

关键词 空间系统分析、空间系统综合、空间系统设计、空间系统利益相关方、系统工程、系统构架、空间项目阶段

本章是对全书的总体介绍。本章以描述本书的写作目的以及出版的缘由开篇。之后介绍了在开始一个新的空间系统项目时涉及的参与方及其角色。接下来,本章介绍了定义一个空间系统所需的综合架构观点。之后的两个部分是关于设计过程的演变内容。首先论述了空间系统的设计与实现,然后回顾了定义一个空间系统时通常所设定的阶段和目标,最后介绍了空间系统的构成。本章以书中常用的简要术语列表以及推荐的辅助读物清单结尾。

除了简介部分之外,本书的结构如下:

(1) 本书的第一部分描述并分析了空间系统的设计与实现,其内容分成以下章节:

① 第2章:关于空间系统设计与实现的科学。主要内容是正确设计与实现空间系统所需的技术或者科学原理的重新汇编。

② 第3~4章:关于系统需求和约束条件的分析。

③ 第5~6章:介绍了实际的设计过程。第5章论述了影响设计的各种因素,第6章详细解释了实现最终设计所需的迭代步骤。

(2) 本书的第二部分分析了空间系统设计过程的具体方面。重点关注设计决策之间的相互作用,并持续使用已有的设计实例来说明这些相互作用。第二部分分成以下章节:

① 第7章:介绍将设计过程划分为不同的域。

② 第8章:卫星观测量和仪器域。

③ 第9章:轨道、空间环境和姿态域。

④ 第10章:卫星配置域。

⑤ 第11章:卫星操作数据流域。

⑥ 第 12 章：仪器输出数据流域。

(3) 第 13 章：分析了可替代的、低成本的设计和实现方法。

1.1 本书的目的

本书有两个目的：

(1) 描述和分析一个空间系统的合理设计所需的过程，以便读者理解一个优秀的系统设计是什么样的、是如何实现的。

(2) 从空间系统组成要素之间相互关系的角度描述和分析空间系统，而不是从要素本身的角度进行描述和分析。即着眼于系统综合的角度，而不是系统分析的角度。

设计过程涵盖了从顶层设计到底层详细设计的各个环节，但本书只涉及早期设计阶段。本书所涵盖的设计过程起始于用户或发起人对需求的模糊陈述，结束于全面的设计文档集的交付。文档编制的目的是对实际的大型工业项目的批准或拒绝做出明智的决定。Meyer Rechtin^① 将系统架构定义为“能充分反映发起人的目的，明确系统价值、成本及风险的一组信息”。本书使用这一“系统架构”的定义，探讨空间系统架构的创建过程。此架构定义过程的输出应包括：

(1) 一个对任务目标的清晰定义，包括对用户以及设计系统将处理的需求的识别。

(2) 一套确定系统功能和性能需求的正式文档，包含定性和定量两个方面内容。

(3) 一份对拟用系统的描述和支持文档，以证明所描述的系统满足确定的需求。

(4) 一份对设计和开发方法的详细描述文件，以提供成本和进度的可靠预测。

(5) 根据所选择的设计，以及所选择的开发和实现方法，对成本和进度进行预测。

(6) 允许以用户可理解的方式，推导端到端的系统性能数学模型。

上述过程发生在一个完全成熟的工业项目获得批准之前，并由一个小团队来完成。该过程完成时，接近 90% 的系统成本已经被有效确定，并在

① MAIER M W, RECHTIN E. The Art of Systems Architecting[M]. CRC Press, Inc. 2000.

总成本中被锁定^①。尽管它只占系统定义和实现工作的一小部分,但却是非常重要的一部分。

在 Tom Hanks 制作的系列电视片《从地球至月球》的第五集中^②,真正的英雄是工程师们。剧本围绕着 Thomas Kelly 及来自格鲁曼公司的团队讲述了他们设计并建造登月舱的故事。在最开始和最后结尾的两个简短场景中出现了 T. Dolan 和 J. Houbolt,他们在 1959 年提出了登月舱和月球轨道交会的概念。最初的设计是整个阿波罗登月舱在月球着陆,并直接返回地球。由于质量和经费的限制,他们放弃了最初的方案,转而寻求一个更加经济可行的解决方案,最终提出了这个更有风险、但经济上可承受的登月舱和月球轨道交会对接的概念。这种围绕问题思考、在限制条件下工作并提出可行解决方案的能力,使阿波罗计划成为可能。Houbolt 和 Dolan 在电视节目中出现得很少但很重要,这是他们应受的礼遇。同时,在本书中也是值得一写的。

对项目早期阶段给予应有的关注,是避免其在后期出现大问题的最安全的方法。图 1.1 给出了一个用于早期定义的成本超支百分比的概括说明。如果项目在早期定义上投入了足够精力,其超支的成本显然会更少。

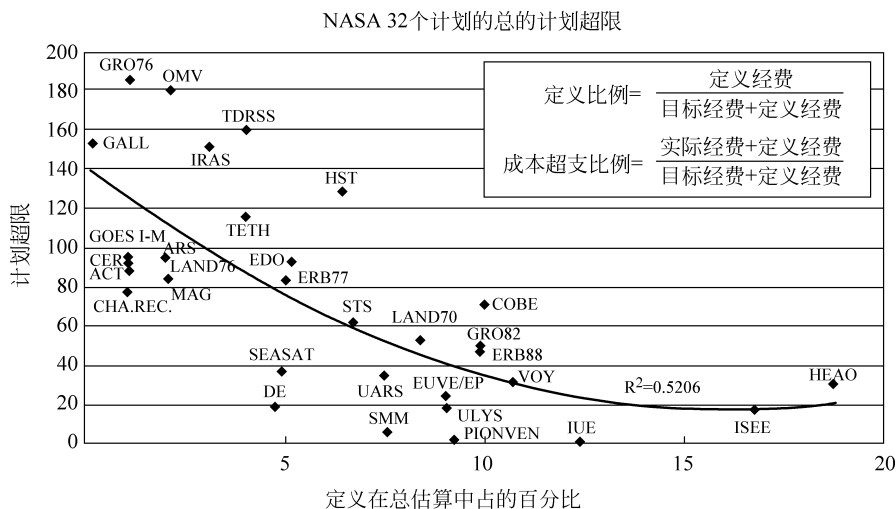


图 1.1 设计成本与总成本关系曲线^{③④}

① NASA. Systems engineering handbook: SP-610S[S]. NASA, 1995.

② *From the Earth to the Moon*, Fifth Chapter, 由 Tom Hanks 改编自 Andrew Chaikin 作品 *A Man on the Moon*.

③ 由 NASA 总部审计官员 Werner Gruhl 于 1985 年提供。

④ 编者注: 本书中所有插图均系原文插图。

本书与其他空间系统工程书籍是互补的。本书将重点放在了其他书籍通常不涉及的相互关系及综合方面,而且也不包括其他书籍会完全覆盖的信息。例如,要学习为卫星提供合适热环境的各种不同方法,本书并不是一个很好的资料来源。然而,本书则是一个学习掌握热设计、姿控系统设计、载荷和平台的指向要求在冲突的方向驱动卫星的姿态控制、配置和结构稳定的好资源。书中用于学习这些内容的方法是将其与以前设计进行对比分析。为了与所期望的互补和通用的观点相一致,我们对不同工程领域的分析是简要的,将放弃对实际设计所必需的公式和详细分析程序。为了弥补这一缺失,本书对驱动设计的因素及其相互关系进行了扩展分析,并用当前和过去设计的多个实例进行了说明。例如,9.7节对人造卫星周围的天球几何关系进行了详尽分析,包括太阳、地球、观测目标以及深空环境的时变方向和尺度。为什么没有包含计算这些时变几何所需的基础轨道力学和球面三角公式呢?因为缺少公式符合本书的互补特性和综合观点。本书不包含在之前的书籍中已经包括的数学公式,而是聚焦在对数学公式应用的整体背景的理解上。

本书认为空间任务设计过程是一个交互过程。一组清晰的用户需求,通过设计生成一个清晰的规格说明,这是教科书中所讲的情况。遗憾的是,这样的情况在现实中是不存在的。使用空间任务数据的用户,总是有相当广泛的、有时甚至是混乱的、相互矛盾的一组愿望。这些愿望可以用通过不同设计实现不同最终性能的方式得以部分地或全部地满足。这些设计将会被贴上截然不同的成本、风险和时间进度的标签,还需要采用不同的程序性方法。此外,作为使用者的科学家和作为投资方的行政发起者分属不同的实体。行政发起者可能有明确或者不明确的目标,他们通常是资金的来源。所以实现这些目标是非常重要的。这些目标可以是开发和使用一项特殊技术,或者是完成一个国家或特殊组织的某项工作。

在本书的开头,说明了编写本书的目标是介绍如何开展和实现“合理”的空间系统设计。这是什么意思呢?“合理”的设计会平衡所有来自不同用户群体的相互矛盾的需求,同时会在项目发起者所建立的承受能力及刚性约束条件下,提供一个产生合理科学任务输出的系统。如果可以响应一系列重要的用户需求,那么科学的输出就是合理的。通过将功能和性能正确分配给构成整个系统的不同要素,并采用符合发起者定义的风险和成本报告的技术、设计和开发方法,系统设计将达到最佳。这意味着要将科学要求、开发风险和计划的约束等作为一个整体加以考虑,由系统架构的设计者

给予同样的优先级。这种方法与 Wertz^① 在《空间任务分析与设计》的引言中介绍的方法的要点是一致的,值得逐字引用:

空间任务分析与设计通常从一个或几个广泛的目标和约束开始,在尽可能低的成本条件下确定一个满足既定目标和要求的空间系统。这些广泛的目标和约束是这个过程的关键。空间系统的采购计划常常用详细的数值要求代替广泛的任务目标。为了获得最佳的效费比,我们必须要求系统刚刚好能实现的合理的目标。

前几段建立了四个基础性的重要原则:

(1) 将需求的建立视为迭代设计过程的一部分,而不是一个单独的步骤。需求的建立不是在设计过程之前完成的,而是设计过程的一部分。

(2) 对于一些不合适的要求,需要通过优先级排序和协调谈判的方式对其进行系统化设计,以设计一个可承受的系统。

(3) 不仅需要考数学分析及详细的数值输出,也要考虑非数值因素。

(4) 要在需求、约束及实现难度之间达到平衡状态。

美国国家航空航天局^②(National Aeronautics and Space Administration, NASA)也承认需要平衡。

一个成本—效率系统必须提供效率与成本之间的一种特殊的平衡。

事实上,这本书致力于理解一个设计良好的系统中存在的平衡。

在前几段中,一再强调必须将需求视为灵活的,并将其作为整个设计过程的一部分。不过,N. Augustine 指出^③,在完全成熟的工业实施阶段,需求必须尽可能保持稳定。这并不矛盾。在航天任务的空间系统体系架构定义阶段,设计和需求之间的互相调整,必须确保已识别的需求和产生的设计之间的啮合度尽可能高。在随后资金充足的工业实现阶段,则要将尽量减少更改需求的需要,理想状态就是减少到零。

1.2 总体架构定义过程中的角色

1.1 节提到了两个参与实体或角色:用户和投资方。在建立空间系统

① WERTZ J R, LARSON W J. Space missions analysis and design[M]. Springer, 1999.

② NASA. Systems engineering handbook: SP-610S[S]. NASA, 1995.

③ AUGUSTINE N R. Augustine's laws[M]. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1983.

的过程中,区别不同的利益相关方所扮演的角色是正确理解创建过程的关键。欧洲空间标准 ECSS—P—001^① 采用了如下定义:

(1) 用户是使用空间项目产生的数据,包括使用数据的科学团队和操作团队。

(2) 客户承担作为用户代理的角色,将用户需求转化为规格说明,领导项目进展,并接受空间系统的交付,如航天局等。

(3) 供应商承担实际建设空间系统的角色,它是航天工业部门。

Wertz 在其《空间任务分析与设计》中使用了另外三种角色划分:

(1) 投资方是为空间项目提供经费支持的机构。

(2) 开发商是建设空间系统的机构。

(3) 用户/操作者是使用空间项目输出数据的机构。

Wertz 关于投资方和用户之间区别的描述是非常恰当的。在大多数空间项目中,为系统支付费用的利益相关方并不是系统的使用方,这是一个重要的区别。这种二元性不仅在空间领域存在,也在许多政府资助的商品和服务的实施中存在,它使空间项目的建立过程不可避免地带有政治性。但这并不意味着系统设计师必须是政治相关的,事实上,如果他从不接触政治,那就更好了。一个好的系统设计师往往是一个糟糕的政客。然而,系统设计师必须能够意识到政治环境,才能设计出一个最终可以发射的系统。正如 Brand Forman 在 1990 年所言:“如果政治不起作用,那么硬件将永远不会发挥作用”。

在欧洲,一旦一个项目通过批准并建立工业组织后,投资方就不再扮演重要的角色。然而,在美国,国会的年度预算程序使投资方持续参与到任务的整个过程中,所以在此期间,存在投资方停止对项目进行投入的永久危险。

之前提到过的 ECSS 标准将开发者划分为客户和供应商两类。这种划分是必要的,因为几乎所有的空间项目都是通过代表用户的空间机构和实际建设空间系统的航天工业部门之间的相互作用完成的。因此,本书将研究空间任务总体架构设计过程中的四个角色。具体的术语将使用欧洲空间标准合作组织(European Cooperation on Space Standardization, ECSS)推荐的术语,并加入了 Wertz 提到的投资方。

本书所讲的角色所述如下:

^① European Cooperation for Space Standardization, Glossary of terms european cooperation for space standardization: ECSS-P-001[S], ESA, 1997.

(1) 投资方是实体机构,负责为空间系统的实施提供经费支持,并确定约束条件、最高成本、预期进度、方案框架,以及一系列适用于空间系统实现的适当的指导方针。

(2) 用户是使用系统输出结果的团体,负责确定空间系统产生的数据的数量、质量及交付方式的需求。

(3) 客户是代表用户对供应商利益的实体,负责指定系统、监督实施情况、接受及认证系统,并将系统交付给用户,同时在按时完成任务和将成本控制限度之内对投资方负责。

(4) 供应商是与客户进行交互的实体,参与初步设计,完成后续详细定义及开发和系统建设,并将系统交付给客户,由客户向其支付报酬。

客户这个角色实际上是“经典的系统设计师”角色,负责解释及维护用户和投资方对供应商的需求。必须指出的是,在某些情况下,参与过程的角色数量可以更少。在几乎所有私人资助的空间项目中,投资方和用户往往是同一个实体。一家私营公司会购买一个空间系统,来满足一系列明确的公司需求。这个公司同时扮演投资方和用户的角色,来确定项目的性能要求和投资总额。在一些需求明确,且这些需求可以通过现有的和经过验证的系统加以满足的项目中,则可能不需要客户,即航天局。客户是相对于供应商来说的,代表用户利益的解释者和捍卫者,当系统的创新性较低时也是不必要的。标准系统不需要成为本书中讨论的总体架构定义的主题,它只需要采购。就本书的目的而言,重点应放在包括所有参与者的空间项目上。空间项目是复杂的,它包括在相互矛盾的需求之间进行协调,并涉及先进技术的开发。正是基于这个原因,才需要一个实体来处理投资方和供应商之间的关系。这个必要的实体就是客户。20 世纪 60 年代初期,欧洲成立了欧洲运载火箭开发组织(European Launcher Development Organization, ELDO)来开发运载火箭。该组织没有管理和技术能力来履行客户的职责,尝试了 11 次火箭发射,均以失败告终^①。这表明有一个在管理和技术方面都精通的实体是必要的,它可以扮演在空间任务中所有参与者之间的协调者的角色。这个角色就是客户。

有一种情况下存在两个客户:一个客户与用户进行联合并交互,另一个客户与供应商交互。以业务气象任务为例,研究机构是 NASA 或欧洲航天局(European Space Agency, ESA),业务机构是美国国家海洋和大气管理局(National Oceanographic and Atmospheric Administration, NOAA)

^① European Space Agency. ESA Achievements: BR-250[R]. ESA, 2005.

或欧洲气象卫星组织。业务机构在与用户进行深入的沟通后建立需求,并将这些需求转移到向客户施加这些需求的研究机构。这种方式已经证明了它对复杂、昂贵、会持续很多年的业务气象任务的价值。该业务机构通常也负责维护经过认证的在轨空间系统的日常运行。这些任务所需要的巨大投资以及用户需求之间复杂而持久的联系,证明了将客户角色划分为这两部分的合理性。

类似的方法已经存在了几个世纪。1550 年马拉加港口的建设是当时的一个重要的项目,参与港口建设的有:

- (1) 用户: 马拉加的商人及渔民。
- (2) 投资方: 西班牙王室为项目出资并有一名行政长官代表。
- (3) 客户/系统设计师: 提供整体设计,对工作进行认证并授权支付“Veedor”。
- (4) 供应商: 由承包商和分包商组成,实际承担建设港口的任务。

就像当今典型的空项目一样,马拉加港的供应商是由一个名为“sobrestante mayor”的主承包商和一个名为“maestros de obras”的分包商组成的。与许多现代项目一样,这个项目也经历了延误和成本超支^①。如果说阳光下没有什么新鲜事物,其实并不符合实际情况^②,但确实不像广告宣传的那样,有那么多新鲜事物。

1.3 系统总体架构定义阶段的观点

本书是从客户的中心视角写作的。客户解释用户的期望和需求,并将其转化为一系列详细、正式的开发层面的规格说明。客户在供应商的帮助下,建立系统的总体架构,为系统各要素分配功能,分解总体性能要求,将它们分配至指定的系统要素,从而提高整体的性能。在这个过程中,客户将不断优化用户需求,并在用户和供应商之间进行沟通,直到用户需求、系统设计、性能划分及功能分配达到平衡和谐的状态。与此同时,客户还要关心投资方的主要约束,例如总体成本控制、可承受的风险、进度和将要采用的技术等。一旦所有参与者之间相互冲突的利益得到平衡,系统总体架构就可以确定,也就可以发布第一个全面的正式系统级规格说明。总体架构和系统规格说明将派生出系统主要要素的详细设计和一系列规格说明。总体架

① Ingenieria en el tiempo de Felipe II Patrimonio Nacional 2003.

② Ecclesiastes, Cohelet, date of writing unknown.

构定义的详细程度取决于在“基于投资方的目的,充分定义了系统的价值、成本以及风险的一组信息”方面将要达到的目标。这些信息将作为文件提交给投资方和客户,这将促使人们对一项空间项目是否有充足的成熟度和资金支持、是否要实现其工业开发做出明智的决定。这一步应该而且必须在项目审批之前进行。在早期设计阶段,客户作为用户和供应商之间的纽带,扮演着古典建筑师的角色。建立一个空间系统的架构是为了在这项任务成为现实之前,向用户和投资方证明其可行性和合意性。总体架构设计努力在用户需求、供应商的能力以及投资方的投资能力之间达到一种平衡。平衡只能通过相互作用来保证,其详细程度要确保人们能做出明智的决策,促使项目得到最终的批准。总体架构设计对于项目的审批至关重要,其对空间系统的整体成功来讲也至关重要。这些相互关系的概述如图 1.2 所示。

对于不同系统要素的功能和性能的详细设计、分配,系统设计师的综合视角也很重要。他独立于负责系统要素设计的专家,可以充当专门负责设计过程的专家们之间的仲裁者。因此,在空间项目的早期阶段,客户必须以系统架构的综合视角行事。在本书

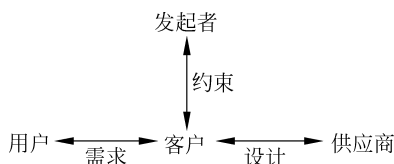


图 1.2 空间系统设计及实现过程中关键要素之间的相互关系

引用的 Maier 和 Rechtin 的书的序言中,探讨了系统设计师视角与系统工程师视角的不同,书中也对系统总体架构定义和系统工程的角色进行了比较和区分。再次引用书中的话:

空间项目的早期确实是一个形势未知、目标没有完全确定的时期。在这一阶段,与分析相比,需要更多的是综合。这些工作通过小型团队来完成。客户与用户和投资方之间的交互是强力的、非常有效的。

这意味着,项目的早期阶段更趋向于“总体架构定义”,而不是“系统工程”。如表 1.1 所示,其也来自 Maier 和 Rechtin 的书。

表 1.1 系统总体架构与系统工程观点

系统总体架构设计/系统工程集合			
特征	总体架构设计	系统总体架构与系统工程	系统工程
状态	弱结构的	受约束的	可理解的
目的	满意	合规	最优化

续表

系统总体架构设计/系统工程集合			
方法	试探法	T^M	方程
	综合	T^M	分析
	艺术与科学	艺术与科学	科学与艺术
接口	聚焦于不匹配之处	临界	完整性
系统完整性维护	单一思想	明确的目标	规则的方法
管理问题	为投资方/用户工作	与投资方/用户一起工作	为供应商工作
	概念化及认证	整体瀑布式的管理	满足需求
	保密	利益冲突	利润与成本

从表中可以看出,“艺术”是非常关键的元素,最佳功能分配和最佳关键性能指标的确定不能仅仅通过科学和数学的手段建立。在设计过程开始时,设计环境是如此之大,使得试探法、平衡感、艺术美感以及由此产生的创造性火花比复杂的数值优化算法具有更大的真实性。掌握着财政大权的投资方“政治”需求,使仅用数学方程来实现最优的总体架构设计变得更加不可能。

满足如下条件,就可以说是一个好的总体架构:①需求得到满足;②具有良好的平衡;③是经费可以支持的;④是优雅的。

本书的目的之一就是要培养辨识好的总体架构的敏感度。

1.4 设计与实现是一个不断演进的过程

在上文中,设计过程被描述为平衡相互冲突需求的过程。本节将介绍如何随时间变化平衡相互冲突的需求的问题。

空间系统工程师需要在所有设计和实施阶段努力保持平衡,就像专业工程师在他们感兴趣的领域内所做的那样。因此,相同的需求会在更详细的设计层次上反复出现,一个迭代的过程就随之而来。这就是过去生产诸如串联或如图 1.3 所示的螺旋图来说明复杂系统设计过程的原因。

最顶层的设计从需求和约束的一般性陈述开始。这将产生整个任务的概念、有效载荷或观测的概念、最广泛的设计特征,以及项目的一系列顶层规格说明和计划。以这个输出作为下一个设计周期的起点,将逐步完成更详细的设计和规格说明。早期的设计处理了关键需求和任务的更高层次的描述,但由于该设计决定了项目的实施,这就意味着,对于要实际构建的系统,更高层次的描述还必须包括易于描述和分析的关键子集,因为对项目成本、性能和风险的可靠估计需要对这些关键子集进行相当详细的分析与设计。第 n 层的设计所提供的信息是第 $n+1$ 层规格说明和设计的起点。这意味着在每