

# 航天发射故障基本分析方法

郑永煌<sup>1,2</sup> 徐克俊<sup>1</sup>

(1 中国酒泉卫星发射中心 2 西安交通大学系统工程研究所)

**摘要** 阐述航天发射故障诊断基本程序,提出航天发射故障分析方法和故障诊断方法。

**关键词** 航天发射故障 分析方法 诊断方法

## 1 前言

设备在使用过程中,会因为由设计和制造生成的内部固有缺陷及受到外部环境应力的影响而发生故障;设备在故障发生时表现出异常现象,或在故障将要发生时会出现故障征兆;通过观察、检测、分析这些异常现象、故障征兆信息,可以识别设备是否处在可工作状态、不可工作状态或性能下降状态;进一步的故障分析、检测,隔离故障,可以使故障定位在一个具体的可更换或可修复的单元。本文主要针对航天发射故障特点和规律,阐述航天发射故障诊断程序、分析方法和诊断方法。

## 2 故障诊断程序

航天发射故障诊断基本程序是指当系统或设备出现异常现象后,为了对故障进行快速隔离与定位

应采取的诊断步骤,一般包括工作程序、检查程序和定位程序。

### 2.1 工作程序

故障诊断工作程序如图 1 所示。

(1)及时报告出现的故障。在测试过程中,参试人员应精力集中,注意观察现象和记录参数,及时发现和抓住故障现象向现场指挥报告,这是故障诊断的基础。

(2)注意保护现场。出现故障时,应立即保护现场,防止故障消失成为隐患。保护现场一般包括下面的含义:

- ①保持故障发生时系统的工作环境、工作状态和参数的记录;
- ②维持箭(弹)上设备和地面测试设备的连接状态、地面设备的工作状态;
- ③在不损害箭(弹)上设备的前提下,保持供电

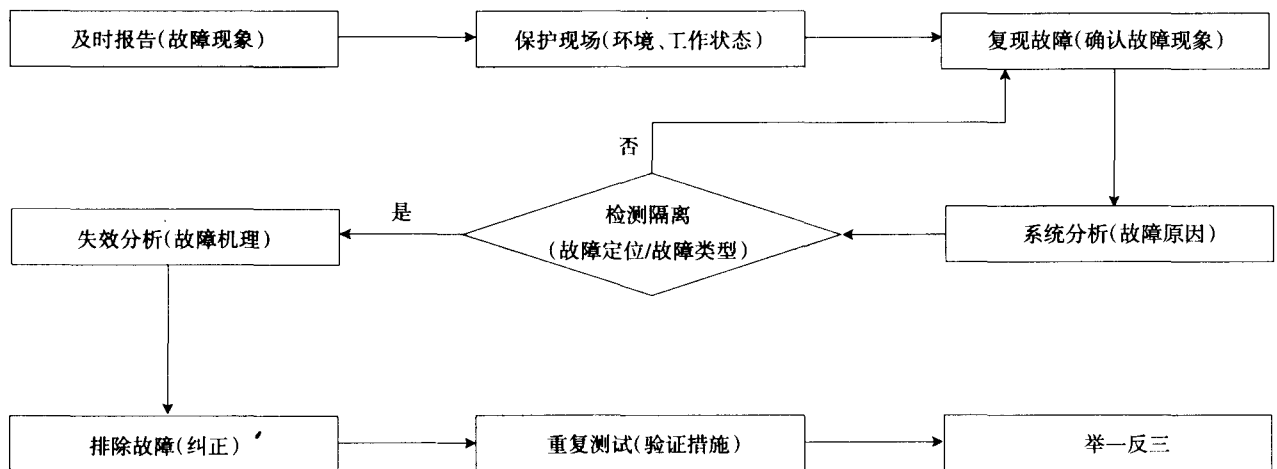


图 1 故障诊断工作程序框图

状态。

(3)复现故障。测试中故障首次出现时,测试人员获取的信息往往是局部的,不足以分析、判断问题。只有使故障再次复现,才有可能获取比较全面的信息供分析、判断。特别是对隐性故障,只有创造条件,使故障复现出来,才有可能对其分析定位。通常创造条件复现故障的过程,也就是分析故障机理并对其定位的过程。

(4)系统分析。在进行故障检测隔离之前,严密的理论分析和系统分析是必须的,主要分析故障可能产生的原因、故障检测隔离的步骤以及故障检测中应注意的事项。系统分析的目的主要是为了提高故障诊断效率,避免故障定位过程中产生新的问题。

(5)检测隔离。按照事先确定的检测隔离步骤,对系统或设备进行检测,并根据检测结果实施故障定位和判定故障类型。如果按上述步骤检测(必要时可以多次检测)之后,仍然无法进行故障定位,则需要重新确认故障现象。

(6)失效分析。故障定位之后,必须随即进行故障失效机理分析,以便确定有效的故障处理措施。

(7)排除故障。按照确定的故障处理措施和步骤,进行设备更换、线路修改或绝缘处理等,使系统和设备恢复到正常的功能。

(8)重复测试。采取故障处理措施后,须重新进行相关项目的补充测试,以验证处理措施的有效性和正确性。

(9)举一反三。故障有时是因为产品质量的个性引起的,具有偶然性,有时则是必然的产品共性原因引起。这些共性原因必然导致产品的批次性故障。虽然出现在个别仪器上,但因设计上的缺陷,或生产工艺上的问题,或元器件材料上的问题等,相同的故障早晚会出现在同一批次的其它产品上。因此对这种故障必须要作为批次性故障来处理,即所谓举一反三,对该故障产品采取的措施,也要应用到同批次的其它产品上。

## 2.2 检查程序

当航天测试发射过程中出现故障时,一般按以下程序进行检查隔离。

(1)先查操作和技术状态,后查仪器设备。操作失误和技术状态错误是最易判定的故障原因。因此,

在进行故障诊断之前,首先应查操作和技术状态,以免进行不必要的检查或造成其它不必要的损失。

(2)先查本系统,后查外系统,再查外部环境。由于故障通常是由本系统的原因引起的,同时为了避免不必要的扩大排故范围,造成复杂的系统间协调问题。因此,出现故障之后,应先从本系统查起,然后再排查相关外系统的原因。对于某些故障,还应排查外部环境对产品性能和功能的影响。

(3)先查地面,后查箭(星、弹、船)上。为了避免排除故障过程对箭上产品造成损坏或增加不必要的工作时间,通常应先对地面设备进行检查,然后逐步排查地面设备与箭上设备连接电缆和插头,最后再查箭上仪器设备。

(4)先查电源,后查其它设备。电源是一切电子电气设备工作的基础,也是故障易发部件。从提高排除故障效率角度出发,应先查电源,后查其它设备。

(5)先查硬件,后查软件。随着软件规模和功能的不断扩大,由软件设计缺陷引发的故障时有发生。因此,出现故障时,应遵循先查硬件,后查软件的原则。

## 2.3 定位程序

故障诊断的目的是对故障进行定位与隔离。通常按照航天发射故障诊断的一般规律,故障定位应遵循从“系统到设备、设备到线电路、线电路到元器件”的检测过程。在实际工作中,根据不同的工作时段和不同的故障危害性,故障定位要求也会有所不同。如对于一些危害后果轻微的故障,可能只须定位到设备级。

## 3 故障分析方法

航天发射故障分析方法是指故障诊断过程中应该使用的分析理论和分析方法,这些理论和方法贯穿于故障诊断过程,并对故障隔离与定位起着重要的指导作用。主要包括系统分析方法、系统原理分析方法等。

### 3.1 系统分析方法

(1)系统定义与分类:系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合而成的,系统内部与系统之间存在能量、信息的交换和联系,系统是具有特定功能的有机整体,并具有集合性、相关性、目的性和环境适应性四个特征。

系统是以不同的形态存在的,系统的形态与它们所要解决的问题密切相关。系统按照其形态,一般分类为:自然系统与人造系统、实体系统与概念系统、开放系统与封闭系统、静态系统与动态系统、控制系统与行为系统。航天发射故障诊断系统就是一个人造的、其内部与外界有能量和信息交换的实体系统。

(2)系统分析方法的原理。在复杂的客观世界中,几乎任何事物都与其他事物相互联系着,而系统的思维推理方法就是把所要研究的对象理解为一个包括周围环境在内的整体。这个整体包括许多从属的分系统,这些从属的分系统是相互作用的,同时整体也要受到从属分系统的制约。系统分析是以系统观点全面收集系统的内、外部信息,分析正常信息、异常信息与系统功能之间的相互关系,确定系统是否存在某种问题,问题的性质通过分析人员的直观判断和定性分析,同时利用检测装置或依靠计算工具找出系统中各要素的定量关系,最终找到发生问题的原因和解决问题的方法。由于系统分析的范围十分广泛,问题的性质差异很大,一般来说,对需要分析的问题要提出一系列的“为什么”,直到问题取得圆满的解决为止。提问过程如表 1 所示。

基于航天发射系统的复杂性,在航天发射故障诊断过程中,分析判断故障产生的原因应建立大系统观念,不能局限于某个信息或某个单机、分系统来进行故障诊断。通常,须全面考虑检测对象、检测设备、检测人员、检测环境等方面的因素。如图 2 所示。

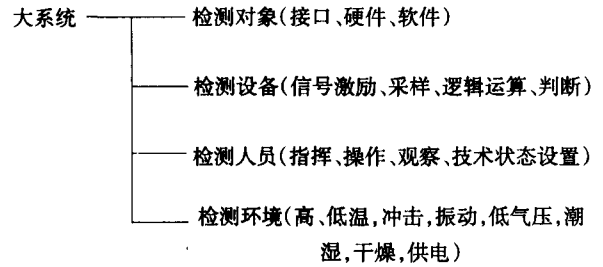


图 2 航天发射故障诊断应考虑的因素

检测对象包括接口、硬件、软件,这些是故障诊断的主要目标。在对故障分析后,进行进一步检测时,可以采用不同的排除故障思路,利用不同检测设备和检测方法,对接口、硬件和软件进行几个循环的检测,以便找到确切的故障点。

检测设备主要包括检测对象的信号激励、采集、逻辑运算和判断的设备。有时航天发射故障诊断的最后结果不是检测对象出现了问题,而是检测设备出现了故障。因此,在航天发射故障诊断中,要特别注意鉴别检测设备的功能和性能,这一点不能被忽视。

检测人员包括具有指挥排故能力的指挥员、操作手、各类仪器仪表观察人员以及技术状态设置人员等。检测人员的误操作常常也是航天发射故障产生的重要原因之一。

检测环境主要考虑检测对象和检测设备所处的外部环境和电磁环境。进行故障复现检测时,可根据排故的需要进行设置,通常有高、低温以及冲击、振动、低气压、潮湿、干燥等几种选择。

(3)系统分析方法。系统分析是对一个系统的基

表 1 系统分析的提问过程

项目	第一次提问	第二次提问	第三次提问	决定
问题(或目的)	是什么?	为什么是这个?	问题或目的是否已经明确?	删除不必要的
原因(或困难)	是什么?	为什么是这样?	有无其他确切的原因或困难	重新分析
方法	怎样做?	为什么要这样做?	有无更合适的方法?	简化方法
地点	在何处做?	为什么在这里做?	有无其他更合适的地点?	重新安排
时间	在何时做?	为什么在这时做?	有无其他更合适的时间?	改变时间
人员	由谁做?	为什么由这人做?	有无更合适人员?	合适的人选

本问题,用系统观点思维推理,在确定和不确定的条件下,探索发生的原因、可能采取的方法,通过分析对比,为达到预期目标选出最优方案的一种决策方法。

航天发射故障诊断是一个典型的系统分析过程,应采用系统分析方法,建立具有航天发射特点的系统分析步骤,如图 3 所示。系统分析方法的步骤主要包括以下内容:

①故障确认。当系统出现异常现象之后,首先应该准确地、系统地、全面地对异常现象进行描述,同时提供正常现象与之比较,确认是否构成故障及故障性质,为故障诊断打下良好的基础。在航天发射故障诊断中,出现某些异常现象后,经分析判断并非设备发生故障的例子屡见不鲜。

②收集资料。按照故障诊断的需要,尽可能多地收集与故障有关的资料,例如:系统或设备历史上曾经发生过的类似故障,故障发生时相关仪器仪表反映的现象,记录设备记录的数据曲线,操作人员的器官感觉,状态设置情况,环境温度高低,等等。

③分析建模。根据故障现象、相关资料、系统工作原理和检测原理,应用故障树、故障模式影响及危害性分析等直接分析法建立故障模型,初步判断故障模式,分析可能的故障原因。

④判断优选。根据各种可能的故障原因,采取排除法,确定最可能的故障模式,制定几种检测方案,优选一种最佳的检测方案,按照一定检测次序和检测步骤开始检测。

⑤检验评价。即对系统或设备进行检测分析后,实施故障隔离与定位。如果不能确认故障已经隔离

与定位,则回到第①步,按照①~⑤步重新对故障现象进行描述和检测,直至故障隔离与定位;或回到第③步,重新对故障进行分析建模和检测,直至故障隔离与定位。

⑥决策。根据确定的故障点和故障原因,采取相应的整治措施。

### 3.2 系统原理分析方法

系统原理分析方法是一种以系统工作原理为主要分析对象的方法,比较适合对系统级、分系统级故障以及跨系统间故障的诊断,也适用于故障的初始分析。

系统原理分析方法具有如下几个特点:一是系统性,即从系统组成的角度对故障进行分析与定位;二是根本性,即从系统原理的内核剖析故障的原因与机理;三是综合性,即从结构、功能和工作原理等方面综合对故障进行分析与定位。

系统原理分析方法的基本思想是在仔细观察故障现象的基础上,根据系统的工作原理和系统中各零部件的作用,初步判断可能引起故障的部件或元器件,然后对其进行检查和测试,找到损坏的或性能不良的部件或元器件。

系统原理分析方法主要包括故障现象收集、绘制系统工作原理图、进行跑图分析、检测定位等几个步骤。

(1)故障现象收集。当故障出现之后,应仔细观察和收集故障发生时系统各部分的响应,包括测试数据、仪表显示以及异常响声等。

(2)绘制系统原理图。对故障发生的系统和检测系统进行认真分析,绘制结构组成原理图、功能组成

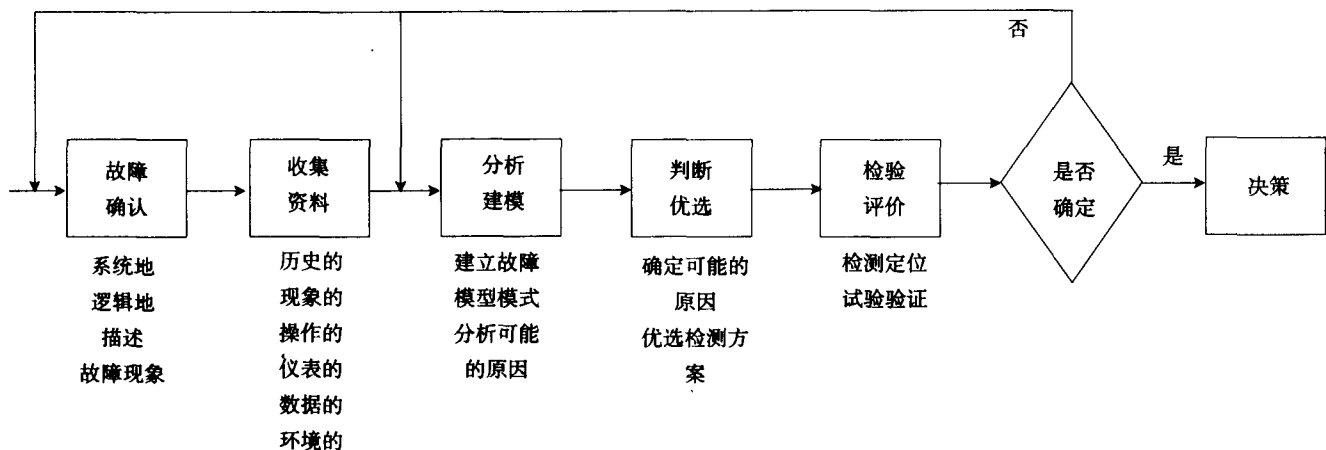


图 3 利用系统分析方法进行故障诊断步骤示意图

原理图或可靠性原理框图, 电子设备有时还要绘制详细的电子线路图和检测原理图。

(3) 跑图分析。根据上述原理图, 综合故障现象, 按照系统工作原理对信息流进行分析, 初步判断故障的原因或部位, 制订相应的排查步骤与检测方法。

(4) 检测定位。对系统进行加电检测, 必要时可增加辅助监测设备, 直至获得充分证据, 实现故障隔离与定位为止。

## 4 故障诊断方法

航天发射故障诊断方法是指故障诊断过程所采取的具体诊断手段或诊断设备, 一般可按方法复杂程度、检测手段类型和方法的理论基础进行诊断。

### 4.1 按方法复杂程度进行诊断

按方法复杂程度进行诊断, 一般有简易诊断法和精密诊断法。简易诊断相当于人的初级健康诊断, 一般由现场工作人员实施, 对监测结果不需要作进一步的处理和分析, 仅用有限的检测数据和合格范围加以比较, 即可判断设备或系统是否存在故障。通常所称的“故障诊断”不是这种简易诊断, 而指的是较为复杂的精密诊断。一般情况下, 当简易诊断发现设备或系统存在异常现象时, 应转入精密诊断。

精密诊断是对异常设备或系统进行的精确诊断, 通常由故障诊断水平较高的专家来进行。精密诊断不仅要对检测数据作进一步处理、分析, 确认设备或系统是否存在故障, 还要检测、隔离故障, 分析产生故障的原因和机理, 判断故障性质和程序, 提出治理和预防的措施。

### 4.2 按检测手段类型进行诊断

按检测手段进行诊断, 一般有以下七种诊断方法。

(1) 直接观察诊断法。根据人的经验, 通过人的感觉器官对设备的状态进行视、听、闻、触摸等直接观察判断的方法称为直接观察法。这种方法可以获得可靠的第一手资料, 但观察的对象主要是静止的、能直接观察到的设备现象, 如发热、发光、发声、有气味、有东西晃动等, 这是一种较为简单的物理检查手段。在实际诊断中, 主要用于设备状态设置错误、接口连接错误以及设备磨损、电流过

载等故障的判断。

(2) 性能参数测定法。通过测定系统或设备的性能参数来判定系统或设备状态的方法称为性能参数判定法。性能参数一般包括电信号、磁特性、功率、物体运动、系统特征量、机械设备性能等。性能参数测定可分为三类: 一类是用物理和化学手段直接测定设备的物理与化学性能; 二类是用输入和输出之间的关系来表示系统的性能; 三类是用两个或两上以上的变量之间的关系来识别系统的特性。采用这种方法, 通常需要使用专门的检测设备或手动、自动的检测系统。

(3) 无损检测诊断法。对被测设备不造成损坏的非接触式检测方法称为无损检测诊断法, 一般包括声、光、热等检测方法。主要用于一些无法或不便于安装接触式传感器的设备故障的诊断。采用这种方法, 通常需要使用专门的无损检测设备, 如超声波检测仪、红外检测仪及 X 光透视仪等设备。

(4) 振动与噪声测定诊断法。对于机械和电子系统, 振动和噪声是很重要的诊断信息, 应用比较广泛。振动与噪声测定诊断法主要用于机电设备故障的诊断。通过测量振动体的位移、速度、加速度的大小, 以及振动的频率、周期、相位角、频谱图等, 可以对设备的故障进行诊断。通过对设备噪声测量与分析, 研究其频率组成和各分量的变化情况, 可以确定设备故障的部位和程度。

(5) 高低温诊断法。通过设置高温环境或低温环境, 对设备性能进行测定的方法称为高低温诊断法。高低温诊断法主要用于受温度影响较大的设备的故障判定, 例如电子产品、焊接设备等。采用这种方法, 一般要使用高低温箱或环境实验室等检测设备。

(6) 化学成份测定法。通过测定设备零部件或元器件内部化学成份来判定设备故障的方法称为化学成份测定法。化学成份测定法主要用于设备腐蚀、磨损、变质的产物或设备中多余物成份的判定, 以分析故障形成的机理。采用这种方法, 一般需要专门的理化实验室进行检测。

(7) 软件诊断法。软件故障诊断是根据软件(包括程序、数据和文档)的静态表现形式和动态运行状态信息查找故障源, 并确定相应决策的一种方法。采用软件诊断法需要进行编码测试或专门的软件工具。

### 4.3 按方法的理论基础进行诊断

按方法的理论基础进行诊断, 一般有以下三种诊断方法。

(1) 基于模型的诊断方法。核心思想是用解析冗余取代硬件冗余, 通过构造观测器估计出系统的输出值, 将其同输出测量值相比较, 从中获取故障信息。基于模型的诊断方法一般可分为基于参数估计的诊断方法和基于状态估计的诊断方法两种。

基于参数估计的故障诊断方法的思路是: 由机理分析确定系统的模型参数和物理元器件参数之间的关系方程  $u=f(v)$ , 由实时辨识求得系统的实际模型参数  $u'$ , 由  $u=f(v)$  和  $u'$  求解实际的物理元器件参数  $p'$ , 将  $p$  和  $p'$  的标称值比较从而得知系统是否有故障及故障的程度。

基于状态估计的故障诊断方法最早是由贝尔德 (Beard) 于 1971 年首先提出的, 这种诊断方法发展至今已形成三种基本方法: ① 贝尔德提出的故障检测滤波器的方法; ② 梅恩乐 (Menra) 和培松 (Peshon) 提出的基于卡尔曼滤波器的方法、德拉克 (Dlark) 提出的构造卡尔曼滤波器阵列; ③ 德克特 (Deckert) 提出的一致性空间的方法。一致性空间法实现故障诊断可分为两步: 一是形成残差, 即真实系统的输出与状态观测器或卡尔曼滤波器输出的差值; 二是从残差中提出故障特征进而实现故障诊断。

多年以来, 基于模型的诊断方法获得了深入的研究, 但在工程实践中, 由于获得系统精确模型的困难性, 限制了其使用范围和效果。

(2) 基于信号的诊断方法。核心思想是利用信号模型, 如相关函数、频谱等, 提取诸如方差、幅值、频

(上接第 35 页)

率等特征值, 检测出故障。例如, 旋转机械中的滚动轴承在出现疲劳脱落、压痕或局部腐蚀等故障时, 其振动信号的功率谱就会出现相应的特征, 利用这种特征就可对系统或设备的故障进行诊断。基于信号的诊断方法一般可分为以下四种: 直接测量系统输入输出方法、小波变换方法、主元分析方法和基于信号融合的方法。

(3) 基于知识的诊断方法。基于知识的诊断方法不需要对象的精确数学模型, 诊断对象作为一个有机整体被研究, 以知识处理技术为基础, 诊断问题的求解致力于通过模拟领域专家在推理过程中控制和运用各种诊断知识的行为而获得解决, 目前研究工作发展迅速、成果迭出。基于知识的诊断方法一般可分为以下五种: 专家系统诊断法、模糊故障诊断法、基于故障树的故障诊断法、基于神经网络的故障诊断法和基于智能体的故障诊断法。

率等特征值, 检测出故障。例如, 旋转机械中的滚动轴承在出现疲劳脱落、压痕或局部腐蚀等故障时, 其振动信号的功率谱就会出现相应的特征, 利用这种特征就可对系统或设备的故障进行诊断。基于信号的诊断方法一般可分为以下四种: 直接测量系统输入输出方法、小波变换方法、主元分析方法和基于信号融合的方法。

## 5 结束语

航天发射故障具有诱因复杂、诊断要求快速和准确的特点, 本文所阐述的诊断程序、分析方法和诊断方法在实际工作中具有较好的指导作用, 但随着航天技术的不断发展, 还需要不断地积累、总结和研究, 才能探索出真正适应航天发射故障诊断需要的实用技术。

### 参考文献

- [1] 徐克俊. 发射工程学概论. 北京: 国防工业出版社, 2003
- [2] 穆山. 运载火箭控制系统. 北京: 国防工业出版社, 2003
- [3] 管理系统工程教程. 北京: 经济科学出版社, 1987
- [4] 虞和济. 设备故障诊断工程. 北京: 冶金工业出版社, 2001

罩装配、扣罩要求, 为进一步提升载人航天发射场测试发射的综合能力发挥重要作用。

### 参考文献

- [1] 921-520 工程航天器加注扣罩厂房初步设计说明. 总装备部工程设计研究所. 2007.11
- [2] TG-1 载人航天二期工程对发射场要求. 航天科技集团公司五院. 2006.04
- [3] CZ-2F 对发射场整流罩厂房技术要求. 航天科技集团公司一院. 2007.04
- [4] 921 工程第二步第一阶段发射场系统总体方案设计. 总装备部工程设计研究所, 总装二十基地. 2007.12

## 5 结束语

航天器加注扣罩厂房采用加注、扣罩一厅方案, 简化了航天器在厂房内的工艺流程, 减小了设计规模, 能够较好的满足目标飞行器、飞船的加注和整流