



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

上海汽车工业教育基金会资助图书

System Engineering Approach to
Product Development

系统工程指导下的 产品开发

黄晨东 范 君 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

系统工程指导下的 产品开发

黄晨东 范 君 著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

系统工程指导下的产品开发/黄晨东, 范君著. —北京: 北京理工大学出版社, 2014. 7

ISBN 978 - 7 - 5640 - 9406 - 5

I. ①系… II. ①黄… ②范… III. ①系统工程 - 应用 - 产品开发
IV. ①F273. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 129942 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京尚唐印刷包装有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 7.5

字 数 / 105 千字

版 次 / 2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

定 价 / 49.00 元



责任编辑 / 申玉琴

文案编辑 / 申玉琴

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

今天，中国正处于前所未有的经济技术的转型期，许许多多老的产业因为竞争力不足而消失了，许许多多新的产业又如雨后春笋般逐渐呈现出来，仔细想想产业的产生和消失都有其合理的地方，但是有一条是值得我们深思的，那就是如何实现从技术到产品的转化。

许多东西在技术上都是非常好的、可行的，但是到了产品阶段往往都差强人意。为什么呢？可能有许许多多原因，其中一个重要的原因就是没有抓住技术到产品的转化规律。

我在美国和中国的工业界工作超过二十年，在航天、汽车、民用行业开发过多种多样的产品，总觉得有许多话要对大家讲，要把一些心得体会说出来，让年轻的工程师们少走弯路。感谢清华大学汽车工程系，他们邀请我在其暑期学校讲课，到本书出版我已连续授课三年。这本书就是在清华大学讲课的材料基础上整理而成的。

本书讲的是大家耳熟能详的产品开发，但是从另外一个角度——系统工程角度来探讨。系统工程是一个非常大的学科，这本书只能给大家介绍如何应用它。本书介绍了系统工程基本原理和方法，系统的组成和分类，系统工程的模型，系统的需求和功能到最后目标设定，这些都已经应用到许多复杂产品的开发中了。系统工程最重要的是要领会客户需求，把客户需求转化为技术要求，通过产品设计、产品验证，最终满足客户要求。本书还介绍了系统工程在产品开发中的常用工具，如系统参数图（P - Diagram）、设计潜在失效模式与后果分析（DFMEA）和设计验证计划（DVP），通过使用这些工具来帮助进行产品开发，以达到事半功倍的效果。还介绍了产品开发

流程，尤其是通过介绍汽车开发中的产品开发流程，把系统工程中的理论知识梳理了一遍；介绍了新能源汽车中的燃料电池汽车，尤其是燃料电池汽车的一些基本知识及原理，为后面的应用作铺垫；介绍了一个应用例子——用系统工程方法来进行燃料电池系统的开发，通过这个例子帮助读者掌握系统工程的理论与方法。

通过学习本书，读者可以基本掌握系统工程方法；同时结合具体应用实例，可以意识到如何把一种技术转化为产品。本书也可以为年轻读者把学校学习的知识应用到工业产品设计中提供很好的帮助。

本书的出版得到了许多人的帮助和支持。首先，感谢我的家人，因为花了很多时间撰写这本书，失去了与他们在一起的时间。其次，感谢清华大学张剑波教授，邀请我在清华大学讲授这门课；感谢上海交通大学章俊良教授，提供给我到上海交通大学讲授这门课的机会。最后，还要感谢上汽集团新能源和技术管理部团队，在我回国几年中，协助我一起应用这个理论来进行燃料电池系统开发；感谢上海汽车工业教育基金会支持该书的出版；感谢上汽集团技术情报中心朱盛镭总监协助我出版这本书。

最后希望读者能从本书中受益。

谢谢！

黄晨东

目 录

- 0 引言 / 1
 - 0.1 系统工程方法论的概念 / 1
 - 0.2 系统工程方法论的主要特点 / 1
 - 0.3 系统工程方法论的演变过程 / 2
 - 0.4 用系统工程方法处理问题时的基本观点 / 5
- 1 系统工程基本原理 / 6
 - 1.1 系统工程介绍 / 6
 - 1.2 系统的组成 / 8
 - 1.3 系统工程模型 / 11
 - 1.4 系统的分类 / 15
 - 1.5 系统需求分析 / 24
 - 1.6 系统功能分析 / 29
 - 1.7 系统目标设定 / 32
- 2 系统工程常用分析工具 / 35
 - 2.1 P - Diagram / 36
 - 2.2 系统失效模式 FMEA / 40
 - 2.3 系统验证计划 DVP / 45
- 3 产品开发流程 / 46
 - 3.1 V 序列模型 / 47
 - 3.2 产品质量先期策划 / 55
- 4 燃料电池及燃料电池汽车简介 / 62
 - 4.1 燃料电池汽车 / 62
 - 4.2 燃料电池发动机 / 64
 - 4.3 燃料电池电堆 / 67
 - 4.4 质子交换膜 / 71
 - 4.5 燃料电池系统辅助零件 / 72

5	系统工程应用于汽车研发 / 74
5.1	设计需求分析 / 74
5.2	限制因素 / 76
5.3	系统功能分解 / 77
5.4	燃料电池系统功能分析 / 78
5.5	燃料电池系统目标设定 / 80
5.6	燃料电池系统开发 / 82
5.7	燃料电池系统架构 / 83
5.8	燃料电池系统 DFMEA 及 DVP / 95
5.9	燃料电池系统控制逻辑 / 97
5.10	燃料电池系统集成 / 102
	结束语 / 111
	参考文献 / 112



引言

0.1 系统工程方法论的概念^[1]

所谓方法论，就一般意义来说，就是解决问题的辩证程序的总体，通过这样的程序把问题和可用的技术联系起来，求得问题的解决。方法论的意义可以说是设定问题的环境，即解决问题的概念、目标（功能目标和价值目标）、结构关系和过程、途径、方法选择依据等，也常称为方法框。

系统工程方法论是指建立在系统工程观念的基础上，在更高的层次上指导人们正确地应用系统工程的思想、方法和各种准则去处理问题。系统工程方法论自然就是解决系统工程问题的方法框。从某种意义上讲，系统工程是开发解决问题的系统的思想方法。构成系统工程的主要部分是观念和方法论。

0.2 系统工程方法论的主要特点

(1) 强调研究方法上的整体性。系统工程把研究对象作为一个有

机整体,同时把研究过程看作一个整体。在系统研究中,要把系统作为若干子系统有机结合成的整体来设计,对每个子系统的技术要求应首先从实现系统整体技术协调的观点来考虑,要以整体协调原则来协调子系统之间、子系统与系统整体之间、系统与其所属更大系统之间的矛盾。将研制过程作为整体,要求整个分析过程按着逻辑关系分解成各个环节,并分析各个环节之间的信息、信息传递路线、反馈关系等,把整个研制过程连接成一个整体。

(2) 强调技术方法应用的综合性。从系统的总目标出发,合理恰当地综合运用自然科学、工程技术、社会科学的有关思想、理论和技术方法解决系统问题,并使系统达到整体协调和优化。

(3) 强调管理工作的科学性。复杂的大系统研制有两个并行的过程:一个是工程技术过程,一个是管理控制过程。管理控制过程包括对系统的规划、组织、控制、决策等一系列过程。系统工程的整体化和综合化要求管理工作的科学化与现代化。

0.3 系统工程方法论的演变过程^[2]

当科学发展由高度分化开始走向综合,且传统的还原论思想和方法又无法解决一些复杂系统问题时,系统工程方法论开始兴起。虽然早在20世纪30年代生物学家贝塔朗菲已经提出一般系统论的基本思想,但是最先出现的能解决不少实际问题,而且从方法论意义上属系统研究的方法还是20世纪30年代末40年代初的运筹学(OR)方法。该方法是从解决一些武器、装备合理应用的问题开始而形成的一套方法论,它的核心是将问题化成数学模型,并寻求其最优解。

20世纪50年代末到60年代初,由于一些大型工程项目,如导弹、大型通信系统等的出现,形成了先由古德和麦克霍尔(1957)后由霍尔(1962)等提出的一整套系统工程(SE)方法论。特别是1969年霍尔提出的三维结构(逻辑维、工作维、知识维)矩阵。他利用逻辑维深化了运筹学的方法论,此外利用工作维规范了工程项目的设计、制

造、运行等过程。同时霍尔用知识维强调了各种知识的运用。系统工程最有名的应用例子大概算是阿波罗宇宙飞船的设计、研制和管理。实际上,20世纪60年代起这套系统工程方法论就已经在我国导弹部门开始应用。由于其富有成效的工作,周恩来总理生前曾希望将这个经验推广到国民经济部门中去。从1978年起,由钱学森教授等在全国范围内宣传、推广系统工程后,霍尔的系统工程方法论一直为我国大多数专家、学者以及一些实际工作者所遵循。

美国 RAND 公司在 20 世纪 50 年代提出了系统分析 (SA) 的方法论,从思路上看,与运筹学和系统工程的方法论中逻辑维大体相同。只是由于 RAND 公司在五六十年代的注意力不全在工程设计,而主要集中在解决政府和国防部门所面临的一些复杂的社会、政治和军事问题,其中最著名的例子可以算是麦克纳马拉提出的规划计划预算系统 (PPBS)。美国国防部于 1961 年首先应用 PPBS,1965 年,美国总统约翰逊命令将其用于联邦政府其他部门。

20 世纪 60 年代初,与上述 OR、SE、SA 的方法论有某种类同的是福雷斯特 (1961) 提出的系统动力学 (SD)。但他只是在建模时强调了系统中因果关系和控制反馈的概念,强调了在计算机上的仿真试验。所有这几个方法论在 20 世纪 60—70 年代都分别有了发展、应用和推广。由于在空间工程、管理等明显偏技术性的问题成功解决后,系统工程界都希望也能同样成功地将其应用到社会、经济等问题。例如美国在 20 世纪 60 年代中期曾兴起一个声势浩大的“把空间技术应用于社会”的运动。美国加州政府与四家航空公司签约,分别就公共运输、消除污染等问题立项研究。1969 年,美国参议院一份长达 40 多页的题为“把系统分析和计算机技术应用于社会科学和社会问题”的报告中指出:“政府应吸收管理科学、系统分析和计算机技术这些新方法,积极运用现代技术来设计一种应付今天复杂问题所必需的社会制度,在这方面起领导作用并发挥独创性”,而且声称,“无情的数学方法是人们在即将面临的关键年代中实现人们社会仁慈的目标的唯一方式”。福雷斯特也从研究工业问题转为研究社会问题。他在《增长的极限》一书中认为:世

界经济的增长随着各种社会问题危机恶化将走向极限。SD 常被用于描述各种社会领域的问题。20 世纪 70 年代,不少管理学院也纷纷增设有关定量分析的课程。然而实际结果却并不令人振奋,加州的四项报告没有被采用实施,联邦政府各部门推进 PPBS 计划半途而废。哈佛大学等又重新强调增加人文科学方面定性理论的课程。总之,过分的量化、过分的数学模型化难以解决一些社会实际问题。于是有人对这些学科的发展本身抱有悲观情绪,有人开始反思。1984 年,国际应用系统分析所 (IIASA) 专门组织了一个名为“运筹学和系统分析过程的反思”讨论会^[3]。与会者中有人认为这些学科所以在某些问题上不能很好地应用,主要是他们的方法论不对,处理一些问题太硬,定性考虑不够,把实施和分析分开来了。这里我们特别注意到英国的切克兰德的观点,他把 OR、SE、SA 和 SD 所使用的方法论都叫作硬系统方法论,而他自己在 1981 年提出一种软系统方法论 (SSM)。他认为用他的 SSM 解决一些结构不良的社会性问题效果比硬的方法论要好^{[4]、[5]}。

与 SSM 同类型的其他一些软的方法论也都出现在 20 世纪 70~80 年代,例如用于对付复杂性的系统的方法论有定性系统动力学 (QSD)、社会技术系统设计 (STSD)、管理控制论 (MC) 和组织控制论 (OC); 用于对付多元价值系统的方法论有战略假设表面化和验证 (SAST)、战略选择发展与分析 (SODA)、对话式计划 (IC)、社会选择 (SC) 等。到 20 世纪 90 年代初西方又提出关键系统思考 (CSH) 和整体系统干预法 (TSI)^[6]。

20 世纪 80 年代末到 90 年代初,东方出现了两个重要的系统方法论,那就是钱学森教授等提出的用于解决开放复杂巨系统的从定性到定量的综合集成方法论^[7],以及日本榎木义一教授等提出的既软又硬的 Shinayaka 系统方法论^[8]。由于他们都结合自己文化的特色,所以有人就统称其为东方系统方法论。我国系统界学者、专家正应抓住这个契机,在国际系统科学的舞台上占有自己的一席。

图 0-1 为系统工程方法论演变过程。

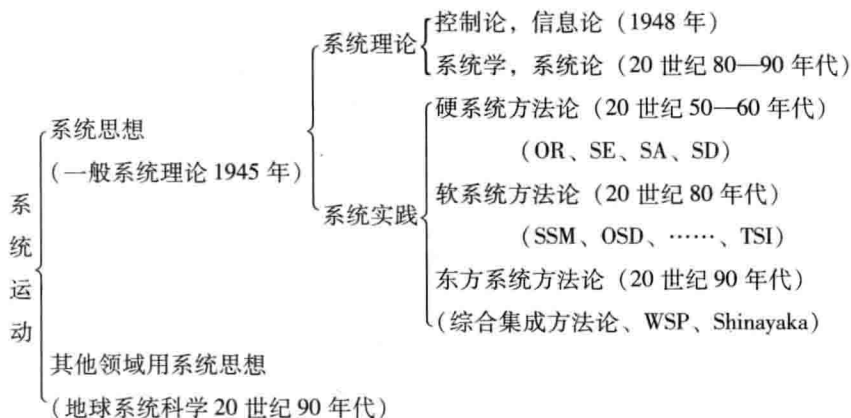


图 0-1 系统工程方法论演变过程

0.4 用系统工程方法处理问题时的基本观点

(1) 整体性的观点。所谓整体性即全局性或系统性，也就是在处理问题时，采用以整体为出发点，以整体为归宿的研究方法。

(2) 综合性的观点。所谓综合性就是在处理系统问题时，把对象的各部分、各因素联系起来加以考察，从关联中找出事物规律性和共同性的研究方法。这种方法可以避免片面性和主观性。

(3) 科学性的观点。所谓科学性就是要准确、严密、有充足科学依据地去论证一个系统的发展和变化规律，不仅要定性，而且必须定量地描述一个系统，使系统处于最优状态。

(4) 关联性的观点。所谓关联性是指从系统各组成部分的关联中探索系统的规律性。

(5) 实践性的观点。所谓实践性就是要勇于实践，勇于探索，要在实践中丰富和完善以及发展系统工程理论。系统工程是来源于实践并指导实践的理论和方法，只有在实践中，在改造自然界的斗争中，系统工程才会大有作为并得到迅速的发展。为了推广系统工程的方法，实践性是重要的，只有系统工程的广泛实践，才能使人们认识和了解系统工程的作用，才能促进系统工程的应用和发展。

系统工程基本原理

1.1 系统工程介绍

随着科学技术不断进步,许许多多新产品也在不断涌现,如航天飞机、波音 777 飞机、汽车、智能手机、智能家用电器,等等。这些产品都有一个共同特点,那就是它们都是一个非常复杂的系统。如何在有限的时间、有限的经费内,设计并开发出这么一个复杂的系统,如图1-1所示,并且还要保证质量?这是摆在管理者和工程师面前的一道难题。幸运的是,许多公司都在这方面做出了许多探索。如波音 777 飞机的开发,采用了系统工程的方法,成立了一个跨国界的团队。发动机在美国设计开发,机身每个部分在不同地方开发,最后在波音总部集成。还有福特汽车某款车,发动机用的是日本马自达的,底盘是欧洲开发的,最后整车在美国开发及制造。还有大家熟悉的苹果手机,其设计在美国,机壳制造、集成等在中国,随后美国负责总体定价及全球销售。可以看到,对于复杂的产品,所有厂家都不约而同地转向用系统工程的方法开发这些新产品,从而使产品从全球化中受益。

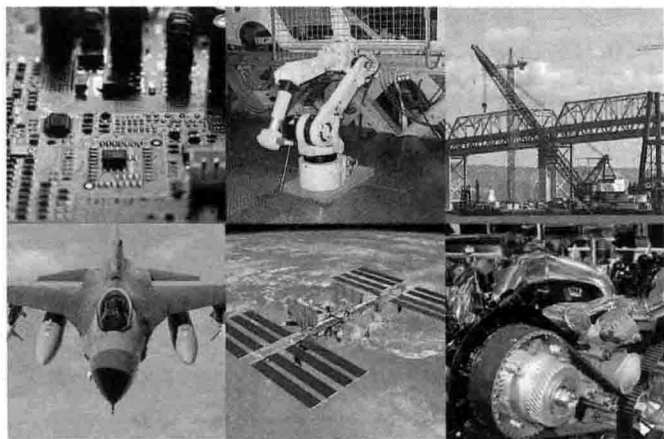


图 1-1 复杂系统示例

这几个例子都告诉我们，由于现在的全球化、网络化，设计、制造及销售是可以分离的，在不同地域，用不同人员，从而可以达到最优配置。但是这么一个跨国界、跨地域的团队需要采用系统工程方法把他们串联起来才能达到最佳的效果。

系统工程就是采用多学科的方法和手段来进行系统设计和开发，从而得到最优产品。也就是说，要设计一个最优的产品，必须要采用各种各样的技术和手段，利用系统开发流程来开发出新产品。

采用系统工程来开发新产品，整个过程存在六大特点，如图 1-2 所示。

(1) 产品必须由客户需求驱动。客户需求可以是产品使用者提出，也可以是政府规范需求等。

(2) 产品设计是由功能决定的，功能要求就要在设计中体现出来。

(3) 开发中要把文档存档并使之可追踪，这样如果将来有问题就可以追溯来龙去脉。

(4) 产品开发是通过整个团队融合多学科的知识来进行的，所以



图 1-2 系统工程六大特点

需要有各种各样学科的人才。

(5) 产品开发过程是个动态过程，所有的零件、子系统和系统要在这个过程中不断验证而加以完善。

(6) 最优产品质量是由整个产品决定的，不是由某个子系统、零件决定的。只有整个系统最优，产品才会最优。

1.2 系统的组成

一个复杂的系统是由多个系统组成的。比如一台常规汽车是由五大系统组成的：动力总成系统，底盘系统，车身系统，内饰系统，电子电气系统。早期的车，如马车，马是动力系统，加上简单的底盘，并不复杂的车身、内饰，就成了一辆车，当时没有电子电气系统。随着技术不断进步，车的构造也越来越复杂，但车由五大系统组成的，在今天还是适用的。动力系统由马演变成内燃机，再演变成电动机；底盘系统也越来越智能和安全；车身材料、设计也不断演变得越来越安全与环保。变化最大的应该是电子电气系统，从无到有，再到不断完善。并且电子技术、互联网技术不断进步，把这些技术集成应用到汽车中也是今后一大发展方向。

通常，一个复杂的系统由成千上万个零件组成，图 1-3 为汽车系统组成。一辆汽车大约由一万四千个零件组成，一台飞机由十万个零件组成。



图 1-3 汽车系统组成

因此，系统工程方法需要把复杂系统简化为简单系统，然后一个一个地解决。

那么，如何给一个复杂的系统分类呢？一个复杂系统可分为几个子系统？每个子系统又可分为几个总成？每个总成又可以分为多少个零件？一个复杂系统可按如图 1-4 进行系统分类。

从一个真实需求的产品开始逐级分解，首先将产品分解至“系统”级别，该层分解可以依循企业标准、产品特性等进行分类，比如，按照功能进行分类，或者根据位置进行分类，再或者根据材料类别分类等。有了“系统”级别的分类后，我们再根据系统构成进行“子系统”级别的分类，该层分解可以依据子系统之间的属性进行区分，如果是一个复杂的系统，也可以参照上述“系统”级别的分类方法再进行“子系统”分类。到了“子系统”级别的分解，我们可以依循“子系统”内部构成等进行分类，比如，按照总成件、结构件、组装件等分类，从而得到“总装件”。而最后就是由“总装件”拆分至最小组成单位的“零件”。

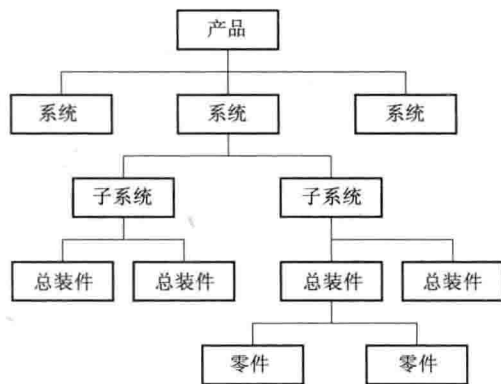


图 1-4 系统分类

较为简单或者明确的产品通过上述层层分级，可以得到相互独立的产品构成。复杂的产品同样也可以通过上述层层分解得到产品构成分解图，但是并不代表各个组块之间是毫无联系的独立个体。

其实，上述分块只是为了将一个复杂的产品进行工作包形式的分

割，每一个系统与系统之间、子系统与子系统之间、总装件与总装件之间，乃至零件与零件之间都或多或少有一些联系。一方面，可能存在结构连接、固定等联系；另一方面，也可能存在电气、控制等联系。无论上述何种关联，我们都无法将各个组块之间完全切断。因而很多时候，我们会发现各个组块构成之间会有“你中有我、我中有你”的现象产生，如图 1-5 所示。相互交叉渗透有时候是不可避免的现象。

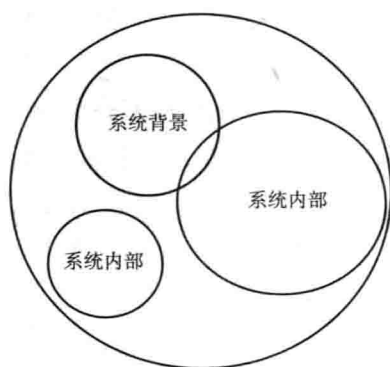


图 1-5 系统中各子系统相互关系

为了将复杂问题简单化，就必须将产品分解至最小组成部分，以便设计、验证、改进等的进行。所以上述分割只能做到一定意义上的分割，但不是绝对的。特别对于接口方面的分割，往往是相互关联的，很难完全划分清楚。

系统可以有两种类型的接口：物理接口和功能接口。

(1) 物理接口：物理部件的连接系统。

物理上是连在一起的，比如，螺丝与螺母、车轮和传动轴之类的，它们相互之间是机械形式连在一起的。

(2) 功能接口：连接系统各种功能的接口。

物理上没有连在一起的零件，但功能上是有关系的。比如发动机的控制器，它控制着点火、进油等一系列机械元器件的动作，但是它并没有通过机械形式与被控对象相连接，只是通过信号发送来控制发动机工作，像这种功能上连接的则是功能接口。

在设计研发工作中，对于接口部分的分割需要特别注意，因为接口