复杂装备试验安全风险评估与预警

周晟瀚　杨敏　魏法杰　常文兵◎著

Safety Risk Assessment and Early Warning of Complex Equipment Test

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

复杂装备试验安全风险评估与预警

周晟瀚　杨敏　魏法杰　常文兵◎著

Safety Risk Assessment and Early Warning of Complex Equipment Test

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书系统论述了复杂装备试验（Complex System Test，CST）安全风险评估与预警的方法、技术与案例。全书分7章，第1章绪论，介绍CST安全风险管理的基本概念、程序和相关研究综述；第2章介绍通用的13种安全风险识别方法并分析了各自优缺点和适用场合，提出了按成因、流程和后果的安全风险事件分类法，随后介绍了基于模糊信息、云模型、因果关系等多种新识别方法及其运用；第3章分析了常见安全风险事件分析方法的适用条件，介绍了基于Vague集、安全指数、改进的FMECA法，基于试验流程仿真等评估安全风险的新思路；第4章介绍了安全风险事件知识库的构建框架，提出了基于质量信息和关联规则的两种构建策略；第5章介绍了基于稀有事件模型的加速抽样仿真安全事件预测方法和基于因果贝叶斯网络的安全风险预警方法；第6章介绍了现代飞参数据采集分析原理以及对无人机重着陆安全事件进行预测的技术方法；第7章介绍了某无人机工程研制及试飞试验中的安全风险事件评估与预警的案例。

本书侧重安全风险评估与预警的方法和技术介绍，可供CST安全风险评估与预警的研究者和实践者，以及安全风险管理相关专业的研究生和高年级本科生参考。

图书在版编目（CIP）数据

复杂装备试验安全风险评估与预警 / 周晟瀚等著. —北京：中国电力出版社，2016.12
（项目管理前沿系列）
ISBN 978-7-5123-9886-3

Ⅰ. ①复… Ⅱ. ①周… Ⅲ. ①电力设备－试验 Ⅳ. ①TM4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 246053 号

中国电力出版社出版、发行
北京市东城区北京站西街19号　100005　http://www. cepp.sgcc.com.cn
责任编辑：李　静
责任校对：马　宁　　责任印制：邹树群
三河市百盛印装有限公司 • 各地新华书店经售
2016年12月第1版 • 2016年12月北京第1次印刷
787mm×1092mm　16开本 • 28.25印张 • 306千字
定价：88.00元

前　言

复杂装备试验（Complex System Test，CST）是对装备系统在规定使用环境条件下的各项性能做出准确评估，并给出是否满足指标要求的结论的工作。CST 规模大、投入高、过程复杂、关键技术多、可靠性和安全性要求高，具有很高的风险，其间一旦发生人员伤亡、设备损坏、财产损失或环境破坏等安全事故，会直接导致试验任务失败，极大影响复杂装备建设目标的实现。

随着现代装备规模和复杂程度的提高，试验规模和投入也在急剧扩大，试验的安全性要求也在不断提高。一方面，由于复杂装备构成及使用环境的复杂性，试验评估结果的可信性往往不高，故大量研究围绕装备试验系统设计以提升装备性能进行，较少涉及复杂装备试验安全领域。另一方面，复杂装备试验环境具有多样性，复杂装备试验操作的管理体系尚不完善，试验过程管理缺乏科学性和规范性。此外，在复杂装备试验安全分析、安全预警和安全控制等方面在实践中缺少重视，这些因素激发我们对 CST 安全风险评估与预警方法展开系统研究，主要研究成果则体现在本书中。

本书内容主要按照 CST 安全风险事件的识别、分析、预警等过程展开，在识别过程中，本书首先介绍了通用的 13 种方法并分析了它们的优缺点和适用场合，提出了按成因、流程和后果的事件分类法，随后分析了基于模糊信息、云模型、因果关系等多种新方法及其运用；在分析过程中，我们首先分析了常见安全风险事件的适用条件，提出了基于 Vague 集、安全指数、改进的 FMECA 法、基于试验流程仿真等新方法；为了高效进行安全风险事件知识管理，提高安全风险管理效率，我们提出了安全事件知识库的构建框架，设计了基于质量信息和关联规则的两种构建策略；在预警过程中，我们提出了基于稀有事件模型的加速抽样仿真方法和基于因果贝叶斯网络的安全风险预警方法；结合现代信息技术与数据处理方法的发展，我们提出并发展了基于飞参数据的无人机重着陆预测模型；最后本书给出了一个无人机工程研制和试飞试验中的安全和风险事件分析和预警的案例。

作者感谢国家自然科学基金项目（71332003、71271014、71501007），技术基础项目（Z132012A002、Z132014A001），航空科学基金项目（2014ZG51075）的支持。

在本书撰写中，刘安英、张雪、曾军崴、李琛、刘威、乐耀东、张佳宁、郭亚兵、胡陈、王凤天、庞娇子、乔通、乔小朵、李晓涵、钱思霖、苑晓鹏等同学参与了本书的研究与稿件整理、校对工作，做了很多贡献。

在研究过程中，空军试验基地、中航工业无人机办、中航工业成飞公司、中航工业贵飞公司、中航工业沈飞公司、中航工业试飞院等单位为本书研究工作提供了很多帮助。在此表示衷心的感谢。

本书借鉴、参考和引用了许多国内外学者的研究，在此一并表示衷心感谢。文中任何错误由作者承担，恳请读者批评指正。

作者

2016 年 11 月

目　录

第 1 章
复杂装备试验概述

1.1 复杂装备研制简介

复杂装备研制（Complex System Development，CSD）项目是指研究发展由多种复杂新型技术以及分系统组成的、用以满足预期需求的任务，需要应用大量新技术、新方法、新材料，创造性解决一系列难以预知的问题，一般分为研制、试验、生产、使用保障等多个阶段，具有层次性、多因果性、非线性以及动态性等特点。

在装备试验中，安全是指不发生可能造成人员伤亡、设备损坏、财产损失或环境破坏的状态。如果造成人员伤亡、设备损坏、财产损失或环境破坏等意外事件，则称为发生了安全事故。为了实现装备试验安全，需要进行的一系列设计、研制、生产、试验和管理工作。在工程上，为了评价安全，常用“安全性”指标来说明安全的程度。复

杂装备试验（Complex System Test，CST）涉及复杂装备系统的全面验证，需要大量高技术试验装备和高层次试验人员，投入巨大。CST 项目的安全性直接关系到试验任务能否顺利完成，对复杂装备建设目标的实现至关重要，属于装备研制中高风险任务。复杂装备试验是指为了检验复杂装备是否符合技术要求或标准化规定，用试验方法对其样品或批量产品进行的验证活动，如模拟、测试、试验等。目的是获取准确的试验结果，做出正确的试验结论，为被试验装备的定型工作、投产使用、承研承制单位验证设计思想和检验生产工艺提供科学依据[1]。

复杂装备试验要求对装备系统在规定使用环境条件下的各项性能做出准确评估，并给出是否满足指标要求的结论。与一般的装备试验不同，CST 是集国家政治、军事、科技实力于一体的高难度系统工程，其规模较大、投入高、系统复杂、关键技术多、可靠性和安全性要求高，具有很高的风险，也同时具有层次性、多因果性、非线性以及动态性等特点。随着现代装备规模和复杂程度的提高，试验规模和投入也在急剧扩大，试验的安全性要求也在不断提高。一方面，由于复杂装备构成及使用环境的复杂性，试验评估结果的可信性往往不高，故大量研究围绕装备试验系统设计以提升装备性能进行，较少涉及复杂装备试验安全领域。另一方面，复杂装备试验环境具有多样性，复杂装备试验操作的管理体系尚不完善，试验过程管理缺乏科学性和规范性。此外，在复杂装备试验安全分析、安全预警和安全控制等方面在实践中缺少重视，在理论研究中具有很大不足甚至空白。而这些都给 CST 安全造成诸多隐患，甚至导致安全事故的发生，故本书对 CST 进行安全风险评估和预警具有重要意义。

1.2　试验程序及步骤

复杂装备试验本质是一项验证任务，它通过试验获取可靠数据，用于评价复杂装备是否达到预定要求，与装备质量和可靠性管理密不可分。复杂装备试验主要工作包括：检验装备设计的总体技术方案，考核所采用的关键技术，检验设计的技术和战术指标，鉴定装备的作战性能，确定产品的技术状态，为装备能否定型及生产提供依据，大致可分为试验准备阶段、试验实施阶段和试验总结阶段，一般的工作流程如图 1-1 所示。

按试验性质和目的不同，复杂装备试验可分为定型试验、性能鉴定试验、科研摸底试验、生产交验试验等；按试验组织方式的不同，复杂装备试验可分为工厂试验（设计试验）、试验基地试验和使用单位试验。复杂装备试验可提前发现装备问题，减小或消除装备在研制、使用和维护过程中的风险，是装备采办寿命周期中的重要工作。

飞机试飞试验作为一项重要的复杂装备试验项目，在飞机正式交付使用前，对飞机进行飞行测试，采集飞机飞行数据，包括科研试飞、定型试飞和批生产试飞等。以试飞试验为例，其整体工作流程符合装备试验的一般步骤，同时有着自身的特点。试飞试验整体工作流程如图 1-2 所示。整个试飞过程分为试飞准备阶段、试飞实施阶段以及试飞后讲评阶段。

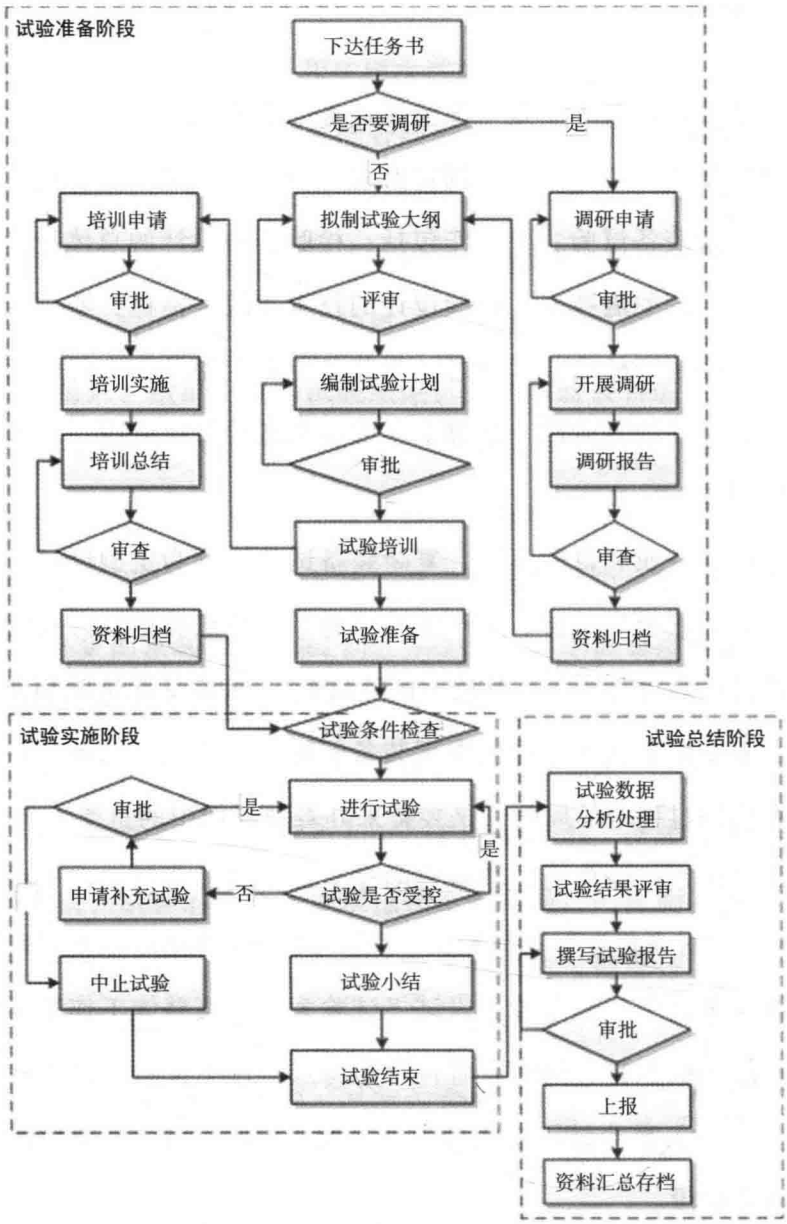

图 1-1　复杂装备试验一般流程

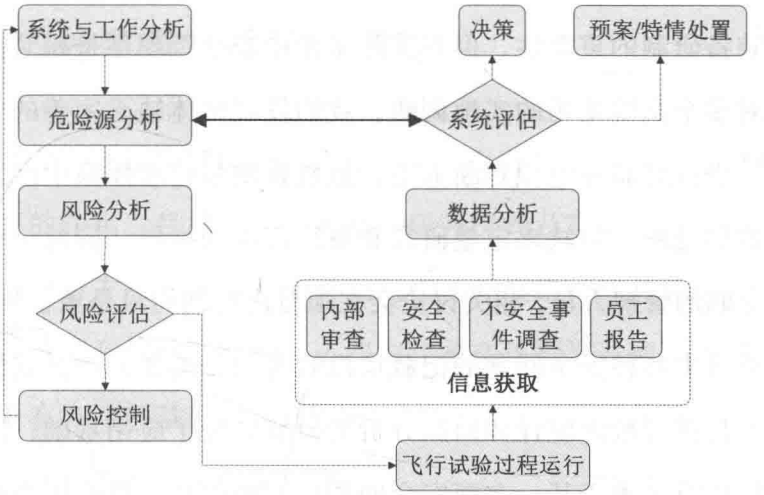

图 1-2　飞机试飞试验整体工作流程

在复杂装备试验中，安全是指不发生可能造成人员伤亡、设备损坏、财产损失或环境破坏的状态。如果造成人员伤亡、设备损坏、财产损失或环境破坏等意外事件，则称为发生了安全事故。为了实现装备试验安全，需要进行一系列设计、研制、生产、试验和管理工作。在工程上，为了评价安全，常用“安全性”指标来说明安全的程度。安全性是指产品不导致人员伤亡，不危害健康及环境，不造成设备损坏和财产损失的能力。试验项目安全管理是指在进行试验项目过程中，为杜绝、防止和减少试验事故，保证参试人员生命安全、试验装备和试验设施的完好无损而进行的一系列活动,其一般流程如图 1-3 所示。

CST 涉及大型复杂系统的全面验证，需要大量高技术试验装备和高层次试验人员，投入巨大。CST 项目是否安全，直接关系到试验任务能否顺利完成，对复杂装备建设目标的实现至关重要，属于装备研制中高风险任务。从总体上来说，装备研制各方已意识到试验安全风