

飞机设计技术丛书

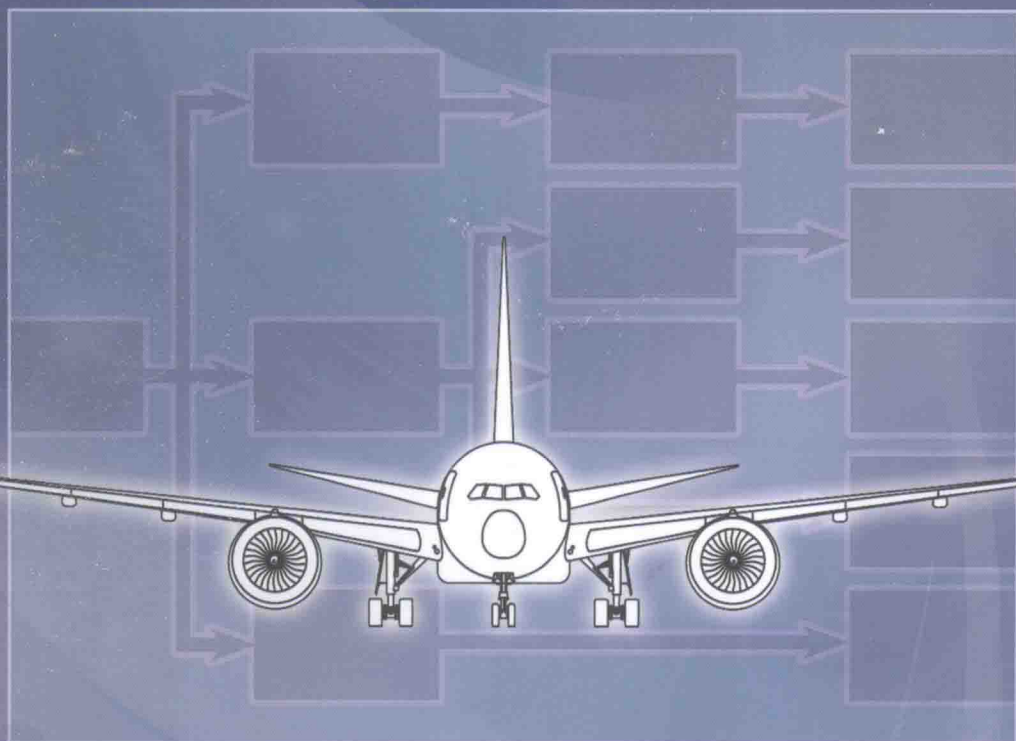
“十二五”国家重点图书出版规划项目

SYSTEMS ENGINEERING FOR COMMERCIAL AIRCRAFT

商用飞机系统工程

[美] 斯科特·杰克逊 (Scott Jackson) 著

王文萍 译 唐长红 审校



航空工业出版社

商用飞机系统工程

Systems Engineering for Commercial Aircraft

[美] 斯科特·杰克逊 (Scott Jackson) 著

王文萍 译

唐长红 审校

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书共计 12 章及 3 个附录,旨在阐述如何应用系统工程原则进行商用飞机研发,为工程技术人员和管理者将要求、架构、功能、约束、接口、综合和验证等融入飞机设计中提供指导原则、方法和途径。

本书适用于飞机项目管理人员和飞机设计人员学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

商用飞机系统工程 / (美) 斯科特·杰克逊
(Scott Jackson) 著; 王文萍译. -- 北京: 航空工业
出版社, 2017. 1

(飞机设计技术丛书)

书名原文: Systems Engineering for Commercial
Aircraft

ISBN 978 - 7 - 5165 - 1139 - 8

I. ①商… II. ①斯… ②王… III. ①民用飞机—系
统工程 IV. ①V271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 291709 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01 - 2013 - 7383

© Scott Jackson, June 1997.

This translation Systems Engineering for Commercial Aircraft is published by arrangement with
Ashgate Publishing Limited.

商用飞机系统工程

Shangyong Feiji Xitong Gongcheng

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2017 年 1 月第 1 版

2017 年 1 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 9

字数: 204 千字

印数: 1—2000

定价: 36.00 元

原 版 前 言

作为一种广泛应用于现代商用飞机工业的方法和流程，系统工程的核心原则是将飞机看作一个整体，而不是当作一堆零件的集合。另一个重要原则是，飞机及其子系统的研制需求源于一套逻辑化的、有序组织的功能需求，以及经济性或客户方面的需求，还要符合适航条例的要求。通过流程保证设计综合和验证，使飞机设计质量更高，更好地满足客户需求，更具运营经济性。

本书旨在向读者阐述将系统工程流程应用于新飞机、改进改型飞机和特定改进飞机研制中的相关知识，通俗易懂地阐明系统工程的基本原则，并不是企图教授具体细节方法。

将系统工程应用到适航认证流程中，是美国联邦航空局（FAA）和欧洲联合航空局^①（JAA）的一种最新观点。结合这种思想，作者表明，现行系统（含软件）认证的指导思想与系统工程主要原则相一致，这些原则依次适用于3种系统层级：航空系统级、飞机级、飞机子系统级。

本书为应用系统工程原则进行商用飞机研发和管理提供了指导方针，使得工程师和管理者能够以新的视角去看待工作。无论是全新飞机研发还是仅仅进行飞机子系统改型，系统工程都有助于从功能的角度来审视他们的产品，从而研发出更优异、更经济、更安全的新型飞机。

本书的读者对象为航空工业界、供应商和管理机构等方面的人员，如技术人员、项目管理者、供应商管理者、系统设计师、专业工程师（人为因素、可靠性、安全性等），以及相关领域的学生、政府机构（如FAA和JAA）官员等。

^① 2008年4月8日成立了欧洲航空安全局（EASA），正式接管了欧洲联合航空局（JAA）的职能。——译者注

致 谢

首先，我向吉姆·凯瑞斯（Jim Kehres）诚挚道谢：1963年前后，他建议我去研究系统工程。在本书的编写过程中，要感谢下述各位：首先，汤姆·内格尔（Tom Nagle）和阿奇·维克斯（Archie Vickers）在全面的系统工程流程知识方面给予很大帮助。其次，以下人员也从各个专业领域提供了很多支持：加里·巴茨（Gary Bartz）的适航认证，彼得·卡马乔（Peter Camacho）的飞机总体参数定义，达琳·卡彭特（Darlene Carpenter）的电气系统设计，曼德娜·盖泽特（Madrona Geisert）的内饰内饰系统设计，弗雷德·格雷（Fred Gray）的动力装置设计，斯图·汉恩（Stu Hann）的安全性和可靠性，唐·汉森（Don Hanson）的飞机研发，布赖恩·基利（Brian Keeley）的机体结构设计、诺琳·奎因（Noreen McQuinn）博士的人为因素，克里斯蒂娜·奥斯特沃斯科（Christine Ostrowski）的维修性，莫·派珀（Mo Piper）的航空电子和软件设计，鲍勃·里奇（Bob Rich）的功能分析，托德·斯特朗（Todd Strong）的机械系统设计，马特·万斯（Matt Vance）的质量功能展开，史蒂夫·威尔斯（Steve Wiles）的环境控制系统设计，国际系统工程协会成员贝丝·克拉克（Beth Clark）的集成分析和全寿命周期分析。最后，在文词表达方面，我的妻子卡罗尔（Carole）给予了宝贵的建议。

斯科特·杰克逊

就如同身体是一个，却有许多肢体。肢体虽多，仍是一个身体……身体原不是一个肢体，乃是许多肢体……眼不能对手说，我用不着你；头也不能对脚说，我用不着你。若一个肢体受苦，所有的肢体就一同受苦；若一个肢体获得荣耀，所有肢体就一同快乐。

—— I 《新约全书》 12: 12 - 26, 《圣经》，詹姆斯国王（授权）版本

译 序

十多年前第一次读 *Systems Engineering for Commercial Aircraft* 时，感觉蛮有意思，但那时忙于事事，也没有来得及仔细思考就放下了。

随着飞机研制工作的不断推进，遇到了大小、方方面面的问题，有的是技术挑战，有的是管理难题，更多的问题牵扯到各个方面，互相纠结，互为因果，特别棘手，难以处理。所以特别希望能够找到把金钥匙，得到一种方法和手段来帮助理顺那团团困局。当我再次翻开原著研读时，颇有心得，于是懊恼以前没有认真研习这本书。

随着近年来我国大型复杂项目的发展建设，系统工程理论得到各行各业越来越多的重视，国际系统工程协会等组织推行的基于模型的系统工程方法论获得广泛赞同，正在航空工业这类大型复杂系统中广泛应用。

相比较起来，原著出版较早，其中的思想、方法和观点等更为朴素，可以说是对系统工程基本理论和实践的一次补课。它的独特之处在于，本书具体阐述了如何将系统工程理论和方法应用到飞机设计的流程中，这对于我国航空领域的工程技术人员和相关管理人员来说，更加直观，更易理解，指导性更强。

原著作者从系统工程的视角解析飞机设计，把设计流程与系统工程流程进行比较研判，提出一套基于系统工程理论和方法指导的飞机设计思想和方法，具有很高的参考和借鉴价值。

作者对军、民用飞机设计有深刻的理解，他简洁明了地阐明了系统工程在飞机设计中实践的基本原则和流程，并未囿于具体细节内容描述，强调的是系统工程思维、技能和经验的推广。

原著文笔简洁，用词精准。译者翻译过程中一方面力求能够准确达意，简洁清晰，另一方面还希望符合国内飞机研发领域的工程习惯，争取让一线工程人员轻松阅读。

“兵无常势，水无常形”。系统工程源于人类在工程研发过程中的总结和提炼，其理论和方法也正在不断地探索和演进中。对于飞机研制这种超复杂的大系统研发活动，没有什么灵丹妙药能够包治百病，随着商用飞机市场需求和工业技术的双维度发展，这些理论和方法将面临更多、更新的挑战，

反过来这也将促进系统工程学科的进一步发展。诚如原著作者所描述的：“通过系统工程，创造性的解决方案将不断增加，绝不是减少。”对系统工程本身也是如此。

在本书翻译过程中，唐长红院士对译稿全文进行了审校，就词义辨析和语义分析等与译者进行了细致推敲，他的严谨认真使本书受益良多。此外，姚雄华、刘看望、许云峰、郭兆电、史永强、张军超、火建卫和白康明等人也给予了大力帮助和支持，在此对他们的协助和贡献表示衷心感谢。

在出版过程中，航空工业出版社韩莎莎编辑严谨认真、精益求精的工作态度保证了书稿的质量，在这里对她谨表谢忱。

王文萍

2016年7月于阎良

缩略语和符号说明

AC	advisory circular	咨询通告
AC	alternating current	交流电
ACARS	ARINC communication addressing reporting system	ARINC 通信寻址和报告系统
ADI	attitude direction indicator	姿态指示器
APU	auxiliary power unit	辅助动力装置
ARINC	Aeronautical Radio Incorporated	美国航空无线电公司
ARP	Aerospace Recommended Practice (SAE)	航空航天推荐标准 (SAE)
ATA	Air Transport Association of America	美国航空运输协会
ATC	air traffic control	空中交通管制
BCD	baseline concept document	基线概念文件
BFE	buyer furnished equipment	买方提供的设备
BITE	built – in test equipment	机内自检设备
BWB	blended wing – body	翼身融合
CCA	common cause analysis	共因分析
CCB	configuration control board	构型控制委员会
CDE	chief design engineer	总设计师
CDR	critical design review	关键设计评审
CFD	computational fluid dynamics	计算流体力学
CM	configuration management	构型管理
CMR	certification maintenance requirement	审定维修要求
CRM	cockpit (or crew) resource management	驾驶舱资源管理
CSE	chief systems engineer	首席系统工程师
CTOL	conventional take – off and landing	常规起降
DC	direct current	直流电
DCAS	digital core avionics system	数字核心航空电子系统
DF	development fixture	研制样机
DFMA	design for manufacture and assembly	面向制造和装配的设计
DME	distance measurement equipment	测距器
DOC	direct operating cost	直接使用成本

ECS	environmental control system (or subsystem)	环境控制系统 (或子系统)
EDF	electronic development fixture	电子样机
EDP	electronic data processing	电子数据处理器
EMI	electromagnetic interference	电磁干扰
FAA	Federal Aviation Administration	美国联邦航空局
FAR	Federal Aviation Regulation	美国联邦航空条例
FBL	fly - by - light	光传操纵
FBW	fly - by - wire	电传操纵
FCA	functional configuration audit	功能构型审核
FDA	Food and Drug Administration	食品和药物管理局
FFR	first flight review	首飞评审
FHA	functional hazard assessment	功能危险性评估
FMS	flight management system	飞行管理系统
FOD	foreign object debris (or damage)	外来物碎片 / (或损坏)
G&A	general and administrative (costs)	管理成本
GMT	greenwich mean time	格林尼治标准时间
GPS	global positioning system	全球定位系统
GPWS	ground proximity warning system	近地警告系统
GSE	ground support equipment	地面支援设备
HBPR	high by - pass ratio	高涵道比
HF	high frequency	高频
HIRF	high - intensity radiation field	高强辐射场
HSCT	high - speed civil transport	高速民用运输机
HSI	Horizontal situation indicator	水平姿态指示器
HUD	heads - up display	平视显示器 (平显)
ICA	initial cruise altitude	初始巡航高度
ICAO	International Civil Aviation Organization	国际民航组织
ICD	interface control drawing (or document)	接口控制图 (或文件)
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineering	美国电气和电子工程师协会
ILS	instrument landing system	仪表着陆系统
IMACH	improved methods for aircraft cargo handling	飞机货物装载改进方法
INCOSE	International Council on Systems Engineering	国际系统工程协会
INS	inertial navigation system	惯性导航系统

IPD	integrated product development	联合研制
IPT	integrated product team	联合工作团队
JAA	Joint Aviation Authorities	欧洲联合航空局
JAR	Joint Airworthiness Requirements	欧洲联合航空要求
LRU	line replaceable unit	外场可更换件
MAP	maximum allowable probability	最大允许故障概率
MCBF	mean cycles between failures	平均故障循环周期
MCBUR	mean cycles between unscheduled removals	平均非计划拆卸间隔周期
MEL	minimum equipment list	最小设备清单
MEW	manufacturer's empty weight	制造空重
MMEL	master minimum equipment list	最小主设备清单
MMH/ 1000FH	maintenance man - hours per 1000 flight hours	维修工时/1000 飞行小时
MN\$ / 1000FH	maintenance cost per 1000 flight hours	维修成本 (美元) /1000 飞行小时
MT\$ / 1000FH	material cost per 1000 flight hours	材料成本 (美元) /1000 飞行小时
MTBF	mean time between failures	平均故障间隔时间
MTBUR	mean time between unscheduled removals	平均非计划拆卸间隔时间
MTOW	maximum take - off weight	最大起飞重量
MTTR	mean time to repair	平均修复时间
NDI	non - development item	非发展项目
NO _x	nitrous oxide	氮氧化物
OSHA	Occupational Safety and Health Administration	职业安全与健康管理局
PBW	power - by - wire	功率电传
PCA	physical configuration audit	物理构型审核
PCA	propulsion controlled aircraft	推力控制飞机
PDR	preliminary design review	初步设计评审
PRA	probabilistic risk analysis	概率风险分析
PSAC	plan for software aspects of certification	软件审定计划
PSSA	preliminary system safety analysis	初步系统安全性分析
QFD	quality function deployment	质量功能展开
RAS	requirements allocation sheet	需求分配表
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics (formername of RTCA, Inc.)	美国航空无线电技术委员会 (RTCA 的前称)

SAE	Society of Automotive Engineers	美国汽车工程师学会
SATCOM	satellite communications	卫星通信
SCI	software configuration index	软件配置标识
SCM	software configuration management	软件配置管理
SDR	system design review	系统设计评审
SE	systems engineering	系统工程
SELCAL	selective calling	选择呼叫
SOW	statement of work	工作说明
SQA	software quality assurance	软件质量保证
SRR	system requirements review	系统需求评审
SSA ^①	system safety analysis	系统安全性分析
SVR	system verification review	系统验证评审
TBD	to be determined (for a requirement)	待定需求
TCAS	traffic collision avoidance system	空中交通防撞系统
TEAM	technology evaluation and adaptation methodology	技术评估和选用法
TQM	total quality management	全面质量管理
URR	unconfirmed removal ratio	未确认的清除率
VHF	very high frequency	甚高频
VOR	VHF omni-directional radio	甚高频全向(无线电)信标
VTOL	vertical take-off and landing symbols	垂直起降标识
AR	aspect ratio	展弦比
C_D	drag coefficient	阻力系数
C_{D0}	lift-independent drag coefficient	零升阻力系数
C_L	lift coefficient	升力系数
$C_{L,ic}$	initial cruise lift coefficient	初始巡航升力系数
$C_{L,max}$	maximum lift coefficient	最大升力系数
$C_{L,TO}$	take-off lift coefficient	起飞升力系数
ΔC_{DC}	compressibility drag coefficient	压缩性阻力系数
e	lift efficiency	升力效率因子
L/D	lift to drag ratio	升阻比
$A_{c/4}$	sweepback angle at quarter chord	1/4 弦线后掠角
Ma_{div}	divergence Mach number	发散马赫数
R	total range	航程

① 原文中也有将“system safety assessment”缩写为“SSA”，对应的翻译为“系统安全性评估”。——译者注

R_{cl}	climb range	爬升距离
R_{cru}	cruise range	巡航距离
SFC	specific fuel consumption	耗油率
$(t/c)_{av}$	average thickness to chord ratio	平均相对厚度
U	aircraft utilization factor	飞机利用率
V_b	block speed	轮挡速度
$(W/S)_{ic}$	initial cruise wing loading	初始巡航翼载
$(W/S)_{TO}$	take - off wing loading	起飞翼载
W_0	initial cruise weight	初始巡航重量
W_1	$W_0 - W_f$	初始巡航重量 - 燃油重量
W_f	weight of fuel	燃油重量
W_{TO}	weight at take - off	起飞重量

词 汇 表

airworthiness	适航性 一个单元（飞机、飞机系统或零部件）的状况。在此状态下该单元能够安全运营，可实现其计划功能。（ARP 4754，1996 年）
allocation [def. 1]	分配（定义 1） 向一个功能分配性能需求。
allocation [def. 2]	分配（定义 2） 向一个系统元素分配需求。
allocation [def. 3]	分配（定义 3） 将顶层需求分解到下层组件，如重量分配等。
analysis	分析 一种验证方法。执行任何一种数学、计算或者逻辑分析作业，证明一个用其他方式无法验证的需求，包括在役评估和相似性分析等。
anthropometry	人体测量学 人类学的应用子学科，研究测量人体自然特征的学科。（查帕尼斯，1996 年）
arousal	激励 通过采用一种应力形式给予初始刺激或激励事件，开始激活、启动。
assurance	保证 计划好的系统化的行动，需要提供必要、恰当的信任，保证产品或过程能够满足给定的需求。
canard	鸭翼 前机身上安装的水平操纵面，用来提高操纵能力。现代商用飞机上很少采用鸭翼，但莱特兄弟（Wright brothers）的“飞行者”1 号（Kitty Hawk）飞机上采用了鸭翼。
certification	认证，鉴定 经官方确认特定产品、服务、组织或人员符合所规定要求。（ARP 4754，1996 年）

certification basis	审定基础 飞机审定所依据的一系列特定的标准、美国联邦航空条例等。
certification maintenance requirement (CMR)	审定维修要求 作为飞机的使用限制, 要求飞机设计认证时建立的定期维修任务。
change - based aircraft	特定改进飞机 按特定客户的需求进行大量更改的飞机。
cockpit resource management (CRM)	驾驶舱资源管理 规定的专门用来减少由人类行为导致的差错和事故的一类任务, 主要集中在培训活动及飞行员遴选程序上。
common cause	共因 使冗余措施或独立性无效的事件, 即能够导致多余度同时失效或独立的事件。
component	部件, 组件, 单元 任一自我包含的零件、组件、部件或单元, 它能够执行系统使用所必需的独立功能。
configuration index	构型索引 飞机的物理要素目录, 其中包括飞机及其子系统。
configuration management	构型管理 用来控制飞机构型并控制飞机定义所用数据的流程。
constraint	约束 所有非性能需求。约束包括重量、尺寸、环境, 以及所有对设计构成制约的因素。
control	控制 在项目整个研制阶段内, 在飞机所有层级中开展的系统工程技术管理活动, 如构型和风险管理等。
demonstration	演示 一种验证方法, 与试验类似, 但不需要复杂的设备。
derivative aircraft	改进改型飞机 以现有飞机为基础, 利用其主要部件来研发的新型飞机, 满足新的需求。

derived requirements	衍生的需求 基于设计方案的需求。
design	设计 设计过程的结果、区别与需求。
design requirement	设计需求 设计的品质，它是综合过程的结果。
development fixture	研发样机 研发过程用飞机样机，用以保证所有部件的空间位置分配正确，装配协调。
electronic development fixture (EDF)	电子样机 由计算机生成的电子版研发样机。
element	元素，单元 用于描述飞机层级中的任一部分的词汇的统称。一个元素可能是一个部段、系统、子系统或组件等，飞机也可称为一个元素。
empennage	尾翼 飞机的全部尾段。是否包括尾锥取决于制造商。
environment	环境 飞机及其人员、产品和过程所必须经历的自然及诱导环境。
examination	检查 一种验证方式。目视确认是否满足要求，也称作观察。
failure condition	失效条件 能够对飞机及其乘员直接或间接地导致后果的条件，产生或促使一个或一系列失效，考虑有关操作失误或环境条件。
firmware	固件 所有包含嵌入式逻辑程序的电子设备。
flow - down	向下传递 根据飞机层级，从较高层向较低层传递或分配参数、需求或功能的所有流程。
function	功能 为获得希望的输出而执行的任务、行动或活动。
functional allocation	功能分配 将需求分配到较低层级功能。

functional analysis	功能分析 对确定功能的检查，用以明确实现该功能所必须具有的全部子功能。
functional hazard assessment (FHA)	功能危险性评估 一种系统、全面的功能测试，用以明确各功能的失效条件，并按严重程度进行分类。
functional requirements	功能需求 在确定的条件下，系统为获得希望的性能所必需的需求。
fuselage	机身 飞机的主干部分，是否包括机头、机尾取决于各制造商。
inspection	检查 与“检查”(examination)意义相同。
integrated product development (IPD)	联合研制 在飞机及其子系统等产品研发时所采用的系统化管理方式。其关键是产品研发和流程中的多专业联合工作团队、联合并行工作等。
interface	接口 两个系统元素间的边界。
interface control drawing (ICD)	接口控制图 包含两个系统元素界面的所有基本信息的文件，包括界面类型(电气、冷气、液压等)及其接口参数(功能性或物理性)。
item	单元 作为元素来处理的一个或多个硬件和/或软件单体。(见“产品”(product))
master minimum equipment list (MMEL)	最小主设备清单 由供应商编制的机载设备目录文件，当这些设备不正常工作(在一定条件下)飞机仍能安全飞行。(见“最小设备清单”(minimum equipment list (MEL)))
mean time between failures (MTBF)	平均故障间隔时间 在给定的条件下，同一个硬件单元的两个连续故障间隔时间的数学期望值。