

中国运载火箭技术发展

鲁宇

(中国运载火箭研究院, 北京 100076)

摘要: 中国航天运输系统建设起步于20世纪60年代, 经过近50年的发展, 取得了举世瞩目的成就, 建设了布局合理、覆盖全面的空间运输系统体系, 能够将不同有效载荷发射到低、中、高不同轨道。国际合作方面, 在搭载发射、商业卫星发射服务和在轨交付3个方面也取得了一定成绩。对中国航天运输系统发展成就进行了总结, 对航天运输系统未来发展特别是人工智能技术应用进行了展望。

关键词: 运载火箭; 国际合作; 低成本; 人工智能

中图分类号: V448.22

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2017) 03-0001-08

Space Launch Vehicle's Development in China

LU Yu

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

Abstract: China space transportation system started in 1960s and has made remarkable achievements after 50 years development. China has established a complete space transportation system with full spectrum of launch vehicles, enabling the launch of any payload to any orbit. China is willing to carry out international cooperation and helps newly emerged space countries develop their own space technology. This paper mainly summarizes the development achievements of China space transportation system and gives a prospect on its future development, especially on artificial intelligence technology.

Key words: Launch vehicle; International cooperation; Low cost; Artificial intelligence

0 引言

中国的航天运输系统目前的主要代表是长征系列运载火箭、远征系列轨道转移运载器(上面级)及可重复使用运载器。确保安全、可靠、快速、经济、环保地进出空间, 推进太空探索技术发展, 促进人类文明的进程, 是中国航天运输系统的发展目标。

中国航天运输系统的建设起步于20世纪60年代, 经过近50年的发展, 取得了举世瞩目的成就, 具备强大的进入空间和开发、利用空间的能力, 是世界上少数几个近地轨道运载能力超过20t、具

备载人发射能力和进行地外天体着陆探测的国家。中国航天运输系统的发展, 不但为中国经济建设奠定了基础, 也为太空探索和国际商业航天发展贡献了力量。中国航天一直有能力、有意愿充分开展国际合作, 与世界各国一起共同发展航天技术, 共享发展成果。

1 中国航天运输系统取得的成绩

中国长征系列运载火箭发展共经历了5个阶段, 研制了4代17型运载火箭, 具备将不同有效载荷送入低、中、高不同轨道的能力^[1]。长征系列运载火箭的发展经历了从常温推进剂到低温推进

收稿日期: 2017-08-08; 修订日期: 2017-09-01

作者简介: 鲁宇 (1958-), 男, 研究员, 中国运载火箭技术研究院科技委主任。

剂、从串联到并联、从一箭单星到一箭多星、从载物到载人、从末级一次启动到多次启动的技术跨越。截止到2017年6月底,中国长征系列运载火箭已飞行249次,发射成功率96%。运载火箭技术的发展为航天技术提供了广阔的舞台,推动了中国卫星及其应用以及载人航天技术的发展,有力支撑了以“载人航天工程”“北斗导航”和“月球探测工程”为代表的中国国家重大工程的成功实施,为中国航天的发展提供了强有力的支撑。

1.1 完成四代运载火箭研制

第一代运载火箭包括CZ-1、CZ-2,是根据液体导弹改进而来,具有明显的武器特点。第一代火箭解决了中国运载火箭有无问题,运载能力等总体性能偏低,使用维护性差,发射场测试发射周期长,采用模拟控制系统。

第二代运载火箭包括CZ-2C系列、CZ-2D、CZ-3、CZ-2E,仍然带有液体导弹的痕迹,在第一代火箭的基础上进行了技术改进。第二代火箭以原始状态CZ-2C火箭为基础改进,一、二级与CZ-2C火箭基本相同,采用有毒推进剂(四氧化二氮和偏二甲肼),采用数字控制系统。

第三代运载火箭包括CZ-2F、CZ-3A系列、CZ-4系列。第三代火箭在第二代基础上持续开展可靠性增长和技术改进,采用系统级冗余数字控制系统,增加了三子级,任务适应能力大大提高。为满足载人航天任务需求增加故检逃逸系统而研制定载人火箭,大幅度提升任务可靠性,并且简化发射场测发流程,提高使用维护性能。

第四代(也称为新一代)运载火箭包括CZ-5、CZ-6、CZ-7、CZ-11等,采用环境友好的无毒无污染推进剂,采用高可靠总线技术,最大运载能力得到了本质性提升。

1.2 助推中国航天完成3个标志性里程碑

发射人造地球卫星、载人飞船和月球探测器是中国航天发展的3个标志性里程碑。1970年4月24日,中国用长征一号(CZ-1)运载火箭成功将东方红一号卫星发射到近地轨道,成为世界上第5个用自制火箭成功发射本国卫星的国家。1999年CZ-2F火箭成功发射神舟一号试验飞船,中国成为世界上第3个自主发展载人航天技术的国家。2003年10月中国首次载人航天成功。2012年6月首次载人交会对接成功。2007年10月,CZ-3A火箭成功将中国首颗月球探测卫星“嫦娥一号”送

入预定轨道,标志着中国航天事业成功跨入深空探测的新领域。

1.3 完成载人、探月、北斗等一系列重大工程

1) 载人航天工程: CZ-2F运载火箭完成13次发射,成功将14人次航天员送入太空,发射2次目标飞行器,成功完成交会对接任务,为长期在轨、有人值守的空间站建设打下坚实基础。

2) 探月工程: CZ-3A、CZ-3B和CZ-3C火箭完成4次探月飞行器发射,2013年12月发射的嫦娥三号探测器实现了中国首次地外天体软着陆;后续CZ-5运载火箭还将执行采样返回任务。

3) 北斗导航工程: CZ-3A系列火箭+远征系列上面级完成18箭21颗北斗导航卫星发射,完成了北斗区域导航系统建设,为全球导航系统建设奠定了基础,将为中国和周边国家经济建设提供优质服务。

4) 其他重大工程和项目: 长征系列火箭还成功将高分辨对地观测卫星、风云系列气象卫星和广播通信卫星送入预定轨道,为中国社会和国民经济发展做出了贡献。

2 中国航天运输系统具备的能力

2.1 自由进出空间能力

长征系列运载火箭包括小型火箭CZ-6、CZ-11(固体),中型火箭CZ-2系列、CZ-3A系列、CZ-4系列、CZ-7,大型运载火箭CZ-5系列;同时,中国还研制了快舟等固体运载火箭。长征系列运载火箭具备发射低、中、高不同轨道,不同类型卫星、探测器、空间实验室、载人飞船及货运飞船的能力,LEO运载能力25t,GTO运载能力14t,运载能力和入轨精度均处于国际先进水平。长征系列运载火箭既能实施一箭一星发射,也能进行一箭多星快速部署;既能实现转移轨道发射,也能直接将卫星送入工作轨道。总之,现有长征系列火箭具备将实用航天器发射到任何空间轨道的能力^[2]。

2.2 自主载人发射能力

中国是世界上第3个具备自主载人发射能力的国家,CZ-2F载人运载火箭发射成功率100%。航天飞机退役后,中国的CZ-2F运载火箭和俄罗斯联盟号火箭是目前仅有的两型具备载人发射能力的运载火箭。

CZ-2F用于发射载人飞船,是为载人航天而研制的具有特殊要求的运载火箭。与普通商业运载火箭相比,它要求具有更高的可靠性和安全性。通过采用系统级冗余技术使飞行可靠性达0.97以上,远远高于一般发射商业卫星等非载人用途的运载火箭0.91~0.93的可靠性指标。同时,CZ-2F火箭配备专用的故障检测处理系统和逃逸系统,确保故障情况下航天员的生命安全,使CZ-2F运载火箭安全性指标超过0.997。

2.3 高密度发射能力

长征系列运载火箭采用批生产模式,具备高密度发射能力。2011年~2017年5月底,长征系列运载火箭共完成了110次发射,年平均发射超过16次,成功率超过97%,均处世界前列。CZ-3A系列火箭在西昌卫星发射中心创下了截至目前中国最短连续发射间隔周期纪录。

高密度发射能力是不断进行技术改进与突破的结果。统一运载火箭状态,使长征系列火箭主要系统和单机具备统筹批产条件;单一构型系列运载火箭之间统一箭体结构、测量系统状态,弱化发次代号,使其具备进行批生产条件。

高成功率是不断提升系统级试验能力的结果。突破深低温领域试验关键技术,建成中国首个增压输送系统系统级试验平台,能够完成冷氢增压冗余系统的原理性试验和液氢温区低温系统试验。

高频度发射是不断缩短发射场流程的结果。通过优化靶场测试项目、开发自动化判读平台等措施,使火箭靶场测发时间由50天缩减到20余天。同时,对与发射流程有重要影响的单机和系统进行冗余改进,大幅提升了发射可靠性,保证火箭准时发射的同时,也提升了运载火箭窄窗口、零窗口发射能力。

2.4 深空探测与空间轨道转移能力

高轨运载火箭具备深空探测飞行器发射能力,长征系列火箭地月转移轨道(LTO)运载能力为8.2t,地火转移轨道(MTO)发射能力为5t。远征系列上面级与长征系列运载火箭组合,主要完成高轨卫星直接入轨发射任务以及多星快速部署发射任务。在上面级的研制中,突破先进热控、轨道自规划等技术,具有多次起动、长时间工作、自主飞行等特点。目前,远征系列上面级(YZ-1、YZ-2、YZ-3)最长在轨工作时间达到48h,发动机最多启动次数达到20次,使用灵活,任务适应

性强,被誉为“太空摆渡车”,大幅提升中国航天运输系统进入空间的能力。

3 中国航天运输系统的国际合作

中国航天运输系统的国际合作主要体现在搭载发射、商业卫星发射服务和在轨交付3个方面。截至目前,长征火箭共完成55次国际合作发射,为20个国家和地区发射了64颗有效载荷^[3]。

3.1 搭载发射

1987年8月,CZ-2C运载火箭第一次为法国马特拉公司成功搭载发射微重力装置,开启了中国航天国际合作的历史。通过CZ-2C火箭发射返回式卫星数次搭载任务,中国运载火箭对国际合作项目有了更明晰的认识,对国际合作模式有了更深入的了解。

搭载发射是中国商业发射的起源,1990年7月16日CZ-2E火箭首飞除验证主载荷发射能力外,还成功将搭载的巴基斯坦科学试验卫星送入预定轨道,对后续推动第三世界国家发展航天起到了重要的促进作用。

搭载发射具有成本低、验证环境真实等优势,是新技术、新设备研制过程中最有效的验证方法之一。2014年10月,利用嫦娥五号返回飞行试验器发射任务,CZ-3C火箭成功搭载了卢森堡4M小卫星。该搭载载荷采用不分离方案,与火箭末级一起飞往月球,经受了地月转移轨道飞行环境验证,为后续扩展搭载发射国际合作提供了又一经典范例。

3.2 商业卫星发射服务

对外商业卫星发射服务是中国航天运输系统国际合作主要形式。1990年,长征三号发射亚星一号拉开了长征系列运载火箭对外商业发射的序幕。中国第一型液体捆绑火箭CZ-2E火箭也是专门为完成对外商业发射任务而研制的。

20世纪末,长征系列运载火箭对外发射服务项目生机勃勃,中低轨方面以CZ-2C运载火箭发射铱星为代表,高轨方面以CZ-2E和CZ-3A系列发射澳星、亚星等项目为代表。长征系列火箭以其较高的性价比享誉世界,中美两国在航天领域的合作也成为助推全球经济增长和社会发展的力量,一时被传为佳话。进入21世纪,随着冗余技术的大量应用,长征系列火箭可靠性进一步提高,2011年长征三号乙火箭成功发射欧洲通信

卫星组织的 W3C 卫星，再次证明长征系列火箭的可靠性和履约能力。

通过对外商业卫星发射服务任务，中国航天进一步与世界接轨，推动了长征系列运载火箭与卫星间接口的统一和标准化，推动了运载火箭轨道设计、远场安全性分析、分离分析、载荷耦合分析、热耦合分析等工作的深入研究，为推动中国航天运输系统发展起到了积极作用。同时，中国积极将这些研究成果与世界共享，牵头完成环境参数遥测数据处理方法、远场安全性分析要素等国际标准制定。

3.3 在轨交付

中国航天在运载火箭、卫星、载人飞船等领域全面发展，建制齐全，这使得它能够为用户提供火箭+卫星的在轨交付一揽子解决方案。

在 SSO 方面，中国具备成熟的遥感卫星技术，2012 年发射的委内瑞拉遥感卫星采用 CZ-2D 发射，是 SSO 轨道在轨交付任务的典型代表，不仅为相关国家航天技术发展，更为国民经济建设做出了贡献。

在 GTO 方面，随着 5t 级东方红四号卫星平台的日臻成熟，中国航天跻身世界主流商业通信卫星市场。为更好地执行东方红四号卫星发射任务，CZ-3B 运载火箭助推器和芯一级进行了加长改进，标准 GTO 运载能力由 5.1t 提升至 5.5t。因此，东方红四号平台卫星与 CZ-3B 组成最佳搭档，共同参与国际竞争，以其高性价比和在轨交

付等优点赢得了市场认可。目前以此种方式，已经向尼日利亚、委内瑞拉、玻利维亚、白俄罗斯、老挝等国家成功在轨交付通信卫星，并将于 2018 年向阿尔及利亚交付通信卫星。相关国家因此实现了自己的航天梦，为国民的生活品质提升奠定了基础。

4 未来探索发展

4.1 型谱完善

根据对 2030 年左右全球航天器发展的预测分析，对于未来潜在任务，现有长征系列运载火箭仍然存在能力断档。后续，需要研制 700km SSO 运载能力 3t~4.5t 的中低轨运载火箭 (CZ-8)、GTO 运载能力 6.5t~7t 的高轨运载火箭 (CZ-832C)，需要研制 LEO 运载能力 140t、LTO 运载能力 50t 的重型运载火箭 (CZ-9)^[4]。

目前，CZ-8 火箭已经立项，CZ-832C 火箭正在开展方案论证工作，这两型火箭是增强我国运载火箭商业竞争力的重要构型，基础级仍然采用 3.35m 直径，可充分借用 CZ-7 火箭芯级成熟技术，末级采用氢氧模块。CZ-9 火箭方案深化论证和关键技术攻关已经立项。CZ-9 火箭为三级半构型，芯级最大直径 10m 级，是完成深空探测、载人登月和载人登火、空间基础设施建设（如空间太阳能电站）等任务的重要支撑，将加速航天强国建设步伐。

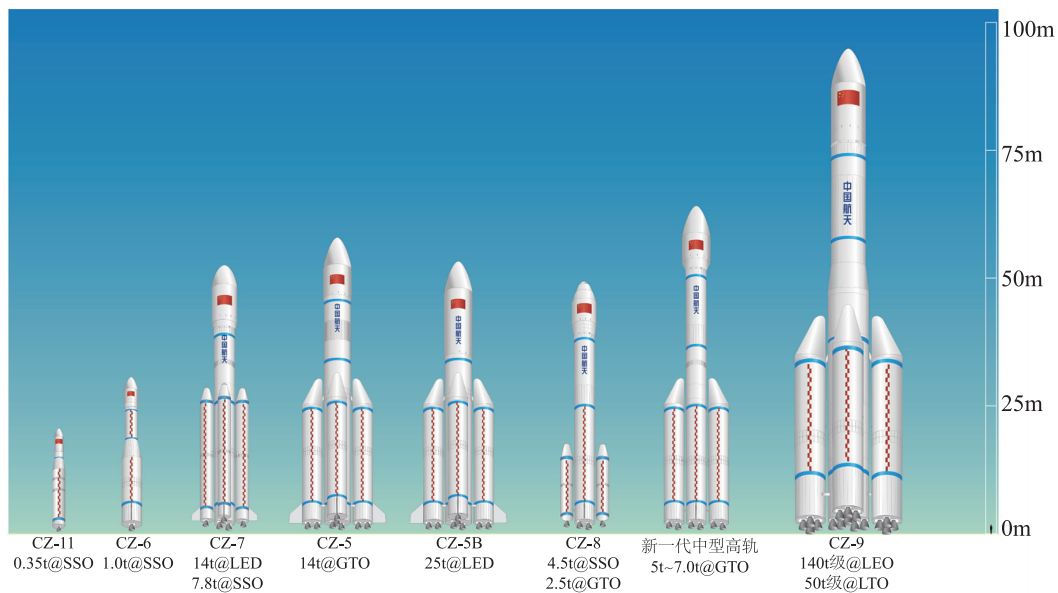


图 1 新一代运载火箭型谱

Fig. 1 New generation launch vehicle series

通过以上火箭研制,可以构建体系完整、分布合理、性能卓越的航天运输系统,提升中国进入空间、探索空间的能力,支持深空探测、空间科学和各种航天发射活动,满足经济、社会发展需要,为建设航天强国提供有力支撑。

4.2 低成本改进

低成本进入空间永远是每个航天国家和企业追求的目标。美国 SpaceX 公司的 Falcon9 火箭从设计、生产、试验和管理各个维度采取低成本措施,较低的发射成本给当前活跃于发射服务市场的主流火箭带了较大竞争压力。欧洲在 21 世纪初就开展了未来运载器预研项目 (FLPP) 研究,该项研究主要目标是降低运载器成本^[5]。当前,各国正在研制的下一代火箭也将通过更先进的技术和管理方法来降低成本,这些火箭主要包括美国的火神火箭、欧洲的阿里安 6、日本的 H3 以及俄罗斯的安加拉。到 2020 年左右,各国低成本下一代火箭将陆续首飞,我国长征系列火箭将面临严酷的竞争。

4.2.1 技术改进

现役火箭低成本改进是提升竞争力的当务之急,已经投入发射应用的第二代到第四代运载火箭都可以从总体、电气、结构、动力等方面开展低成本改进,进一步提升我国长征系列火箭国际竞争力。

1) 开展总体优化设计。总体各专业从传统的串行设计改为多专业并行协同设计,开展基于主模型的总体协同设计,规范专业间数据接口。另一方面,结合飞行结果,开展参数辨识。参数辨识与总体协同设计结合起来,尽可能消除各专业不必要的设计余量,降低火箭载荷,进一步提高结构效率,提高运载火箭综合性能。

2) 开展低成本电气系统设计。取消非必须的冗余设备,取消非必须的遥测参数及测量设备;部分电气系统产品采用民用产品,研究并形成工业级电子元器件采购与筛选控制方法;开展电气系统一体化设计,实现各系统模块集成和优化,重要模块和单机实现冗余和重构,降低成本的同时保证系统可靠性。

3) 开展低成本动力系统设计。增压系统设计方面,可采用自生增压方案,减少全箭气瓶数量;开展以 YF-100 为代表的发动机推力提升、总装泵后摆改进、结构减重和简化使用维护流程研究、

涡轮泵优化改进方案产品冷试验证、流量调节器改进方案冷调试验研究,提升发动机性能,简化使用维护流程。

4) 开展低成本结构系统设计。例如液氧箱可以改用柱段不绝热,取消柱段发泡工艺;对部分结构的环境防护措施进一步优化。提高生产工艺水平,如贮箱壁板/箱底结构改为等厚度壁板,贮箱筒段壁板可采用光筒结构,前后底采用等厚结构,等厚结构将简化设计流程;贮箱采用先进的搅拌摩擦焊工艺替代现有的熔焊自动焊工艺;采用大厚度板材代替锻件工艺从而取消热处理等工序;部分零部件采用激光增材 (3D 打印) 制造技术;贮箱箱底采用旋压整体成型技术。通过以上措施,可显著提高生产效率,缩短生产周期,降低成本。

除此之外,通过系统研究目前测试发射流程设计的关键要素,改进不必要和不优化的环节,应用新方法、新技术、新手段,采用远程快速测试发射技术,提高测试效率,降低使用成本。

4.2.2 颠覆性技术发展

颠覆性技术是指以意想不到的方式取代现有主流技术的技术。颠覆性技术的应用,会使得运载火箭成本呈数量级的降低,性能大幅提升。未来运载火箭各系统均有颠覆性技术的应用场景。箭体结构方面,采用高强度纳米材料,充分发挥纳米材料高强度优势,大幅降低结构质量。电气方面,采用抗干扰的可靠通信手段,全箭采用无电缆化设计,保证安全的同时,也可传递海量数据,降低电气系统成本的同时,大幅降低电气系统质量,提升运载火箭效率。发动机方面,突破新型动力技术,可使比冲等性能指标有质的飞跃。

4.3 可重复使用运载器

重复使用运载器具有廉价、快速、机动、可靠等特点,是航天运输系统的重要发展方向,也是降低发射成本的重要途径。通过对国内外发展情况的分析,结合我国重复使用运载器的技术研究现状及技术基础,充分借鉴美国在发展重复使用运载器过程中由于过于追求单级入轨的先进指标几经挫折的经验教训,提出我国发展重复使用运载器“三步走”的发展思路:

第 1 步:火箭动力的助推器、或第一级可重复使用实现工程应用;对于第 1 步,已经开展了部分

关键技术研究,包括伞降回收和垂直起降技术,完成部分试验验证,一些关键技术取得突破。

第2步:火箭动力两级入轨完全可重复使用运载器实现工程应用。

第3步:组合动力两级入轨完全可重复使用运载器具备工程应用能力。

4.4 智能技术应用

经过60多年的演进,特别是在移动互联网、大数据、超级计算、脑科学等新理论新技术的驱动下,人工智能发展进入新阶段,呈现出深度学习、跨界融合、人机协同、群智开放、自主操控等新特征^[6]。可以预见,未来人工智能也将会是运载火箭的属性之一,并涵盖从设计、制造、飞行、进化、管理等全寿命周期各环节。

4.4.1 智能设计与验证

运载火箭设计是典型的系统工程,涉及多种学科和专业,参数模型复杂,系统间接口数据多,研制流程长。我国运载火箭目前采用数学模型的专业设计方法,文件传递的接口传递方法,以及总体方案优化—分系统独立设计—产品集成测试的“总—分—总”的研制流程,已难以适应新型号研制和精细化设计的需求。如模型上,新一代运载火箭采用摆助推技术后,重新推导姿态控制方程前后历时2年之久;接口传递上,由于文件传递迭代过程长,各系统均只能基于标准工况在大偏差下开展设计,设计裕度大;研制流程上,产品集成测试是对总体方案优化的最终验证,缺乏有效的中间验证环节,验证周期极长。

运载火箭智能设计体系围绕数字化研制流程,结合虚拟现实智能建模技术,开展基于虚拟样机,统一数据源下的系统设计和“虚实结合”的试验手段。由数学模型与虚拟样机结合代替单一数学模型,由数据+模型驱动代替设计文件驱动,由“虚实结合”试验代替实物验证。以产品CAE模型为基础,通过参数驱动,建立集成产品物理结构、电气性能等虚拟样机,完成总体、分系统、设备的性能仿真,大幅增强适应新技术能力。协同研制平台统一数据源,实现迭代的自动化和设计精细化,大幅提升设计效率和精细化水平。通过虚实结合的试验手段,提早开展仿真验证,将“总—分—总”的“V形”研制流程变成随时在验证、时常在迭代的“W型”流程,缩短验证周期,降低方案可能反复的风险,提升设计效率。

4.4.2 智能结构与智能制造

智能结构是集成传感器、驱动装置、微处理器等元器件或记忆合金、功能复合材料等特殊材料而成的结构,具备感知外部环境并主动响应的能力,又称为自适应结构。利用智能材料感知、自适应变形和响应的性能,用于箭上结构的损伤检测、主动损伤抑制和自诊断,仪器设备的主动减振、减噪控制,以及将智能结构用于箭上有动作的机构中,实现机械式低冲击分离或空间交会对接和组装等,还可以在可重复使用火箭回收过程中,实现主动气动外形控制以适应再入气动和回收姿态控制的需要。

在“中国制造2025”等国家战略的指引下,智能制造成为军工制造业发展的重要方向。采用生产装备智能物联与云化数据采集、生产线动态智能调度等技术,建设智能生产线和智能工厂^[8]。在工业4.0制造体系下,打通数字化设计与制造的通道,实现设计和制造的一体化。构建智能制造的基础环境及标准体系,建设智能管控系统,搭建基于模型的智能化虚拟制造平台,大量采用智能化技术装备,大幅提升航天产品质量和制造能力。

4.4.3 基于故障诊断和重构的智能飞行

目前国内运载火箭的飞行程序均是基于运载火箭各部件工作正常的假设,在部分飞行试验中暴露出当前方法的严重不足,迫切需要实现运载火箭由自动飞行到智能飞行的跨越。

未来运载火箭基于智能技术进行故障诊断与重构是重要的发展方向,通过部分故障下的系统重构和任务重构,实现智能飞行。首先,根据发生的故障,充分采用智能技术,根据系统模型综合分类、聚类、关联、孤立点分析等数据挖掘和建模分析完成故障诊断和定位。然后采用神经网络自适应控制方法等进行系统重构,保证火箭稳定飞行,为任务重构提供基础。任务重构是智能飞行的主要目标,基于火箭当前信息和目标轨道信息,决策当前任务是否能够正常完成,进而决策是否进一步进行轨迹在线生成;对无法完成当前任务的,在线生成降级任务目标,如从LTO轨道降级到LEO轨道,有效载荷在降级的轨道上通过其他方式入轨或者等待救援。无法完成降级任务的,箭上决策进入再入自毁及残骸落区规划流程。

4.4.4 平行智能镜像系统

构建运载火箭天地平行智能镜像系统,可以

和箭上故障诊断与重构系统协同工作,对于飞行时间短的任务,以箭上决策为主;飞行时间长的任务,以地面平行智能镜像系统决策为主。火箭飞行过程中,根据飞行遥测数据进行实时状态模拟和地面故障诊断,利用地面远强于箭上的高速计算能力,辅助以增强智能技术,开展故障信息深度挖掘,在故障情况下进行辅助判断,为地面操作人员紧急决策提供支持,执行系统重构及任务重构。

无飞行任务时,可开展镜像系统的深度学习,提升系统智能水平;亦可利用镜像系统开展人员培训,提升设计师及测控队伍能力。利用镜像系统开展多种方案的比对,多种新技术的试用,实时、随机注入多种故障,对方案和新技术的鲁棒性进行验证,对火箭瓶颈环节进行识别和持续改进,利用精确的分析和有效的验证不断提升火箭智能化水平。

4.4.5 智能管理

我国航天在60年的发展历程中,始终贯彻着基于文档的航天系统工程开发和组织管理方法。随着生产力的发展,该模式存在一定弊端,如信息的完整性、一致性及信息之间的关系难于评估和确定,难以描述复杂的活动,更改影响分析的全面性不足,各环节横向和纵向层级较多,导致信息及时性和准确性难以保证;需要开展基于模型的系统工程(MBSE)与智能管理研究,建立运载火箭研制中的需求-功能-行为-结构模型,有效传递系统工程研发中的动态信息,实现系统设计一体化,并提升系统研发的可重用性,增强研发流程的显性化表述与再造,确保全程信息传递的一致性,从而创建高效、智能、协调、集约的运载火箭研发体系,实现我国运载火箭全生命周期、全要素数字化智能管理。

4.5 未来国际合作设想

未来,中国可以在商业发射、航天技术联合研究、国际发射合作、载人及空间站等多个维度与世界各国开展合作。首先,继续发挥中国航天运输系统布局合理、覆盖全面、能力大、适应性强的优点,向全世界开放,提供商业发射服务。中低轨主流卫星发射任务将主要采用CZ-8完成,微小卫星专属发射可以采用CZ-11,高轨发射任务将由CZ-3A系列火箭、新一代中型高轨火箭和CZ-5火箭完成。火箭和上面级结合能够提供更灵

活的入轨方式,CZ-3B+上面级和CZ-5+上面级火箭发射GEO任务运载能力分别为1.8t和4.5t,能够提供多轨道面部署和星座、星群发射服务,提升任务适应性。完成主星发射任务的同时,也可充分发挥“太空顺风车”的优势,通过定期公布并及时更新潜在的搭载发射服务能力和时机,为发展中国家或新兴航天国家提供搭载发射平台,促进世界航天和谐发展。

航天技术联合研究也是国际合作的重点之一。中国可以和其他航天大国建立国际学术机构或者联合实验室,集中全世界优势资源开展航天运输系统基础技术研究,为未来发展打牢技术根基,提供创新原动力。近期以中外联合实验室为平台,在新概念飞行器、可重复使用运载器、先进复合材料设计和试验等专业技术领域开展深入合作,为未来微小型运载火箭研制和发射的重要支撑。同时,建立固定的技术交流平台,定期开展航天运输系统技术、管理、服务等相关方面的成果展示、经验交流,促进世界航天运输系统领域健康快速发展。

联合研制运载火箭是未来我国研制火箭的途径之一。如重型运载火箭的研制,可以充分利用中俄合作优势,在低温发动机研制、大型试验、大结构制造等方面开展合作;可以发挥各国、地区资源优势,对箭上产品和地面设备进行全球采购或在海外建立基地,进一步提升运载火箭性能,降低成本,提供一型更具竞争力的运载工具。除了在中国现有4个发射场完成发射外,也可租用国外已有发射场,提升发射的灵活性;或在赤道地区建设国际联合发射场,合作研制海上发射平台。

2022年前后,中国将建成永久性的空间站,随着国际空间站的退役,中国的空间站有条件成为国际合作的优选平台。各国航天员和科学家可以来往于地球与空间站,进行规模比较大的空间应用;长征火箭可以向其他国家提供载人发射服务、参与空间站建设的能力;中国可以与全球航天科研机构及商业公司合作开展太空旅游等民用产业研究,促进太空技术迈入寻常百姓家。

5 结束语

经历若干年的研制攻关,中国航天运输系统取得了巨大的进步,形成了长征系列运载火箭、远征系列上面级和可重复使用运载器等3大产品体

系和技术体系,具备将各类有效载荷送入预定工作轨道的能力,并且广泛开展搭载发射、商业卫星发射和在轨交付等国际合作,促进全球航天技术进步。未来,中国必将更加注重国际合作,在低成本、可重复、人工智能等方面加速发展,加快我国运载火箭更新换代的脚步,加速我国向航天强国迈进。

本文特献给中国运载火箭技术研究院建院60周年(1957-2017)。

参考文献

- [1] 吴燕生.中国航天运输系统的发展与未来[J].导弹与航天运载技术,2007(5):1-4.
- [2] 秦旭东,龙乐豪,容易.我国航天运输系统成就与展望[J].深空探测学报,2016,3(4):315-322.
- [3] 孙冀伟,张涛,刘佳雯,等.浅析中国运载火箭的商业化发展[J].航天工业管理,2017(1):13-16.
- [4] 王雪梅,秦旭东,王小军.基于聚类分析的运载火箭划代研究[J].航天工业管理,2013(11):4-6.
- [5] Lu Y, Qin X D, Chen H P. Low Cost and Reusability of Launch Vehicle [J]. Aerospace China, 2016(2): 37-44.
- [6] 国发[2017]35号.国务院关于印发新一代人工智能发展规划的通知[C/OL]. http://news.xinhuanet.com/tech/2017-07/21/c_1121355212.htm.
- [7] 李洪.智慧火箭发展路线思考[J].宇航总体技术,2017,1(1):1-7.
- [8] 李杰,倪军,王安正.从大数据到智能制造[M].上海:上海交通大学出版社,2016.