

美国联邦航空局(FAA)

国家空域系统 系统工程手册

中国民用航空总局空中交通管理局

美国联邦航空局(FAA)

国家空域系统
系统工程手册
(2.1 版)

中国民用航空总局空中交通管理局

翻译说明

《国家空域系统系统工程手册（2.1 版）》是美国联邦航空局（FAA）实施国家空域系统（NAS）现代化的工作依据和准则。为便于了解和借鉴西方国家民航空管系统建设经验，现将《国家空域系统系统工程手册（2.1 版）》翻译成中文。

中文版手册由吕小平同志主译。译文不足之处，欢迎指正。

2004 年 10 月

国家空域系统

系统工程手册

联邦航空局

ASD-100

结构与系统工程

批准:



Ann Tedford, ASD-100 项目总监

日期: 2003 年 11 月 19 日



联邦航空局系统结构
与投资分析办公室



目录

1.	介绍.....	1
1.1	目的.....	1
1.2	范围.....	1
1.3	手册的组织结构.....	3
1.4	SEM 与 SEMP 之间的关系.....	3
1.5	系统工程程序描述.....	4
1.6	基于过程的管理和系统工程.....	5
2.	系统工程概述.....	6
2.1	什么是系统工程?.....	6
2.2	什么是系统?.....	7
2.3	为什么使用系统工程?.....	9
3.	采购管理系统项目生命周期中的系统工程.....	10
3.1	介绍.....	10
3.2	系统工程要素与 AMS.....	12
3.3	AMS/系统工程工作产品输入与输出.....	13
3.4	AMS 程序阶段.....	16
3.5	保留项.....	27
3.6	保留项.....	27
3.7	系统工程制定指南.....	27
4.	实施系统工程.....	30
4.1	系统工程.....	30
4.2	综合技术计划 (满足标准 EIA/IS731 FA 2.1 和 iCMM PA 11) ...	41
4.3	需求管理.....	55

4.4	功能分析（满足 EIA/IS 731 FA 1.2 和 iCMM PA 4）	95
4.5	合成	141
4.6	同业研究	164
4.7	接口管理（符合 EIA/IS731 FA 1.5 和 ICMM PA 7 标准）	181
4.8	专业工程	196
4.9	分析的完整性	260
4.10	项目风险管理	279
4.12	确认与验证	311
附录 A	缩写	339
附录 B	系统工程手册术语表	350
附录 C	原始系统要求评估检查表	358
附录 D	关注点与问题	359
附录 E	综合技术计划详情	361
附录 F	采购管理系统生命周期阶段及相关系统工程要素工作产品	386

1. 介绍

系统工程手册（SEM）为一本“如何做”的指南。本手册详细说明了主要的系统工程（SE）要素，并提供了将这些要素应用于国家空域系统（NAS）的最优方法。本 SEM 选编了 SE 领域中已被证实的方法，这些方法被认为是最适于联邦航空局（FAA）项目分析、计划、设计、采购、管理及生命周期支持的方法。

教科书、专业期刊、课堂上关于 SE 的定义相当多，本 SEM 选用以下定义：

SE 是一门集中研究与局部不同的、完整的系统的设计与应用问题的专业，它包括完整地看待问题，考虑所有方面和所有变数，并将技术方面与社会联系起来。

SE 将（项目）利益共享者的需求转换成系统要求并使过程更加便利，通过该过程，系统和/或组件规范能够满足系统要求。尽管不同的项目在需求、项目的大小和复杂度上不同，SE 仍然提供了一组逻辑步骤来派生出最佳的需求，并将需求转化为解决方案。上述步骤产生一系列的工作产品来详细说明各级系统的特性，证明（项目）利益共享者需求（明确的或隐含的）的可追溯性，同时说明了如何确认需求以及如何验证系统和相关组件。为了获得最高效率，SE 在大型产品研发活动前开始进行，并贯穿于整个项目的生命周期中。SE 的正确实施有助于确保从一开始就正确执行项目；当出现问题时，也能及早发现和解决问题。因此，该过程降低了项目的成本和风险。

1.1 目的

本手册的四个主要目的包括：

- 说明了 FAA 的综合 SE 方法，即工程师或小组将用于完成任务（要求采用 SE 方法）的方法；通过计划，该方法与 FAA 的所有机构协调一致，并与政府、行业的最佳政策及指导方针保持一致；
- 提供能产生有效的、一致的 SE 的方法与工具；
- 提供 SE 活动（确保统一的、一致的优质产品所必需的活动）各个工作产品的详细信息；
- 使 SE 能够参与并支持项目管理的需要；
- 使系统工程能够参与并支持项目管理。

1.2 范围

SEM 描述了在 FAA 应用的 12 个主要的 SE 要素。SEM 通过确定 SE 要素在决策和采购过程中的合理应用来支持采购管理系统（AMS）。图 1.2-1 列出了这 12 个 SE 要素。

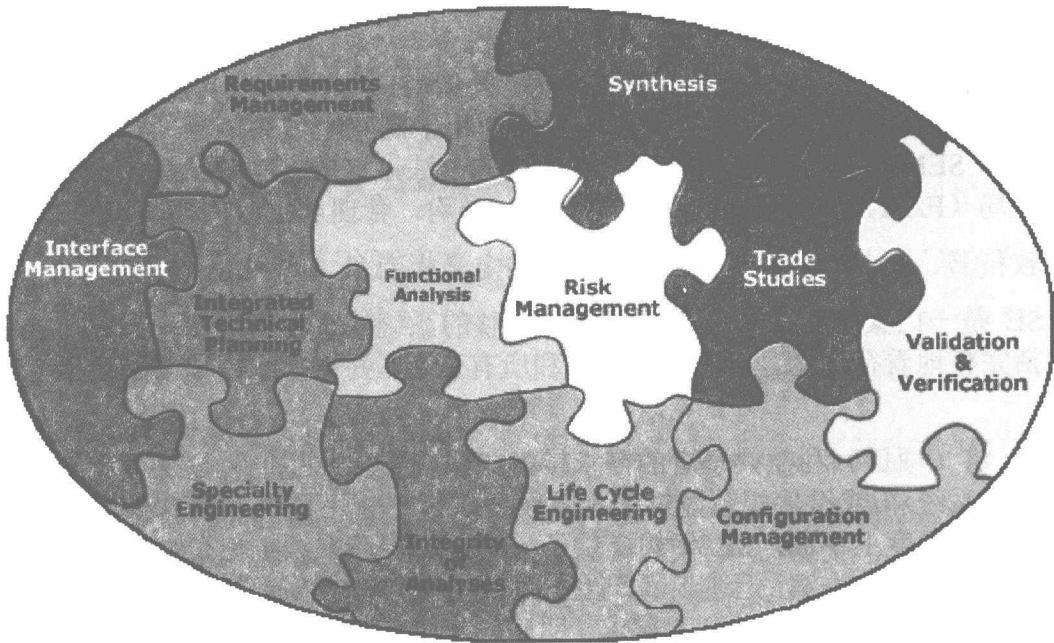


图 1.2-1. 联邦航空管理系统工程要素

作为 SE 的一本“如何做”的指南，SEM 详细说明了将在整个项目生命周期中执行的 SE 要素。术语“项目”在本文中包括所有大小和复杂度不同的项目，范围从 NAS 到其中的各个部分。当 SEM 主要用于 NAS 现代化时，建议每个项目根据需求来确定过程、工具和技术的应用。进一步说，指定 NAS 系统工程管理计划（SEMP）中的相应 SE 管理部门来指导这些过程的执行，或者对于特殊的项目，由总系统工程师或项目经理指导这些过程的执行。本手册包括过程制定指南（见 3.6 节）。

SEM 详细说明了 FAA SE 要素以及由每个 SE 要素产生的工作产品。表 1.2-1 描述了 12 个要素及其各自的用途或功能。表中列出的第 13 个要素用于其他 12 个要素的过程管理和维护。

表1.2-1. 系统工程要素

系统工程要素	要素目的
综合技术计划	计划 SE 的活动和产品。
需求管理	确定并管理需求（需求能够说明预期的系统特征）。
功能分析	描述用以派生出需求的功能特性（系统应该做什么）。
合成	将需求转化为具体的解决方案。
同业研究	通过分析和选择需求的最平衡的解决方案来帮助作出决策。
接口管理	确定并管理系统内部中间的相互作用以及与其他同级系统之间的相互作用。
专业工程	使用专门的技术和工具来对系统、需求、功能、解决方案和（或）接口进行分析。帮助实现需求的派生、解决方案的合成、方案的选择、需求的确认和验证。

系统工程要素	要素目的
分析完整性	确保分析能达到所要求的准确度和精确度。
风险管理	通过制定战略来确定、分析和管理在实现项目需求过程中的不定因素，以降低这些不定因素的严重程度或减少产生不定因素的可能性。
配置管理	建立和维护系统的一致性，并管理系统性能、功能和物理属性的变化。
确认和验证	判断系统要求是否正确；判断解决方案是否满足已被确认的需求。
生命周期工程	确定和管理系统生命周期属性的需求，包括不动产管理、展开与转移、综合后勤支持、维持/技术发展、处置等
系统工程程序管理	管理和维护 SE 过程来满足 FAA 目的。通过不断地改进 SE 过程和工具的效力和效率来增进 FAA 机构范围内的技能和标准化。

1.3 手册的组织结构

第一章，包括目的、范围、手册的组织结构、SEM与SEMP之间关系、系统工程程序描述以及基于过程的管理和系统工程；第二章，描述了SE实践方法的历史背景及前后关系；第三章，描述了本手册与FAA AMS的每个阶段之间关系；第四章，详细说明了每个主要的SE要素以及各要素之间的相互关系。本文还包括每个SE要素之间的相互关系（见第四章中的相关段落）以及对能力成熟度集成模型（iCMM）（如SEM 4.12和 iCMM PA 08）的参考。

包括以下附件：

- 缩写；
- 术语表；
- 原始系统要求评估检查表；
- 关注点与问题；
- 综合技术计划详情；
- AMS 生命周期阶段及其相关 SE 要素工作产品。

1.4 SEM 与 SEMP 之间的关系

SEM与SEMP携手合作。SEM回答有关“做什么”和“怎样做”的SE问题，而SEMP则回答有关“做什么”、“谁做”、“什么时候做”和“为什么做”的SE问题（即：根据SEM中的SE要素目的，说明为什么某个特定的组织或项目执行或不执行某个特定的SE要素）。二者通过SE“做什么”或SE的产品和活动建立直接联系。图1.4-1说明了SEM与SEMP之间关系。

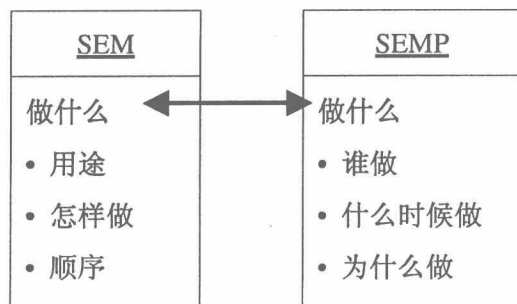


图1.4-1 系统工程手册和系统工程管理计划之间的关系

1.5 系统工程程序描述

第四章描述的SE过程包括以下信息：

过程定义：包括实施具体SE过程的目的以及对具体SE过程的叙述性说明。叙述性说明论述了过程的功能（能做什么）。项目实施者可以使用这些信息来安排具体活动，从而与项目的发展事件一致。

基于过程的管理（PBM）图：第四章中的每一个SE要素部分均包含一个标准模板，该模板使用基于过程的管理图来描述SE要素过程。模板给出SE过程的主要步骤、SE过程的输入及其相关供应商、可能产生的输出以及相关的产品用户（从SE角度来看）。SEM同样确定提供（输入）和使用（输出）过程，这些输入和输出过程在过程实施期间用来建立必要的项目交流、文档活动、审查活动。

产品粒度（包括输入和输出）由采用了本文讨论的特殊SE要素的AMS生命周期的阶段决定。例如：合成能够比任务分析提出更多的解决方案。

过程描述包括每一个SE过程的所有方面，包括针对安全性、经济性、性能、可用性、可操作性、拥有成本的设计要求等。在一些项目中，可正式或非正式地（如在工程师的笔记本中）实施一个特定的活动，但应确保中间产品在正式的底线控制之下。

每一个SE过程都包括下列主要 workflow 任务，这些任务同样也包括在PBM图中。

怎样做：SEM讨论了用来实施每个SE过程的具体方法和技术，并根据给定的项目阶段指导怎样选择正确的方法。SEM集中概述了“做什么”、“为什么做”、“怎样做”等关键点。

输入：包括来自于外部资源或是其他过程的信息。这些信息包括了过程开始前或者过程实施期间所接收的内容。

输出：包括在过程实施期间的信息以及由过程实施所产生的信息。

开始标准：过程开始所需的必要条件。

结束标准：包括过程结束前应完成的活动和产品。

度量标准：包括对过程执行情况和过程产生的工作产品进行测量的度量标准实例。

方法/工具：包括有效实施过程所需的工具和方法。同时让用户知道哪些工具和方法在AMS FAA采购系统成套工具中是可用的。

实例：包括SE工作产品以及产生工作产品的标准模板的例子。在第四章的某些节中、SEM附录中以及FAA的官方网站中均有例子，不管在何种情况下，均提供了参考统一资源定位符（URL）。

参考文献：包括来自政府、行业、学术界的与本课题相关的文档。

1.6 基于过程的管理和系统工程

要建立一个通用的高阶过程模型来反映表1.2-1中的所有SE要素在过程中的相互关系是相当困难的。考虑的项目不同，则SE要素之间的交互和反复可能是不同的。第三章包括了对AMS每个主要阶段：任务分析、投资分析、解决方案实施、在用管理和处置中SE要素交互的定义。另外，系统工程功能N²图(图3.1-1)，包括相关过程的相互关系、输入、输出和产品。由上所述，第四章包括了一个标准模板，该标准模板使用PBM图来描述SE要素过程。

2. 系统工程概述

本节介绍了几个关键的发展和既得的经验，它们使得SE成为当今能够组织和管理复杂程序（例如，NAS中的那些复杂程序）的有力途径。SE不但重视更强的商业性的基于团队的工程组织，而且也重视没有技术产品的组织，从而不断发展。“二次世界大战”前，建筑师和土木工程师实际上是系统工程师，他们从事于大型的、主要的土木工程项目，包括埃及金字塔、古罗马水道桥、胡佛水坝、金门大桥和帝国大厦，而其他的工程师则从事于火车和大型轮船的制造。然而，“早期”的系统工程师没有任何的理论或科学来支持SE。因此，他们缺乏明确的、不断应用的流程或实践方法。“二次大战”期间，一个项目管理和总工程师可能监督航空器项目的开发，而其他的人就管理关键的子系统，例如，动力、控制、结构和支持系统，这样就导致整个流程缺乏统一性。

另外的一些SE要素（比如运筹学和决策分析）在“二次世界大战”期间和战后才崛起。现在，通过分析更加复杂的需求和系统，总工程师使用SE来研究需求并综合项目组的的活动。

在二十世纪五十年代后期，SE逐渐发展成为工程的一个分支。在这个时期，空域竞争和发展核弹竞争被认为是国家生存必不可少的，军方及其民间承包商在极大的压力下从事核弹和轨道运行人造卫星的研发、测试和投入使用工作。在这种条件下，军方及其承包商寻找各种工具和技术，以改善系统性能（任务的成功）和项目管理（技术性能、交工计划、费用控制）。工程管理得以发展，使规范、接口文档、设计评审和规范配置管理的应用标准化。混合计算机和数字计算机的出现实现了对系统、子系统以及组件（便于系统要素的精确合成和权衡取舍）的广泛模拟和评估。

在高技术产品发展的所有阶段中，从项目开发中获取的经验促进了实践方法的创新。创新的原动力便是为了获得较高的系统可靠性。该期间提出的一些变化的例子包括：

- 各部分的可追溯性；
- 材料和过程控制；
- 变更控制；
- 产品的可量测性；
- 标准的接口控制；
- 需求的可追溯性。

2.1 什么是系统工程？

除了“介绍”（第一章）中使用的定义外，SE还可定义为一个高级别的过程，该过程在一个系统的设计中权衡取舍并整合各种要素以获得最好的产品和/

或最佳的系统性能。在SE中，虽然项目管理有些方面很重要，但是SE需要更多的工程专业知识，而不是更多的管理专业知识。SE所要求的定量和定性决策包括权衡取舍、最优化、选择以及多个工程学科结晶的整合。

SE具有反复性，它在系统的每一层都导出需求并加以详细说明，从最高层（NAS层）开始派生出那些需求，经过一系列的步骤最终获得所有层次上（即从系统到部分）的结构设计。反复性及设计的细化产生了初步设计、详细设计和最终设计。每一层都支持下一层的设计反复，这是做出正确决策所必需的。在这些反复活动中，同业研究中假定、分析、评估了许多概念选择。这些反复活动导致了需求的多层性。这些需求形成性能结构化检验的基础。SE几乎监控了所有的开发活动并将结果整合，从而为所有的系统层次提供最佳解决方案。

2.2 什么是系统？

系统是为实现某一特定目的而被整合在某运行或支持环境中的组件的集合体。这些整合部分包括人员、硬件、软件、固件、信息、程序、设备、服务和其他的支持方面。来自不同专业和产品领域的人员在系统的组成上有不同的观点。例如，软件工程师通常把集成的计算机模块作为系统；电子工程师可能就把一个复杂的集成电路或集成的电器件作为系统。FAA有一个叫做NAS的由多个系统组成的组合系统，它包括但不限于所有的机场、飞机、人员、程序、空域、通信、导航、监视/空中交通管理系统、设施。

有时很难就“什么构成一个系统”取得一致意见，因为系统的构成完全取决于确定系统目的或功能的那些人。例如，如果目的是要打印输入数据，则打印机可能被定义成一个系统。然而，另一个可能还要考虑打印机所需要的电源；如果目的是处理输入数据和用于显示结果，则计算机可作为一个系统；如果目的包括计算全国或全世界数据并把数据/结果存入到数据库中的能力，则计算机网络也可作为一个系统，而在这个系统中，计算机和打印机只是该系统的子系统。

SE首先在高层层面上定义系统，以确保在该层面上的关键要素及最优化，这样就排除了焦点过窄和非最优化，然后层层逐渐细化，直到系统完全被分解成基本要素。下段描述了系统分层结构。

2.2.1 系统分层结构

一个系统可能包括硬件、软件、固件、人员、信息、技术、设备、服务以及其他的支持项目。为了讨论NAS中系统/子系统的分层结构，在图2.2-1中建立了一个通用参考模型。每一个系统项目可能有自己的关联分层结构。例如：系统中各种软件程序/组件有一个通用的分层结构，见图2.2-2。因此，图2.2-2是图2.2-1的一个子图，在图2.2-2中，一个系统/子系统有多个计算机软件配置项。可以调整通用分层结构的深度，以使其与系统的复杂性吻合。在分层结构中，简单系统的层次可能比复杂系统的层次少，反之亦然。因为SE领域可能涉及各种分层结构模型，所以，确定给定系统/子系统目标或功能的人还应安排系统的分层次，从而确定系统的范围，这一点非常重要。

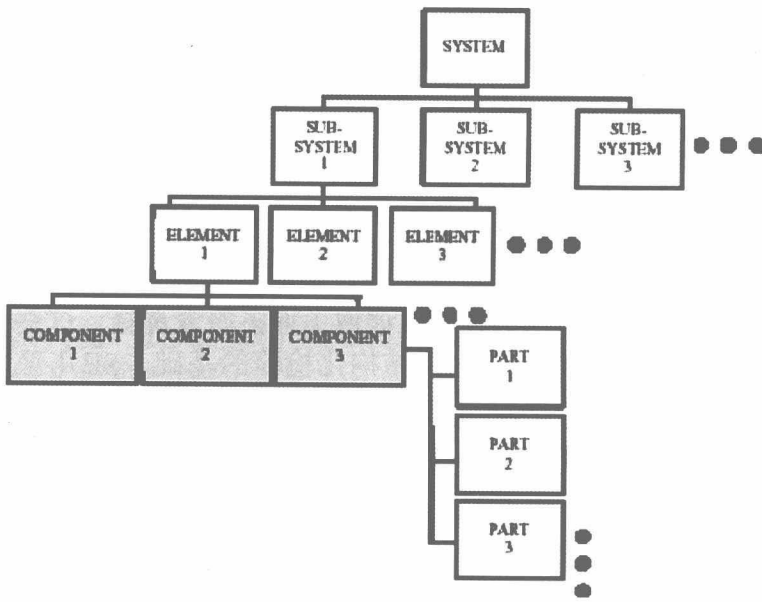


图2.2-1 系统分层结构

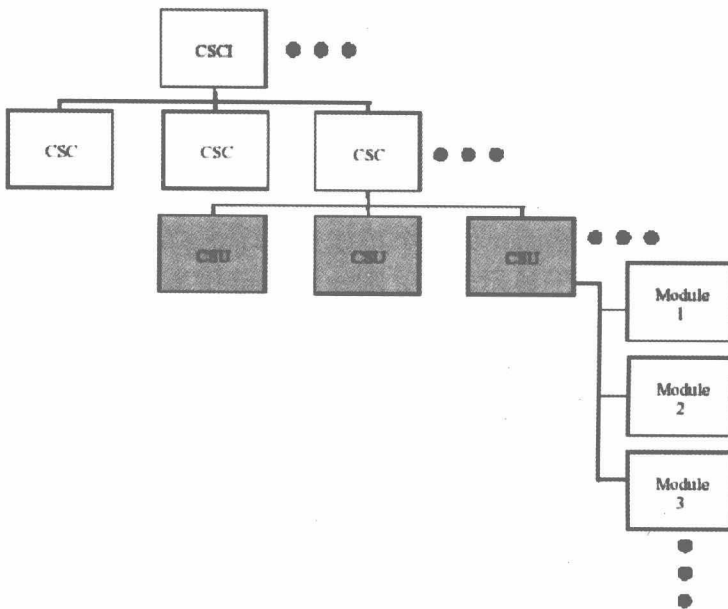


图2.2-2 通用软件分层结构

系统/子系统分层结构如下：

- **系统：**系统是为实现某一特定目的而被整合在某运行或支持环境中的组件的综合体。这些整合部分包括人员、硬件、软件、固件、信息、程序、设备、服务和其他的支撑方面。
- **子系统：**较高级系统中的一个系统（参见系统定义）。子系统的功能

构成较高级别系统整体功能的一部分。子系统的功能范围小于较高级系统的功能范围。

- **组件：**构成子系统某一部分的构件的综合体（如推进子系统的喷油组件）。
- **构件：**由多个零件组成，构成设计或生产产品的一部分。
- **零件：**系统中可单独辨认项目的最低层。
- **软件：**相关计算机说明和计算机资料定义的组合，用以使计算机硬件能够执行计算或控制功能。
- **计算机软件结构项（CSCI）：**软件集合体，用于配置管理，并作为配置管理过程中的单个实体。
- **计算机软件组件（CSC）：**CSCI 的一个功能部分或逻辑部分，通常包括两个或两个以上的软件单元。
- **计算机软件单元：**CSC 设计中的一个元件，可以单独检验，也可进行编辑。
- **模块：**一种独立且可以标识的程序单元，可以单独编译，可与其它程序单元组合并加载。

2.3 为什么使用系统工程？

对有效SE的需求在大型的、复杂的系统（如武器和运输系统）研发中最明显。但是，SE在研发、生产、展开、支持非常小的系统（如照相机和打印机）中同样也很重要。开发区域不断增加的复杂性加剧了对有效SE的需求。举例来说：大约35年前，半导体工业中，单片只有少数几个门电路或至多一个四级寄存器。现在，英特尔公司生产的“奔腾”处理器要复杂得多，它可以无限扩大应用水平，但是在其设计中需要更成熟的分析和专业知识。

并行工程活动（如工程开发技术）实际上都采用了良好的SE，因为SE可提供技术规划和控制机制来确保并行工程活动/结果能够满足整体系统要求。

项目开发期间通常都需要团队合作，而SE的驱动原则便是团队工作。在这种情况下，团队工作是几个可能拥有不同工具、不同分析能力等实体之间的相互合作。本手册中的SE原则能提高计划和控制活动的的能力（计划和控制活动都需要各界的相互配合和相互合作）。

使用 SE 过程的最大优势在于能提高最终产品完整和一致地满足需求的可能性。

3. 采购管理系统项目生命周期中的系统工程

3.1 介绍

本章讨论SE要素之间的关系及它们与AMS阶段之间的联系。针对每一个AMS阶段，将讨论SE要素产生的产品、提供给这些要素的输入以及要素的输出，而这些要素与JRC决策点相关。

本SEM所阐述的是当前被广泛认可的SE标准、方法和过程。因为文件和SEM的更新周期不一致，这里引用的AMS、SE文档以及过程可能并不全是最新的。

对每个AMS阶段的输入、SE活动和输出用图表的形式表示。同时还包括提供指南来指导针对具体项目制定SE过程。

3.1.1 系统工程要素间的关系

在第一章（表1.2-1）列出了SE要素。本节通过对各种SE要素输入和输出的描述，讨论SE要素之间的关系。这里，使用 N^2 图来说明SE要素之间的关系。在图3.1-1中，SE要素按对角线位置排列。通过取得 N^2 图中各行列的交叉点来解释 N^2 图，这些交叉点包括任意两个要素的相互联系和要素对应块的内容，从而以输入、输出、产品的形式说明了要素之间的接口。

3.1.2 采购管理系统生命周期中系统工程要素间的关系

项目生命周期包括所有与系统（从初始的概念到处理和结束）有关的活动和产品。这与SE定义各个方面一致。项目生命周期阶段的定义对于不同的SE要素有着不同的意义。建议系统发起人和高层项目管理人员使用这些阶段及其相应的里程碑（如：任务需求决策、初始投资决策、最终投资决策、在用决策等）来确定是继续还是终止该项目。因此，也提倡使用阶段来衡量一个项目的进度，同时提交报告给联合资源委员会（JRC），并最终做出杰出的决策。