

中国运载火箭测试发射模式发展思路研究

肖士利, 何 巍, 秦旭东

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 运载火箭的测试发射模式对火箭和发射场总体方案起着重要作用, 目前各国常用的测发模式主要有一平两垂、三垂和三平模式。研究和总结国内外运载火箭测发模式及其特点, 从任务适应性、环境适应性、可靠性和安全性、经济性这4个指标中细化出13项影响因素, 在此基础上开展了3种测发模式影响因素对比分析。结合我国发射场环境地质条件和现有建设条件, 提出一种运载火箭测发模式定量分析方法, 完成了我国小型、中型、大型及重型运载火箭在现有4个发射场最优测发模式分析, 为我国运载火箭未来测发模式发展提供重要参考。

关键词: 测发模式; 测发流程; 发射场; 定量分析; 影响因素

中图分类号: V554

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2021) 01-0065-08

Research on the Development of Test and Launch Mode of Chinese Launch Vehicle

XIAO Shili, HE Wei, QIN Xudong

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The test and launch mode of launch vehicle plays an important role in the overall scheme design of rocket and launch site. Common test and launch modes in various countries include one-level and two-vertical, three-vertical and three-level modes. The test and launch mode and characteristics at home and abroad are studied and summarized, based on the four indicators, i. e task adaptability, environmental adaptability, reliability and safety, and economy. The four indicators are refined into thirteen influencing factors. Upon this, the comparative analysis of the influencing factors of three kinds of test and launch mode are carried out. Combining with environment geological conditions and existing construction conditions of launch sites in China, a quantitative analysis method of test and launch mode is proposed, and the analysis of optimal test and launch mode of small, medium, large and heavy rockets in four launch sites is completed. This work can provide important reference for future test and launch mode development in China.

Key words: Test and launch mode; Test and launch process; Launch site; Quantitative Analysis; Influence factors

0 引言

运载火箭的测试发射模式 (以下简称测发模式)

是指火箭在发射场技术区和发射区转运、总装、测试过程中的技术物理状态, 通过转运、总装、测试这3个状态基本上能反映火箭的技术状态、测发流

收稿日期: 2020-08-27; 修订日期: 2020-10-13

作者简介: 肖士利 (1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为运载火箭总体设计。

E-mail: 170456059@qq.com

程、地面设施设备和发射场总体布局的特点。测发模式一经确定,就决定了火箭在发射场的测发流程和发射场设施设备的总体方案与基本规模^[1]。

目前,各国运载火箭常用的测发模式主要有3种:一平两垂(火箭水平转运、垂直总装、垂直测试)、三垂(火箭垂直转运、垂直总装、垂直测试)和三平(火箭水平转运、水平总装、水平测试),3种测发模式各有优缺点,在国内外火箭中均有应用。由于测发模式对火箭和发射场总体方案起着重要作用,未来我国运载火箭在不同的发射场采用何种测发模式才能发挥出最大效能是一个值得研究的问题。本文提出了一种测发模式定量分析方法,开展了我国小型、中型、大型及重型运载火箭在不同发射场最优测发模式分析,为我国下一代运载火箭测发模式发展思路提供重要参考。

1 国内外运载火箭测发模式现状

1.1 一平两垂测发模式

该模式在发射场技术区建设水平准备厂房,发射区建设固定发射台、地下设备间、勤务塔和脐带塔^[2]。火箭各部段在技术区水平准备厂房完成状态检查后,通过公路运输车将各级运往发射区,用勤务塔上的吊车将各级火箭、整流罩/有效载荷或其组合体垂直吊装对接在发射台上,经过测试后进行加注发射,如图1所示。

该模式的优点在于技术区设施简单,在发射区测试过程连贯,无需状态转换。对发射台要求较低,火箭运输条件低,操作简单。但该模式对发射区设施要求高,需要修建功能完整、全封闭式的塔架用于火箭吊装和测试,而且火箭在发射区占位时间长,每两次发射时间间隔长。发射区塔架一般可采取两种不同的组合形式,一是固定勤务塔和脐带塔方式,二是固定脐带塔和活动勤务塔方式。我国的CZ-2C、CZ-3A系列以及CZ-4系列火箭采用这种模式^[3]。

1.2 三垂测发模式

该模式在发射场技术区垂直总装测试厂房内,将各级箭体、整流罩/有效载荷组合体垂直组装在活动发射平台上,完成各项测试后,通过活动发射平台将火箭垂直转运至发射区,在发射区经综合测试后进入发射准备阶段,如图2所示。



图1 一平两垂测发模式

Fig. 1 One-level and two-vertical test and launch mode



图2 三垂测发模式

Fig. 2 Three-vertical test and launch mode

该模式的优点是测试环境好,技术区及发射区测试可采用同一套前端测试设备,且在运输时测试状态不断开,确保技术区的测试状态及测试结果有效,有效降低火箭在发射区的工作时间,便于连续发射。但该模式对地面设施设备要求高,除了和技术区建设高大的垂直总装厂房外,部分火箭还需要在发射区建设勤务塔,同时对活动发射平台要求高,整个地面设施设备规模较大,造价较高。美国的土星5号、航天飞机、SLS、宇宙神5,欧洲的阿里安5,日本的H-2A,中国的CZ-2F、CZ-5、CZ-7等火箭均采用这种模式^[3-7]。

1.3 三平测发模式

该模式在发射场技术区水平准备厂房内完成箭体水平组装和有效载荷水平对接,完成各项测试后,由转运车将火箭水平转运至发射区,在发射区开展火箭整体起竖、箭地连接、加注和发射,如图 3 所示。



图 3 三平测发模式

Fig. 3 Three-level test and launch mode

该模式的优点是可以避免在技术区建设高大的垂直总装测试厂房且发射区地面设施较为简单,对运输道路要求较低,转运时所用的运输车辆与三垂模式相比,较经济。美国的猎鹰 9、苏联/俄罗斯的能源号、联盟号、质子号和天顶号,我国的 CZ-6 和 CZ-11 等火箭采用这种模式^[8-9]。

火箭和有效载荷在水平状态下组装和测试,须解决测试状态和发射状态不一致的问题。对于这种方式,如果有效载荷不允许水平运输,可以将整流罩/有效载荷组合体运输至发射区与火箭垂直对接,但须在发射区额外配套勤务塔吊车和操作平台,进而增加了发射区建设规模。比如按照三平模式来设计的德尔它 4H 和在库鲁发射场发射的联盟号火箭,因有效载荷不能适应水平对接、转运及测试,火箭基础级(一二级、助推器)采用水平组装和水平测试,整流罩/有效载荷组合体

采用垂直组装的方式与基础级对接^[10],这种模式可认为是三平模式的过渡状态,或称为“两平一垂”测发模式,即火箭水平转运和水平测试,整流罩/有效载荷组合体垂直对接。

1.4 各国运载火箭测发模式分析

俄罗斯火箭一直以来都采用三平模式,欧洲火箭主要采用三垂模式,美国火箭早期以三垂模式为主,随着猎鹰 9 火箭的发展,目前三垂模式和三平模式均有应用。我国火箭也采用了多种测发模式,早期火箭以一平两垂模式为主,三垂模式为辅,新一代运载火箭以三垂模式为主,三平模式为辅。

国外火箭发射场设施较为简单,基本都采用简易勤务塔模式,部分火箭直接取消了勤务塔,火箭在发射区都是露天测试及加注,这对火箭的可靠性、安全性、环境适应性和使用维护性能提出了很高的要求。我国大中型火箭在发射区都采用了全封闭式的勤务塔方案^[11],为火箭在发射区的操作、测试、检查提供良好的环境保障条件,对地面设施的保障能力提出了很高的要求,发射场整体建设规模较大。

2 测发模式影响因素分析

测发模式论证需结合我国实际情况,应具备较强的任务适应性和环境适应性、较高的可靠性和安全性、较好的经济性,从这 4 个指标中可以细化出 13 项影响因素,如图 4 所示。

2.1 任务适应性

任务适应性可通过快速发射能力、连续发射能力、通用发射能力、逆流程处置能力、有效载荷适应能力等 5 个方面来分析。

1) 快速发射能力反映火箭在发射场的测发周期;

2) 连续发射能力反映火箭在同一个工位连续两次发射的时间间隔和火箭在发射区占位时间;

3) 通用发射能力反映不同构型火箭在同一个发射工位的适应能力;

4) 逆流程处置能力表征火箭在故障情况下,应急处理的处置能力;

5) 有效载荷适应能力反映有效载荷水平或者垂直总装、测试、转运的适应能力。

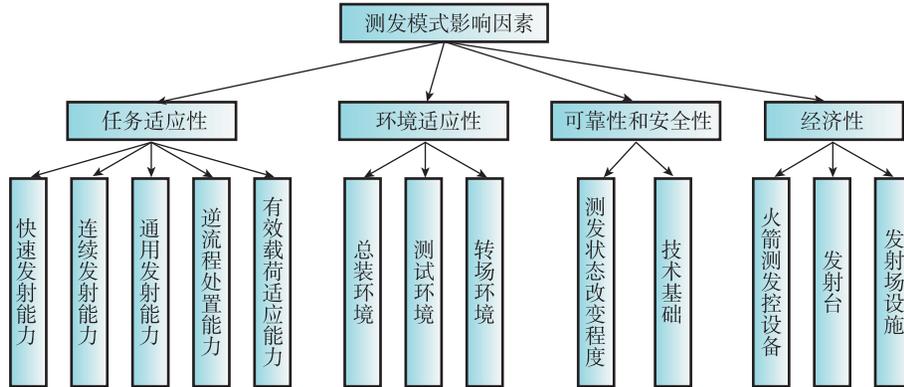


图4 测发模式影响因素

Fig. 4 The influencing factors of test and launch mode

通过优化发射场测发流程，缩短火箭发射准备时间和每次发射后恢复时间，具备快速发射能力和连续发射能力，满足不同的任务需求；同一发射工位尽可能适应不同构型火箭发射能力；火箭出现重大故障时，应具备较好的逆流程处置能力；有效载荷能够适应水平和垂直总装测试状态。

2.2 环境适应性

环境适应性通过火箭在发射场总装、测试、转运这3个状态来反映，这3个状态对应3种不同的环境，分别是总装环境、测试环境和转场环境。

1) 总装环境适应性表征火箭在发射场总装过程的环境适应性，一般受自然环境和力学环境影响，其中火箭吊装可分为室内吊装和室外吊装；

2) 测试环境适应性反映火箭在各种天气情况下的测试发射保障难度；

3) 转场环境适应性反映火箭在转场过程中的自然环境适应性和力学环境适应性。

火箭在发射场应具备较强的自然环境适应能力和运输环境适应能力。

2.3 可靠性和安全性

可靠性和安全性主要通过火箭测发状态改变程度、技术基础来反映。

1) 测发状态改变程度反映火箭测试和发射时状态改变程度；

2) 技术基础反映该模式在发射场总装、测试和发射的成熟度和可靠性。

火箭和有效载荷测试状态和发射状态基本保持一致，减少状态转换；发射场技术区和发射区尽量使用同一套前端地面设备，与箭体连接测试完成后状态不再变化；采用技术基础好和成熟度高的技术，其可靠性和安全性相对较高。

2.4 经济性

火箭在发射场的主要设施设备包括火箭地面测发控设备、发射台和发射场设施等，以上设施设备可以反映建设规模，体现经济性。

1) 火箭测发控设备主要通过配套数量、箭体总装设备规模等反映；

2) 发射台一般包括固定发射台或活动发射台；

3) 发射场设施主要包括技术区测试厂房、转运轨道和发射区勤务塔等。

测发模式论证时应尽量降低火箭地面测发控设备、发射台和发射场建设规模，降低成本，提高使用维护性能。

运载火箭3种测发模式对比分析如表1所示。

3 测发模式定量分析方法

按运载能力划分，可把我国运载火箭大致分为小型、中型、大型、重型等，其中小型火箭直径一般小于3.35 m，中型火箭直径一般为3.35 m，大型火箭直径一般为5 m，重型火箭直径一般为10 m级。

我国目前有4个发射场，其中1个沿海发射场，为文昌发射场，其他3个为内陆发射场，分别是西昌发射场、酒泉发射场和太原发射场。

3.1 分析步骤

测发模式定量分析法按照以下步骤进行分析。

1) 梳理出测发模式影响因素，共4大类13项，见图4。

2) 对测发模式影响因素综合分析，分别对火箭在4个发射场采用不同测发模式的影响因素进行评分，评分采用5分制。根据表1的分析结果，每项影响因素按照1~5分进行评分，1分表示差，2分表示较差，3分表示一般，4分表示较好，5分表示好。

表 1 3 种测发模式对比分析

Tab. 1 Comparison and analysis of three modes

| 序号 | 影响因素 | | 一平两垂 | 三垂 | 三平 |
|----|---------|----------|--|----|--|
| 1 | 任务适应性 | 快速发射能力 | 视火箭规模而定, 小型火箭易实现快速发射, 快速发射能力好; 中大型火箭一般; 重型火箭规模大, 系统复杂, 快速发射能力差 | | |
| 2 | | 连续发射能力 | 差 | 好 | 好 |
| 3 | | 通用发射能力 | 好 | 较好 | 视火箭规模而定, 小型火箭构型简单, 通用发射能力好; 中、大及重型火箭构型较多且复杂, 通用发射能力一般 |
| 4 | | 逆流处置能力 | 好 | 一般 | 一般 |
| 5 | | 有效载荷适应能力 | 好 | 好 | 视有效载荷规模而定, 小型有效载荷适应能力强, 中大型有效载荷适应能力差 |
| 6 | 环境适应性 | 总装环境适应性 | 视发射场而定, 内陆发射场吊装环境一般, 文昌发射场吊装环境差 | 好 | 好 |
| 7 | | 测试环境适应性 | 视发射场而定, 内陆发射场测试环境一般, 文昌发射场测试环境差 | 好 | 好 |
| 8 | | 转场环境适应性 | 好 | 差 | 较好 |
| 9 | | 测发状态改变程度 | 好 | 较好 | 较差 |
| 10 | 可靠性和安全性 | 技术基础 | 好 | 好 | 视火箭规模而定, 小型火箭技术基础好, 中大型捆绑火箭技术基础较差 |
| 11 | | 火箭测发控设备 | 好 | 好 | 差 |
| 12 | 经济性 | 发射台 | 好 | 差 | 一般 |
| 13 | | 发射场设施 | 一般 | 差 | 视发射场而定, 酒泉发射场地势平坦, 对设施建设无约束, 经济性好; 太原发射场和西昌发射场属于山区, 对道路坡度、转弯半径有一定影响, 经济性较好 |

3) 对测发模式影响因素进行权重评分, 即影响因子。影响因子按照重要程度分为重要影响因素和一般影响因素两类, 其中重要影响因素是指对测发模式影响较大的因素, 影响因子为 10%; 一般影响因素是指对测发模式影响较小的因素, 影响因子为 5%, 详见表 2。影响因子设置原则如下:

①在任务适应性中, 快速发射能力和连续发射能力表征火箭在发射场的测发周期和发射工位时间, 决定了火箭的最大年发射量, 是影响发射能力的重要因素; 有效载荷适应能力决定了全箭是否能够水平或垂直总装测试, 是发射任务适应性的重要因素; 而通用发射能力和逆流处置能力则不会显著影响火箭的最大年发射量和有效载荷发射任务适应性, 是一般影响因素。

②在环境适应性中, 火箭在发射场的总装时间和转场时间较短, 一般不超过 1 天, 且总装时间和转场时间可根据天气好坏进行选择。而火箭测试一直贯穿整个发射场, 时间需要数周或数月,

更易受自然环境的影响。因此, 测试环境是重要影响因素。

③在可靠性和安全性中, 测发状态改变程度和技术基础均会较大程度地影响发射可靠性, 均为重要影响因素。

④在经济性中, 发射场测试厂房、勤务塔及转运轨道等设施的造价比发射台、火箭测发控设备造价更高, 是重要影响因素。

需要特别说明的是, 对于执行载人发射任务的火箭, 某些因素会成为决定性因素。比如, CZ-2F 载人火箭在空间站运营阶段有应急救援发射任务需求, 对火箭的连续快速发射能力和发射可靠性提出了很高的要求, 其任务适应性、可靠性和安全性应给出更高的影响因子, 降低经济性影响因子。因此, CZ-2F 火箭在发射场立项论证时, 提出了三垂测发模式, 垂直总装测试厂房有两个测试工位以及配套了两个活动发射平台和两套地面设备, 可同时存放两发火箭^[12]。

表2 影响因素及其影响因子

Tab. 2 Influencing factors and impact factors

| 序号 | 影响因素 | | 影响因子 | 重要程度 | 影响因素说明 | 评分标准 |
|----|-----------------|----------|------|--------|--|---|
| 1 | 任务适应性 40% | 快速发射能力 | 10% | 重要影响因素 | 反映火箭在发射场的测发周期 | 采用5分制, 1分表示差, 2分表示较差, 3分表示一般, 4分表示较好, 5分表示好 |
| 2 | | 连续发射能力 | 10% | 重要影响因素 | 反映火箭在同一个工位连续两次发射的时间间隔和火箭在发射区占位时间 | |
| 3 | | 通用发射能力 | 5% | 一般影响因素 | 反映不同构型火箭在同一个发射工位的适应能力 | |
| 4 | | 逆流处置能力 | 5% | 一般影响因素 | 故障情况下, 火箭应急处理的处置能力 | |
| 5 | | 有效载荷适应能力 | 10% | 重要影响因素 | 反映有效载荷水平或者垂直总装、测试、转运的适应能力 | |
| 6 | 环境适应性 20% | 总装环境适应性 | 5% | 一般影响因素 | 火箭在发射场总装过程的环境适应性, 一般受自然环境影响和力学环境影响, 其中火箭吊装可分为室内吊装和室外吊装 | |
| 7 | | 测试环境适应性 | 10% | 重要影响因素 | 反映火箭在各种天气情况下的测试发射保障难度 | |
| 8 | | 转场环境适应性 | 5% | 一般影响因素 | 反映火箭在转场过程中的自然环境适应性和力学环境适应性 | |
| 9 | 可靠性和 安全性 20% | 测发状态改变程度 | 10% | 重要影响因素 | 反映火箭测试和发射时状态改变程度 | |
| 10 | | 技术基础 | 10% | 重要影响因素 | 反映在发射场总装、测试和发射的成熟度和可靠性 | |
| 11 | 经济性 20% | 火箭测发控设备 | 5% | 一般影响因素 | 反映测发控设备规模, 主要包括配套数量、箭体总装设备规模等 | |
| 12 | | | | | | |
| 13 | | 发射台 | 5% | 一般影响因素 | 反映发射台规模、成本等 | |
| | | 发射场设施 | 10% | 重要影响因素 | 反映发射场设施设备规模, 主要包括技术区测试厂房、转运轨道和发射区勤务塔等 | |

4) 分别计算得出小、中、大、重型火箭在4个发射场3种测发模式的综合评分, 综合评分越高者为优。计算公式见式(1), 其中 S 为综合评分结果, A_i 分别表示13个影响因素评分, B_i 为该影响因素对应的影响因子评分。

$$S = \sum_{i=1}^{13} A_i \times B_i \quad (1)$$

表3给出了中型火箭在文昌发射场采用三垂模式的评分方法和计算结果, 影响因素评分 A_i 根据表1分析结果给出, 影响因子评分 B_i 根据表2分析结果给出, 可得出综合评分结果为3.75。

3.2 分析结果

小型、中型、大型、重型火箭在不同发射场采用不同测发模式综合评分见表4, 可得出以下结论:

表3 中型火箭在文昌发射场采用三垂测发模式综合评分

Tab. 3 Comprehensive scores of three-vertical test and launch mode of medium-sized rockets in Wenchang launch site

| | 任务适应性 | | | | | 环境适应性 | | | 可靠性和安全性 | | 经济性 | | | 备注 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|----------|-------|------|------|----------|------|---------|-----|-------|----------|
| | 快速发射能力 | 连续发射能力 | 通用发射能力 | 逆流处置能力 | 有效载荷适应能力 | 总装环境 | 测试环境 | 转场环境 | 测发状态改变程度 | 技术基础 | 火箭测发控设备 | 发射台 | 发射场设施 | |
| 影响因素评分 A_i | 3 | 5 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 1 | 4 | 5 | 5 | 1 | 1 | 根据表1分析结果 |
| 影响因子评分 B_i | 10% | 10% | 5% | 5% | 10% | 5% | 10% | 5% | 10% | 10% | 5% | 5% | 10% | 根据表2分析结果 |
| 综合评分结果 S | 3.75 | | | | | | | | | | | | | |

1) 在我国现有技术水平下, 小型火箭在 4 个发射场优选三平模式, 大型火箭和重型火箭在文昌发射场优选三垂模式, 中型火箭在文昌发射场优选三垂模式, 在内陆发射场优选一平两垂模式。

2) 一平两垂模式在内陆发射场具有明显的优势, 除连续发射能力评分相对较低之外, 在其他方面评分高, 没有明显的短板, 综合评分高。若要实现快速发射和连续发射, 可进一步简化技术区工作, 优化发射流程或建多个发射工位。实践证明, 一平两垂模式发射工位建设周期较短, 总投资较低, 是比较经济适用的测发模式, 具有典型的中国特色。一平两垂模式在文昌发射场得分较低, 主要原因是文昌发射场高温、高湿、高盐雾、浅层风以及台风等环境因素导致总装测试环

境差。

3) 三垂模式在文昌发射场具有明显的优势, 主要得益于连续发射能力和有效载荷适应能力强、总装测试环境好、测发状态改变较少以及技术基础好, 评分较低的因素包括转场环境差、对活动发射平台和发射场要求高, 工程建设规模大, 经济性较差。

4) 三平模式在小型火箭中评分较高, 在中大型火箭中评分较低, 主要原因在于有效载荷适应能力差、测发状态改变较多以及技术基础较差等。但三平模式在技术区不需要高大的垂直总装测试厂房, 发射场配套设施简单, 且三平模式在发射区占位时间较短, 与三垂模式相当, 具备快速发射和连续发射能力, 兼具三垂模式和一平两垂的优点。

表 4 不同类型火箭在四个发射场测发模式综合评分

Tab. 4 Comprehensive scores of test and launch mode of different types rockets in four launch sites

| 火箭类型 | 文昌发射场 | | | 酒泉发射场 | | | 西昌发射场 | | | 太原发射场 | | |
|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| | 一平两垂 | 三垂 | 三平 |
| 小型火箭 | 3.8 | 3.95 | 4.25 | 4.1 | 3.95 | 4.25 | 4.1 | 3.95 | 4.15 | 4.1 | 3.95 | 4.15 |
| 中型火箭 | 3.6 | 3.75 | 3.25 | 3.9 | 3.75 | 3.25 | 3.9 | 3.75 | 3.15 | 3.9 | 3.75 | 3.15 |
| 大型火箭 | 3.6 | 3.75 | 3.25 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 重型火箭 | 3.4 | 3.55 | 3.05 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

注: 受限于运输条件, 大型火箭 (直径 5 m) 和重型火箭 (直径 10 m 级) 无法在内陆发射场进行发射, 故不进行评分

当前我国小型火箭 CZ-6 和 CZ-11 均采用三平模式, 大型火箭 CZ-5 和重型火箭采用三垂模式^[13], 中型火箭 (包括 CZ-3A 系列和 CZ-7 系列火箭等) 测发模式主要为一平两垂模式和三垂模式。鉴于三平测发模式的优点, 分析各个发射场三平模式制约因素, 如果后续我国突破了有效载荷水平对接及测试、全箭水平测试与垂直测试差异性、火箭水平组装及运输起竖等关键技术, 中型火箭在各个发射场测发模式综合评分见表 5, 可以看出:

- 1) 文昌发射场优选三平模式;
- 2) 酒泉发射场采用三平模式略优;
- 3) 西昌发射场和太原发射场采用一平两垂模式略优;
- 4) 在 3 个内陆发射场中, 一平两垂模式和三平模式评分非常接近, 基本相当, 不同发射场评分差异的原因是发射场地质条件不同。

表 5 中型火箭在四个发射场测发模式综合评分

Tab. 5 Comprehensive scores of test and launch mode of medium-sized rockets in four launch sites

| 发射场 | 一平两垂 | 三垂 | 三平 | 三平 |
|-------|------|------|---------|---------|
| | | | (技术突破前) | (技术突破后) |
| 文昌发射场 | 3.6 | 3.75 | 3.25 | 3.95 |
| 酒泉发射场 | 3.9 | 3.75 | 3.25 | 3.95 |
| 西昌发射场 | 3.9 | 3.75 | 3.15 | 3.85 |
| 太原发射场 | 3.9 | 3.75 | 3.15 | 3.85 |

4 我国运载火箭测发模式发展思路

通过以上测发模式定量分析结果, 结合国内外运载火箭测发模式发展趋势和我国现有发射场环境地质条件及建设条件, 应根据火箭的需求来选择不同类型的测发模式, 未来我国火箭测发模式发展思路如下:

- 1) 小型运载火箭在各发射场优选三平模式, 发射区采用无勤务塔模式, 提高火箭的使用维护性能。

2) 中型运载火箭是我国未来的主力火箭,为满足高密度发射和快速测试发射的需求,在掌握三平测发技术前提下,文昌发射场优选三平模式,同时根据卫星的适应情况,也可采用两平一垂模式。酒泉、西昌和太原等内陆发射场采用一平两垂模式和三平模式均可,可根据发射场现有条件进行选择,提高工位利用率。因此,未来中型运载火箭在设计时应同时具备一平两垂、三垂以及三平测发模式能力,核心是同时具备垂直总装测试和水平总装测试能力,根据需要在不同的发射工位采用合适的测发模式进行发射,大幅提高火箭发射任务适应性。

3) 大型、重型运载火箭在文昌发射场优选三垂模式,可利用现有发射场设施,但需开展三垂模式优化工作,重点优化方向是简化发射区,采用简易勤务塔或争取实现取消勤务塔,实现转场后快速发射,降低发射区建设规模,缩短发射准备时间。

5 结论

本文提出一种运载火箭测发模式定量分析方法,对我国运载火箭后续测发模式发展思路进行了研究,完成了我国小型、中型、大型及重型运载火箭在各发射场最优测发模式分析。鉴于三平模式的优势,建议我国开展中型捆绑火箭完全三平模式关键技术研究,尽早实现型号应用。未来小型运载火箭优选三平模式,中型运载火箭应同时具备一平两垂、三垂以及三平测发模式能力以满足不同任务需求,大型和重型运载火箭采用三

垂模式和简易勤务塔或无勤务塔方案以提高火箭使用性能。

参考文献

- [1] 张智,容易,秦瞳,等.重型运载火箭总体技术研究[J].载人航天,2017,23(1):1-7.
- [2] 魏继友.航天发射塔设计[M].北京:国防工业出版社,2007:1-7.
- [3] 龙乐豪,李平歧,秦旭东,等.我国航天运输系统60年发展回顾[J].宇航总体技术,2018,2(2):1-6.
- [4] 《世界航天运载器大全》编委会.世界航天运载器大全(第2版)[M].北京:中国宇航出版社,2007:600-619.
- [5] 周凤广.世界航天发射场系统(国外篇)[M].北京:国防工业出版社,2009:111-129.
- [6] 张菽.宇宙神5系列运载火箭的现状及其未来的发展[J].导弹与航天运载技术,2008(2):56-60.
- [7] 李东,王珏,何巍,等.长征五号运载火箭总体方案及关键技术[J].导弹与航天运载技术,2017(3):1-5.
- [8] SpaceX. Falcon 9 launch vehicle payload user's guide (Rev 2)[M]. Space Exploration Technologies Corporation, 2015.
- [9] 张卫东,王东保.新一代低温液体快速发射运载火箭及其发展[J].上海航天,2016,33:1-7.
- [10] 孙雅平.德尔它4系列运载火箭[J].导弹与航天运载技术,2005(6):21-27.
- [11] 张泽明.我国航天器发射场工程设计回顾与展望[J].中国工程科学,2007,9(4):1-5.
- [12] 张泽明,陈应麒.载人航天发射场设计回顾与主要特点[J].载人航天,2013(4):48-52.
- [13] 龙乐豪,郑立伟.关于重型运载火箭若干问题的思考[J].宇航总体技术,2017,1(1):8-12.

引用格式:肖士利,何巍,秦旭东.中国运载火箭测试发射模式发展思路研究[J].宇航总体技术,2021,5(1):65-72.

Citation: Xiao S L, He W, Qin X D. Research on the development of test and launch mode of Chinese launch vehicle [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(1): 65-72.