

(第2版)



装备科技译著出版基金



*Design and  
Development of Aircraft Systems*  
(Second Edition)

# 飞机系统的设计与开发

[英] 伊恩·莫伊尔

著

[英] 阿伦·西布里奇

朱纪洪 冯悦 尉询楷 杨立 等译

WILEY



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

# 飞机系统的设计与开发 (第2版)

## Design and Development of Aircraft Systems (Second Edition)

[英]伊恩·莫伊尔 阿伦·西布里奇 著  
朱纪洪 冯悦 尉询楷 杨立 刘冠初  
乔洪信 由育阳 陈博 译



国防工业出版社

·北京·

## 著作权合同登记 图字：军-2014-098 号

Design and Development of Aircraft System by Ian Moir and Allan Seabridge

ISBN 978-1-119-94119-4

Copyright © 2014 by John Wiley & Sons, Ltd.

All rights reserved. This translation published under John Wiley & Sons license. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

Copies of this book sold without a wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

飞机系统的设计与开发：第 2 版 / (英) 伊恩·莫伊尔 (Ian Moir),  
(英) 阿伦·西布里奇 (Allan Seabridge) 著；朱纪洪等译. —北京：  
国防工业出版社，2019.7

书名原文：Design and Development of Aircraft Systems (Second Edition)  
ISBN 978-7-118-11265-8

I. ①飞… II. ①伊… ②阿… ③朱… III. ①飞机—系统设计  
②飞机—系统开发 IV. ①V22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 152469 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$  字数 318 千字

2019 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 119.00 元

(本书如有印装错误，我社负责调换)

国防书店：(010) 88540777

发行邮购：(010) 88540776

发行传真：(010) 88540755

发行业务：(010) 88540717

## 译者序

飞机是现代局部战争的杀手锏武器,是航空发达国家高度重视持续发展的重大武器装备。随着国内外四代机的陆续投入研制、列装,先进飞机已成为未来空军发展建设的重中之重。飞机系统设计一直都是航空领域的研究热点内容,也是我国国防科技预研和高技术发展的重要内容。目前,国际上关于飞机系统设计与开发技术方面的专著较多,然而,国内在该方向的中文参考书籍数量极少,而且内容深度不够、重复性较多,因此急需翻译内容新颖、质量较好的外文专著。

*Design and Development of Aircraft Systems (Second Edition)* 原著作者 Ian Moir 从事航空工作超过 50 年,有近 20 年的工程管理经验,在军用和民用航电系统多电技术以及系统实现的开发和集成等领域有丰富的经验。原著作者 Allan Seabridge 在航空领域从业超过 45 年,在飞机系统设计与开发过程管理方面有着丰富的经验。两位作者出版了多部飞机系统设计与开发相关的专著,是飞机系统设计与开发领域的权威专家。本书是两位作者的最新力作,也是目前唯一一部从系统工程角度全面介绍飞机系统设计与开发的专著,内容翔实、案例丰富,经验见解独到、注重系统工程原理方法与实现的紧密结合。特别是,本书结合实用案例介绍了作者在设计与开发过程中各类人员协调、交流,批判与自我批判等特殊经验的总结,具有较大的参考价值。

全书由朱纪洪、冯悦、尉询楷、杨立、刘冠初、乔洪信、由育阳、陈博共同翻译,由朱纪洪、尉询楷统稿,冯悦审校。本书可作为从事飞机系统设计与开发研究的设计人员、相关专业研究生以及科研人员的重要参考资料,也可供对飞机研制管理、系统工程技术专业感兴趣的读者阅读。

本书的翻译工作得到了吴宏鑫、甘晓华院士的支持与鼓励,在此表示诚挚的感谢。国防工业出版社冯晨编辑在本书出版过程中付出了大量的辛勤劳动,在此一并致谢。在本书的翻译过程中,离不开家人的大力支持,值此成稿之际,谨向译者的家人们表示由衷的感谢。

译者

2019.4

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 系统开发 .....	3
1.3 技能 .....	6
1.4 全书章节安排 .....	7
参考文献 .....	9
拓展阅读 .....	9
<b>第 2 章 飞机系统</b> .....	10
2.1 引言 .....	10
2.2 定义 .....	10
2.3 日常系统案例 .....	11
2.4 感兴趣的飞机系统 .....	14
2.4.1 机身系统 .....	17
2.4.2 飞行器系统 .....	17
2.4.3 飞行器系统接口特征 .....	19
2.4.4 航电系统 .....	20
2.4.5 飞行器和航电系统特征 .....	20
2.4.6 任务系统 .....	21
2.4.7 任务系统接口特征 .....	22
2.5 地面系统 .....	22
2.6 一般系统定义 .....	23
参考文献 .....	25
拓展阅读 .....	25
<b>第 3 章 设计与开发过程</b> .....	26
3.1 引言 .....	26
3.2 定义 .....	26
3.3 产品寿命周期 .....	28
3.4 概念阶段 .....	32

3.4.1	工程过程	32
3.4.2	工程技能	34
3.5	定义阶段	35
3.5.1	工程过程	35
3.5.2	工程技能	36
3.6	设计阶段	38
3.6.1	工程过程	39
3.6.2	工程技能	39
3.7	建造阶段	40
3.7.1	工程过程	40
3.7.2	工程技能	40
3.8	试验阶段	41
3.8.1	工程过程	41
3.8.2	工程技能	41
3.9	运行阶段	42
3.9.1	工程过程	42
3.9.2	工程技能	42
3.10	报废或退役阶段	42
3.10.1	工程过程	43
3.10.2	工程技能	43
3.11	翻新阶段	43
3.11.1	工程过程	44
3.11.2	工程技能	44
3.12	整个寿命期任务	44
	参考文献	45
	拓展阅读	46
<b>第4章</b>	<b>设计驱动器</b>	<b>47</b>
4.1	引言	47
4.2	商业环境中的设计驱动器	49
4.2.1	用户	49
4.2.2	市场与竞争	50
4.2.3	产能	50
4.2.4	财务问题	50
4.2.5	防卫政策	51
4.2.6	休闲和商业利益	51
4.2.7	政治	51

4.2.8	技术	52
4.3	项目环境中的设计驱动器	52
4.3.1	标准和规章	53
4.3.2	完好率	53
4.3.3	成本	53
4.3.4	大纲	54
4.3.5	性能	54
4.3.6	技能和资源	54
4.3.7	健康、安全性和环境问题	55
4.3.8	风险	55
4.4	产品环境中的设计驱动器	56
4.4.1	功能性能	56
4.4.2	人/机接口	56
4.4.3	机组和乘客	57
4.4.4	外挂和货物	57
4.4.5	结构	58
4.4.6	安全性	58
4.4.7	质量	58
4.4.8	环境条件	58
4.5	产品工作环境中的驱动器	59
4.5.1	热	59
4.5.2	噪声	60
4.5.3	射频辐射	60
4.5.4	太阳能	61
4.5.5	高度	61
4.5.6	温度	62
4.5.7	污染物/破坏性物质	62
4.5.8	闪电	62
4.5.9	核生化	63
4.5.10	振动	63
4.5.11	冲击	63
4.6	与子系统环境的接口	64
4.6.1	物理接口	64
4.6.2	功率接口	64
4.6.3	数据通信接口	65
4.6.4	输入/输出接口	65

4.6.5	状态/离散数据	65
4.7	过时性	66
4.7.1	产品寿命周期中的过时性威胁	67
4.7.2	管理过时性	71
	参考文献	71
	拓展阅读	72
<b>第5章</b>	<b>系统架构</b>	<b>73</b>
5.1	引言	73
5.2	定义	73
5.3	系统架构	74
5.3.1	通用系统	76
5.3.2	航电系统	77
5.3.3	任务系统	77
5.3.4	客舱系统	77
5.3.5	数据总线	77
5.4	架构建模与折中	78
5.5	开发架构案例	79
5.6	航电架构的演化	80
5.6.1	分布式模拟架构	82
5.6.2	分布式数字架构	83
5.6.3	联合数字架构	84
5.6.4	综合模块化架构	86
	参考文献	88
	拓展阅读	88
<b>第6章</b>	<b>系统集成</b>	<b>89</b>
6.1	引言	89
6.2	定义	90
6.3	系统集成案例	91
6.3.1	部件级集成	91
6.3.2	系统级集成	91
6.3.3	过程级集成	97
6.3.4	功能级集成	100
6.3.5	信息级集成	102
6.3.6	主合同商级集成	102
6.3.7	应急特性集成	103
6.4	系统集成技能	105

6.5	系统集成管理 .....	106
6.5.1	重大活动 .....	107
6.5.2	主要里程碑 .....	107
6.5.3	分解和定义过程 .....	109
6.5.4	集成和确认过程 .....	109
6.5.5	部件工程 .....	109
6.6	高度集成系统 .....	109
6.6.1	主飞行控制系统的集成 .....	111
6.7	讨论 .....	113
	参考文献 .....	114
	拓展阅读 .....	114
<b>第7章</b>	<b>系统要求验证 .....</b>	<b>115</b>
7.1	引言 .....	115
7.2	寿命周期中鉴定依据的收集 .....	115
7.3	试验方法 .....	118
7.3.1	设计检查 .....	118
7.3.2	计算 .....	119
7.3.3	类比 .....	119
7.3.4	建模与仿真 .....	120
7.3.5	试验器 .....	132
7.3.6	环境试验 .....	134
7.3.7	集成试验器 .....	134
7.3.8	飞行试验 .....	136
7.3.9	试用 .....	137
7.3.10	作战试验 .....	137
7.3.11	演示 .....	137
7.4	使用雷达系统的案例 .....	137
	参考文献 .....	139
	拓展阅读 .....	139
<b>第8章</b>	<b>实际考虑 .....</b>	<b>141</b>
8.1	概述 .....	141
8.2	利益相关方 .....	142
8.2.1	利益相关方认定 .....	142
8.2.2	利益相关方分类 .....	142
8.3	沟通 .....	144
8.3.1	沟通的本质 .....	145

8.3.2	组织机构沟通媒介的实例	146
8.3.3	沟通不佳的代价	148
8.3.4	教训	149
8.4	给予和接受批评	150
8.4.1	设计过程中的批评需求	150
8.4.2	批评的本质	151
8.4.3	批评相关的行为	151
8.4.4	小结	152
8.5	供应商关系	152
8.6	工程决断	153
8.7	复杂度	154
8.8	应急特性	155
8.9	飞机线路和连接器	156
8.9.1	飞机线路	156
8.9.2	飞机分离点	156
8.9.3	线束定义	157
8.9.4	线路布线	158
8.9.5	线路规格	158
8.9.6	飞机电气信号类型	160
8.9.7	电气隔离	161
8.9.8	飞机线路和连接器的本质	161
8.9.9	使用双绞线和四绞线	162
8.10	短接和接地	164
	参考文献	166
	扩展阅读	166
<b>第9章</b>	<b>构型控制</b>	167
9.1	引言	167
9.2	构型控制过程	167
9.3	系统简图	168
9.4	可变系统构型	169
9.4.1	系统构型 A	170
9.4.2	系统构型 B	170
9.4.3	系统构型 C	171
9.5	向前和向后兼容性	172
9.5.1	向前兼容性	172
9.5.2	向后兼容性	173

9.6	影响兼容性的因素	173
9.6.1	硬件	174
9.6.2	软件	174
9.6.3	线路	174
9.7	系统发展	175
9.8	构型控制	176
9.8.1	空中客车 A380 实例	178
9.9	接口控制	180
9.9.1	接口控制文件	180
9.9.2	飞机级数据总线数据	182
9.9.3	系统内部数据总线数据	182
9.9.4	内部系统输入/输出数据	182
9.9.5	燃油部件接口	182
<b>第 10 章</b>	<b>飞机系统实例</b>	<b>183</b>
10.1	引言	183
10.2	设计考虑	184
10.3	安全性和经济性考虑	184
10.4	失效严重程度分类	186
10.5	设计保证等级	186
10.6	冗余	187
10.6.1	架构可选项	188
10.6.2	系统实例	190
10.7	飞机系统集成	193
10.7.1	发动机控制系统	195
10.7.2	飞行控制系统	196
10.7.3	姿态测量系统	197
10.7.4	大气数据系统	197
10.7.5	电源系统	198
10.7.6	液压功率系统	199
10.8	航电系统集成	200
	参考文献	203
<b>第 11 章</b>	<b>功率系统</b>	<b>204</b>
11.1	引言	204
11.2	电气系统	204
11.3	配电系统	206
11.3.1	发电	207

11.3.2	主配电	207
11.3.3	功率转换	207
11.3.4	副配电	207
11.4	电气系统设计问题	207
11.4.1	发动机功率分输	208
11.4.2	发电机	208
11.4.3	电源馈线	209
11.4.4	发电控制	209
11.4.5	电源开关	210
11.5	液压系统	210
11.5.1	发动机传动泵	210
11.5.2	液压蓄压器	211
11.5.3	系统用户	211
11.5.4	功率传输单元	212
11.6	液压系统设计考虑	212
11.6.1	液压功率的产生	212
11.6.2	系统级问题	213
11.6.3	液压油	214
11.7	飞机系统能量损失	214
11.8	电气系统功率耗散	216
11.8.1	恒频系统	217
11.8.2	变频系统	218
11.9	液压系统功率损失	218
11.9.1	液压功率计算	220
11.9.2	工作压力	221
11.9.3	额定输出能力	221
11.9.4	波音767——服役年份:1982(美联航)	221
11.9.5	波音787——服役年份:2011(全日空航空)	222
11.9.6	简单液压功率模型	222
11.10	多电飞机考虑因素	224
	参考文献	226
<b>第12章</b>	<b>飞机系统的关键特征</b>	<b>227</b>
12.1	引言	227
12.2	飞机系统	229
12.3	航电系统	240
12.4	任务系统	247

12.5	系统的大小和范围 .....	253
12.6	飞机系统的燃油损耗分析 .....	256
12.6.1	引言 .....	256
12.6.2	燃油重量附加损耗的基本公式化表述 .....	256
12.6.3	多阶段飞行的燃油重量附加损耗公式 .....	259
12.6.4	多阶段飞行燃油重量附加损耗分析 .....	259
12.6.5	用燃油重量附加损耗比较系统 .....	260
12.6.6	确定系统附加消耗燃油重量分析的输入数据 .....	260
	参考文献 .....	263
<b>第 13 章</b>	<b>结论</b> .....	<b>266</b>
	参考文献 .....	268

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 概 述

在之前已出版的 Wiley 航空航天系列丛书的三本姊妹书——《飞机系统》<sup>[1]</sup>《民用航空电子系统》<sup>[2]</sup>以及《军用航电系统》<sup>[3]</sup>，作者从系统和系统产品的技术层面介绍了军用和商用飞机使用的航电子系统。该系列的其他书也介绍了诸如燃油系统<sup>[4]</sup>、显示系统<sup>[5]</sup>等各种系统。但是，我们不应仅仅停留于这类系统的设计和开发机理，更需要关注其系统的开发过程，以获得设计的一致性、高品质和鲁棒性。

本书第 1 版试图阐述典型飞机系统的设计开发过程以及全寿命周期。自从出版以后，该书已经被很多航空航天系统工程师研究生课程和工业短期培训班使用，并根据课程教学期间收到的反馈和讨论意见建议进行了深化以满足工程读者的需求。

第 2 版则期望能够成为一本飞机系统和系统开发过程的入门书，可用于研究系统或航空航天专业的学生，或期望进入飞机工业及相关工业领域的人士，以及资助前述人士的专业机构阅读。本书内容可为预期从事或已经在下述行业工作的人士或机构提供参考：

直接涉及军民有人、无人，固定翼和旋翼飞机设计、开发和制造的机构；

涉及为航空产品制造商提供服务、子系统、设备和部件的系统和设备供应公司；

涉及个人或代表商用、军用运营商使用飞机的修理、维护和大修机构；

每天运行自有或租赁飞机的商用航空公司和武装力量；

涉及为机上工作人员培训的机构。

本书也作为高等学校大学本科生或研究生的系统工程、航空航天工程，或航空电子和装备工程等专业领域教学用书，也可作为行业专业人士的短期培训教材使用。

图 1.1 所示为复杂航空项目中常见的利益相关方。图中给出了一个典型航

空系统及直接影响或间接影响系统的人或群组，展示的是为满足环境考虑因素而研制的飞机解决方案中的利益相关方。特定项目会有各自特定的利益相关方集合。

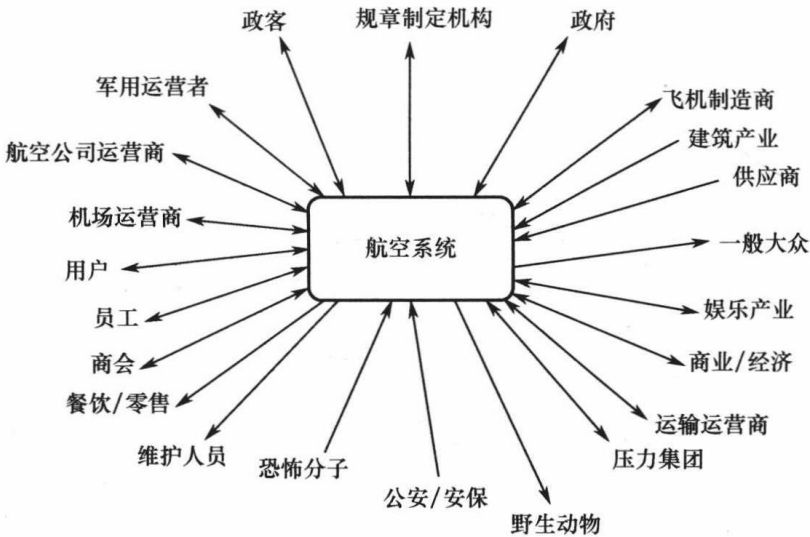


图 1.1 航空系统利益相关方

利益相关方的每个成员对于设计和开发过程都将有不同视角理解，且都能够对过程施加影响。对于直接参与的，设计过程必须对全体可见，以便于其相互协调工作安排，最大化项目的效益。清晰、存档良好的过程非常必要，使得利益相关方可以可视化其设计和开发路径，并作为讨论不同视角的框架。这可用于确定观点差异，技术、商用或合法理解争论等的边界。

值得一提的是，自从本书第1版以来，航空工业商业化实践发生了巨大的变化。在此之前，飞机的开发主要在由用户指定的主合同商手中，单个设备和部件有竞争供应链。在现代飞机研制中，第一级供应商首先在系统级展开竞争，且多数情况下，供应商团队在主合同商基地现场办公。在国际协作的诸多案例中，通常意味着在不同国家有很多个主合同商合作伙伴的基地。在这种情况下，供应商和主工程团队作为一个综合产品团队（IPT）共同制定设备和部件的规范。系统供应商现在主要负责系统级和部件级性能，且多数情况下负责其系统相关的直接维修成本。商业实践中的这种变化要求供应商基地要日益灵巧化，本书将为商业社区在高效满足其需求方面提供有价值的见解<sup>[6]</sup>。

确定的原则同样也适用于海军水面或水下舰船、商用舰艇和陆地载具等其他平台。从飞机的本质来说，航空工业具有唯一性的特点，不得不解决高度集成、可用率、重量、体积、功率消耗、成本和性能等问题。在满足用户要求和产品经济可承受性时，往往需要进行折中以得到最佳的权衡。商用和军用解决方案也存在显著差异，可能要求对过程进行完全不同的解译、应用不同的标准。无人飞行器的出现将遥控飞行器地面站纳入到了系统中，扩展了系统的概

念。自主无人飞行器的兴起将会促使设计上采取更加具有创新性的手段，且在系统认证时要求更加严苛。无论如何，本书描述的这一过程适用但需要适当裁剪。

尽管本书的案例主要源自航空平台，读者完全可以将其应用至地基雷达、通信、安防系统、海洋和空间载具系统，甚至制造或工业应用等其他高价值系统。

这类平台和系统具有复杂、价值高，且由很多交互子系统构成等相同点，由人员操控。还有一个共同的特征是工作寿命周期长，通常超过 25 年，且酝酿和开发周期长，需要人员操作和维护培训以及全寿命在役保障。要求开发过程要严谨、可控且有一致性，可用于在整个寿命期维持对平台标准或构型的深入理解，保障系统的修理、维护和程序更新。

## 1.2 系统开发

系统工程领域有很多宝贵的经验值得学习。作者坚信很多系统工程的理论和实践可用于飞机使用的硬件和软件系统中。实践领域非常宽泛，涵盖了系统在包括组织、运行、政策、商业、经济、人和教育系统等宽广范围主题下的行为。系统和系统工程概念在不同类型的组织有不同的等级。早先对于系统行为的分析主要关心组织或管理问题——所谓的“软”系统。这项工作引出了对于复杂组织内沟通、人、过程和信息流交互的理解<sup>[7,8]</sup>。

这项工作的重要成果是“系统思考”概念的提出，指的是对从整体或完整系统角度考虑任意系统开发或分析的能力，其关键是考虑所有影响系统行为的因素。这可以通过将系统看作存在于某一环境中得以实现，当中存在理解系统的某些重要因素。

在本书中，单个环境的概念已经被扩展包括环境的层或框架，允许组织中的人能够有各自的视角，并审查各自最关心的方面。这样就允许自顶向下审查系统，并允许政治家、销售人员、会计、工程师、制造和保障人员等个体严格审查并制定各自的特殊要求。

系统的另一个重要特性是其可分解为子系统，例如，图 1.2 显示的是一个系统如何可视为一个系统中的系统（是多个子系统的群组），在被审查系统等级处可能不需要详细的定义。但是，子系统所有者会视其子系统为最重要的，并将其进一步分解为子系统。这种自顶向下的分解可由系统的抽象概念产生，并直至硬件和软件部件为止。在系统级联关系中，最高等级最为重要并影响低等级系统，级联方式广泛应用于多数复杂系统的分析和实现。通过这种方法，使得最高等级系统定义规定的关键系统和系统架构原则得以保留并贯彻到产品中。

对于飞机系统，系统最终和最基础的建造模块是部件——如泵、阀、传感器、作动器等确定系统硬件特征的物理部件或对整个系统性能有贡献的软件应用

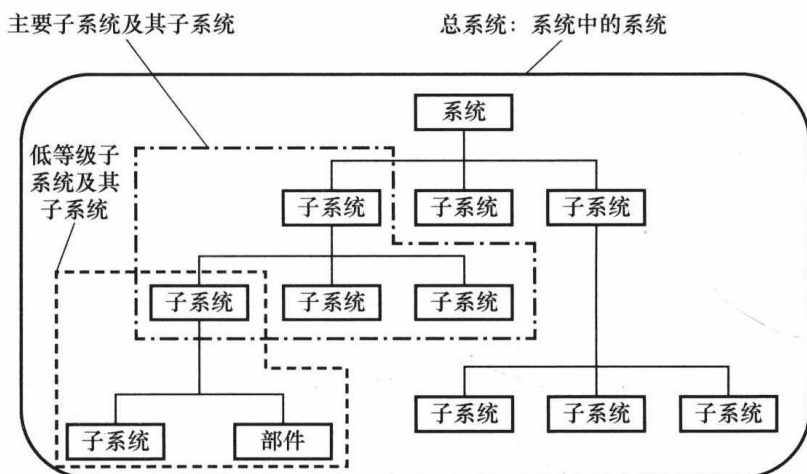


图 1.2 系统、子系统和部件级联关系图

或模块。以飞行员、机组成员、乘客或维护人员等形式参与的人员也是系统必不可少的组成部分。

将系统分解为多深的子系统层级取决于系统的复杂度以及将功能和接口看成是一个整体的能力。在某些阶段，围绕系统构建边界非常必要，并规定给外部的供应商进行深入分析和设计，例如，传感器子系统的定义由专业供应商开发和制造会更加高效。

将系统分解为子系统以及更深层次的子系统和部件，补充了系统的另一个重要方面及其内部联系。一个系统的输出可作为其他系统的输入。实际上，一个系统可能产生输出并反馈给自己作为输入。反馈回路不限于系统的一个阶段，反馈可出现在多个串联或内部互联系统上以产生系统的状态或稳定性。反馈也可使用数据总线和多路处理单元实现，这意味着必须考虑数据的等待时间。为使其在硬系统中高效实现，系统接口的定义必须要确保兼容性——系统输出被接收并被理解作为输入使其可被操作。这要求接口必须定义好并在整个系统开发中得到严格控制。

值得一提的是，飞机供应商行业已发生重大变化，致使兼并和采办流向有拓展业务渴望的大型组织，使其有实力投标更大的系统合同。兼并也提高了供应商提出合理提议的能力。同时，主合同商可以聚焦于系统管理合同中的主系统，将其能力集中到设计管理、专家集成任务设计、总装以及产品的鉴定等方面。

图 1.3 A 点处所示的是很多生产线管理机构应用的单个系统“自顶向下”开发模式。这是多数工程师熟悉的所有飞机系统开发路径，航电系统和任务系统视为单独的系统。但是，通常还需要考虑直接开发途径之外的事情。图中的点 B 展示的是特定系统内部互联并形成协同综合作用功能的案例，换句话说，一项功能执行时所起的作用不是单个系统功能的和。例如，导航与控制是飞行控制、液压、自动飞行控制和燃油系统的功能集成（详见第 6 章），又如通