

第 1 章 概 论

1.1 产品设计及质量管理

1.1.1 产品设计

产品，是指“一组将输入转化为输出、相互关联或相互作用的活动的结果”，即过程的结果。现代经济领域中，市场经济运行的实质就是产品在企业与顾客之间、研制与消费之间的循环。产品作为过程的结果和需求的实现，关联着上游企业如何开发和生产、下游顾客如何选购和消费，因此，产品的本质涵盖开发、生产、应用等全周期环节。

产品设计，是指将预定的目标通过人们创造性思维，经过一系列规划、分析和决策产生文字、数据、图形等信息的载体，然后通过实践转化为某项工程或通过制造形成为产品，以满足要求并取得满意的社会与经济效益。产品设计从本质上说是将创新构思转化实现为有竞争力的产品的过程，如何更高效地实现为产品也是评价产品设计优劣的一项重要因素。

产品设计随技术进步与需求提升而不断发展，目前经历的发展阶段包括：

- 1) 满足基本的功能性能要求；
 - 2) 进一步满足产品的可靠性要求；
 - 3) 进一步满足下游生产可制造要求，产品设计可便捷实现；
 - 4) 进一步满足全周期各种要求，产品设计可持续便捷实现；
 - 5) 对全周期各种要求动态跟踪，产品设计可柔性化便捷实现。
- 由此可见，产品设计的系统性特征越来越显著，产品设计的质

量需求越来越多元化,产品设计的关注点逐步从基本功能延伸到了全周期效益,产品设计方法及质量管理方法都需要向着更高效、更系统的目标发展。

1.1.2 产品设计方法

产品设计方法,是指为形成设计输出所采取的途径、程序、手段与行为方式。产品设计方法是随着技术、管理水平不断发展提升的,好的设计方法能够起到提高质量、提高效率、降低成本、减少工作量等作用^[1]。

(1) 公理化设计

公理化设计方法的出发点是将传统的、以经验为主的设计,建立成以科学公理、法则为基础的公理体系。公理化设计将设计的问题域看作由顾客域、功能域、物理域和过程域四个依次通过映射机制相联系的概念模型。公理化设计体系的主要贡献在于提出公理抽象本身,推进设计研究的深化。公理化设计提出两个基本公理,即独立性公理和信息量最小化公理,其余公理和法则均由这两个公理衍生而得。

(2) TRIZ

TRIZ 是俄文“发明问题解决理论”的词头缩写,它由解决技术问题和创新开发的各种方法、工具和算法组成,最终目标是使 TRIZ 成为指导人们进行创新活动的科学。TRIZ 是苏联 Altshuller 教授及其团队,在分析研究世界各国专利的基础上提出的一种创新问题解决理论,其相关方法可以普遍适用于新发明,从而协助人们获得这些发明问题的最有效解。目前,国际上已经对超过 250 万项出色的专利进行过研究,大大充实了 TRIZ 的理论和方法体系。

(3) 质量功能展开

质量功能展开 (quality function deployment, QFD) 是一种面向顾客需求的产品开发设计方法,通过建立顾客(用户、使用方)需求与产品质量特征之间的关系矩阵,把顾客对产品的需求转化为

产品设计要求、零部件特性、工艺要求、生产要求和质量控制要求。QFD 设计方法体现了以市场为导向、以顾客要求为产品开发依据的指导思想。

(4) 田口方法

田口方法把传统的产品设计、工艺设计流程改为系统设计、参数设计和容差设计的三次设计流程。在系统设计阶段,利用工程技术和科学知识设计出能够满足顾客需求的产品,包括组成结构与零件、材料与制造技术的选择。在参数设计阶段,确定产品参数的最佳水平组合,通过使产品功能波动最小来实现产品制造成本与寿命周期内费用最小的目标。在容差设计阶段,使产品在满足功能的前提下容差尽可能的宽,从而降低制造成本。田口方法提出以信噪比为衡量产品稳定性的指标,通过对试验数据的统计分析找出性能最稳定、最可靠的设计方案。

(5) 六西格玛设计

六西格玛设计(DFSS)从一开始的设计阶段就强调产品质量,通过组织化和系统化的途径实现突破性的改进,在开发过程中努力消除产品的潜在缺陷、提高产品抵御各种干扰的能力、减少质量波动,从而实现六西格玛的质量目标(100 万件中缺陷产品少于 3.4 件)。六西格玛设计目前还没有统一的流程模式,迄今为止,研究者已提出多种 DFSS 流程,如 DMADOV 流程(定义、测量、分析、设计、优化、验证)、DCCDI 流程(定义、顾客、概念、设计、实现)等。六西格玛设计过程中会用到许多设计工具及方法,如田口方法、QFD、FMEA、TRIZ 等。在实施六西格玛设计时,一般应结合自身实际定制六西格玛设计路线及设计模式、基于六西格玛设计的流程、设计方法及设计工具等。

(6) DFx 设计

面向型设计(design for manufacturing/assembly/testing/x, DFx),x 是指产品设计过程所应关注的目标、过程或行为,其具体内容与设计需求相关。DFx 是一种并行设计的技术方法,强调在上

游设计阶段就全面考虑下游的可制造、可装配、可维护性等因素，应用思维科学、信息科学、系统工程和数字化技术等工具，通过设计优化实现缩短产品开发周期、提高产品可靠性、降低产品成本、提高用户满意度的目标。DFx 包括：

- 1) 面向装配的设计 (design for assembly, DFA)
- 2) 面向制造的设计 (design for manufacturing, DFM)
- 3) 面向测试的设计 (design for testing, DFT)
- 4) 面向环境的设计 (design for environment, DFE)
- 5) 面向报废的设计 (design for discarding, DFD)
-

1.1.3 全面质量管理

质量管理，是指确定质量方针、目标和职责，并通过质量体系中的质量策划、质量控制、质量保证和质量改进来实现所有管理职能的全部活动。质量管理方法伴随着人类社会的经济、技术和文化等客观环境的变化而不断地演化和发展，其根本原因是质量管理必须与客观环境和各方需求相协调适应。在工业时代，一般认为质量管理经历了质量检验、统计质量控制和全面质量管理三个阶段。

(1) 质量检验阶段

20 世纪初，人们对质量管理的理解还只限于质量检验。质量检验是指专职检验人员依靠经验和使用各种检测工具，对产品进行百分之百的检验，在成品中挑出废品，以保证出厂产品的质量。这种方法强调人（检验员）在保证质量方面的作用，并且实现了初步的工业化分工，但是其实质是事后控制，无法在生产过程中起到预防、控制的作用。在生产规模进一步扩大、大批量生产的情况下，这种方法就会显现出检验费用激增、错检漏检频现等弊端，增加产品生产过程的成本，导致企业效益降低，不利于企业的发展。

(2) 统计质量控制阶段

第二次世界大战开始以后，统计质量控制得到广泛应用。由于

战争的需要,美国军工生产急剧发展,尽管大量增加了检验人员,但是产品积压待检的情况日趋严重,使得有时不得不进行无科学依据和纯粹经验主义的检查,结果不仅废品造成的经济损失惊人,而且在战场上也不乏不合格军工产品引起的质量事故。在这种情况下,数理统计与质量管理结合的方法在军工厂中被强制推行,控制图方法及其效果逐渐被广泛认可。直至第二次世界大战结束后,许多国家都陆续推行该方法并取得了实效,质量管理从单纯事后检验转入检验加预防阶段,并开始形成一门独立的学科。

但是,统计质量控制过分强调质量控制的统计方法,使人们误认为“质量管理就是统计方法”“质量管理是统计专家的事”,多数人感到高不可攀,望而生畏。同时,这种方法只局限于制造和检验,忽视了设计、采购等其他工作对质量的经济影响,难以充分发挥产品线上各个部门和全体员工的积极性。

(3) 全面质量管理阶段

20世纪50年代以来,随着科学技术和工业生产的发展,出现火箭、人造卫星、宇宙飞船等产品,这些产品具有大型、精密、复杂等特征,对安全性、可靠性、经济性等要求越来越高;同时,人们对产品质量的需求从注重一般性能发展为注重产品的耐用性、经济性、维修性等。因此,质量内涵从单纯的产品质量扩展到产品、服务和过程等各方面,全面质量管理应运而生。“全面质量管理是为了能够在最经济的水平上并考虑到充分满足用户要求的条件下进行市场研究、设计、生产和销售,把企业各部门的研制质量、维持质量和提高质量活动构成为一体的有效体系”^[2]。全面质量管理强调“三全”管理:

1) 全面的内容与方法。即不限于产品的质量,还包括形成产品的工作质量、销售产品的服务质量及时间、成本等多种内容,同时注重多种方法和技术的应用,包括科学管理方法、数理统计的方法、现代电子技术和信息技术、成本分析与售后服务等。

2) 全过程控制。即不限于生产过程,还对市场调查、产品设

计、生产准备、采购、检验、包装、贮存、运输、销售、售后服务等全过程都进行质量管理。其中,产品设计是全面质量管理关键过程,是下游各环节的质量源头。

3) 全员参与。即不限于领导和质量专业人员,还包括工程技术人员、操作和试验人员、管理人员等在内的企业全体人员都要参加质量管理,并对产品质量各负其责,提倡相互协同、人人有责的大质量观。

全面质量管理理论在日本首先被普遍接受和采用,并逐步建立了全面质量控制(TQC)的质量管理方法,以因果图、分层法、直方图、检查表、散布图、排列图、控制图为代表的各类质量工具被用于控制和改进质量水平^[3]。日本企业因此取得的成效受到了国际关注,全面质量管理逐渐成为企业获得核心竞争力的管理战略。全面质量管理方法与实践主要建立在几位质量大师的思想之上,了解全面质量管理之前必须先了解几位全面质量管理先驱的观点。

戴明,被称为现代质量管理之父,著有《质量、生产力与竞争地位》(《Quality, Productivity and Competitive Position》)、《转危为安》(《Out of Crisis》)、《新经济学》(《The New Economics》)。其提出的戴明学说对质量管理理论和方法产生了重要影响,其中的“十四要点”(Deming's 14 Points)是21世纪全面质量管理(TQM)的重要理论基础。该学说提出改进产品和服务作为企业恒久的目的,打破部门之间的壁垒,以实现跨部门的质量圈活动,改善设计、服务、质量及成本,无论是采购、运输、方法、维修、销售及生产制造的任何一项活动,都必须降低浪费和提高质量等先进的观点。戴明最早提出了PDCA循环概念,其是促使质量管理能力有效提升的一种工作程序,是全面质量管理的基本方法。

约瑟夫·朱兰,世界著名质量管理专家,著有《管理突破》、《质量计划》等。其主编的《质量控制手册》被称为当今世界质量控制科学的名著,为奠定全面质量管理的理论基础和提出基本方法做出了卓越的贡献。朱兰博士提出产品质量是在市场调查、开发、设

计、计划、采购、生产、控制、检验、销售、服务、反馈等全过程中形成的，同时又在这个全过程的不断循环中螺旋式提高。朱兰博士提出“质量三元论”观点，又称朱兰三部曲。该理论将管理过程分为三个步骤：质量计划、质量控制和质量改进，认为管理就是不断改进工作，质量不仅要满足明确的需求，也要满足潜在的需求。此外，朱兰博士率先把帕累托原理引入质量管理，提出了质量管理的“80/20原则”，即在所发生的所有质量问题中，仅有20%源于员工，而80%出于管理层。为质量改进提供了有力工具。

费根堡姆，被称为全面质量管理之父，著有《全面质量管理》，在该作品中第一次提出了全面质量管理概念。他主张用系统或全面的方法管理质量，在质量管理过程中要求所有职能部门参与，而不局限于生产部门。他努力摒弃当时质量控制最受关注的技术方法，而是将质量控制作为一种管理方法，提出质量控制包括制定质量标准、按标准评价符合性、不符合标准时采取行动及策划标准的改进等过程。

1.2 宇航产品设计

1.2.1 宇航产品及其特点

宇航产品是指宇航系统（一般包括空间航天器与远程武器系统）中通过开发、研制和生产过程形成的硬件和/或软件，按照组成的复杂程度分为系统、分系统和单机三个层次。

1) 系统。一般是指为执行规定功能以达到规定的目标，由一组有关要素组成的集合。在宇航领域，系统一词通常指整星、整箭、整船或整器，有时由若干个下级要素（分系统或单机）组成的产品也泛称为系统。

2) 分系统。一般是指为执行规定功能以达到规定的目标，但本身还不能完全满足用户需求，由一组相互有关的要素所组成的集合或完成某一主要功能的单机组合。以卫星为例，卫星平台是由保障

系统组成的、可支持一种或几种有效载荷的组合物。保障系统是指为有效载荷正常工作提供支持、控制、指令和管理保障服务的各分系统的总称。按各自服务功能不同,卫星保障系统主要包括结构与机构、热控制、电源、姿态与轨道控制、测控、数据管理、总体电路、返回等分系统。有的卫星还有数据传输分系统等。

3) 单机。一般是指能完成规定的功能,同时在被分解和再组装后能保持其功能的设备;或具有独立功能、完整结构和明确机械、电子、热等接口,可构成分系统的产品。同样以卫星为例,卫星上的控制与推进分系统单机产品涉及机电类、光电类、电子类和机械类各种单机;其中机电类产品有飞轮、陀螺、帆板驱动装置、控制力矩陀螺等,光电类产品有星敏感器、红外地球敏感器等,电子类产品有控制计算机、驱动控制单元等,机械类产品有推力器、贮箱及各类阀门等。

宇航产品要被发射到地球大气层之外进行航行活动,长期处于高真空、强辐射、微重力、热交变的环境中,有的还要返回地球或在其他天体上着陆,有的需要在轨正常工作几年甚至十几年。因此,高可靠、长寿命和可承受复杂环境的能力是宇航产品的基本要求,基于以上要求,宇航产品具有以下特点。

1) 多品种小批量。宇航任务需满足天基通信、导航、遥感、载人航天、深空探测、星表行走等多类型需求,宇航产品涉及测控、敏感器、控制、动力推进、动量提供、逻辑处理等多种功能,产品种类繁多;同时各产品面向不同宇航应用时,客观上应具有小批量、小子样的特点。如卫星用星敏感器产品,为了满足不同任务要求,需研制一般精度、高精度、甚高精度、超高精度产品,还需专门针对特殊工况研制不同产品,每类产品在卫星上的配制数量都不多,因此批量较小。

2) 设计复杂度高。宇航产品需要高度融合各种专业和技术,包括力学、热力学、材料学、电子技术、自动控制技术、计算机技术、喷气推进技术和制造工艺技术等,所以宇航产品设计开发过程是非

常复杂的,参与人员数量庞大且拥有不同知识背景,且需要相互之间紧密协作。如三浮惯性姿态敏感器,该产品具有大量程、高精度和长寿命等要求,结构十分复杂,需采用高精度动压马达、有源磁悬浮技术取代常规的滚珠轴承以实现转动部件的长寿命,还需采用双刻度因子模数转换技术提高对卫星姿态角速度的测量精度。

3) 应用工况条件恶劣。宇航产品工作于大气层外,处于高真空、强辐射、温度冷热交变比较大的空间环境中,复杂的空间环境使宇航产品衍生出大量的不确定性技术风险。经统计,宇航产品的在轨故障的70%是由于空间环境的影响而造成的。宇航产品必须充分考虑其工作环境,发射前在地面充分开展各种空间环境模拟试验,使其能够长期可靠、稳定地工作在空间环境中。如推力器组件是长寿命卫星的关键部件之一,星箭分离后,在卫星转移轨道和地球同步轨道运行期间提供轨道控制和姿态控制所需的力和力矩,使卫星能够完成轨道转移和进入地球同步轨道后的姿态控制和位置保持。推力器要承受恶劣的环境条件:高力学强度、剧烈的温度变化、强辐射及强电磁场,在卫星全寿命周期内可靠工作。

4) 在轨维护难度大。宇航产品发射入轨后,若出现故障,除航天飞机和载人飞船外,一般不能直接在轨维修。这不仅在经济上造成巨大损失,在政治和军事上也将带来不良影响,因此宇航产品最重要的需求是安全可靠。

1.2.2 宇航产品设计过程

宇航产品设计过程一般是指从用户需求下达直至产品通过鉴定的过程,过程中需要演示样机、原理样机、工程样机等实物以进行阶段性的充分验证。设计过程通过评审确认完成后才能转入生产阶段,生产宇航产品。鉴于宇航产品的多层级、高复杂度、高要求,宇航产品的设计过程通常会非常注重系统功能可逐级展开、协作界面清晰高效、设计验证充分细致,从而形成具有“严、慎、细、实”特色的设计过程。宇航产品的设计过程可按三种基本类型划分:按

设计阶段划分、按系统层次划分和按设计步骤划分,如表 1-1 所示。

表 1-1 三类设计过程比较

过程类型	过程阶段划分特点	设计过程的主要阶段			过程特征
		1	2	3	
设计阶段过程	按设计阶段和工作回合划分	方案设计	概要设计	详细设计	逐步深入、逐步细化
系统层次过程	按系统层次的高低划分	外部设计	整体(总体)设计	分系统/单机设计	先外后内、先高后低
设计步骤过程	按解决问题的步骤和逻辑思维划分	明确任务和目标	多方案比较分析、综合	选优和决策	从无到有、从有选优

(1) 按设计阶段划分的产品设计过程

这类设计过程按工作深入程度的不同,将宇航产品的整个设计过程划分为几个阶段,每一个阶段的设计都是一个设计回合。在每一个设计回合中,设计的内容在原则上都涉及到所有与产品有关的方面,包括外部的环境和条件、产品的上一层次系统和下一层次系统。在这类设计过程中,尽管前一阶段工作是后一阶段工作的基础、后一阶段是前一阶段的继续,但每一阶段的工作都具有相对的独立性,每一阶段结束时都要对所设计的产品作较为全面的评审。这类设计过程反映了宇航产品设计工作逐步深入、逐步细化的过程和“走一步,看一看,比一比”的审慎从事态度。如果此类设计应用得当,则可以降低风险、避免局部工作盲目超前或过分细化而带来的损失和负作用。

在以上两个阶段的基础上,根据产品特点,还可将详细性设计阶段进一步划分为初样开发阶段和初样鉴定阶段,使设计验证与设计鉴定分阶段开展,从而使设计验证更为充分、质量管理更为清晰。

(2) 按系统层次划分的产品设计过程

这类设计过程,根据系统层次性,先解决宇航产品适应其外部

的环境和条件的问题,其后再解决宇航产品整体的设计问题,而后再进行其分系统/单机的设计,从高层次往低层次按顺序一层一层安排设计工作。采用这类设计过程,每一设计阶段的工作虽然也会涉及到所有有关层次,但重点放在解决本阶段层次上的问题,设计工作按照先外后内、先高后低和先整体后局部的顺序安排,符合局部服从整体的整体优化原则。如果每一阶段的问题能得到比较全面彻底的解决,则对设计工作的顺利推进能起到良好作用。

(3) 按设计步骤划分的设计过程

这类设计过程一般按逻辑思维的顺序安排设计工作,将设计过程大体上划分为四个阶段:明确任务和目标,多方案比较、分析和综合,优化和选择,权衡和决策。这类设计过程与创造性思维过程基本一致,概括地说明了从无到有、从有选优的产品设计过程。

1.2.3 宇航产品设计现状分析

经过多年的探索、实践和不断发展,以往宇航产品设计中常见的功能性问题、可靠性问题等都已具备较好的解决方案。但是产品设计缺陷引发的技术状态频繁反复、研制周期超出预期的现象仍屡见不鲜,究其原因,主要存在以下两个方面的脱节和不协调。

一是组织管理方面。宇航产品的设计过程往往过分强调设计个体的智力活动,疏于构建规范和协同的流程化模式,易导致设计开发、质量管理、计划调度等各行其是的低效现象和慢性浪费,使设计模式因循守旧、未及时开展系统化流程再造而导致设计与管理相关方的脱节。

二是设计方法方面。宇航产品的设计过程往往过分关注对上级输入的符合性,疏于研究对下级或下游实现的便利性。据统计,宇航产品因设计原因发生的不合格品审理及质量问题中,涉及可制造性、可装配性与可验证性等问题占60%以上;同时近67%的技术状态变更项目也与可制造性、可装配性和可验证性等下游要素考虑不周有关。因此,设计方法不系统地面向产品全周期综

合考虑问题,导致设计与下游专业相关方的脱节。其中,在单机产品层级,特别突出地表现为设计与工艺流程、设计与指标验证、设计与特殊工况的脱节,以及设计过分依赖智力经验导致基于知识的设计不足等。

(1) 设计与工艺流程的脱节

宇航产品具有高复杂度、可靠性要求高的特点,产品涉及多专业、多领域的技术交叉耦合,易产生结构精密、特性繁多、实现流程复杂的设计。因此,若相关工艺专业未能提前介入产品早期的设计过程,以及未能面向具体生产过程对产品设计进行必要优化,很有可能就会由于相关复杂设计的设计工艺性不足导致高额的质量成本。

①产品设计未考虑工序流转需简易可行,易导致生产流程不顺畅

案例一:某电子产品包含总线板、电源板、主备份驱动板和主备份控制板等 10 块电路板,布局复杂,如图 1-1 所示。按照设计图纸投产后发现,装配工序复杂、装配难度大,具体表现为:

1) 线路板数量多,布局复杂,有平行底面安装,有垂直底面安装,装配工序复杂;

2) 线路板从底面向顶面层层叠装,每层电路板之间通过螺柱的方式连接,安装精度不易保证;

3) 装配过程中的误差会不断累积,导致最后安装产品外壳时,螺钉与螺孔位置误差太大,需要进行反复修配才能保证所有螺钉可靠安装;

4) 线路板调试后,都要对接口电缆接插件进行二次焊接,并辅以检验跟检等工序,生产流程特殊,产品装配过程不顺畅。

案例二:某型压力传感器设计要求将线路板垂直于轴线方向装入传感器后再焊线。如图 1-2 所示:对正面 4 个焊盘刷绝缘清漆时,因传感头 4 根导线已经电装完成,如将电路板拆下来对反面焊盘进行刷漆,则会导致焊点受力,造成隐患,因此按照该设计方案

进行生产装配时，两道重要工序难以完成：

- 1) 焊接后，焊接面焊点无法检查；
- 2) 焊接面焊点无法三防涂覆。

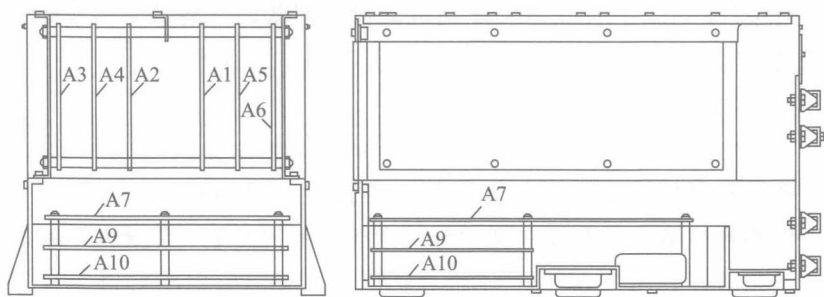


图 1-1 某电子产品结构

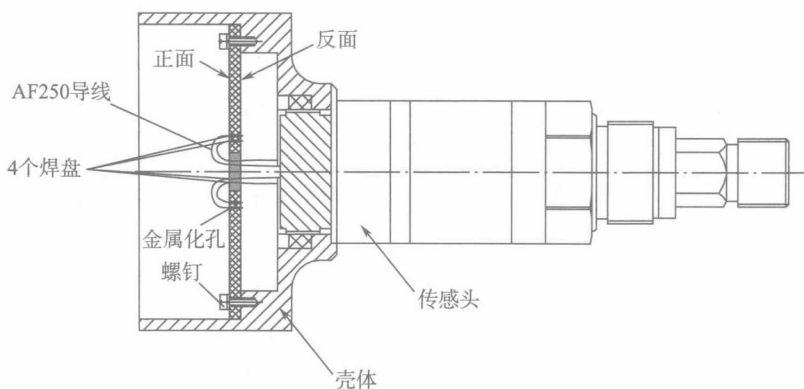


图 1-2 某型压力传感器结构示意图

②产品设计未考虑生产操作实施的便利性，易导致质量隐患

案例三：某产品印制电路板接线端采取铆接的加工方式，设计人员未充分考虑铆接过程会对印制电路板线条造成损伤的风险，未设计专用保护工装对印制电路板表面进行有效的防护，也未对印制电路板表面提出检验要求，导致在电装时电装人员发现印制电路板导线有划伤。

问题启示：从以上各案例看出，由于宇航产品具有多专业、多领域的特殊性，若发生工艺介入产品设计不及时、并行协同开展不到位等现象，则极易导致设计工艺性不足的产品设计流向生产环节。通过设计、工艺、测试等人员组成的设计团队，开展基于多专业知识的协同设计，使以上问题在早期被识别并加以改进。

（2）设计与指标验证的脱节

宇航产品的应用环境（空间）与研制环境（地面）差异很大，其通用质量特性要求包括可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性和环境适应性要求（简称为“六性”）。宇航产品指标体系的构建和验证都十分不易；同时，宇航产品通常使用高质量等级的材料与器件，需要特殊资质的制造供方，这都使得实物验证子样的成本十分高昂。因此，产品的可验证性设计就具有十分重要的意义。

①产品测试点设计不合理，易导致性能难以有效验证

案例四：某星载计算机主备份存在耦合点，产品设计时对测试点设置不完整，导致热备份输出信号缺少单独功能测试的方法，因此整机功能正确并不能证明热备份线路中的单份线路是功能正确的，备份计算机性能未能得到有效验证。

②产品设计量化不充分，易导致相关参数或特性不能检验

案例五：某线路板如图 1-3 所示，设计师按照一般电子产品的设计要求计算了固定螺钉与边框的间隙，为确保垫片与金属边框可靠绝缘，设计师还采用了安装绝缘垫片的方式；然而，设计师并未充分考虑到结构加工误差、螺钉垫片尺寸公差和散热框架的盲腔结构等综合量化因素。在对产品进行复查时发现，考虑到结构加工误差为 0.1 mm，装配误差 0.15 mm，则最坏情况下固定螺钉的柱头、平垫片与密闭散热框架内侧壁之间的距离约为 0.15 mm，不满足安全距离最小为 0.4 mm 的国家军用标准要求，存在安全隐患。

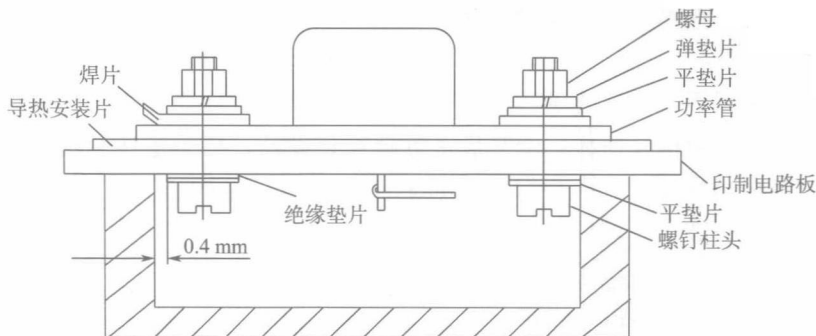


图 1-3 固定螺钉与密封散热框架内侧壁之间的安全距离示意图

③ 产品数字化仿真开展不充分，质量隐患未能提前识别

案例六：某产品摆镜扫描单元的碟形簧片设计如图 1-4 所示，该碟形簧片的材料为厚 0.1 mm 的 6911 不锈钢带，设计要求簧片锥角为 45° 。产品设计时未进行有限元计算和仿真分析，零件加工完成后在开槽处产生裂纹。分析原因为设计锥角过大，超出材料的延展率，无法加工实现。

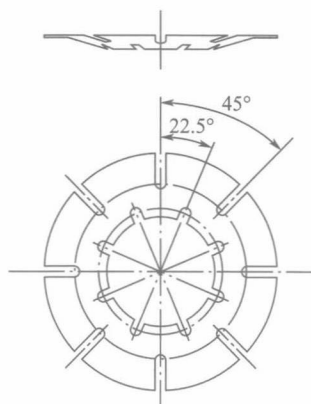


图 1-4 碟形簧片设计图

问题启示：从以上各案例看出，对于指标复杂、验证难度大的产品，产品设计的可验证性不足、量化设计不到位、仿真手段应用

不充分等现象会直接导致产品性能指标验证不充分、覆盖不全面。产品设计时,应充分考虑指标分解及其可验证性,提高系统可观性,避免采用不可验证的设计;应采用模块化解耦设计等方式,减少验证项目间的耦合迭代;应开展全方位量化设计,减少定性验证,明确验证的量化判据;应尽量通过数字化手段,促使验证项目前移,降低实物验证成本。

(3) 设计与特殊工况的脱节

宇航产品在地面的研制,在空间的使用,以及产品在包括冲击和振动、微重力环境、冷热交变、真空及辐射等条件下的运行,都是在地面没有的工况。因此,在产品的设计过程中,既要全面考虑空间工况对产品性能的影响,又应当考虑天、地之间的差异和地面测试的特殊性,若对相关特殊工况考虑不足,会导致产品可靠性不足。

①产品设计未考虑地面重力与空间微重力的差异,导致地面工况下产品失效

案例七:在某二浮陀螺正样产品总装某项专项测试时,陀螺动压气体轴承电机启动出现异常。问题确定为陀螺电机在斜置状态下,因重力作用,当启动时的静摩擦力矩大于启动力矩导致电机不能启动,如图 1-5 所示。该问题反映了产品在设计过程中,对地面(重力作用)和空间工况(微重力)的差异识别不到位,针对电机轴斜置安装状态的电机启动特性分析和试验验证不够深入,没有充分认识到当电机轴斜置安装时的启动摩擦力将处于最大值,对电机的启动力矩裕度摸底试验不充分。

问题启示:从以上案例看出,对于研制及使用全周期内存在各种工况的产品,未能针对各种工况,特别是一些特殊工况,及时开展适应性设计,有可能导致产品失效,甚至危及任务安全。因此,宇航产品在设计之初就应当考虑产品在全周期内的工作环境、存储环境和试验环境等,识别不同工况对产品功能性能可能产生的影响,并通过试验进行充分验证,确保产品在全周期内各种工况下正常工作。

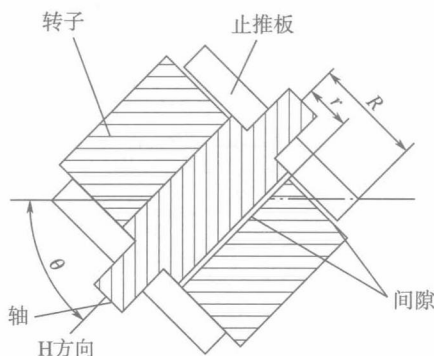


图 1-5 二浮陀螺动压气体轴承电机斜置结构图

(4) 基于知识的设计不足

设计师的经验是企业最宝贵的财富，但是宇航产品具有的多品种、多状态、小批量特点，导致产品复用率低、设计经验传承不足；同时，宇航产品多专业交叉耦合的技术格局、复杂严格的规范体系，需要以综合、全面的知识视野和业务能力来开展设计，易导致由于设计过程中专业知识不充分而造成产品研制隐患。

①产品设计师对材料、工艺专业了解不深入，导致选材不合理

案例八：某大规格板型结构零件设计如图 1-6 所示，图样设计要求使用 GB/T 3191/2A12-T4 铝合金棒料，但实际使用 GB/T 3880/2A12-T4 态铝合金板材更便于加工，且加工变形量能控制得更小。原材料选用应根据产品性能要求，选择尽可能方便加工制造、低成本的原材料和标准件。

②产品设计师对零件工艺实现缺乏有效理解，徒增加工实现难度

案例九：在电子机箱电源模块结构设计中，深腔内圆角结构广泛存在，某产品设计了深 33.5 mm R2、深 27 mm R1、深 84 mm R3 内圆角。由于刀具加工深度受限，只能采用电火花加工，耗时费力，还需要增加钳工修挫环节，零件设计不易实现。如果设计圆角可适应性增大，按照表 1-2 尺寸设计圆角，可以通过数控铣直接成