



李东，中国运载火箭技术研究院研究员，长征五号运载火箭总设计师，研究方向为运载火箭总体设计。

十年铸造国之重器，长征五号托举中国航天强国希望

——访长征五号运载火箭总设计师李东

2016年11月3日20:43,长征五号运载火箭在中国海南文昌卫星发射中心成功发射升空(图1)。长征五号是由中国航天科技集团公司研制的,中国目前起飞规模最大、技术跨度最大、运载能力最大的一枚大型运载火箭。

长征五号的历史最早可以追溯到1986年的“863计划”项目,当时“大型运载火箭和天地往返运输系统”已确立为航天领域的重大探索项目,但由于当时各方面条件的限制,工程研制工作一直未能开展;进入20世纪90年代,“长征三号乙”的首飞一定程度上完善了中国运载火箭系列,但在整体上,长征系列火箭的技术仍偏于老旧,而当时世界上各航天强国的火箭运载能力纷纷升级,中国在世界航天界第二集团的优势地位开始下滑;进入21世纪,随着中国航天事业的发展,已有型号长征火箭运载能力已无法满足中国载人航天工程第三步、探月工程三期,及大质量卫星发射的需求,中国航天也迫切需要在世界商业发射的市场上占有一定的份额,

新型大火箭的论证工作再次在2000年左右被提上日程;2006年,长征五号大型运载火箭正式批准立项研制。

在2006—2016年长征五号10年的研制过程中,先后完成并通过了120 t



图1 长征五号运载火箭发射升空

级YF-100液氧煤油发动机和50 t级YF-77液氢液氧发动机定型,3.35 m助推器、5 m大直径液氢液氧贮箱和壳段的研制,液氢液氧一级、二级和液氧煤油助推剂动力系统全程热试车,以及其他控制、测量、地面发射支持系统关键核心技术的研制与试验,可谓十年磨一“箭”,它的首飞成功,标志着中国正式从航天大国迈入航天强国的行列。为深入了解长征五号的情况,《科技导报》采访了中国运载火箭技术研究院长征五号运载火箭总设计师李东研究员。

《科技导报》:长征五号作为中国的第一枚大型运载火箭,它最突出的特点是什么,与其他型号的长征火箭相比,在哪些方面面临了重大技术挑战并实现了突破?

李东:长征五号是中国第一枚大型运载火箭,其最突出的特点体现为“大”,即大发动机、大结构、更大规模的控制、测量系统和地面发射支持系统,这些均是为了达到一个目标,即大运载

能力(图2)。长征五号将中国进入空间的能力提升了2.5倍以上,即低轨道(LEO轨道)从10 t级跃升到20 t级,高轨道(GTO轨道)由5 t级提升至10 t级,所以它的一切特点、技术难点、挑战以及技术突破,都是围绕运载能力大而来的。

为了实现这一运载能力,火箭自身的研制实现了一系列重大技术突破,包



图2 长征五号运载火箭

括全新的大推力YF-100液氧煤油发动机技术、YF-77液氢液氧发动机技术、YF-75D膨胀循环高性能氢氧发动机、5 m直径大箭体结构、新型偏心载荷助推器和新型捆绑技术,全新的配套控制系统、测量系统、地面支持系统及全新的测试发射模式。另外,火箭研制所涉及的基础工业也实现了多项重大突破,包括大直径的箭体结构的材料、加工工艺、大装备制造等。应该讲为了配合长征五号的研制,中国航天的基础工业水平得到了提升,例如长征五号制造过程中所需要的大型加工设备、机床和焊接装置,其工艺都已触碰到了中国现有机械行业的“天花板”。因此,长征五号火箭的研制不仅实现了火箭技术的突破,也带动了机械、电子等基础配套行业的发展。

《科技导报》:对于发动机、贮箱、推

进剂这几项关键核心技术,国际上目前的研发现状是怎样的,中国是否已经达到了国际领先水平?

李东:应该说在运载火箭的总体技术方面,长征五号已经达到了国际先进水平,但是单项技术不一定是国际上最领先的。例如发动机,长征五号的YF-100液氧煤油发动机推力可达到120 t,而国际先进的液氧煤油发动机最大推力达到了600 t甚至更大;长征五号的YF-77液氢液氧发动机推力达到100 t,而国际先进的液氢液氧火箭技术达到了200~300 t;长征五号的火箭直径是5 m,而“土星五号”火箭为10 m。

运载火箭是一个系统工程,火箭设计不追求单向技术指标最优,而是在一定的技术成熟度、技术基础、可靠性、成本、进度约束下达到整体性能最优,因此,长征五号的各项技术指标服务于整体设计目标,它的设计运载能力目标为低轨道20 t级高轨道10 t级,因而发动机的推力与比冲、贮箱尺寸、材料与工艺水平、推进剂的环保性,以及箭体结构等技术指标,都围绕设计的运载目标来确定,虽然单项技术、单个指标不是世界上最先进的,但集成在长征五号运载火箭上后,整体在国际上却处于领先地位。

当然,将单项指标定得较高一定对实现总体设计目标有好处,但实现时却会将研制难度大幅增加;放眼全球,目前能够制造液氢液氧发动机、液氧煤油发动机和大尺寸低温贮箱的国家,除中国外只有美国、俄罗斯和欧洲少数几个国家。因此,无论是相对于中国现役的其他型号的长征火箭,还是国际上现役的其他大型火箭,长征五号的技术指标已有了质的飞跃,与世界航天界运载火箭第一集团的水平完全相当。

《科技导报》:长征五号的系统设计庞大而复杂,其可靠性怎样,又是如何实现的?目前国际上现役的同级别运载火箭,其可靠性情况是怎样的呢?

李东:长征五号火箭技术上的最大

的特征之一是其极为庞大而复杂的系统,这也是火箭达到较大运载能力所不可避免的环节。通常情况下“简单即可靠”,庞大而复杂意味着可靠性保障的难度急剧增大。长征五号的各项技术指标都达到了国际先进水平,但发动机的台数多,全部为液体低温发动机,因而保障长征五号火箭的高可靠性就是非常重要而困难的一件事。长征五号立项的设计可靠性、飞行可靠性指标为0.98,与世界上单一不载人新型运载火箭可靠性设计指标相当,因此实现该指标难度也非常大。长征五号火箭团队也为此经历了艰苦的努力和近10年的研制与试验。

首先从设计角度,尽管系统很庞大很复杂,但我们要做到的是尽可能简化它,尽可能用成熟的、可靠的技术去实现它,这里主要谈3个方面。

(1) 采用大直径少级数技术。与中国其他的长征火箭相比,长征五号在执行相同任务的情况下会比其他火箭少一级,即其他的长征火箭通过三级或三级半实现的任务,长征五号火箭两级半就可以实现,其他火箭两级半能够实现的任务,长征五号火箭一级半就能实现。例如,发射同步轨道卫星的“长征三号甲”火箭是个三级半火箭,一、二、三级接力工作,而对与长征五号来说,两级半则能达到相同的任务轨道。由于火箭的级间分离是一项核心技术,发动机空中点火也难度较大,因此运载火箭少一级则意味着可靠性成倍地提高,长五火箭采用的大直径少级数技术极大地提高了可靠性,这也是国际上新一代大型火箭的共同特点。

(2) 大量采用冗余、容错等技术来提高固有可靠性。例如,控制系统设计为系统级的三冗余的方案,以“三取二”表决的方式来实现火箭的制导稳定性与飞行控制性;动力系统也尽可能在核心关键的部件上采用冗余技术实现高可靠性;采取容错技术,即在尽一切努力把火箭部件做到可靠的情况下,仍要防止一旦部件出现了故障,火箭对该故障的耐受能力足够强,要考虑从系统上

采取更大的强壮性来耐受这种偶发故障,从而实现高可靠性。

(3) 采用新型线性分离装置的分离技术。传统火箭的级间分离以点式串联的螺栓爆炸实现,因而一个螺栓失效则会导致整个级间分离的失败。长征五号所采用的线性分离技术,是在分离时采用导爆索技术,瞬间可将级间像拉拉链一样切开,这样就避免了单点失效对级间分离的影响,该项技术的实现,对整个火箭的可靠性保证做出了非常大的贡献。

在设计之外,长征五号还进行了大量的可靠性试验验证工作,包括可靠性标准方法、加大应力水平、人为制造更恶劣的工作环境、人为延长工作时间等试验,通过这些试验来暴露设备和单机的薄弱环节,进而提高它的可靠性。

《科技导报》:长征五号运载火箭在未来肩负着何种航天任务,它的首飞成功对于中国航天事业未来的发展又具有怎样的战略意义?

李东:长征五号火箭最突出的特点是其大运载能力,因此它所肩负的航天任务都与这一能力相关,目前已明确的发射任务有:2017年前后将执行的中国探月工程三期的“嫦娥五号”探测器的发射任务,“嫦娥五号”是一个8 t级的探测器,长征五号火箭负责把它运送到奔月的轨道上,探测器在月面软着陆、采样、并返回地球;更晚一些,长征五号系列火箭的另一个构型“长征五号B”,计划开始用于载人空间站核心舱段和实验舱段的发射,空间站任务将分3次完成3个20 t级大舱段的发射,在轨道上组装成一个60 t级的载人空间站;2020年前后,长征五号计划执行中国首次火星探测任务,把火星探测器运送到火星轨道上,环绕火星进行科学探测,并同时火星表面软着陆和火星表面巡视探测。

长征五号火箭以其大运载能力,未来能够担负的中国和国际航天任务必将更加广泛,有前景的发射任务包括:大型的高分辨率对地观测卫星;高轨道大平台卫星和高轨道大容量通讯卫星;

另外,长征五号能够实现一箭双星、多星的发射,对多卫星的星座组网发射任务也很适用。

《科技导报》:长征五号首飞的成功,对中国运载火箭的未来发展方向将产生什么影响,哪些经验是中国航天科技产业值得借鉴的,是否会进一步带动中国航天产业的国际商业化进程?

李东:长征五号研制过程中无论是取得的经验还是汲取的教训,对中国航天未来的发展都是非常宝贵的。

在长征五号火箭研制开始之前,中国所有的运载火箭都是在第一代战略导弹的基础上发展起来的,中国也有几十年没有研制过全新的运载火箭。后来,虽然有不同型号火箭的问世,通过改进、捆绑、加氢氧第3级等途径实现了高可靠和更大的运载能力,但火箭的核心关键技术仍以第一代火箭为基础,火箭的发射也曾暴露出一些问题。而长征五号是中国真正意义上第一个从基础开始的、全新研制的火箭:全部采用无毒无污染的推进技术,是真正环境友好的绿色环保火箭;新建的海南文昌卫星发射场(图3),发射的安全性大幅提高;研制过程中在工程管理、技术经验、装备基础、设计规范和标准等方面都积累了非常多的经验。特别是中国未来载人登月还要发展重型运载火箭,



图3 长征五号运载火箭在海南文昌发射场

那么长征五号所积累的这些经验都将使其直接受益。可以说,没有长征五号的积累与突破,中国未来重型火箭的发展之路可能会障碍重重,走出了长征五号这一步,重型火箭的发展就有基础了。换句话说,长征五号火箭使中国人在重型火箭的发展上更加自信了、把握更大了。

在工程技术方面,通过长征五号的研制,中国运载火箭主体结构的主要材料体系全部更换为更具优势、更可靠的铝合金材料;箭体的焊接、铆接等更新为搅拌摩擦焊、等离子焊、自动钻铆等先进工艺;重新摸索并完善了火箭的设计方法,形成了一系列新的设计规范和设计标准;火箭制造全部使用新的工装,因而极大地带动了中国相关机械制造业的发展,更为未来重型运载火箭的研制奠定了坚实的基础。

在管理方面,长征五号火箭贯彻并执行并行工程管理、风险辨识与控制的管理方法,这些新型管理方法的运用,对未来重型运载火箭的研制、其他航天领域,甚至未来规模更大、复杂度更高的系统工程,都有着极大的借鉴价值。

在人才培养方面,长征五号火箭的研制过程中培养起一大批年轻有为的科研人员,他们的相对年龄较轻,平均只有30多岁,然而却积累了丰富的工程和研制经验,经历了重大研制过程的考验,形成了很强的工作能力,未来也必然能够担负起中国航天更大的使命。

除此之外,以长征五号火箭核心技术为基础的中国新一代中型和小型运载火箭的发展也得到了极大的带动,如2015年9月发射的小型火箭“长征六号”和2016年6月发射的中型火箭“长征七号”,它们同属于中国新一代运载火箭系列,也是由最初为长征五号关键技术的研制而带动起来的运载火箭。

长征五号首飞的成功,不仅奠定了中国未来航天产业发展的基础,而且对中国航天产业成功迈进国际商业化道路也起到了最关键的促进作用。只有跻身于世界大型火箭国家的行列,中国才能在国际航天的舞台上拥有更多的话语,国际合作才有前提。长征五号的

成功,也必将使中国在世界航天第一集团中占据重要的一席之地。

《科技导报》:长征五号首飞的成功凝结了无数科研团队及航天人的智慧和汗水,请您谈谈研制过程中您印象深刻的、体现航天人精神的几个片段。

李东:于我而言,长征五号整整10年的研制过程中有太多令人感动、令人欣慰、令人鼓舞的事情(图4)。同志们在工作中废寝忘食、夙兴夜寐,舍小家为大家,一心想着事业。这里只简单讲一个例子。长征五号火箭的大型活动发射平台研制好后,需要以组件的形式船运到海南发射场再重新组装调试,很多同志在这个过程中几个月甚至一两年都住在发射场;发射场的主要工作场地是一个大型的钢结构,夏季午时气温



图4 长征五号运载火箭总设计师李东与火箭合影

高达50~60℃,为了避开最高温的工作时段,同志们不得不提前到早上4点上班,并且加大傍晚至夜间的工作量。无论工作环境多么恶劣,他们有困难从来不对组织讲,也从来不提什么要求。这样的例子比比皆是。长征五号这支年轻的队伍完全继承了老一代航天人牺牲、奉献的精神,只要事业有需要,就会付出百分之百的努力。我相信,一个人为了了一件事奉献了自己人生中最宝贵的10年,其中所有的奉献和付出,在长征五号火箭发射成功的一瞬间,都将回报以巨大的喜悦和成就,也必将谱写出航天人人生中最华美的乐章。

文/韩丹岫(《科技导报》编辑部)