of vehicle system and its guidance & navigation control. After the LM-3 launch vehicle established the high orbit launch capacity of China, the LM-3A series launch vehicles developed from basic capacity to high adaptability and obtained the high orbit launch capacity for large-scale satellite. Technical breakthroughs are made on launch capacity for orbits from single orbit plane to multiple orbit planes, from transfer orbit to satellite operation orbit, from earth orbit to lunar transfer orbit, and on mission targets from the ones for technology testing to the ones for high reliability engineering applications. These enhanced the launch capacity of China to the level of all earth orbit injection and interplanetary orbit injection. The experiences of China national projects and international commercial launch service show that this series of launch vehicles has entered the forefront of the global high orbit launch vehicles and laid the foundation for further development.

Key words: Launch vehicle; Navigation; Guidance control; Adaptability

收稿日期: 2023-02-05; 修订日期: 2023-03-10

作者简介: 姜杰 (1960-), 女, 中国科学院院士, 主要研究方向为导航制导与控制、运载火箭总体设计。

E-mail: yhzts@163.com

0 引言

运载火箭能力是一个国家自主进入空间的重要标志,是开展航天活动的基础。我国运载火箭的发展始于20世纪中期,经过50多年的发展,取得了举世瞩目的成就,具备了发射高、中、低不同地球轨道卫星和载人飞船以及深空探测器的能力。截至2022年12月29日,长征系列运载火箭共进行了458次发射,成功率超过96.5%。其中,长征三号甲系列(含CZ-3A、CZ-3B、CZ-3C三型)运载火箭,作为我国现时期发射高轨道卫星的主力火箭,发射数量达132次,成功率超过98%。长征三号甲系列运载火箭是我国首个发射次数过百的单一系列运载火箭(2019年4月20日,CZ-3B运载火箭成功发射第44颗北斗导航卫星,这是长征三号甲系列运载火箭的第100次发射),圆满完成探月、北斗、通信和气象等国家重点航天工程及国外商用发射任务,该系列运载火箭已成为我国发射轨道种类最多、适应能力最强、发射密度最高的火箭,极大促进了我国运载火箭产业化、商业化和国际化进程,提高了我国火箭在世界火箭中的地位。

1 CZ-3A系列运载火箭发展背景

1984年4月8日,长征三号(CZ-3)运载火箭成功发射地球同步轨道东方红二号试验通信卫星,使我国具备了高轨道卫星的发射能力。随后,研制CZ-3A火箭、发射中国第一型实用通信卫星(“东方红三号”)的任务如期而至。CZ-3A系列运载火箭的发展,既是我国实用卫星通信需求拉动的结果,也与当时中国航天酝酿打入国际发射市场以及国际发射市场出现的机遇有关。

2 CZ-3A系列运载火箭发展

2.1 基本能力发展

CZ-3A系列运载火箭能够在20世纪90年代世界运载火箭中达到高轨道运载能力世界第三(CZ-3B火箭),而且历经30年还如此有生命力,令我们这个年龄的、当年加入这个团队中的晚辈,对当年决策者的远见、胆识和开创精神敬仰不已。

1) 定位。CZ-3A系列运载火箭是在CZ-3火箭成功后,我国研制的发射高轨道大型卫星的三级系列运载火箭。尽管CZ-3A火箭当时的首要任务

是发射2.0 t重的东方红三号通信卫星,但分析了国外运载火箭现状和发展趋势,将它定位于标准地球同步转移轨道(GTO)2.5 t的中等运载能力档次。以此为基础,捆绑液体助推器,再形成两个衍生型火箭,成为GTO运载能力为2.5 t、3.5 t、5.0 t的系列运载火箭。这个定位奠定了CZ-3A系列运载火箭的生命力所在。

2) 走出去。CZ-3A系列运载火箭的诞生源于国内与国外两个市场的需求。可以设想,1986年CZ-3A火箭刚立项,还处在技术攻关研制阶段,航天人就拿着它的衍生型CZ-3B、CZ-3C火箭的设计图纸,去与美、欧航天大国和组织谈判签订了4个卫星发射服务合同,并促使另两个型号不到3年就实现了立项,全面开展了研制工作。这需要很大的勇气,克服很大的困难!

3) 敢于创新。做出了瞄准世界运载火箭技术前沿的选择。如大推力氢氧发动机,创新发展了世界先进的螺旋管束高空大喷管技术,解决了三级大推力难点,不仅填补了我国在这一级别氢氧发动机的空白,而且20多年后又改进研制作为新一代大型运载火箭长征五号需要的发动机,很有生命力;采用对液氧贮箱增压的冷氢加温增压系统,当时只有美国拥有这一技术,我国是世界上第二个自主研制成功的,仅此一项就提高火箭运载能力200 kg;动调陀螺四轴惯性平台,突破了任意框架角下平台启动和稳定的难题,国内首次实现了俯仰、偏航、滚动均为大角度范围的敏感输出,提高了精度和适用性,又大幅减小了结构质量,取得了20年来我国在火箭惯性器件方面的重大突破;低温氢气高效能源双摆伺服机构,攻克了高速旋转下的干摩擦、自润滑、高低温度区交变工作的技术难关。这4项关键技术达到或接近当时世界同类先进水平。1994年CZ-3A火箭首飞成功,1997年CZ-3B火箭发射国际通信卫星成功,2008年CZ-3C火箭发射天链一号中继卫星成功。后经进一步改进,CZ-3A系列运载火箭达到GTO 2.6 t、3.9 t和5.5 t的运载能力,标志着我国火箭进入世界高轨道大型卫星运载火箭的行列。

2.2 适应能力发展

2.2.1 实现了火箭自主发射各种轨道航天器的能力

一个国家进入空间能力的重要标志是火箭自主发射各种轨道,要求火箭具备三维大姿态飞行

控制能力。

难点在于,火箭俯仰、偏航和滚动三通道姿态控制系统是一个非线性时变的多变量交连耦合系统;且多级火箭作为刚体运动、弹性振动和推进剂晃动的复合体,在空间复杂环境飞行时各种干扰严重制约了控制性能。

我们的研究解决了火箭多维非线性时变交连耦合系统的姿态控制问题。揭示了火箭三维大姿态飞行控制机理,建立了火箭姿态交连解耦控制方法,成功设计出火箭三维大姿态飞行控制系统。在工程上实现了火箭从单一轨道面进入三维空间机动飞行控制“质”的变化。

CZ-3A 系列运载火箭三维大姿态飞行控制技术的突破,为我国火箭自主发射各种轨道航天器做出重要贡献,成果推广于多型长征火箭。

2.2.2 提升了火箭控制系统的可靠性

控制系统可靠性制约着我国运载火箭的产业化进程(早期统计表明,控制系统故障数占火箭的 40%以上)。1996 年,CZ-3B 火箭首飞时,惯性平台一个器件失效导致发射失败。所以实现控制系统系统级冗余至关重要。

难点在于,影响火箭飞行成败的高危害度单点失效环节,不可能依赖提升器件可靠性来解决,而受火箭结构、质量及成本等限制,传统的设备冗余方法也难以实施。我们的研究突破了冗余备份思想和设备功能界限,自主创新提出以火箭控制信息冗余为核心的控制系统冗余方法。提出了基于火箭异位信息冗余构架的速率陀螺冗余方法,提出了基于火箭异构信息冗余构架的惯性平台-激光惯组主从冗余方法,提出了基于三模箭载计算机冗余管理的系统级冗余方法。在此基础上创建了控制系统最大限度利用火箭测量信息的信息冗余构架,实现了多源信息融合、实时故障诊断和系统在线重构于一体的控制系统系统级冗余。

运用上述技术消除了 CZ-3A 系列运载火箭控制系统全部高危害度单点失效环节,开创了国内火箭低成本实现高可靠性的途径,大幅提升了火箭飞行可靠性,对该系列运载火箭 2000 年以来的高发射成功率,起到了至关重要的作用,有力保证了探月、北斗、通信、气象等重大航天工程及国际商业发射计划的实施。上述技术成果已在多型长征火箭中推广应用。

2.2.3 实现了中高轨大型星座快速组网发射技术

北斗导航卫星工程是我国迈出多轨道面、大

规模复杂构型星座部署的第一步,要求快速组网发射,且必须突破变轨道面、高空风补偿、一箭双星和高密度发射技术。

我们的研究解决了快速发射组网方案的关键技术。提出并实现了火箭变射向控制方法,提出并实现了高空风补偿姿态控制减载技术,提出并实现了高轨道一箭双星发射技术。2010—2012 年 CZ-3A 系列运载火箭以高密度发射实现北斗二号地球静止同步、地球倾斜同步和地球中圆轨道 3 种轨道 14 星组网,实现了大型星座组网发射的技术跨越。

2.3 高适应能力发展

2.3.1 突破了直接地月转移轨道发射技术

火箭直接地月转移轨道发射作为月球探测器奔月的最小能量轨道,是探月工程实现“落月”“返回”两大目标必须突破的关键技术,也是未来载人登月和其他深空探测工程必须采取的途径。

难点在于,火箭发射探测器直接进入地月转移轨道的时机,从发射卫星进入地球转移轨道的一个轨道面变为由 6 个轨道根数约束的一个时空点,任何超差都将使探测器错过与月球交会。为降低工程风险,嫦娥一号任务为实现我国首次“绕月”目标,采用成熟的火箭地球转移轨道发射,由嫦娥一号探测器经 7 天调相轨道变轨飞行再进入地月转移轨道;嫦娥二号任务的重要目标是实现直接地月转移轨道发射,为探月工程实现“落月”“返回”奠定基础。

我们的研究解决了火箭直接地月转移轨道发射技术,建立了地月转移轨道设计方法,实现了火箭地月转移轨道设计技术,建立了火箭组合导航方法,实现了火箭远地点约 38 万千米的地月转移轨道高精度制导控制,实现了连续 3 天火箭“多窗口”地月转移轨道和“零窗口”发射技术,保证了探月工程实施的可靠性要求。

CZ-3C、CZ-3B 火箭分别于 2010 年 10 月 1 日、2013 年 12 月 2 日、2014 年 10 月 24 日、2018 年 12 月 8 日采用直接地月转移轨道发射嫦娥二号、嫦娥三号、探月三期嫦娥五号再入返回试验器、嫦娥四号探测器,实现了准时发射、准确入轨的工程任务要求,保障了嫦娥三号、嫦娥四号成功落月以及嫦娥五号返回的关键技术验证。探月工程鉴定委员会评价:“掌握了探月‘落月’‘返回’和载人登月必须突破的轨道设计等关键技术,轨

道设计、发射技术和入轨精度达到国际先进水平。”

探月工程突破了我国运载火箭直接地月转移轨道发射技术，实现了运载火箭发射探测器直接进入星际转移轨道的技术跨越，为我国未来深空探测奠定了技术基础。

2.3.2 突破了高轨道卫星直接入轨发射技术

火箭发射高轨道卫星直接进入工作轨道属于国家快速进入空间能力，可实现航天器快速部署，以及卫星平台小型化发展，降低航天发射成本。北斗全球导航系统30余颗卫星星座组网，必须具备这种能力。

火箭发射高轨道卫星直接入轨，依靠火箭基础级+上面级组合发射方式实现。上面级兼具运载器与航天器的技术特性，相对火箭飞行时间数十分钟、飞行高度几百千米，上面级要在复杂高层空间环境飞行数小时、几万千米，必须解决上面级长时间飞行“自主、准确、可靠”三大难题。

我们的研究提出并实现了组合导航新体制，创新了自适应制导方式，攻克了上面级数小时、数万千米全程自主高精度导航、制导与控制技术，突破了适应高层空间辐射和微重力环境等一系列关键技术，提升了控制系统高可靠水平，研制出国内首个火箭上面级远征一号。

2015年，1枚长征三号乙/远征一号（一箭双星）、1枚长征三号丙/远征一号及1枚长征三号乙火箭成功发射4颗北斗全球卫星导航系统试验卫星，实现了我国运载火箭发射高轨卫星直接入轨的技术跨越，拓展了火箭发展新领域；2017—2019年，长征三号乙/远征一号（一箭双星方式）共12枚火箭发射北斗三号全球卫星导航系统24颗组网卫星直接入轨，成功完成了北斗全球导航系统中轨道卫星的组网发射。

3 结束语

长征三号甲系列运载火箭，在长征三号火箭解决我国发射高轨道卫星有无问题的基础上，历经基本能力、适应能力、高适应能力的发展，取得了高轨道大型卫星运载能力，突破了从单一轨道面到三维空间各种轨道发射，从高轨卫星转移轨道到工作轨道发射，从地球轨道到地月轨道发射，以及从航天技术试验到高可靠工程应用发射等关键技术，使我国运载火箭整体能力取得了地球全轨道发射、星际轨道发射等跨越发展。航天重大工程和国际商业发射表明，该系列运载火箭已进入世界发射高轨道航天器的运载火箭前列，并奠定了进一步开拓发展的基础。

引用格式：姜杰. 长征三号甲系列运载火箭高适应性发展——从总体与导航制导控制的视角[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(2): 23-26.

Citation: Jiang J. High adaptability development of LM-3A series launch vehicles: from the aspects of vehicle system and its guidance & navigation control [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(2): 23-26.