

中国文昌航天发射场建设发展特点分析

摘要：中国文昌航天发射场作为中国首个沿海、低纬度发射基地，是我国自主设计建设的第一座绿色、生态、环保，完全对外开放的现代化新型航天发射场。本文概要了文昌航天发射场立项论证建设发展的总体概况，综述了发射场设计建设的主要特点，总结了发射场的主要应用效益。

2016年6月25日和11月3日，在我国自主设计建造、绿色环保、技术创新跨越的中国文昌航天发射场分别首次成功实施了新一代“数字化”中型运载火箭——长征七号和新一代大型低温液体捆绑式运载火箭——长征五号的发射任务，这也标志着作为我国首个沿海、低纬度、完全对外开放型的现代化发射场正式进入运营阶段，并将与酒泉、太原、西昌三个内陆航天发射场形成沿海内陆、高低纬度、各种射向相结合的科学布局，推动我国航天事业的可持续发展。

一、文昌航天发射场建设发展总体概况

(一) 建设发展目标

中国文昌航天发射场的建设是在我国航天事业迅猛发展，紧扣我国国防和科技发展长远规划，为满足载人航天、二代导航、探月三期、深空探测、长征五号(5米直径)和长征七号(3.35米直径)运载火箭等国家重大航天专项需求，提高我国航天综合发

射能力的战略目标牵引下而开展的。其论证设计建设始终按照“坚持科学发展、坚持综合发展、坚持协调发展、坚持对外开放”的指导思想，遵循“统筹规划、分步实施，突出重点、适当兼顾，安全发展、简单可靠，技术先进、经济适用，注重安全、保护生态”的基本原则，以“建设一个运载效率高，射向范围宽，发射能力强，安全性好，技术先进，可靠性和信息化程度高，利于国际合作，带动科普、旅游与区域经济发展，综合效益高，世界一流、现代化的航天发射场”为目标开展设计建设。文昌航天发射场主要承担地球同步轨道卫星、大质量极轨卫星、空间站和深空探测器等航天器发射任务。

(二) 选址优势

文昌航天发射场的选址符合当前世界主要航天发射场选址的发展趋势，即尽量使发射场靠近赤道并靠近海域以提高火箭的运载能力，使火箭飞行轨道位于海洋上空，残骸落于海中。美国肯尼迪航天中心(北纬 $28^{\circ}30'$ ，西经 $80^{\circ}42'$)、法属圭亚那航天中心(北纬 $5^{\circ}14'$ ，西经 $52^{\circ}46'$)和日本种子岛航天中心(北纬 $30^{\circ}22'$ ，东经 $130^{\circ}58'$)均建在海边。此外，在满足发射方位要求和运输能力的基础上，尽量选择交通便利、气候适宜、社会依托条件好、投资较少和运行费用低的地方。

与我国现有酒泉、太原、西昌三个地理纬度相对较高的内陆航天发射场相比，最终选址在海南省东海岸文昌市龙楼镇(北纬 $19^{\circ}36'$ ，东经 $110^{\circ}57'$)的文昌航天发射场具有五大突出优势：

一是地理纬度低。可充分利用地球自转使同型号火箭运载能力增加 10% 左右，还能延长卫星运行寿命可达 2 年以上。

二是射向范围宽。从东射向到南射向，满足 $90^{\circ} \sim 175^{\circ}$ 的射向范围要求。

三是安全性好。射向 1000 千米范围均为海域，火箭残骸落区均在海上，最大限度降低了火箭航区和残骸落区的安全隐患。

四是运输限制少。可采用海运和空运相结合的方式运输新型大尺寸的航天产品，运输方式经济可靠。

五是综合效率高。发射场可发展空间大，发射效费比高，运行费用低，限制因素少，便于开展对外合作，为我国航天发射场的可持续发展奠定基础。

(三) 主要设施

从2002年3月起，经过综合论证、立项论证、可行性研究、工程设计等阶段，文昌航天发射场于2009年9月开工建设，2014年10月竣工交付使用。发射场主要分为技术与发射区、办公生活区、技术研发与航天员训练准备区及测控站等四个功能分区。

技术区主要完成火箭、航天器总装测试，建有长征五号和长征七号运载火箭垂直总装测试厂房各1座、水平转载准备厂房、航天器总装测试厂房、航天器加注与整流罩装配厂房、指挥控制中心。发射区完成火箭加注和发射准备，主要建设长征五号和长征七号火箭固定勤务塔、导流槽各1座，以及相关配套设施区。办公生活区位于文昌市新市区，距发射场区36千米，主要设有发测站、指控站、通信站以及配套公用设施等项目。技术研发与航天员训练准备区位于海口市东部，距离发射场90千米，社会依托条件好。测控站分为铜鼓岭和西沙两站，满足火箭、航天器分离前的测控、通信需求。铜鼓岭测控站紧邻发射场区，西沙测控站建于琛航岛。此外，气象卫通站位于文昌市南阳镇山城村，主要建有卫通机房、气象雷达机房及配套保障设施。

(四) 综合发射能力

经过长征七号、长征五号运载火箭的两次发射任务检验，文昌航天发射场初期长征七号运载火箭的年发射能力约为6次，长征五号运载火箭的年发射能力约为4次。如果在长征七号和长征五号火箭任务穿插并行的条件下，全年可完成约8次发射任务。后续，随着发射任务流程的不断优化、测试发射操作的不断成熟、

地面设施设备恢复效率的逐步提高、特燃特气保障能力的适当扩建，文昌航天发射场的年综合发射能力可逐步达到 10~12 次。

二、文昌航天发射场设计建设主要特点

作为我国首个沿海、低纬度、对外开放型的现代化航天发射场，文昌航天发射场的设计建设面临从火箭、航天器到气候环境的全新特点，实现了多项创新，形成了独有的建设发展特点。

（一）新“三垂一远”测发控模式更加强化技术区，简化发射区

与酒泉载人航天发射场的“三垂一远”测试发射控制模式不同的是，文昌航天发射场的新“三垂一远”模式体现为：设置在活动发射平台前置设备间内的火箭测试发射控制设备由技术区和发射区共用，并在随火箭一同由技术区转运至发射区的过程中始终处于发射状态。这种将各系统发射前的技术准备最大限度地安排在技术区完成，在发射区只进行简单的功能检查，然后加注发射的新测试发射控制模式，更加强化了技术区操作，简化发射区操作，强调安全，重复发射准备简便，火箭在发射区占位时间只需 3 天即可实施发射，从整体上降低了环境的不利影响和保障难度，提高了测试发射控制的可靠性，提高了发射效率，对后续交会对接等航天任务发展和国际竞争的适应能力强。

（二）发射场安全设计技术体系的构建针对性强，系统、全面

发射场安全是发射场建设规划成功与否的关键，其基本原则是要最大限度地降低航天发射给公众、发射场人员和资产带来的风险。设计人员针对文昌航天发射场的大尺度、大推力和推进剂用量大的运载火箭和航天器，特别是典型任务射向下方海域、飞越他国空域和南海周边国家分布特点以及海南省生态旅游海岛的

建设发展要求等问题，从有利于发射场安全布局的角度，以可接受、可负担的风险范围进行控制为基本原则，构建了选址安全、场区布局安全、航区和残骸落区安全三个领域的安全设计技术体系，系统、全面地建立了内容覆盖国家发展战略安全、气象安全、交通运输安全、生态环境安全、地质水文安全、场区安全区域划分、建筑物安全距离设防、有毒推进剂扩散安全防护等多方面的15类、53条安全技术准则，使发射场总体布局安全性好、功能性强，综合效益明显。

(三) 生态、环保、集约型规划设计多要素体现，综合利用率高

文昌航天发射场的规划设计改变了我国发射场设计以往只强调工业性和注重功能而忽略地区生态环保与建筑艺术性的做法，坚持“预防为主、规划优先、清洁发射、安全环保”的设计理念，在规划中体现与自然相协调的思想，进行土地功能区划和生态规划，全面保护发射场区的原生椰林、湿地、滩涂环境，适度开发，节约有限的土地资源，充分发挥安全控制区内的土地价值。集约化设计的火箭垂直转运轨道连接技术区和发射工位，形成一条以“便捷、高效”为特点的航天发射功能轴，凸显发射场区的主要特征，同时各场区及配套建筑的设计强调艺术与技术的协调统一，体现航天时代形象。在发射场节能、环保与环境综合治理方面，始终坚持把生态环境保护作为一条“红线”，从生态系统的角度强调维护其构成要素的多样性和丰富性，运用现代生态理论和科技措施，减少对原有环境的影响，保护和推进发射场的生态环境建设。

(四) 针对复杂气象与环境条件的“三防”技术先进、安全、可靠

文昌航天发射场濒临海边，气候复杂多变，“高温、高湿、高盐雾、强降雨、强台风、强雷暴”直接影响发射场设施设备的

可靠性、安全性和使用寿命，增加维护保障费用，并使任务保障存在安全隐患，这是现有三个内陆发射场在设计建设中从未面临的挑战。

针对防台风问题，设计人员通过前期模拟分析系统掌握了火箭垂直总装测试厂房、固定勤务塔等高大复杂建构筑物的抗风薄弱环节，确定了结构体系方案，使其达到百年一遇强台风下的安全要求。同时通过“三垂一远”测试发射控制模式，优化了火箭测试发射流程，缩短了火箭的室外暴露时间，减小了不利天气的影响。此外还建立完善的气象预报系统，及时发布台风等灾害天气预警，合理调整任务计划，在火箭航天器转运、待命发射等关键时段，进行有效规避。发射场的高大复杂建构筑物成功经受了2014年7月“威马逊”超强台风和9月“海鸥”强台风的连续检验，没有形成主体结构损伤。

设计人员针对防雷电问题为发射场不同地面设施制定了不同类别、不同等级的防雷电技术方案，各单体建筑均能满足防雷电要求。同时将当前比较先进、安全可靠的四塔架空避雷线立体网式防雷电系统应用于发射工位，能有效降低防雷装置高度，缩小间距，又能增强防雷保护效果。此外还在发射场建设雷电监测预警系统、闪电探测定位系统、空中电场探测系统，构建被动防护与主动预警相结合的雷电综合防护体系，雷电拦截效率达到98.5%，有效防范了雷电对火箭、航天器和大型设施设备的影响破坏。

通过各类前期试验验证，设计人员在解决发射场地面设施设备防盐雾腐蚀问题上，确定了防护寿命标准可达10~15年的重度防腐涂装保护体系，采用工艺简便、可操作性强、经济适用且能适应沿海高温、高湿、盐雾环境的新材料、新工艺和新技术。同时加强发射场空调系统建设，利用空调系统进行除湿和盐雾吸附，创造低湿、低盐雾的室内工作环境。此外还建立盐雾监测系统，

制定维护保养规范与制度，有效地提高了发射场系统的可靠性，延长了设施设备的寿命。

(五) 大尺度活动的非标准机械产品设计处于亚洲领先水平

文昌航天发射场最高和最核心的建筑是位于技术区用于长征五号和长征七号运载火箭操作的两个垂直总装测试厂房，以及距火箭垂直总装测试厂房 2.8 千米处、位于发射区的两座火箭固定勤务塔。长征五号测试厂房总高度达 99.4 米，内部高低配置了 14 层活动工作平台，总建筑面积达 21250 平方米，历时 3 年半建成。它拥有众多“之最”：亚洲最大的钢铁之门、中国单层最高的厂房、中国最高的桁架安装。设计人员针对发射场所在地区强降雨、强台风、强雷暴的复杂气候特点，解决了超高支模施工、超高大门钢桁架框安装、超高大跨度钢屋盖安装、大体量钢结构预埋件精度控制、特种非标吊车梁及轨道超高安装等一系列技术难题。高达 81 米的巨型钢铁之门由左右各五扇重达 30 吨的钢桁架铁门拼装而成，再由数十吨重的巨型门轴衔接，总重量达 784 吨，创新设计的“凸”型整体式钢门结构，增强了 U 型开口结构的整体性、抗震和抗台风性能。

(六) 复杂地质条件下的大跨度、大载荷结构设计施工安全可靠

长征五号勤务塔下方的导流槽跨度达 25 米，净深达 22 米，比我国酒泉载人航天发射场的导流槽宽 7 米，深 4 米，是目前我国规模最大的导流槽。由于长征五号和长征七号两座勤务塔距海岸线仅 800 米，台风多发，降水大，地下水丰富，地质气候条件复杂，对于基坑深达 23.25 米、开挖面积约 6650 平方米的导流槽设计建设难度前所未有。设计人员针对导流槽体量大、结构复杂、使用环境和施工环境恶劣等问题，提出了锥面四筒式结构体系，解决了导流槽大跨度、大载荷受力问题，大幅提高了结构的安全

可靠性；自主研制了新型耐烧蚀混凝土，解决了导流槽高温烧蚀防护和海洋环境中材料耐久性问题，综合性能居国际领先水平；针对地下水位高、地质条件复杂，确定了压重法、抗浮桩法和抗浮锚杆法综合抗浮设计方法，止水帷幕、坑内井点降水和分级放坡的深大基坑开挖方法，解决了大体积地下结构抗浮和基坑开挖支护难题。

(七) 自主研发关键设备，突破了低温推进剂加注技术的瓶颈

与以往型号运载火箭推进剂相比，文昌航天发射场所应用的新一代大型运载火箭低温推进剂具有贮量大、加注流量大、多管路多贮箱同时加注和补加等特点。设计人员在借鉴国内外先进技术的同时进行吸收创新，自主研究设计了大型低温真空绝热贮罐、大口径低温输送管路、大口径低温远程控制阀门、大流量高扬程液氧泵等，填补了国内大型低温系统关键设备的空白，突破了低温加注系统关键技术的瓶颈，使低温推进剂大流量加注控制技术达到国际先进水平，长距离、大口径低温真空绝热液氢液氧输送技术可靠性高、维护简便，实现了与国际先进技术接轨，有效地解决了新一代运载火箭低温推进剂的生产、大规模贮存、大流量加注、安全排放等问题。同时，针对低温推进剂加注系统特点与需求，建成集控制技术、计算机技术和信息技术于一体的高可靠性、高安全性的远程自动加注控制系统，有效地解决了指挥、操作人员后撤问题，为氢环境危险场所最终实现无人值守奠定了良好的技术基础。

(八) 首创国产软件开发平台，确保核心技术的自主可控与安全

文昌航天发射场的测试发射指挥监控系统是目前我国航天发射场中最新建设的系统，吸取了多年实践经验，解决了一些以往难以解决的问题，具有数据传输标准化、测试信息精准投送、

WEB 服务系统构建、LED 显示屏幕应用及自主可控技术的应用。此外，首创国产化软件开发平台，研发测控指挥监控系统等配套软件，确保了航天发射核心技术的自主可控、绝对安全；一体化试验任务组织指挥平台，综合运用大数据系统，推动发射中心各类信息高度融合共享、集成高效；发射中心运行管理平台，对测试发射控制设备进行远程操作控制，实现了组织指挥一体化、操作使用远程化、信息管理网络化、技术保障智能化。文昌航天发射场实现了信息化指挥控制能力的突破，提高了发射场试验发射能力与管理能力，提高了发射场地面设施设备的安全可靠性，降低了发射场运行和管理成本，综合发射效益高，发射场的核心竞争力强。

三、文昌航天发射场的主要应用效益

中国文昌航天发射场的建设并投入运行标志着我国航天发射能力的新飞跃，形成的新航天发射战略格局更加合理、体系更加完善，将满足我国航天事业的长远发展需求，提高我国航天综合发射能力和效益，有利于加强国际交流合作和提升我国对外商业发射竞争力，有利于我国航天科普事业发展，带动当地经济发展。

（一）发射成本低，综合效益高

与我国酒泉和西昌航天发射场相比，文昌航天发射场发射地球同步轨道卫星运载能力可分别提高约 15% ~ 19% 和 8% ~ 12%。按照目前国际商业发射价格，承揽国外商业发射的竞争能力将进一步提高。文昌发射场的低纬度区位可大量节省卫星（有效载荷）的推进剂质量，而用于增加有效载荷容量或延长 50% 的卫星寿命，可显著提高运营总收入，长远发射效益将非常可观。

（二）促进国际合作和扩大对外发射服务

基于新一代运载火箭的未来发射能力，文昌航天发射场的建

成可基本满足国内外的有效载荷发射各种轨道要求，可发射的航天器种类多，大大提高长征系列运载火箭在国际市场上的能力，将会进一步促进与有关国家和地区在航天领域的合作，有利于改善我国发射环境，保持我国运载技术在世界航天领域的地位，进一步缩短与国际先进水平的差距，促进我国空间技术发展的良性循环。

(三) 有利于航天科普事业发展

世界主要航天大国对航天科普事业的推动都非常重视，其航天发射场的建设发展经验表明，大型航天发射场作为一个国家经济实力、科技实力的窗口，也可以成为爱国主义的教育基地和大型科普基地。开放式、现代化的文昌航天发射场将充分发挥航天发射的巨大深远影响，充分利用高度集中的科技人才优势，结合海南省得天独厚的旅游资源，通过科普旅游设施建设，宣传航天科普知识，使航天科普资源发挥最大的社会效益。

(四) 推动当地社会经济发展效益明显

航天发射场属于国家大型工程项目，在一个新的航天发射场建设过程和建成之后，都会有利于拉动发射场所在地乃至全国的经济的发展。据统计，在航天领域每投入 1 美元，经济和社会方面的直接和间接回报约为 7~12 美元。美国 2003 年“发现”号航天飞机的一次发射，约有高达 150 万的参观者。文昌航天发射场是我国第一座完全对外开放、国际合作性强的现代化发射场，其建成和运营能有效地提高海南省和文昌市的知名度，并能通过各种国际合作，为所在地的开发提供机遇和创造条件。同时发射场的建设还会吸引和集中高素质人才，促进当地高科技产业和教育、科普的进一步发展，增加就业(如海南航天主题公园建成后 will 增加 1500 人就业，而海南航天发射场配套区建成后 will 实现 4000 余人就业)，推进城市化进程。

四、后续展望

中国文昌航天发射场的设计建设系统总结了我国现有航天发射场的发展经验，吸收借鉴了国外航天发射场的先进理念，发射场总体布局设计合理预留了型号未来的发展余地，精心营造了国际合作和对外航天发射服务的良好环境，使我国航天发射场的战略布局更为合理，体系更加完善，提升了各发射场之间的备份和互补能力，提高了我国进入空间的能力，满足了我国航天事业的长远发展需求。

我国计划在 2022 年前后建成自己的空间站，在发射天宫二号之后，还将陆续发射空间站实验舱、货运飞船等十多吨重的大型设备，而这些设备必须在文昌航天发射场通过大推力运载火箭送入太空。2017 年 4 月，将发射我国首个空间货运飞船——天舟一号，该飞船将与于 2016 年 9 月 16 日从酒泉卫星发射中心发射升空的天宫二号空间实验室对接，验证推进剂补加、再生式环境控制生命保障等关键技术。我国探月工程“绕、落、回”三步走发展规划第三期的月球探测器嫦娥五号将于 2017 年择机发射，主要实现无人采样返回任务。目前我国已具备探测火星能力，未来火星探测器的发射也将选择在该发射场实施。未来，文昌航天发射场将在我国空间实验室与空间站建设与实施、载人探月、火星探测等战略性空间探索任务中发挥重要作用。

(北京特种工程设计研究院)