

航天发射故障综合诊断方法

郑永煌^{1,2} 徐克俊¹ 王军^{1,2}

(1 中国酒泉卫星发射中心 2 西安交通大学电信学院)

摘要 介绍航天发射故障综合诊断方法,综合诊断模型与诊断策略,并给出一个典型的综合诊断案例。

关键词 航天发射故障 综合诊断方法 综合诊断模型 综合诊断策略

1 引言

航天发射是一个复杂的系统工程,尽管传统的航天发射故障诊断实用技术和经典技术对系统或设备某些特定故障的诊断非常有效,但面对故障特征多样、诱发原因复杂的故障诊断问题,有时用单一诊断技术很难做出全面正确的判断,需要将多种诊断信息、诊断手段和诊断方法等进行综合,才能获得可靠的诊断结果。这种应用多种诊断技术进行故障诊断的方法称为故障综合诊断方法。

2 综合诊断方法

2.1 诊断信息综合

诊断信息综合是指把来自不同渠道、不同检测手段获得的与故障相关的诊断信息综合起来,以便快速、准确地进行故障分析、隔离与定位。诊断信息综合主要包括以下几个方面:

(1)测量信息与观察信息的综合。一个系统的工作状态往往以多种形式表现出来,如测量数据、曲线、设备面板的状态指示、操作人员听到的声音、看到的部件运动等。因此,系统中某个部件损坏或功能异常,其测量结果与观察结果往往具有内在统一的联系。在故障诊断中,可以将几种信息相互印证或进行等价或相互导出,作为判断故障的依据。如:根据“+20V 电源输出为 0”的测量结果,可以印证、导出“+20V 电源指示灯不亮”的结果,从而说明+20V 电源工作异常。这里,“+20V 电源指示灯不亮”可以作为电源工作异常的判断条件,但不是充分条件,综合考

虑“+20V 电源输出为 0”的测量结果后,电源工作异常的理由就比较充分了,结论也因此可靠了。

(2)正向观测信息与反向观测信息的综合。在故障诊断过程中,有时所能得到的故障信息往往十分有限,特别是故障刚发现的时候。这时除了可以由异常现象正向分析故障原因外,也可以由正常现象通过反向合理推理得到新的诊断信息,并将正向和反向诊断信息加以综合运用,为下一步诊断提供可靠依据。例如:在一次火箭模飞总检查中出现了关机时间超差的故障,在故障诊断中,除了记录的时间参数不合格外,其它信息很少。从关机时间超差的量级来看,达到了 600ms 以上,正向分析故障原因可能是控制系统惯性平台出了问题,但证据不足。这时操作人员反映该平台是新换上的产品,单元测试时产品功能正常,参数合格。从这个正常表现反过来进行推理,平台本身工作正常,会不会是平台放置方位出错呢?综合考虑关机时间超差大于 600ms 的数据和这一反向推理得到的新信息,最后诊断出故障原因是平台放置方位与正确方位相差 7°以上。

(3)观测信息与环境信息的综合。设备检测时的环境包括电磁环境和天气环境,在环境恶劣时,常常会引起设备故障或暴露产品缺陷。在故障诊断中,观测信息与环境信息综合考虑,可以作为诊断这类故障的有效依据。例如,一种电子设备在发射区发生故障,返回技术区检测三天,故障不再复现。为何在发射区设备故障固定出现,在技术区单元测试间设备故障不再出现呢?综合考虑检测对象所处环境,问题就清楚了。原来,电子设备在发射区时,时令已至秋

冬之交,室外气温降至 0℃左右。电子设备昼夜暴露在这种低温环境下,其内部有缺陷的三极管一脚断开,表现出故障状态;而回到技术区单元测试间后,环境温度相对较高,有缺陷的三极管管脚又恢复了接触状态,故障不再出现。经实验室冷冻实验证明,在低温条件下,该电子设备故障固定出现,验证了所诊断的结果,最终排除了该故障。

(4)历史信息与现时信息的综合。设备从设计、生产到使用是一个连续的过程,其历史信息蕴含着设备的本质特性,把历史信息与现时信息综合起来,对设备故障诊断将起着重要的作用。例如,在一次任务对火箭推进剂加注泵的故障诊断中,发现加注泵供电电流增大,一时难以判断故障原因。直接检查其供电电压正常,但故障电流上升是“猛增”性质。通过查阅历史资料,发现加注泵电流上升故障中有泵卡死模式,再检查泵出现故障时,泵前泵后压力没有变化,即判断泵未转动,综合以上信息最终诊断出加注泵故障原因是内部螺栓脱落使泵叶轮卡死所致。

2.2 诊断手段综合

诊断手段综合是指对同一个系统或设备同时采取多种检测手段获取设备信息,实现故障隔离与定位的一种综合性方法。诊断手段综合主要包括以下几个方面:

(1)硬件诊断手段与软件诊断手段的综合。航天发射系统是一个硬件与软件集成的系统,有时故障难以分清是硬件故障,还是软件故障,在故障诊断过程中,常常需要综合应用硬件诊断手段和软件诊断手段对故障进行隔离与定位。例如,一枚火箭 B 码点火控制终端出现点火时间设置失败故障后,先采用硬件诊断手段,将故障原因定位在设备通讯接口驱动芯片电路板地信号与引线接触不良,导致综合单元和分单元通信不稳定,造成点火时间设置失败;但是,在后续测试中该故障仍然出现,经进一步复查软件和软件测试,最终将故障定位在综合单元与分单元之间的通信软件存在设计缺陷,使软件容错处理不能正常起作用,导致分单元收不到点火时间。对硬件设备故障诊断时,有时为了获取更多的诊断信息,在增加硬件设备监测的同时,也通过修改或编辑软件的办法增加监测手段。例如,一次火箭总体网出现漏发一个模飞时串故障后,专门编辑了一个有 30 个模拟时串且每个时串从 1 到 30 顺序编号的数据文

件作为模拟源进行数据回放,很快将故障定位在多屏显示软件漏发该时串上。

(2)直接诊断手段与间接诊断手段的综合。设备故障通常由设备外部环境影响和内部存在固有缺陷引起。在具体的故障诊断中,可以使用各种直接诊断手段,如通过人的感觉器官观察设备的工作表现或使用监测设备检测设备的输入输出,以获取设备的直接状态信息。同时,也可交叉利用一些间接诊断手段,如声学检测、红外检测、高低温试验、模拟仿真等,以获取设备的间接信息。将直接信息与间接信息结合起来,综合对故障进行隔离与定位,可以提高诊断的效率和准确性。例如,在一次火箭控制系统测试中,一级发动机出现了异常摆动,经现场检查确认是由于伺服机构连接插头连接错误,致使发动机出现四次异常的极限摆动。这种异常极限摆动对发动机会产生什么样的后果无法进行检查。因此,在北京重新组装了一台发动机进行实物仿真试验,结果证明这种摆动对发动机不会造成影响,可以实施发射。

(3)有线诊断手段与无线诊断手段的综合。对一些无线电设备(如应答机、接收机等)进行故障诊断时,可以综合应用有线与无线手段对故障实施隔离与定位。例如,一台应答机工作时不能自锁。用有线检测手段检查其功能正常,参数合格。后采用无线检测手段,移动天线位置,改变电波传输途径,结果诊断出故障原因不是应答机本身问题,而是天线位置设计不合理造成的。

(4)物理诊断手段与化学诊断手段的综合。对一些元器件等故障,为了弄清故障机理,需要综合应用物理诊断手段与化学诊断手段。例如,在一次火箭推进剂利用系统地面控制器测试仪故障诊断中,先对测试仪进行开盖观察与检测,发现继电器板上一个继电器失效,将继电器送回北京失效中心分析,发现有多余物卡在继电器内部衔铁和支架之间,经化学成份分析,该多余物为铁质,确认是其造成继电器失效。

2.3 诊断方法综合

诊断方法综合是指将多种诊断方法进行综合运用,充分发挥各种诊断方法的优点,提高故障诊断准确性和诊断效率的一种综合性方法。在航天发射故障诊断中,基本诊断技术、实用诊断技术和经典诊

断技术很多,存在着多种诊断技术的组合。如:简易诊断法与精密诊断法的综合、系统原理分析法与各种检测手段的综合、实用故障诊断技术中各种诊断方法的综合、具有不同理论基础诊断方法的综合,等等。

(1)简易诊断法与精密诊断法的综合。简易诊断对监测结果只作简单的判断,不作进一步的分析和处理,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。通过精密诊断,可以确认设备或系统是否存在故障,判断故障性质,并确定故障治理和预防的措施。例如,在一次船箭地联合检查中,遥测记录的数据表明,整流罩灭火装置压力超差。当即转入精密诊断,一方面组织专家进行分析,另一方面对灭火装置密封性进行检测。经分析及试验验证,灭火装置状态正常,无泄漏,压力值超差是压力传感器受到外界的射频干扰所致,不会对系统造成危害,不影响飞行任务。

(2)系统原理分析法与各种检测手段的综合。系统原理分析法是系统或设备出现异常现象后,经常并最先采用的分析方法,但系统原理分析只是为下一步故障检测与隔离奠定基础,以避免不必要的检测或进行错误的检测。因此,在实际故障诊断中,系统原理分析法经常与各种检测手段进行综合,以提高故障诊断效率和诊断准确性。例如,在一次火箭总检查中,当程序进行到转电步骤时,控制系统地面发控台“准备好”灯灭,9个耗尽指示灯异常亮。出现异常现象后,首先对控制系统转电工作原理图进行了分析,提出了转电通路短接、脱落插头短接、箭上配电器继电器短接等几种故障模式。然后,用数字万用表逐段排查电缆,将故障定位在箭上配电器;随后将配电器下箭,返回进行单元测试,确认故障点在配电器中的一个插座上,有多点出现短路现象。进一步从配电器局部电路图分析,造成该故障现象的原因可能是继电器触点短路或粘连。经过开盖检查、测试,最后判定该故障原因是配电器内部一个继电器两个触点之间短路所致。

(3)实用故障诊断技术中各种诊断方法的综合。随着航天发射技术的不断发展,航天发射故障也日趋复杂,单靠一种实用诊断技术已难以满足故障诊断的要求,需要综合应用各种实用故障诊断法对故障实施隔离与定位。例如,在一次任务发射区控制系

统火工品回路阻值测试时,其中一个插座的两点开路(正常应为连接状态)。经现场目视检查,发现该插座的一根插针缩入,导致开路。为了进一步查清故障机理,专门对一个同型号插座进行解剖,了解其内部结构,并选择一个同型号插座进行缩针试验。经故障模拟试验和相关分析,确认该插座缩针是由于连接插头时使该点受到较大外力所致,不会出现其他短路故障现象。

(4)具有不同理论基础诊断方法的综合。例如:
①小波分析与神经网络的综合。故障诊断的一个主要步骤是对信号进行采集和处理,而小波分析无疑是对信号进行分析和处理的一个有效工具。神经网络可以有效地实现输入到输出之间的非线性映射,具有自学习和模式识别能力,适合于诊断自动化。将小波分析与神经网络结合并应用于故障诊断是客观实际的需要,可进一步提高故障确诊率和诊断效率。
②专家系统与故障树的综合。专家系统在知识表达、知识处理与知识运用等方面具有其独特的优势;故障树是一种逆归定义的数据结构,特别适合于存贮具有层次性的结构数据。将上述二者结合,可以有效地解决专家系统诊断知识的“瓶颈”问题,更有效地发挥故障诊断专家系统的作用。
③神经网络与模糊逻辑的综合。神经网络能映射任意函数关系和具有并行处理、自学习和诊断能力;模糊逻辑能有效地对难以建立精确模型的系统实施诊断。因此,将二者结合起来,既能表示定性知识,又具有很好的自学习和故障诊断能力。

3 综合故障诊断模型与诊断策略

3.1 综合故障诊断模型

根据不同诊断对象的不同要求,综合故障诊断模型可以采取不同的结构形式。由于层次诊断模型具有结构清晰、诊断搜索工作量少、便于实施等特点,在航天发射故障诊断中得到了应用与发展。基于层次结构的综合故障诊断模型,是按照系统的工作原理和层次结构先逐级进行分解,并将整个系统的诊断问题划分为不同层次、不同规模的子诊断问题,如图 1 所示。

根据系统工作原理和故障特征信息,复杂诊断问题可以分解为 n 个问题,即:问题 1、……、问题 i 、……、问题 n 。按照诊断信息、诊断手段、诊断方法

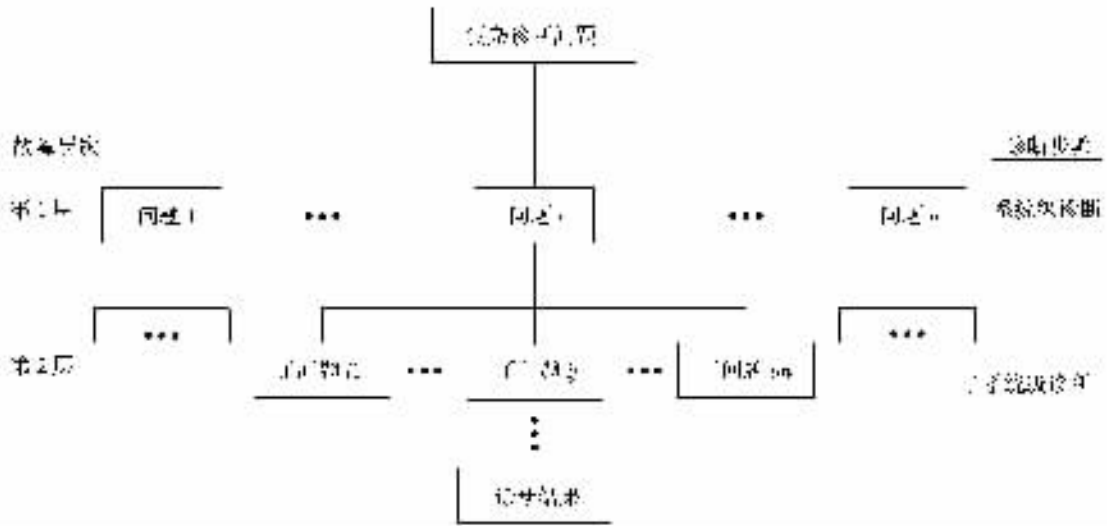


图 1 层次综合故障诊断模型

综合的需要，可以将问题进一步分解为 m 个子问题，例如，问题 i 可分解为：问题 $i1$ 、……、问题 ij 、……、问题 im 。以此类推，可以将复杂诊断问题分解到更小的问题，以便能够被方便、准确地检测、隔离与定位。

根据分解以后各子诊断问题的特点，按照故障分析、故障检测、故障定位、试验验证、故障整治的步骤，分别选择与其最为适用的故障诊断信息、诊断手段和诊断方法，循环进行诊断，直至得到满意的结果，如图 2 所示。

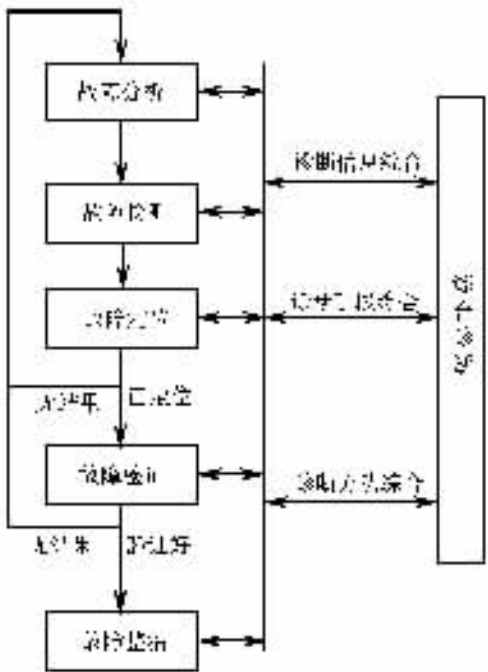


图 2 综合故障诊断过程示意图

3.2 综合故障诊断策略

综合故障诊断通常由高层向低层进行，即先从系统级开始，然后是部件级、功能模块级和元器件级。

诊断时，按照简易诊断法首先对采集到的数据或得到的设备信息进行综合分析（如对波形数据进行幅度和频率分析，对漂移信号进行漂移量计算等），根据事先规定的合格范围，将其转换成具有可信度的故障征兆事实。

其次进入精密诊断阶段，即根据故障征兆事实，进一步按照系统原理分析法，对设备的条件特性，进行综合分析推理，判断设备是否存在故障或故障发生部位。

第三，如果根据已获得的信息综合分析，推判不出合理的结果，或需要对前面的推理结果进行验证，则可以按照先易后难的原则，应用直接诊断法、对比试验法、故障模拟法等实用诊断手段或综合检测手段获取设备更多的信息，以对设备故障进行认定或对故障进行隔离与定位。

第四，如果对前面使用的诊断方法产生的诊断结果不满意或没有结果，再用故障树、故障字典等经典技术进行诊断；若仍对诊断结果不满意或没有结果，可采用专家系统与故障树结合等集成方法进行诊断，以便得到精确的诊断结果。

4 综合故障诊断案例

该案例为一次测试中火箭控制系统二级电爆管等效器 YD 灯不亮的故障。

4.1 故障现象

一次火箭控制系统进行定时关机、耗尽关机、总检 II 模飞测试过程中,电爆管等效器上 YD(游机氧化剂断流活门起爆电爆管)信号灯不亮。

4.2 故障诊断

经过以下三个步骤,对故障进行诊断:

第一步,故障分析。首先应用系统原理分析法对故障进行分析,画出 YD 信号接收电路,如图 3 所示。

由 YD 信号接收电路可以看出,YD 信号灯点亮,需由箭上发出电路信号,经由四个环节才能实现。因此,导致 YD 信号灯不亮的故障,可能有以下 5 种模式:

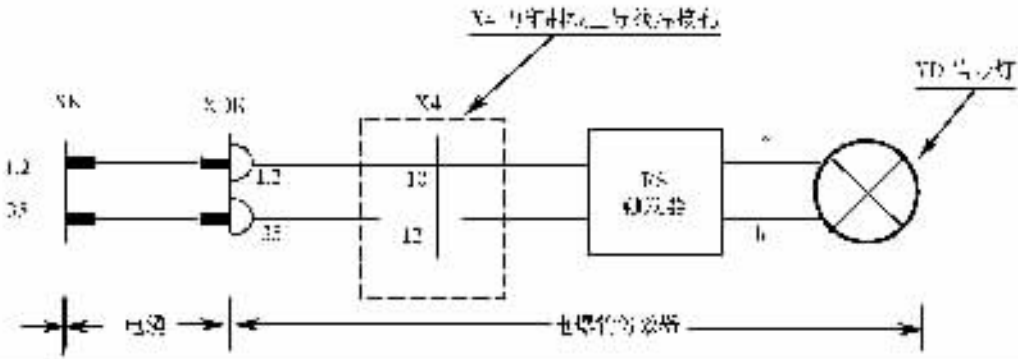


图 3 YD 信号接收电路示意图

①电爆管等效器没有收到或箭上没有发出 YD 信号。

②XK~XDK 电缆不导通。

③印制板 X4 有缺陷。

④RS 触发器损坏。

⑤信号灯损坏。

第二步,故障检测与隔离。根据故障分析结果,对上述故障模式逐个进行故障检测与隔离。故障检测过程中,综合应用隔离诊断法、寻迹测量法、换元法和物理检查法,实现故障的快速诊断。

(1)隔离诊断法和寻迹测量法。包括以下三个方面:

①在电爆管等效器电缆 XK 与箭上接口处设置断点,即断开 XK 插头,用 18V 电池直接给 YD 时串信号输入点(XK/1,2 对 XK/35) 加电,YD 时串灯不亮,此时可以确定故障在地面,与箭上无关。

②在 XDK 处设置断点,即断开 XDK 插头,用 18V 电池直接给电爆管等效器插座 YD 时串信号输入点(XDK/1,2 对 XDK/35)加电,YD 时串灯不亮,此时可以确定故障在电爆管等效器本体,与 XK~XDK 电缆无关。

③在 YD 信号灯与 RS 触发器接口处设置断点,用 3V 电池直接给 YD 时串信号灯输入点(图 3 中 a、b 点)加电,YD 时串灯亮,可以确定 YD 时串灯是好

的,故障与信号灯无关。

(2)换元法。拔去 RS 触发器所在的电路板,用备份板取代原电路板,用 18V 电池直接给电爆管等效器插座 YD 时串信号输入点(XDK/1,2 对 XDK/35) 加电,YD 时串灯不亮,此时可以确定故障与 RS 触发器所在电路板无关,也与 RS 触发器无关。问题可能在印制板上。

(3)物理检查法。拔去 RS 触发器所在的电路板,用三用表 R×1 档测 XDK/1,2 对 35 阻值,正常应为开路,阻值无穷大,实测值约为 2Ω,初步断定 YD 信号输入端有短路现象。经仔细检查,印制板上 X4 中 12 脚多股导线中的一股铜丝与 10 脚多股导线有似通非通现象,如图 4 所示。将 X4 中 12 脚中的故障导线挑开,故障消失。

第三步,故障定位。综合以上分析,确认故障原因是由于印制板上 X4 中 12 脚多股导线中的一股铜丝与 10 脚多股导线短接,造成 RS 触发器无信号输

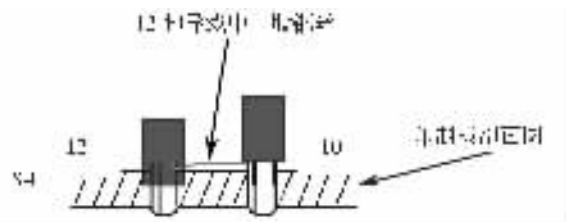


图 4 X4 电缆 12 脚和 10 脚连接状态示意图

入,导致 YD 指示灯不亮。

5 结束语

综合诊断方法是航天发射故障诊断中比较有效的一种方法,在实际应用中应注意从易到难,从高层到低层,从系统级到元器件,逐步将多种诊断信息、诊断手段和诊断方法综合应用,提高故障诊断准确性和效率。◇

(上接第 53 页)
后再来处理。

以上两条原则和要求既有共同点,也有矛盾之处。共同点,即对于有重大后果的故障,处理要求都是严格的,但对其它故障,要求则有差别:第一条偏严,第二条稍宽。如何掌握宽严尺度?这就要求在航天发射故障诊断中,切实做好故障分析工作,故障处理最终采取何种维修对策,完全依赖于故障诊断的结果,特别是故障分离的结果,故障处理离不开符合实际的故障分析;应用以可靠性为中心的维修理论,常常要站在较保守的立场上来评估故障后果,即如果没有确凿的证据证明故障不具有严重后果,就先暂定它具有严重后果,以保证发射风险最小。

(2) 处理对策

一般包括如下方法:

①更改设计、生产工艺、软件等。是从根本上提高设备的固有可靠性,消除设备的固有缺陷,彻底排除故障。该方法对于解决具有批次性质量缺陷问题的故障是必须的。

②更换出现故障的设备和零部件。该方法对于偶然出现的个别设备故障和个别零部件故障,常常是有效的。因为它可以提高设备不出偶然故障的概率。

③修理出现故障的设备和零部件,该方法对于因生产中的个别使用操作引起的故障和因耗损特性引起的个别零部件故障,常常是有效的。因为它可以

参 考 文 献

- [1] 王仲生. 智能故障诊断与容错控制. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.4
- [2] 陈炜, 吴志良. 故障诊断专家系统结合故障树技术的结构研究. 航海技术, 2005, 第 6 期
- [3] 蔡远文等. 运载火箭测试发射过程中故障模式分析与故障诊断研究技术报告. 北京: 装备指挥技术学院, 2002
- [4] 张道昶, 郑永煌. 载人航天测试发射总体文汇. 酒泉卫星发射中心, 2005

纠正生产中的这种个别使用操作差错或延长有耗损特性零部件的有效寿命。

④调整或改变使用操作或设备运行的程序、方法,以避开引起设备故障的外部影响。该方法对于处理一般故障和轻微故障是有效的。

⑤维护保养和状态监测。该方法对于处理轻微故障或有故障征兆(一旦发生,故障影响也是轻微的)设备有效。因为它可以延缓故障的发生或预测、预防故障的发生。

⑥起动防护装置或安全装置。该方法对于处理航天发射产品在空气中飞行时发生危及航天员安全或地面安全目标的重大故障是必要和有效的。

⑦系统重构。对于处理有裕度设计产品的故障是常用的方法,也是自诊治系统修复故障的有效方法。

4 结束语

本文所介绍的航天发射故障检测方法和故障判据以及故障处理方法是在总结我国几十年航天测试发射的经验基础上,结合大量典型实例总结提炼出来的,在实际工作中具有较好的指导作用。◇

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] 虞和济. 设备故障诊断工程. 北京: 冶金工业出版社, 2001