基于时序动作分析和确认的技术风险管理

李明华　编著

中国宇航出版社

基于时序动作分析和确认的技术风险管理

李明华　编著

中国宇航出版社
·北京·

图书在版编目（CIP）数据

基于时序动作分析和确认的技术风险管理/李明华编著．-- 北京：中国宇航出版社，2017.2

ISBN 978-7-5159-1279-0

Ⅰ.①基… Ⅱ.①李… Ⅲ.①飞行器－时序控制－风险管理－研究 Ⅳ.①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 035423 号

责任编辑　彭晨光　　封面设计　宇星文化

出　版
发　行　中国宇航出版社

社　址　北京市阜成路 8 号　邮　编　100830
(010)60286808　(010)68768548

网　址　www.caphbook.com

经　销　新华书店

发行部　(010)60286888　(010)68371900
(010)60286887　(010)60286804(传真)

零售店　读者服务部　(010)68371105

承　印　河北画中画印刷科技有限公司

版　次　2017 年 2 月第 1 版
2017 年 2 月第 1 次印刷

规　格　787×1092

开　本　1/16

印　张　8.5

字　数　207 千字

书　号　ISBN 978-7-5159-1279-0

定　价　68.00 元

前　言

航天工业是创新性极强的高科技行业，航天重大工程的实施和武器系统研制中都大量应用最新最先进的科学技术，体现国家的科研创新水平和工业综合实力。同时，航天工业又是高风险行业，其科研、生产和试验过程涉及易燃易爆、高温、高压、低温、剧毒、辐射等多种危险和有害因素。由于新材料、新工艺、新技术的大量应用，对一些可能导致故障和危险的因素“从技术上未吃透”，导致在科研试验和装备演训中时有事故发生。以创新能力极强、代表着美国商业航天创新奇迹的太空探索技术公司（SpaceX）为例，在取得令国际航天界瞩目的快速发展、多次成功实现火箭一子级回收的辉煌成就的同时，近年来也屡次遭受重大挫折。国内航天工业在近年来快速发展的过程中，也多次遭受重大挫折。

导弹武器系统和运载火箭研制生产中遇到的技术风险，与一般工业系统中的技术风险有巨大的、本质上的区别。运载火箭每一次成功的发射飞行，均须历经射前准备、点火、起飞、各子级飞行和分离、抛整流罩、星箭分离等多个飞行时段；每个飞行时段均对精度和顺序有极高要求，包含数以千计的时序指令和动作；在严密的时序指令控制下，总体、控制、动力、有效载荷、遥外测、测控、发射场等各系统的数百台单机设备、数万个元器件/组件和软件模块以毫秒乃至微秒级的时序精度精准协同工作。对于导弹武器系统而言，由于时间、空间条件更加苛刻，战场环境条件更为恶劣，使得时序动作规模更大，时序要求更精准，时序设计更为复杂，极大地加剧了武器系统研制的难度。

航天科技工作者的挑战正在于对这台超复杂人工系统的精密时序和动作设计，必须确保每一个时序动作都能得到精密的配合，才能保证大系统的正常有序运行。技术风险一般隐含于每一个时段、每一个时序、每一个动作的精准设计中。在航天部组件、元器件质量及可靠性水平已大幅提高的今天，由于器件失效导致的系统失效已能控制在一定的水平，设计上更大的挑战和风险来自于对每个时序动作所涉及产品、环境、配合等全要素的分析、确认和残余风险评估。这正是本书所提出的基于时序动作分析和确认的技术风险管理方法的基本出发点。

本书的目的不在于对传统的、一般的技术风险分析与管理技术进行介绍和罗列。时序动作分析和确认是本书的特色和贡献所在，是导弹武器系统和运载火箭技术风险分析的原创性技术成果，也是与其他技术风险管理图书和成果的最大区别。在艰难而又自豪的研制历程中，科研工作者对于如何识别、分析、评估乃至控制风险有独到的思考和见解，历经

工程实践，最终提出、总结并完善了一套源自基层实践、独具中国航天特色的技术风险管理方法，本书是对中国航天原创性技术风险管理研究和实践成果的总结。

全书由李明华策划并担任主编。第1章由李明华、杨卓鹏、沈波、周一磊编写，第2章由李明华、王旭刚、周一磊、张伟等编写，第3章由角淑媛、程海龙编写，第4章由周一磊、王旭刚、翟章明编写，第5章由李明华、郑恒、任立明等编写。本书创作过程中，得到了中国运载火箭技术研究院、中国航天标准化与产品保证研究院等相关单位领导和技术人员的大力支持，在此一并表示感谢。

我们坚信，本书所述的技术风险识别、分析、评估和管理的理念以及技术，在未来还有更大的发展空间和更广阔的应用前景。限于编著者水平，书中难免有不到位、不准确之处，对技术方法的科学性、理论性、可扩展性的论述可能存在局限，恳请读者明鉴并提出宝贵意见。

李明华

2016年12月

目　录

第1章 绪 论

1.1 背景

大型复杂装备（导弹武器系统、运载火箭系统等航天产品）的论证与研制是一项多学科交叉、多部门协作、多阶段耦合的创造性实践活动，论证与研制能力是一个国家军事力量、科学技术、经济实力、政治威慑力等综合国力的高度体现。《中国制造 2025》特别对航空航天装备、海洋工程装备、先进轨道交通装备等高端装备提出了“提升自主设计水平和系统集成能力”的发展目标，该目标就是对大型复杂装备论证与研制能力的高度概括与总体要求。在新一轮科技革命和产业变革的浪潮中，各大国综合国力同台竞技，大型复杂装备的战略意义愈加显著。

伴随着智能化、网络化、信息化的高速发展，大型复杂装备特别是导弹武器系统、运载火箭系统等航天产品逐步表现出复杂系统的发展态势，呈现出系统规模庞杂、时序动作繁杂、使用环境苛刻、创新性强、风险损失大等特点。

（1）系统规模庞杂

大型复杂装备一般由数十个系统、数以千计甚至万计的单元（元器件和部组件）组成。例如，某导弹武器系统仅飞控过程就涉及控制系统、遥测系统、外测安全系统、伺服系统、火工品系统等多个系统，火工品系统又包含小火箭、爆炸螺栓、非电导爆索、推冲器、切割索、拔销器等十余类单元，其复杂程度可见一斑。大型复杂装备所属各单元在静态结构上表现为并联、串联、共因、网络等错综复杂的耦合关系，在动态结构上表现为串行、并行、选择、控制等或强或弱的关联性。每个单元存在若干个可能运行的状态，导致装备整体运行状态数目巨大。总体而言，大型复杂装备在系统规模方面表现出组成复杂、结构复杂、状态复杂的特点。一般认为，系统的可靠性取决于各单元的可靠性，系统越复杂，其可靠性保证难度越大。

（2）时序动作繁杂

大型复杂装备特别是导弹武器系统的每个飞行时段均对时间精度和动作时序有极高要求，仅点火时序就涉及时间延迟判据、视加速度判据、压力判据、高度判据、机械动作触发等与时间和动作密切相关的判据形式。在整个任务剖面过程中，装备系统严格的指令时序控制、各单元毫秒乃至微秒级的动作协同响应，使其表现出极为显著的时序动作复杂特征。

（3）使用环境苛刻

不同于传统装备的温和使用环境和简单的任务剖面，运载火箭等航天产品存在射前准备、点火、起飞、各子级飞行和分离、抛整流罩等多个飞行时段，某类导弹武器系统还存

在水面分离、大气层飞出与再入等独特时段，这些时段过程中的自然环境因素和诱导环境因素耦合作用。高温、低温、相对湿度、太阳辐射等自然环境因素，振动、冲击、倾斜、摇摆等诱导环境因素，对导弹武器系统苛刻的风险分析、全面的风险确认提出了严酷要求。

（4）创新性强

大型复杂装备是一个多学科、高技术的融合体，其论证与研制过程涉及力学、机械工程、仪器科学与技术、材料科学与工程、控制科学与工程、化学工程与技术等多个专业，存在新环境、新技术、新工艺、新材料；新状态等多种未知领域，以及与此相关的全新贮存、测试、发射和飞行环境的飞行验证，各专业技术集成应用，创新点多、探索性强、难度大，尤其体现在产品设计、制造、材料选用、试验等技术风险方面。

（5）风险损失大

经费方面，大型复杂装备的论证与研制是一项规模庞大的系统工程，需要投入大量的资金，少则数亿元，多则几十亿元，甚至上百亿元。按照一般规律，投资规模越大，投资者承担的风险就越大。对投资规模较大的投资者，还将面临着通货膨胀率、贷款利息率以及航天市场供求关系等变化所带来的各种风险。研制周期方面，从装备立项到定型并投入使用，要经历论证、方案、研制、设计定型、生产定型等多个阶段，这一过程长达几年、甚至十几年的时间。在长期的研制过程中，市场供求的变化、技术的进步、国际政治经济形势的变化都是难以预测的，一旦这些因素发生变化，就会造成前期投入的风险损失。此外，导弹武器系统、运载火箭系统等装备系统的突出特点体现为成败型。这就决定了一旦发射或运行中出现故障，即使是一个细小的问题，如短路、虚焊、元器件失效、多余物等，都可能造成一次任务的完全失败，从而带来巨大的损失。

大型复杂装备的上述特点决定了其论证与研制过程中存在各类风险，涉及技术风险（设计风险、生产风险、关键技术风险）、管理风险（计划风险、组织管理风险、控制风险）、外部环境风险（政治风险、军事风险、外交风险）等内容，各类风险互相关联和互相影响。从装备研制的核心三要素（性能、费用、进度）三者的相互作用和关系来看，研制中最根本的风险是技术风险。同时，技术风险在整个导弹武器系统研制过程中贯穿始终，在论证与研制的全寿命周期内影响最大。本书研究对象主要聚焦于技术风险。为有效识别与防控导弹武器系统研制过程中的技术风险，有必要开展全系统、全过程、全要素、全特性的导弹武器系统技术风险管理。

综上所述，大型复杂装备在其论证与研制阶段，随着技术层次逐级提升、构造体系日趋复杂、跨领域技术方法不断综合，潜在技术风险在逐步积累，确保任务“一次成功”的难度也越来越大。因此，围绕导弹武器系统的核心特征，准确把握时序动作的各环节与各影响因素，有效控制和防范各类风险，确保导弹武器系统的任务成功率，具有重要的现实意义。

纵观国内外大型复杂装备特别是导弹武器系统遭受的多次重大失利，究其原因，很大一部分是由于在型号研制的指标要求传递过程中，总体各专业、各分系统、子系统和单机研制单位只重点关注自身上下游专业的输入输出要求和结果，缺乏一种从上到下、飞行全

过程设计及实现情况的分析和确认方法，使得产品设计实现过程中出现设计指标不闭环、动作不匹配、影响分析不全面等质量隐患，更深层次的原因则是技术风险管理不彻底、不深入、不到位。我国导弹武器系统研制队伍一次次在失败中学习，在过程中成长，不断探索有效、适用的技术风险管理方法。从“昨夜西风凋碧树，独上高楼，望尽天涯路”至“衣带渐宽终不悔，为伊消得人憔悴”，直至“众里寻他千百度，蓦然回首，那人却在灯火阑珊处”，系统研制队伍最终创新提出一套适用于复杂系统的基于时序动作分析和确认的技术风险管理方法。本书就是对该方法的总结、提炼和推广应用。

1.2 基于时序动作分析和确认的技术风险管理方法形成过程

1.2.1 技术风险管理发展历程

纵观国外先进大型复杂装备的发展历程，其大型复杂装备的发展史，恰是技术风险管理的成长史。

德国早在第一次世界大战结束后重建时，就提出了包括技术风险管理在内的风险管理。德国实践强调技术风险的控制、分散、补偿、转嫁、防止、回避和抵消等。如德国法律要求所有公司在其产品技术属性与人素要求存在风险时，必须提交《绝对安全报告》，并且该报告应至少每5年更新一次。

法国和其他一些欧洲国家直到20世纪70年代中期才接受风险管理的概念，但自接受伊始，就高度重视技术风险管理的重要性。如法国达索公司作为法国空军战斗机的主要供应商，其新机研制中重要的一条就是及时地把任何一点的技术风险降低到最低程度。

20世纪70年代初，英国在RB211发动机因复合材料风扇叶片技术不过关而导致英国罗尔斯·罗伊斯公司破产后痛定思痛，将技术风险管理置于非常重要的位置。英国有关部门发布了《英国风险可容忍度文档》，该文档试图应用“最小合理性（原则）”，从技术风险的可容忍度角度探讨技术风险管理。

俄罗斯在技术风险管理上具有一贯的保守性，但非常重视应用综合集成技术以降低技术风险，其中最突出的莫过于新型战斗机研制。俄罗斯在新战斗机设计中尽量运用一切力所能及的技术，针对“对手”的特点，采取一切相应措施，突出重点，以达到制服“对手”的目的。技术不到位，宁可放弃某些性能，也不轻易冒风险。如俄罗斯的Su-27战斗机具有超视距和多目标攻击能力，同时也具有良好的近距格斗能力，是一种具有优良作战性能的战斗机，但它的一些设备（尤其是电子设备）并不先进，而是通过独具匠心的系统设计与综合集成，扬长避短、以巧补拙，使之能与F15和F16等第三代战斗机相抗衡。

欧洲空间局（ESA）对技术风险的深切认识源于美国挑战者号航天飞机爆炸的灾难带来的强烈震撼，这一灾难同时也迫使ESA开始引进和开发现代技术风险管理技术。随后，阿里安-5的首次飞行失败才真正令ESA有了切肤之痛。1997年的一份调查报告最终揭示，那次事故的原因源于软件技术风险和综合集成中技术对环境不适应的风险。随着航天

项目复杂性的增加，ESA 越来越意识到对大型航天项目进行技术风险管理的必要性。为了加强对空间系统及相关设备的技术风险管理，ESA 在 20 世纪 80 年代后期就制定了风险评估标准 PSS－01－401，该标准确定了 ESA 进行技术风险管理的目标是：1）估计技术风险事件后果的累计概率；2）通过渐进技术风险评估促进设计改进；3）对技术风险分布划分等级；4）进行技术风险敏感性分析；5）确定和评价残余技术风险。ESA 开发了多目标决策支持系统来支持风险管理，并成功开发了技术风险评估专家系统。ESA 用于技术风险评价的数据源不仅包括专家经验数据、相似工程中获得的数据、从过去产品中得来的数据，更包括直接从相关试验中获得的数据。

美国各军种在装备采办实践中同样极端重视技术风险管理。如美国空军在 ATF（Advanced Technology Fighter）飞机发动机选型上，十分慎重地考虑和处理技术的先进性与技术风险之间的关系。当时，美国空军选取了两种可以竞争的候选发动机进行比较，即普惠公司的 F－119 和通用电气公司的 F－120，前者是常规涡扇发动机，后者则是新型变循环发动机。单就技术本身而论，变循环发动机的技术较先进，性能明显要高于前者，但结构较复杂，质量较大，可靠性和维修性不如 F－119，更重要的是，这种发动机技术难度较大，存在较大的技术风险。最终，美国空军以此为依据选中 F－119 发动机。又如，在 JSF（Jioint Strike Fighter）战斗机从演示验证向工程研制转阶段决策时，美国空军以其技术完备度等级未达到要求而拒绝了承制商的转阶段申请。

美国国家航空航天局（NASA）对技术风险管理方法和技术进行系统性的探索始于 1967 年 6 月 27 日阿波罗土星－204 事故，这一事故不仅导致三名美国航天员殒命，浪费了大量经费，更令 NASA 的太空探索行动失去了民众支持，使 NASA 的太空计划倒退了 18 个月。有了这一沉痛教训，NASA 开始将技术风险管理推向一个前所未有的高度，但 NASA 似乎并没有掌握技术风险管理的真谛。1986 年，“挑战者”号升空前，美国空军利用概率风险评估方法对之进行了评估，得出承担“挑战者”号发射任务的固体火箭发射失败概率为 1/35，但 NASA 管理层拒绝接受这一评估结果，并组织自己的工程师重新进行风险评估，得出失败概率仅为 1/100 000 的结论，正是这一评估结果最终导致了人类航天史上最大的灾难之一——“挑战者”号爆炸事故。此后，NASA 开始引入概率风险评估法等对包括技术风险在内的各类风险进行评估，技术风险分析方法在 NASA 内部制度化；NASA 开发出自己的技术风险决策支持系统并逐渐形成以 FMEA/CIL（Failure Mode and Effect Analysis and Critical Item List）风险分析方法为代表的技术风险管理理论体系。

我国武器装备采办技术风险管理长期处于以经验为主的状态，缺乏先进的理论指导，研究与应用仍处于起步阶段。这种落后的管理方法给我国国防科技工业造成了较大的损失。20 世纪 70 年代末、80 年代初我军开始引进项目管理理论与方法，可惜由于条件限制只选择性地引进了项目管理的基本理论、方法与程序，未能同时引入风险管理。20 世纪 80 年代中期以来，随着中国经济的不断发展，国外各种风险管理的理论不断被介绍到中国。目前，我军武器装备采办项目正逐步借鉴西方先进技术风险管理经验，实行专家和法

人负责相结合的、目标管理机制下的宏观项目管理模式：在武器装备发展战略目标研究、编制立项、招标投标评审、经费评审评估、项目管理及验收等阶段均由领域专家、决策专家和管理机构成员来共同参与；目标管理机制则通过规避技术风险，同时对武器装备采办项目委托方、代理方采取有效的保障和激励措施，显现对项目技术风险的有效管理。这些理论成果与实践经验从不同角度对我军武器装备采办技术风险管理起到了促进作用。迄今，技术风险管理理论和方法在我军武器装备采办项目的管理实践中正逐渐被采用，并且在大型武器装备采办项目及项目群管理中显示出广阔的应用前景。

1.2.2 时序动作分析和确认的理论原型

时序动作分析和确认方法的最初原型源于“时间线”理论，该理论最初由 NASA 提出：运行使用时间线为定义系统技术状态、运行使用活动，以及其他按顺序的相关单元提供基础，以完成每个运行使用阶段的使命任务目标。它描述为完成每个阶段使命任务目标的活动、任务及其他按顺序相关单元。

时间线伴随设计而成熟，它开始时表现为主要事件的简单时序，成熟后展示在所有主要使命任务模式下或系统交付时的分系统运行使用详细描述。图 1-1 和图 1-2 分别描述探月飞行寿命周期早期的时间线和使命任务设计参考。

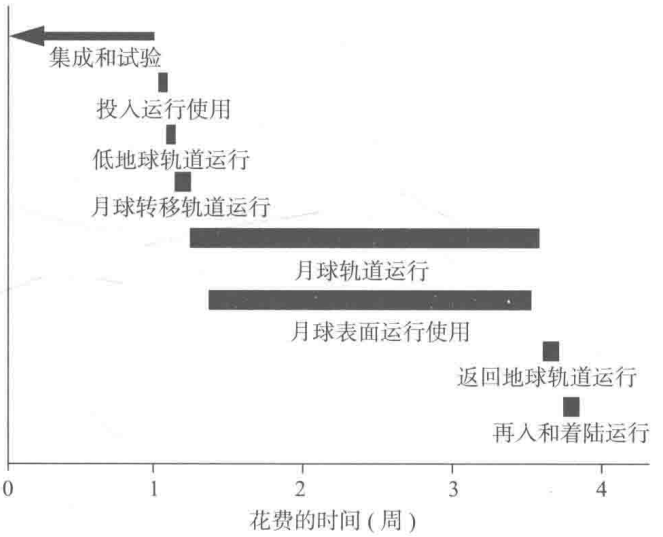

图 1-1 探月飞行寿命周期早期的时间线示例

图 1-3 所示为深空 1 号活动规划结果图，其中不同灰度方块代表不同的活动，方块的长度代表该活动执行时间。规划一旦执行，便可以将航天器的状态成功转移到期望的目标状态。

1.2.3 技术风险管理和“时间线”理论的结合

将传统的技术风险管理方法与“时间线”理论有机结合，形成基于时序动作分析和确认的技术风险管理方法。该方法遵循传统技术风险管理识别、分析、应对、监控的循环往

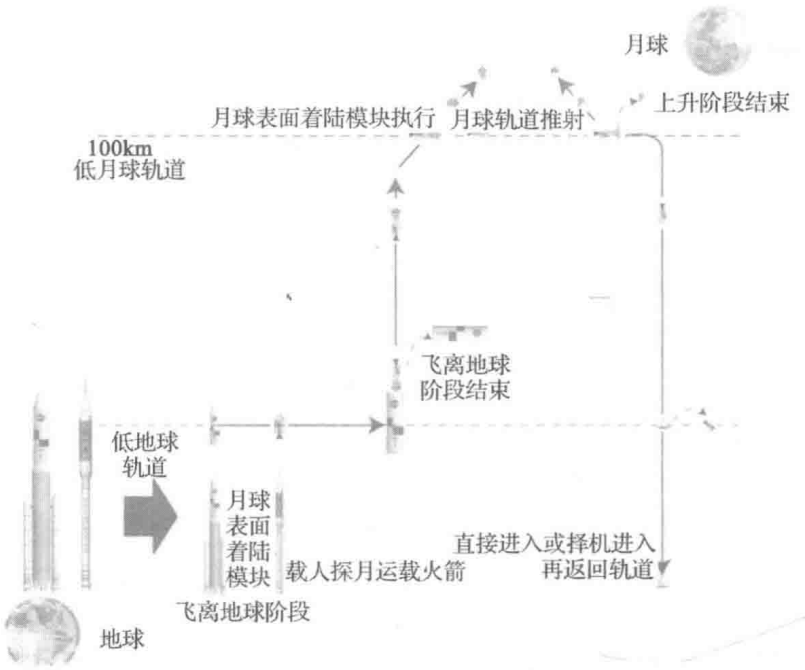

图 1-2 探月飞行寿命周期早期的使命任务设计参考示例

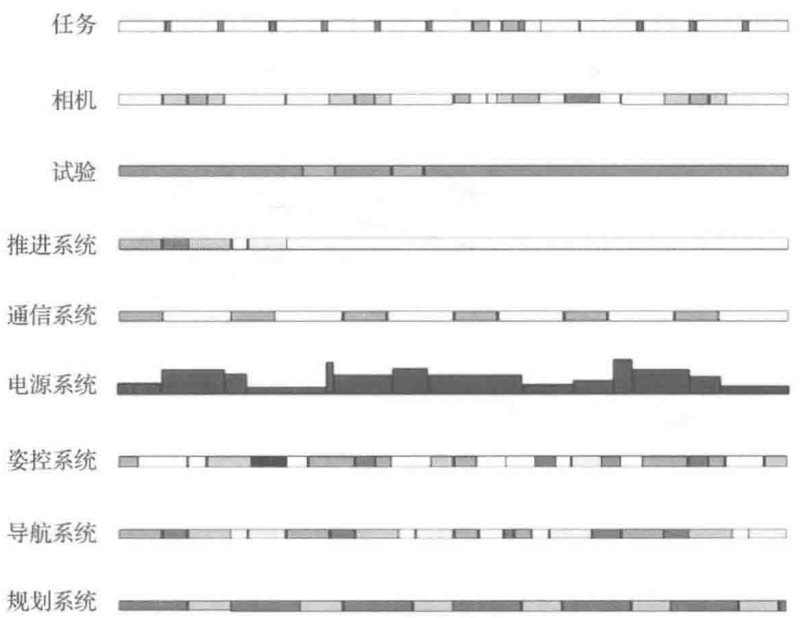

图 1-3 深空 1 号活动规划结果图

复递进过程，有效结合故障树分析、故障模式与影响分析、潜在通路分析、测试覆盖性分析、试验充分性分析等技术，并在此基础上与“时间线”理论融合，通过对任务剖面的精确再现，将“散点式”的技术风险方法与“线条式”的时间线结合，能够实现预防或减少增量风险、消除或控制存量风险，具有广阔的理论价值与应用前景。

1.3 相关概念

1.3.1 装备

传统的装备定义为：实施和保障军事行动所配备的武器、武器系统及其配套军事技术器材等的统称。本书中装备是指导弹武器系统、运载火箭系统等航天产品。

导弹武器系统是完成导弹维护，导弹发射准备、探测和瞄准目标，导弹发射和完成摧毁目标的战斗任务，以及评定导弹攻击效果等的各种设施、设备和系统构成的独立工作系统，由导弹、地面（空载、舰载或潜载）设备、探测和瞄准设备、制导系统、发射系统，以及指挥、通信、控制系统等组成。

运载火箭系统是由多级火箭组成的航天运输工具，其用途是把人造地球卫星、载人飞船、空间站、空间探测器等有效载荷送入预定轨道。运载火箭系统是在导弹的基础上发展的，一般由2~4级组成。每一级都包括箭体结构、推进系统和飞行控制系统。末级有仪器舱，内装制导与控制系统、遥测系统和发射场安全系统。级与级之间靠级间段连接。

1.3.2 技术风险

技术风险是指伴随着科学技术的发展、生产方式的改变而产生的威胁人们生产与生活的风险。大型复杂装备的技术风险是指在全寿命周期中，由于各种技术因素的不确定性及其影响作用的未确知性，而导致项目性能、费用、进度与项目预期发生偏离的可能性、可预测性、可控制性及后果的可转移性与可接受性的综合。

1.3.3 技术风险管理

国外学者对技术风险管理给出了不同定义。Jerry S . Rosenbloom（1972）认为，技术风险管理是处理纯粹技术风险和决定最佳管理技术的一种方法。澳大利亚标准4360号（AST4360）认为，技术风险管理是通过对技术风险事件概率与后果有效控制以实现目标的过程。Heuys 和 Auther（1995）认为，技术风险管理是透过对技术风险鉴定、衡量及控制，而以最少成本使技术风险所致损失达到最低程度的管理方式。Robert（2001）认为，技术风险管理是在追求技术风险正面效果最大与负面影响降至最低的同时，把不确定性减小至可接受范围的努力。大型复杂装备技术风险管理，是指通过对技术风险项目的识别，分析技术风险对大型复杂装备论证、研制或任务成败的影响，评价所采取措施的合理性、有效性、充分性，最终判定是否已将风险消除或采取所有可能采取的措施使风险降到最低，能否完成既定目标的一项活动。

1.3.4 任务成功性

任务成功性又称可信性，是指装备在任务开始时处于可用状态的情况下，在规定的任

务剖面中的任一（随机）时刻，能够使用且能完成规定功能的能力。它取决于任务可靠性和任务维修性。当任务期间不能维修时，任务成功性等同于任务可靠性。

美国空军系统司令部武器系统效能工业咨询委员会于 1963 年提出可信性概念，作为计算武器系统效能的一个要素，表示武器系统完成规定任务的良好程度。20 世纪 90 年代以来，为了适应国际市场发展的需求，考虑到术语的国际通用性，国际电工委员会把可信性定义为用于描述可用性及其影响因素（可靠性、维修性、保障性）的集合术语。

1.3.5 动作

动作是指具有一定动机和目的并指向一定客体的运动系统，是基于时序动作风险识别与控制工作的最小对象单元（底层单元）。它是指在一个工程系统（产品）中，某一个单机、组件在接收到动作指令或者触发条件满足设计要求等情况下，按照客观规律必然会执行的物理、化学或者逻辑等行为。根据设计师系统的判断分析，动作可以细化到单机中某一个零件的行为，也可以将若干为同一个动作目标服务的、存在必然逻辑关系的、受外界影响小、对外界干扰小的细节动作整合成一个整体来进行分析，使得工作更加清晰、明确。

1.3.6 时序

时序是指将某种现象、某一个统计指标在不同时间上的各个数值，按时间先后顺序排列而形成的需求。在自动控制的工程系统中，时序是指某时刻发生的、具有独立功能的指令。该指令一般由产品的控制系统在采集和处理产品自身与外界信息的基础上，按照设计给定的逻辑发出，相关执行机构在接收到指令后相应产生一系列的动作，从而实现设计预定目标；也可以由产品的单机或组件直接感受某些敏感信息而触发动作执行。时序中包含了一系列信息流的传递，往往需要两个或两个以上的单机/系统参与其中进行“接力”才能完成。时序是设计意图的直接体现，时序设置和时序判据的设计就是其具体的体现形式，系统设计人员能够通过时序和判据的调整来对产品的工作特性进行必要的调整。时序可以是某一时刻同时发生的若干个“动作”的集合。

1.3.7 事件

事件是指同一时刻发生的若干个具有内在联系的时序的集合。在时序图中，通常是一条竖线（一个节点）就代表一个事件，事件相对于时序动作是一个更加宏观的概念范畴。

1.3.8 时段

时段是指某两个具有标志性的事件之间的一段时间区间，标志性事件的选取一般都对应着产品的外部环境或工作状态有了显著差别，比如潜基导弹的水下运动时段和空中飞行时段，而空中飞行时段又可划分为主动段、自由段、再入段，其中主动段又可以分为一级飞行段、二级飞行段等。由于时段的划分能够将基本相同外部环境和工作状态的时序动作

整合在一起，而不同时段也相对独立，因此在基于时序动作风险识别与控制工作中，系统设计人员需要根据产品具体情况，对以各个不同时段为顶层的考察对象进行分析和研究。

时序—事件—时段的关系在常见时序图中的体现如图 1-4 所示，由于在时序图中一般不反映（也无法全部反映）具体的动作，因此图中也未体现到动作层。

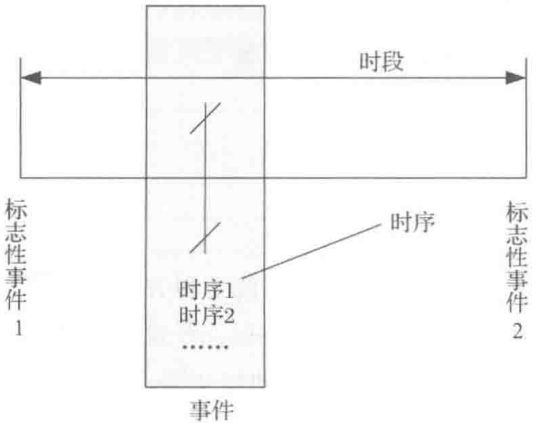

图 1-4 时序—事件—时段的关系图

1.3.9 时域

时域是指描述数学函数或物理信号对时间的关系。例如一个信号的时域波形可以表达信号随时间的变化。

1.3.10 空域

空域是指根据飞行或在轨运行的需要而划定的一定范围的空间。

1.3.11 工作环境

工作环境是指动作执行期间，执行动作的主体（零件、单机、部件等）所承受的外部环境，包括自然环境、电磁环境、力环境、热环境、水环境等。

1.3.12 输入条件

输入条件是指使动作能够得以执行所需要的、除了工作环境之外的所有前提条件。输入条件可以是由产品中其他单机或部件的输出所提供；也可以是由产品的工作状态或外部环境满足了设定的阈值所提供。输入条件可以分为判据类和接口类两大部分，判据类主要是指动作执行所需要到达的逻辑判断依据；接口类主要是指通过正确匹配的机械与电气接口使得相关信息能够准确无误地被动作执行主体所接收。

1.3.13 输出响应

输出响应是指执行动作的主体在获得输入条件后，所执行的机械与电气动作、发出的