

型号研制中的可靠性系统工程技术规范

Technical Specification of Reliability-Centered System Engineering
for Model Research and Development

北京航空航天大学工程系统工程系 王 靖
北京远通恒达科技有限公司 王 禹

[摘要] 对型号技术规范工作进行了概要说明和分析,并指出在型号可靠性系统工程技术规范工作中存在的问题;论述了型号可靠性系统工程技术规范的三维框架、内容和在实际工作中应当注意的问题;最后以某型飞机为例,说明应如何确定可靠性系统工程技术规范的内容和范围。

关键词: 系统工程管理计划 技术规范 可靠性系统工程

[ABSTRACT] The tasks for establishing technical specifications for model are described and the problems which may occur in this process are identified. Then three-dimensional frame structure of the reliability-centered system engineering (RSE) technical specifications, contents and the problems that should be paid more attention in practice are presented. Finally, taking one type of aircraft for instance, the method of deciding the scope and content for RSE technical specifications has been depicted.

Keywords: SEMP Technical specification
Reliability-centered system engineering

“型号”通常用于代指大型、复杂的工程系统,它在工业系统开发项目中具有重要的代表性^[1]。规范是型号在设计、研制、试验、鉴定和生产中的依据,它的作用是确定整个系统、分系统、部件和组件的技术要求,同时准确地说明产品、项目、器材和服务的基本技术要求,其中还应包括确定这些技术要求是否被满足的程序和方法^[2]。通过规范工作,可对型号的技术质量给予保证,缩短研制周期,节省研制、生产、使用费用,减少风险,以获得良好的军事、经济和社会效益。在型号工作中已经开展的一系列标准化工作的实践表明,实施相关的标准和规范是确保型号研制成功的重要环节。

我国型号研制中的可靠性系统工程(Reliability-Centered System Engineering, RSE)同样涉及到规范的

问题,建立和贯彻 RSE 技术规范是顺利开展和有效实施 RSE 工作的必要条件。在目前的型号工作中,涉及 RSE 的技术文档多为工作计划(如可靠性大纲)、工作项目的指导文件(如故障树分析指南)等,鲜有对系统各层次 RSE 技术要求及验证方法的说明,且这些文档就被认为是 RSE 技术规范。这种错误的理解对性能专业和专门专业的有机融合(性能专业是指研究实现产品性能的学科专业,多指传统专业,如机械、自控等等;专门专业是指可靠性、维修性、测试性、保障性和安全性这几个与产品故障相关的学科专业。在目前的装备研制工作中,由于各方面条件所限,这两类专业的工作人员不能很好地相互配合,影响了所研发武器装备的综合效能,而对技术规范的错误认识正是和大惊这种情况的因素之一。)十分不利。鉴于此,本文对型号研制过程中技术规范的概念进行了较为详细的阐述,并在此基础上,给出可靠性系统工程技术规范的三维框架、涵盖内容,以及在实际工作中应注意的问题,最后以某型飞机为例,说明了应如何确定 RSE 技术规范。

1 型号技术规范

从标准化的角度来看,标准文件包括标准、规范和指导性文件,它们统称为(广义的)标准(GB/T 1.1-2000)。(狭义的)标准是指对技术和技术管理中的过程、概念、程序和方法等内容统一要求的一类标准;规范是规定产品应符合的要求及其符合性检验等内容的一类标准。(狭义的标准与规范的主要区别在于:标准规定标准的过程、程序、方法等,一般不供需双方,通常通过规范的费用在产品订购过程中发挥作用;而规范则规定了为符合使用要求所需要的各项要求,涉及供需双方,一般直接在订购过程中发挥作用,是产品订购和研制的依据。在本文中提到的“标准”均指狭义的标准,而“规范”则主要指技术规范,即规定产品应符合的技术要求及其符合性检验内容的标准。

型号技术规范和系统工程管理计划(System En-

表 1 型号技术规范类别及定义

类别	名称	基本内容
A 类规范	系统规范	涵盖了型号系统的技术、性能、使用和保障特性,包括系统功能的需求分配,并定义了不同功能子系统的接口。这样,系统规范就完全确定了系统的基本属性,为其树立了功能基线。制定系统规范可参考可行性分析、使用需求分析、维修方案和功能分析等工作的结果。系统规范体现了型号系统的全部设计要求,是其他类规范的基础
B 类规范	研制规范	涵盖了已经设计、研制完成的系统级以下产品(包括设备部件、组件、软件、设施、保障关键产品等)的技术要求,其中必须包括从系统级向下细化所必需的性能、效能和保障特性。研制规范是指导系统级以下级别产品进行设计和研制工作的重要依据,评审通过的研制规范将成为型号系统的分配基线
C 类规范	产品规范	产品功能规范 涵盖了系统级以下在存货清单中或能采购到的货架产品的技术要求,用于这些产品的采购工作
	产品制造规范	涵盖了系统级以下各个生产项目的技术要求,以指导它们的生产工作
D 类规范	工艺规范	涵盖了在制造过程中对系统部件实施的各种作业(例如加工、弯曲、焊接、电镀、热处理、表面保护、标识、封装和处理)的技术要求。工艺规范主要适用于生产过程,但也可专为控制工艺过程而制定。工艺规范也称为过程规范
E 类规范	材料规范	涵盖了原材料、合剂(例如涂料,化合物)和用于构造产品的半成品原料(例如电缆、管道等)的技术要求

gineering Management Plan, SEMP)是在型号研制过程中产生的最重要的技术和管理文件,这些文件确定了型号的技术需求及其实现的过程。

1.1 技术规范

在型号研制工作中,一般将规范分为 5 类,即系统规范、研制规范、产品规范、工艺规范和材料规范^[2-5],详见表 1。

在型号研制过程中,一般需要根据型号系统的层次体系制定相应的规范体系。型号系统的层次体系包括分系统、子系统、部件、组件和零件等等,并通过工作分解结构(WBS)逐级分解为工作单元^[2]。型号规范体系如图 1 所示,其中涵盖了表 1 中的 5 类规范以及与 SEMP 的关系。

1.2 系统工程管理计划

图 1 特别给出了 SEMP 的简要说明,这是因为在型号的 RSE 技术文档中包含了应出现在 SEMP 中的内容。SEMP 是用于管理型号系统工程工作的最主要的计划,也通常称为型号研制工作计划,其主要作用是确认和保证型号研制全过程的受控。SEMP 一般应

包括技术性能规划与控制、系统工程过程和工程专业综合 3 部分内容^[6]。SEMP 与技术规范有着密切的关系,前者说明在型号研制项目中要完成哪些工作,后者则说明这些工作的目标(要实现的技术要求)和如何验证的问题。

2 可靠性系统工程技术规范

2.1 RSE技术规范在型号工作中的现状

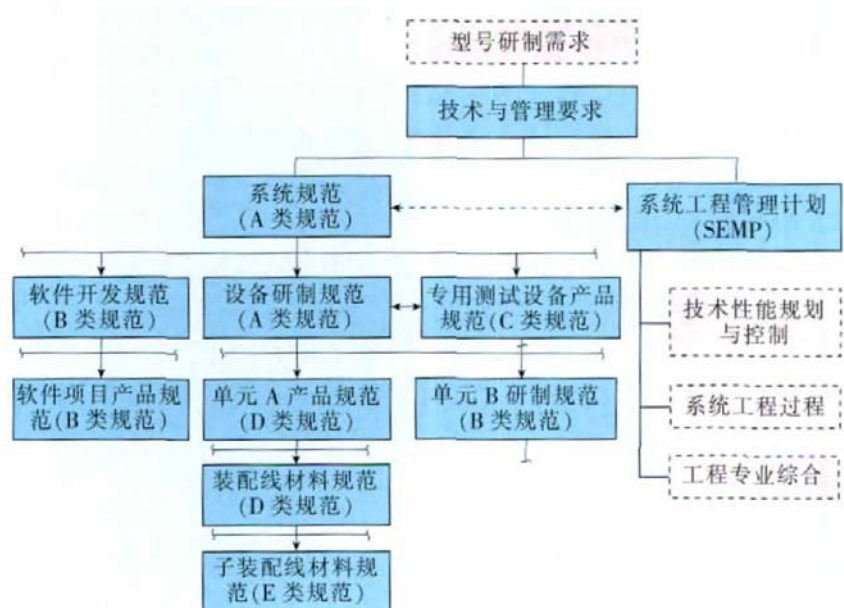
图 1 技术规范体系与 SEMP^[6]

Fig.1 Technical specification system and SEMP

在目前的型号工作中,涉及可靠性系统工程的技术文档数量较多,包括各专业的的工作计划,如可靠性大纲、维修性大纲等;各工作项目的指导文件,如可靠性预计方法与要求、故障树指南等;各专业技术要求,如系统可靠性设计准则、某设备的维修性要求等。通常,型号工作人员认为这些技术文档就是 RSE 技术规范。

从技术规范的定义可知,规范的重点在于明确系统不同层次的技术要求以及对这些技术要求的验证程序和方法。由此可见,可靠性大纲、维修性大纲各专业的的工作计划主要说明了在型号工作中应当开展哪些 RSE 工作,它本身不属于技术规范,而是 RSE 工作的管理文件,应被包括在 SEMP 的工程专业综合部分里,或作为其附加计划出现;各工作项目的指导文件则说明了 RSE 工作如何开展(其实是对 SEMP 中各项工作的说明),也不属于技术规范,而应作为指导性技术文件。

RSE 技术规范是指规定型号不同层次的可靠性、维修性、测试性、保障性和安全性等故障相关特性的技术要求,以及验证这些技术要求是否被满足的程序和方法两部分内容。RSE 技术规范实质上是型号技术规范的组成部分,如在图 1 中所示的规范体系中,A 类规范对系统的技术、性能、使用 and 保障特性进行了说明,这其中就包括了系统故障相关特性的技术要求。而在实际的型号工作中,这部分内容通常被忽略,或被单独列出,成为主要被专职质量人员和可靠性工程师参考的技术文档,未能对系统设计工作产生实质的影响。

简言之,RSE 技术规范在目前的型号工作中多被忽略,内容不够系统、完整,且未能进入型号规范体系中。

2.2 RSE 技术规范的三维框架

可靠性系统工程技术规范涉及型号不同层次(见图 1),包括可靠性、维修性、测试性、保障性和安全性多个故障相关特性,并跨越型号论证、研制、生产和使用整个寿命周期。通过图 2 中的三维框架,可完全确定每一份 RSE 技术规范,其三维分别是:专业技术维——RSE 包括的工程专业,如可靠性、维修性;产品对象维——型号系统的不同层次,如系统、分系统、设备、软件、元器件等;工程活动维——型号全寿命周期,如论证、研制、生产等。

2.3 RSE 技术规范的分类

通过图 2 的三维框架确定的每一份规范都包括

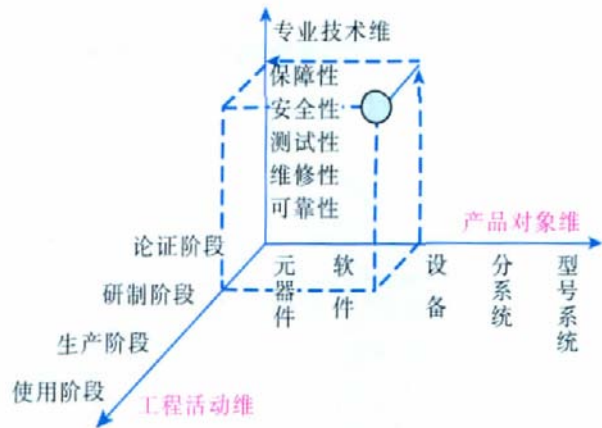


图 2 RSE 技术规范的三维框架

Fig.2 Three-dimensional frame structure of RSE technical specification

2 部分内容:型号的 RSE 定性和定量技术要求;对这些定性和定量要求进行验证的程序和方法。在型号实践中,由于面向研制单位的不同,通常也按照图 1 的规范体系对 RSE 技术规范进行标识。

(1)A 类规范。主要对系统级的 RSE 要求和验证方法进行说明,确定了系统的全部故障特性。如系统可靠性设计准则、系统维修性设计准则、环境应力筛选通用要求等。该类规范通常适用于总体单位或者总体部门。

(2)B 类规范。主要对已经设计、研制完成的系统级以下产品故障特性的技术要求和验证方法进行说明。如航电系统可靠性技术要求、火控系统维修性设计准则等。该类规范主要适用于负责分系统研发的单位或部门。

(3)C 类规范。主要对货架产品故障特性的技术要求和验证方法进行规定,或对系统级以下生产项目关于故障特性的技术要求和验证方法进行说明,如防护装备可靠性技术要求等。该类规范主要适用于外协单位。

(4)D 类规范。主要适用于产品制造过程中的工艺控制,目前适用于该过程的 RSE 规范还是空白。

(5)E 类规范。此类 RSE 规范的作用是对原材料、合剂、半成品原料等的 RSE 技术要求进行说明,如元器件筛选规范等。该类规范主要适用于原材料、元器件生产厂。

2.4 RSE 技术规范工作中应注意的问题

在 RSE 技术规范的制定过程中,必须充分考虑型号系统的实际情况。在型号研制总方案中规定的性

能、质量、进度和费用等要求都是生成 RSE 技术规范(特别是系统级规范)时必须考虑的条件。例如新研战斗机 and 一架改型飞机所需的技术规范就有很大不同,前者需参考很多新的标准来重新制定自己的规范,后

者则大量参考原型机的规范,尽量沿用已有的、成熟的技术规范。

此外,在编制型号系统的 RSE 技术规范时,与该系统相关的同类型标准往往有好几种,如国标、国军标及国外的一些标准,同一标准可能还存在不同版本。在这种情况下,需根据型号系统本身的设计、进度和费用等各方面的要求进行充分的分析和权衡后,才能决定应参考什么标准或如何根据需要对标准进行剪裁。

表 2 某型飞机 RSE 技术文档清单

规范类别	规范名称
可靠性	系统可靠性设计准则
	系统可靠性大纲
	机载设备(系统)的故障报告和纠正措施系统
	机载非电子产品的可靠性设计、分析与试验的工程方法
	机载非电子产品可靠性的探索与实践
	机载设备重要度分类指南
	失效模式、影响及危害度分析指南
	故障树分析指南电子设备基本可靠性预计方法与要求
	可靠性关键项目研究
	电子设备热设计指南的研究
	新成品设计定型,可靠性鉴定试验故障报告、分析和纠正措施系统实施要求
	可靠性试验故障报告、分析和纠正措施系统规定
	机载设备可靠性增长及鉴定试验方案研究
	机电子产品可靠性试验条件的确定方法研究
	机载产品综合环境可靠性试验通用剖面
	二级定型产品设计定型可靠性鉴定试验通用技术要求
	可靠性增长摸底试验通用大纲
	新成品可靠性增长试验通用大纲
元器件筛选规范	
元器件质量和可靠性管理规定	
个体防护设备可靠性设计准则	
电子元器件优选目录	
维修性	维修性设计准则
	系统维修性大纲
	维修方案制定指南
	维修性指标分配指南
	系统和设备修理级别分析指南
	维修性(含测试性)验证程序和方法
	系统和设备的维修分析指南
维修性数据采集方案	
测试性	测试性验证(评价)方法
	机内测试(BIT)典型线路研究
	BIT 技术在非电子系统中的应用研究报告
	非电子系统和设备的测试性设计分析任务研究
保障性	综合后勤保障大纲
	地面保障设备大纲
	机载产品综合使用保障大纲
其他	设计定型可靠性、维修性、测试性和综合保障评估试飞技术报告
	试飞阶段质量保证要求
	首飞前研制质量保障要求

3 某型飞机 RSE 技术规范

3.1 研制过程中的 RSE 技术文档

某型飞机总体单位在研制过程中使用的 RSE 技术文档如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,RSE 技术文档主要按照系统故障相关特性进行划分,共计 41 份,其中,提出和确定技术要求的规范 7 份,说明技术要求验证程序和方法的规范 2 份,各类大纲文件 7 份,针对某个工作项目的指导性文件 25 份。可以看出,在这些 RSE 技术文档中,各种大纲文件和指导文件占 50%以上,而针对该型飞机系统提出技术要求和确定验证方法的仅占约 22%。

3.2 某型飞机 RSE 技术规范

根据 RSE 技术规范的定义,将大纲类文件和工作项目的指导文件删除,对提出和确定技术要求、说明验证程序与方法的规范予以保留;根据图 2 的三维框架,对缺少的 RSE 技术规范进行补充,包括说明技术要求的规范 8 份以及说明验证程序和方法的规范 2 份,得到修正后的技术规范清单,如表 3 所示。

由于本套规范主要适用于总体单位,故主要包括系统级 RSE 技术规范,即 A 类规范、B、C 和 E 类规范还比较少。相应地,在该型飞机负责分系统研发的配套单位、外协单位以及生产厂,RSE 技术规范中 A、B、C 和 E 类规范的比例也有所不同。

4 结束语

本文对 RSE 技术规范在当前型号工作中的现状进行了分析,明确了 RSE 技术规范的概念,对三维框架和 5 类 RSE 技术规范分别进行了阐述,并以某型飞机为例,给出了 RSE 技术规范的示例。在实际应用中,应特别注意对设计人员的宣贯工作,要求他们在研制过程中注意遵守 RSE 技术规范,做到在满足系统设计特性技术要求的同时满足故障相关特性的技

表3 修正后的某型飞机 RSE 技术规范清单

项目	规范名称	规范类别
提出和确定技术要求	系统可靠性要求(补)	系统规范
	系统维修性要求(补)	系统规范
	系统测试性诊断方案和测试性要求(补)	系统规范
	系统保障性要求(补)	系统规范
	系统安全性要求(补)	系统规范
	系统可靠性设计准则	系统规范
	系统维修性设计准则	系统规范
	系统测试性设计准则(补)	系统规范
	系统保障性设计准则(补)	系统规范
	系统安全性设计准则(补)	系统规范
	试飞阶段质量保证要求	系统规范
	首飞前研制质量保障要求	系统规范
	新成品设计定型可靠性鉴定试验故障报告、分析和纠正措施系统实施要求	研制规范
	二级定型产品设计定型可靠性鉴定试验通用技术要求	研制规范
	电子设备基本可靠性预计方法与要求	研制规范
个体防护设备可靠性设计准则	产品规范	
元器件筛选规范	材料规范	
验证程序和方法	系统可靠性验证程序和方法(补)	系统规范
	系统维修性(含测试性)验证程序和方法	系统规范
	系统测试性验证(评价)方法	系统规范
	系统保障性验证程序和方法(补)	系统规范

术要求,保证性能专业和专门专业的有机融合。

参 考 文 献

[1] 张锡纯. 标准化系统工程. 北京:北京航空航天大学出版社,1992.

[2] 阮镰,章国栋. 工程系统的规划与设计. 北京:北京航空航天大学出版社,1991.

[3] Yang W M, Ruan L, Tu Q C. Reliability system engineering-theory and practice // Proceedings of the second international conference on reliability, maintainability and safety (ICRMS94). Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 1994.7-10.

[4] 杨为民. 可靠性·维修性·保障性总论. 北京:国防工业出版社,1995.

[5] [美]国防系统管理学院. 系统工程管理指南. 北京:国防工业出版社,1991.

[6] Benjamin S Blanchard, Wolter J. Fabrycky. Systems Engineering and Analysis. 北京:清华大学出版社,2006.

(责编 淡蓝)

(上接第 83 页)

屈服强度和冲击韧性的明显下降,致使合金的切削力有所降低。

(2)氢对刀具磨损的影响。

通过对不同置氢量试样进行切削试验,以后刀面磨损值为刀具磨损评价基准,结合刀具磨损测量分析软件进行分析,刀具后刀面磨损值 VB 值见表 1。

分析表明:随着切削路程的增加,未置氢试件切削刀具的后刀面磨损较快,切削路程为 797m 时,后刀面磨损值 VB 已经达磨钝标准;而其它置氢试件对应的刀具后刀面磨损尚处于初期磨损状态,说明置氢有效减少了钛合金切削时的摩擦磨损现象。分析其原因,一方面置氢后钛合金摩擦系数降低,另一方面置氢后钛合金比热容、热传导率增加,降低了切削区温度,从而减轻了刀具磨损,对提高刀具寿命起到了积极的作用。

3 结 论

(1)TC4 合金经 800℃置氢炉冷,适量的氢含量可以提高比热容和热传导率,减小摩擦系数,有利于降低切削温度,有效减少钛合金切削时的摩擦磨损,提高刀具寿命。

(2)置氢 TC4 合金的室温抗拉强度、屈服强度和冲击韧性下降,有利于降低切削力,减轻刀具磨损。

表1 后刀面磨损 VB 测试结果

切削路程/m	131	377	598	797	974	1 200	1 434	
VB/ mm	H:0%	0.022	0.074	0.200	0.315	0.405	无	无
	H:0.08%	0.015	0.035	0.055	0.057	0.06	0.080	0.106
	H:0.24%	0.026	0.034	0.035	0.040	0.045	0.046	0.049
	H:0.48%	0.032	0.035	0.038	0.040	0.042	0.050	0.050

参 考 文 献

[1] 科里沃霍夫 B A. 耐热合金和钛合金的切削加工性. 北京:国防工业出版社,1973.13-16.

[2] Gu J, Hardie D. Effect of Hydrogen on Structure and slow strain rate Embrittlement of mill annealed Ti6Al4V. Mater Sci Technol, 1996, 12: 802-807.

[3] 谭美田.金属切削微观研究.上海:科学技术出版社,1988.36-37.

[4] Barry J, Byrne G. Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy. Machine Tools & Manufacture, 2001(41): 1 055-1 070. (责编 依然)