

UNMANNED AERIAL VEHICLE SYSTEM DESIGN

无人机系统设计

符长青 曹兵 李睿堃 编著



非外借



清华大学出版社

UNMANNED AERIAL VEHICLE SYSTEM DESIGN

无人机系统设计

符长青 曹兵 李睿堃 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书针对“大众创业、万众创新”新时代培养高级人才、创新型人才和复合型人才的需要,系统而全面地介绍了无人机系统设计的主要内容和知识体系。全书共6章,主要内容包括概述、无人机系统总体设计、无人机飞行平台结构设计、无人机飞行控制导航系统设计、无人机任务规划和控制站、无人机系统数据链路技术。每一章最后都给出了思考题。

本书选材新颖,叙述深入浅出,注重无人机系统设计的基础知识。本书并不对数学公式进行烦琐的推导,而是侧重讲述无人机设计的相关技术,内容丰富,概念清楚易懂,具有很强的可操作性,既适合作为无人机、航空工程、电子、自动化及相近专业等高职高专和本科教材,也可作为无人机科研、生产和培训人员以及广大航模爱好者的学习用书,对于希望全面了解无人机系统设计知识的读者,本书也是一本较好的参考读物。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

无人机系统设计/符长青,曹兵,李睿堃编著. —北京:清华大学出版社,2019

ISBN 978-7-302-51181-6

I. ①无… II. ①符… ②曹… ③李… III. ①无人驾驶飞机—系统设计 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 210259 号

责任编辑:刘向威 战晓雷

封面设计:文 静

责任校对:梁 毅

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印装者:大厂回族自治县正兴印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:12.5

版 次:2019 年 2 月第 1 版

印 数:1~1500

定 价:49.00 元

字
印



产品编号:080507-01

前言

无人机是一种机上没有搭载飞行员的航空飞行器,包括固定翼无人机和旋翼无人机两大类型。它与有人驾驶飞行器(简称有人机)有许多的不同,包括使用和功能上的差别,而造成这些差别的根本因素就是人。机上无人是无人机的主要特点,正是这一特点,使得利用无人机完成任务时,无须再考虑机上飞行员的生命安全问题,更不必考虑任务的危险性。这不仅大大放宽了对无人机的设计和使用要求,而且使得无人机比有人机更适合执行那些存在着危险、人力无法承受或企及的任务,也使得无人机在军事和民用领域都有着广泛的应用空间。

无人机系统除了无人机以外,还包括与其配套的地面控制设备、数据通信设备、维护设备以及指挥控制和必要的操作、维护人员等。它是一个高度智能化的闭环反馈控制系统,不同类型和不同使用环境下的无人机可选择不同的系统构成。安装无人机地面控制设备和数据通信设备的通信站,既可以建在地面上,也可以设置在车、船或其他平台上。通过通信站及数据链路的空中传输,地面操作人员不但可以获得无人机所侦察到的信息,而且可以向无人机发布指令,控制它的飞行,使无人机能够顺利完成任务。

由于进入门槛低、大量现成技术可以应用、市场潜力巨大等原因,世界无人机市场近年来迅猛发展。特别是在以美国为首发动的几次高技术局部战争中,无人机的出色表现更是极大地提高了世界各国对它的重视程度。随着无人机技术的发展,已形成了高/中/低空、远/中/近程、大/中/小型、战略/战术、侦察监视/电子对抗/攻击作战等多层面、多梯次搭配的无人机体系。

无人机系统设计是指设计人员应用气动、结构、动力、材料、工艺、电子和计算机软硬件等学科知识,通过分析、综合和创造性思维将设计要求转化为一组能完整描述无人机系统的参数(文档、图纸和软件)的活动过程。无人机系统设计是一门应用科学,是各项先进的科学技术综合应用的结果,其内容涉及空气动力学、结构动力学、气动弹性力学、动力技术、自动控制和导航技术、无线电传输技术以及制造工艺等多种学科和专业技术领域。离开先进的科学技术,没有坚实的基础理论的指导,无人机系统设计水平不可能得到提升,现代无人机系统设计无法进行,而现代科学技术的发展也促进了无人机系统设计技术的不断创新和进步。

设计是无人机系统生命周期中最为重要的一个阶段,需要采用系统工程并行设计的方法,具有综合权衡与全面协调、反复迭代与多轮逼近、虚拟设计与整体优化等特点。无人机系统设计对新型号研制工作具有全局性的影响,设计质量直接影响无人机系统研制的全局,即在无人机全生命周期中,设计决定成败。

为了深化我国创新创业教育改革,优化专业结构,提高教育质量,促进学生在创新创业中全面发展,服务于经济社会发展和国家战略,把创新创业教育融入人才培养体系,改革教



育教学内容方法,改进课程,强化实践,本书基于切实增强、深入推进高校创新创业教育改革的责任感和紧迫感,全面提高人才培养质量,为促进大众创业、万众创新和建设创新型国家提供有力的人才支撑。

本书选材新颖,叙述深入浅出,注重无人系统设计的基础知识。本书并不对数学公式进行烦琐的推导,而是侧重讲述无人机设计的相关技术,内容丰富,概念清楚易懂,具有很强的可操作性,既适合作为无人机、航空工程、电子、自动化及相近专业等高职高专和本科教材,也可作为无人机科研、生产和培训人员以及广大航模爱好者的学习用书,对于希望全面了解无人系统设计知识的读者,本书也是一本较好的参考读物。

限于作者水平与精力,书中难免有不妥之处,敬请各位同行、专家和读者指正(联系方式:fcq828@163.com)。

作 者

2018 年 5 月

目 录

第 1 章 概述

1

- ▶ 1.1 与无人机相关的基础知识 1
 - 1.1.1 飞行器的基本概念 1
 - 1.1.2 无人机的定义和特点 2
- ▶ 1.2 系统工程的基础知识 4
 - 1.2.1 系统工程的基本概念 4
 - 1.2.2 系统工程方法论的基本概念 7
- ▶ 1.3 并行工程的基础知识 9
 - 1.3.1 并行工程的定义和背景 10
 - 1.3.2 并行工程的作用及其关键技术 11
- ▶ 1.4 无人机系统的基本概念 14
 - 1.4.1 无人机系统的定义和组成 15
 - 1.4.2 无人机系统的分类 18
 - 1.4.3 国外典型的无人机系统案例 23
- ▶ 思考题 1 28

第 2 章 无人机系统总体设计

29

- ▶ 2.1 无人机系统设计的基本概念 29
 - 2.1.1 无人机系统研制流程和设计的定义 29
 - 2.1.2 无人机系统设计的重要性和任务 30
- ▶ 2.2 无人机系统生命周期管理 31
 - 2.2.1 无人机研制项目的生命周期 31
 - 2.2.2 无人机系统设计研制阶段的工作任务 34
- ▶ 2.3 无人机系统客户需求分析和风险管理 36
 - 2.3.1 客户和客户需求定义 36
 - 2.3.2 无人机研制项目客户需求分析报告 37
 - 2.3.3 无人机研制项目的风险管理 40



▶ 2.4 无人机总体外形设计和总体结构	42
2.4.1 无人机总体外形设计	42
2.4.2 固定翼无人机的总体结构	44
2.4.3 旋翼无人机的总体结构	49
▶ 2.5 无人机总体参数的选择	55
2.5.1 固定翼无人机总体参数的选择	55
2.5.2 旋翼无人机总体参数的选择	57
▶ 思考题 2	64

第 3 章 无人机飞行平台结构设计 65

▶ 3.1 无人机结构设计的基本概念	65
3.1.1 无人机结构和结构设计的定义	65
3.1.2 无人机结构设计的基本要求和结构材料	66
▶ 3.2 无人机机身结构设计	68
3.2.1 无人机机身承受的外载荷和受力特点	68
3.2.2 无人机机身典型结构形式和传力分析	69
3.2.3 无人机机身基本承力构件设计	72
▶ 3.3 无人机起落装置结构设计	75
3.3.1 无人机起飞升空方式	75
3.3.2 无人机的着陆和回收方式	76
3.3.3 无人机轮式起落架的配置形式	77
3.3.4 无人机轮式起落架的基本组成	79
3.3.5 无人机轮式起落架的结构设计	80
3.3.6 旋翼无人机滑橇式起落架	82
▶ 3.4 固定翼无人机机翼、尾翼结构设计	82
3.4.1 固定翼无人机机翼的基本构造和外载	82
3.4.2 固定翼无人机机翼的组成构件	83
3.4.3 固定翼无人机机翼的结构形式	86
3.4.4 固定翼无人机尾翼的结构设计	88
▶ 3.5 旋翼无人机旋翼系统结构设计	90
3.5.1 旋翼无人机旋翼桨毂结构形式	90
3.5.2 旋翼无人机旋翼动力学特性	93
3.5.3 旋翼无人机旋翼桨叶结构设计	97
3.5.4 旋翼无人机尾桨结构设计	100
▶ 思考题 3	102

第 4 章 无人机飞行控制导航系统设计

103

▶ 4.1 无人机自动飞行控制的基本概念	103
4.1.1 无人机飞行品质和 GNC 技术的定义	103
4.1.2 无人机飞行控制方式和原理	105
4.1.3 无人机飞行控制系统的总体结构和分层结构	107
▶ 4.2 无人机飞行控制导航系统设计	109
4.2.1 无人机飞行控制导航系统的功能和设计要求	109
4.2.2 无人机飞行控制导航系统的组成和特点	110
4.2.3 无人机飞行控制导航系统设计	112
▶ 4.3 无人机导航系统和机载传感器	114
4.3.1 无人机导航系统	115
4.3.2 无人机机载传感器	118
4.3.3 无人机避障传感器	121
▶ 4.4 无人机制导控制系统	122
4.4.1 无人机制导控制系统的基本概念	122
4.4.2 无人机飞行控制律设计	123
4.4.3 无人机制导技术的类型	124
4.4.4 无人机的伺服执行机构	127
▶ 4.5 无人机开源飞行控制导航系统	128
4.5.1 开源软件和开源硬件的基本概念	128
4.5.2 无人机开源飞行控制导航系统的基本概念	129
4.5.3 无人机开源飞行控制导航系统的类型和选择	131
▶ 思考题 4	134

第 5 章 无人机任务规划和控制站

136

▶ 5.1 无人机任务规划的基本概念	136
5.1.1 任务规划的定义和特点	136
5.1.2 任务规划系统的定义和功能	137
5.1.3 无人机任务规划系统的定义、功能、流程和特点	138
▶ 5.2 无人机任务规划方法	141
5.2.1 传统优化算法	141
5.2.2 智能优化算法	143
▶ 5.3 无人机任务规划的数字地图技术	150
5.3.1 数字地球的基本概念	150



5.3.2	地理信息系统	151
5.3.3	数字地图	152
▶ 5.4	无人机地面控制站的基本概念	154
5.4.1	无人机地面控制站的定义和功能要求	154
5.4.2	无人机地面控制站系统的组成	155
▶ 5.5	无人机地面控制站的分类、配置和转移运输	157
5.5.1	无人机地面控制站的分类	157
5.5.2	无人机地面控制站配置和转移运输	158
▶	思考题 5	161

第 6 章 无人机系统数据链路技术 163

▶ 6.1	无人机系统数据链路的基本概念	163
6.1.1	无人机系统数据链路的定义和组成	163
6.1.2	无人机系统数据链路的职能和类型	165
▶ 6.2	数字通信和数字通信系统	166
6.2.1	数字通信的定义和特点	166
6.2.2	模数转换和数模转换	167
6.2.3	数字通信系统的组成和传输媒介	168
6.2.4	数字通信系统的性能指标、数据纠错方法和可用率	170
▶ 6.3	数字通信的编码和调制解调技术	171
6.3.1	数字通信的编码技术	172
6.3.2	数字信号的调制解调技术	173
6.3.3	数字信号主要的调制方式	175
▶ 6.4	数字通信系统的同步技术与天线技术	182
6.4.1	数字通信系统的同步技术	182
6.4.2	数字通信系统的天线技术	186
▶	思考题 6	188

参考文献 189

第1章

概 述

主要内容

- 与无人机相关的基础知识。
- 系统工程的基础知识。
- 并行工程的基础知识。
- 无人机系统的基本概念。
- 国外典型的无人机系统型号案例。

1.1 与无人机相关的基础知识

本章首先介绍一些与无人机相关的基本概念和基本知识,包括无人机的定义、特点,以及系统工程和并行工程的基础知识;然后介绍无人机系统的基本概念。

1.1.1 飞行器的基本概念

1. 飞行器的定义和分类

飞行器是指以某种方式连接在一起的变形体的任意组合,能在地球大气层内或大气层之外的空间(含环地球空间、行星和行星际空间)飞行的物体。例如,步枪弹丸是最简单的一种飞行器,飞机和宇宙飞船等则是较为复杂的飞行器。通常,飞行器可分为三大类:航空飞行器、航天飞行器、火箭和导弹,如图 1-1 所示。

(1) 航空飞行器。指飞行动力依靠空气,只能在大气层内飞行的飞行器,如孔明灯、风筝、热气球、地效船、飞机、直升机、无人机等。

(2) 航天飞行器。指飞行动力不依靠空气,而是依靠自身携带气体的反作用力来推动的飞行器,航天飞行器主要在大气层之外的空间飞行,如卫星、空间站、宇宙飞船等。

(3) 火箭和导弹。依靠火箭发动机提供推进力的飞行器称为火箭,依靠制导系统控制

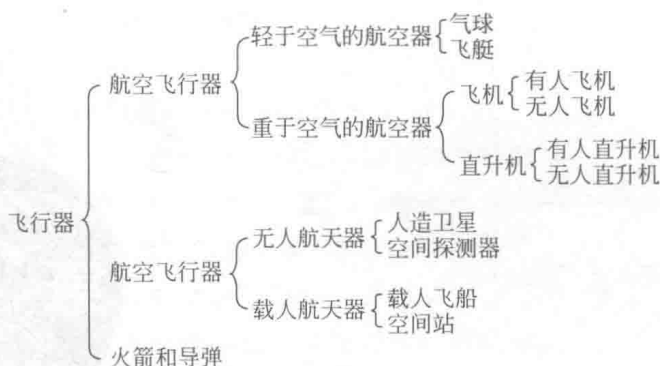


图 1-1 飞行器的分类

其飞行轨迹的飞行武器称为导弹。

2. 航空飞行器的分类

航空飞行器根据其自身的比重(单位体积的重量)是否大于空气(大气)的比重,又分为两种:

(1) 无动力航空飞行器。其自身的比重比空气的比重小,如孔明灯、热气球等,或是靠风的推力升扬于空中,如风筝等。其特点都是不需要安装动力装置就能飞上天空,统称为无动力航空飞行器。

(2) 动力航空飞行器。其自身的比重比空气的比重大,需要依靠动力装置提供飞行动力才能升空。动力航空飞行器包括固定翼飞机(简称飞机)和旋翼飞行器(简称直升机)等。其中,飞机可分为有人驾驶飞机(简称有人飞机)和无人驾驶飞机(简称固定翼无人机)两类;直升机也可分为有人驾驶直升机(简称有人直升机)和无人驾驶直升机(简称旋翼无人机)两类。固定翼无人机和旋翼无人机统称为无人机。

这里有一个概念性问题需要说明:为什么直升机不能称为“直升飞机”?其原因是,由固定机翼提供升力的航空飞行器称为飞机,而直升机是由旋翼提供升力的航空飞行器。为了强调两者在升力来源上的差别,避免概念上的混淆,因此直升机不能称为“直升飞机”。但是,有些复合或组合航空飞行器的升力既有旋翼提供的,又有固定机翼提供的,人们仍习惯上把它们称为特殊形式的“直升机”,如复合式直升机、组合式直升机、倾转旋翼式直升机等。当然,在有些书中把它们定义为“直升飞机”,这在概念上是没错的,只是不太符合人们的习惯叫法而已。

1.1.2 无人机的定义和特点

1. 无人机的定义

无人机(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)就是无人驾驶飞行器。它是指不搭载操作人员(简称飞行员或驾驶员)的一种动力航空飞行器,利用空气动力为其提供所需的升力,能够有效载荷进行全自动飞行或无线引导飞行。无人机既能一次性使用,也能进行回收或自动着陆,以便多次重复使用。

根据无人机的定义,导弹虽然是无人驾驶飞行器,但不能看作无人机。原因主要是:无人机在飞行结束后可以进行回收或自动着陆,而导弹则不能回收;无人机的杀伤能力来自另外携带的武器而不是自身,其携带的弹药也无须与机身合为一体,而导弹的弹头则被整合

在弹体内,依靠其自身形成杀伤能力。

2. 无人机的特点

无人机作为一种飞行器,与有人驾驶飞行器(以下简称有人机)有许多不同,包括使用和功能上的差别,而造成这些差别的根本因素就是人。机上无人(飞行员)是无人机的主要特点,正是这一特点,使得利用无人机完成任务时,无须考虑机上飞行员的生命安全问题,更不必考虑任务的危险性。这不仅大大放宽了对无人机的设计和使用要求,而且使得无人机比有人机更适合执行那些存在着各类危险、人力无法承受或企及的任务,也使得无人机在军事和民用领域都有着广泛的应用空间。

无人机的“无人”特点造就了其使用上的特殊优越性。任何一种无人机都具备以下几个方面的突出优势:

(1) 能出色地完成单调枯燥、时间长、强度大的艰苦任务。例如,军用或民用中大范围监视对飞行员而言是一项非常单调枯燥、长时间无法休息的工作,容易因疲劳而导致注意力不集中,影响任务完成效果。无人机则没有这种问题,作为自动化机器,可以超越人类生理特性极限,执行长时间、高机动性的任务。

(2) 能胜任恶劣、高危环境下的各种危险工作。例如民用领域中的核生化环境监测、灾害搜求、高层建筑消防灭火等,以及军用领域中核生化威胁、长航时、高风险的战场中的空中攻击、侦察等,采用无人机可以代替人类飞行员执行高危险任务,能避免飞行员可能受到的伤害,降低潜在的人员伤亡危险。

(3) 具有体积小、隐蔽性好的优势,战场适应能力强。无人机体积较小,因而雷达反射面小,难以被敌方雷达探测到。同时,无人机还易于采用各类隐身措施,提高防雷达、防红外、防目视能力。由于隐蔽性好,大大降低了被敌方发现和被防空炮火击落的概率。

(4) 飞行中能做大过载动作,机动性好,战场生存能力强。由于机上没有驾驶员,无人机在结构设计上具有非常大的灵活性,飞行中可以不用考虑人的身体承受能力而做大过载规避动作,以躲避敌方导弹的袭击。

(5) 研制、生产和使用成本低,经济性好。由于机上无人的原因,无人机在设计时完全不必考虑飞行员的生理需求,不需要各种生命维持系统,因而可以大大简化机载设备和飞行平台的设计要求,使得无人机的研制、生产成本远远低于有人机。另外,无人机的使用、训练和维护费用也比有人机低得多。

(6) 配置灵活,任务多元化。无人机由于在体积、使用、维护上的综合优势,使其在战场中配置相当灵活,现有的各类飞行平台经过简单改装都可以很好地支持无人机的使用。微型无人机甚至全套系统都可以通过士兵背负的方式进行配置。从而使得各战术单位能够很方便地获得无人机的支持。同时,现有各类无人机系统在设计时均采用平台化、模块化的方式,各种任务模块可根据实际情况进行灵活调整,从而能充分发挥飞行平台优势。

(7) 执行任务灵活,操作方便。对无人机进行操作的人员无须亲历现场和进行全面、完善的作战培训。同时,无人机可以在各种场合灵活地进行起降,具有操作灵活的特点。

(8) “飞行汽车”前途无量。随着载客型无人机的快速发展,特别是专用于载客运输的旋翼无人机作为人们出行使用的新型航空交通运输工具,具有可在自家后院或家门口起飞降落、飞行速度快、在途时间短、操作简单、安全可靠、舒适便捷等许多优点。载客型无人机作为新型的“飞行汽车”,为人们创造了一种全新的交通方式,成为几乎人人都可以安全使用



的可靠飞行器。它在不久的将来就会像如今的小汽车一样,在人们的生活中普及开来,从而有助于解决许多大城市长期存在的地面交通拥堵等难题,成为居民家中不可或缺的交通运输工具。

1.2 系统工程的基础知识

系统工程是实现系统最优化管理的工程技术,它涉及应用数学(如最优化方法、概率论、网络理论等)、基础理论(如信息论、控制论、可靠性理论等)、系统技术(如系统模拟、通信系统等)以及经济学、管理学、社会学、心理学等多种学科。

1.2.1 系统工程的基本概念

1. 系统的定义和特点

1) 系统的定义

系统是指相互联系、相互作用并具有一定整体功能和整体目的的诸要素的有机综合体。通俗地说,系统就是有组织、有秩序地达到某种目的的一个组合体。

2) 系统的特点

系统有以下 6 个特点:

- (1) 整体性。系统是由若干要素以一定结构组成的相互联系、相互作用的整体。
- (2) 分解性。系统可分解成为若干基本要素。
- (3) 全局性。系统整体的功能不等于各部分功能的总和,系统整体包含不同于各组成部分的新的全局性整体功能,系统各要素要实现和服从系统的整体功能。
- (4) 层次性。系统结构决定系统功能。层次是系统结构形式,描述系统构成要素之间的从属关系,系统不同的层次存在着不同的运动方式。
- (5) 关联性。系统中各要素之间存在着物质、能量和信息的流通。系统任一要素随时间的变化是系统所有要素的函数。
- (6) 目的性。系统具有明确的需要完成的功能和目标以及描述这个目标的指标体系。

2. 系统的分类

在自然界和人类社会中普遍存在着各种系统。

1) 自然系统、人造系统与复合系统

自然系统就是由自然物所组成的系统,它的特点是自然形成的。

人造系统是由人工制造出来的系统,主要有 3 种类型:

- (1) 工程技术系统:由人们从加工自然物获得的零部件装配而成的系统。
- (2) 管理系统:由一定的制度、组织、程序、手续等所构成的系统。
- (3) 科学体系:根据人们对自然现象和社会现象的科学认识所创立的系统。

复合系统是自然系统与人造系统相结合的系统。现实生活中大多数是复合系统。

2) 静态系统与动态系统

静态系统是指系统的性能与功效不随时间而改变,反之就是动态系统。应注意的是,静态系统并非指系统中一切都绝对静止,即使是静态系统,仍存在着少量的物质、能量交换。

3) 封闭系统与开放系统

当系统与环境联系不密切,即很少与环境发生能量、物质、信息的交换,称为封闭系统。封闭系统不易变化发展,往往形成静态系统。与外界环境完全没有联系的系统称为孤立系统,在宇宙中实际上是不存在的,只是为了方便研究与计算,把某些封闭系统中与外界联系不密切的因素忽略不计,近似地作为孤立系统来对待。开放系统是指系统与环境经常有较多的物质、能量、信息的交换,而且这种交换影响着系统的结构、功能和发展,一旦与外界的联系切断便会影响系统的稳定,甚至破坏系统。

4) 实体系统与虚拟系统

实体系统是以矿物、生物、机械、人类等实体的存在物为组成部分的系统。与此相对应,虚拟系统是由概念、想像、原理、法则、方法、制度、步骤、手续等组成的系统。

5) 普通系统、大系统

从系统的规模来分,可分为普通系统、大系统及巨系统。

6) 简单系统与复杂系统

从系统的复杂程度来分,可分为简单系统与复杂系统。

3. 工程和工程项目的定义

工程是将理论和知识应用于实践的科学。工程项目是以工程建设为载体的项目,是作为被管理对象的一次性工程建设任务。在实践中,工程项目一般是指大型的建设工程项目。

在谈到“工程”一词时,还要考虑到人们日常用语的习惯。在汉语中常以“工程”一词来称呼计划、项目或子项目。例如,“希望工程”是一项民间捐助失学儿童重返校园,接受义务教育的项目,和人们常讲的建设工程没有多大关系;“长江三峡工程”是一项水利工程项目,是传统意义上的建设工程项目;“软件工程”则是指运用工程的方法进行软件开发等。在某些应用领域中,工程管理、计划管理和项目管理被视为同义词;而在另一些场合,其中一个则可能是另一个的子集。由于“工程”含义上的多重性,要求在特定场合使用时做出明晰的约定。

4. 系统工程的定义

系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法,是一种对所有系统具有普遍意义的科学方法。

系统工程(System Engineering, SE)是从整体出发,合理开发、运行和革新一个大规模复杂系统所需的思想、理论、方法论、方法与技术的总称,是一门综合性的工程技术。它是按照问题导向的原则,根据总体协调的需要,把自然科学、社会科学、数学、管理学、工程技术等领域的相关思想、理论、方法等有机地综合起来,应用定量分析和定性分析相结合的基本方法,采用现代信息技术等技术手段,对系统的功能配置、构成要素、组织结构、环境影响、信息交换、反馈控制、行为特点等进行系统分析,最终达到使系统合理开发、科学管理、持续改进、协调发展的目的。简言之,用定量和定性相结合的系统思想和方法处理大型复杂系统的问题,无论是系统的设计、组织建立还是系统的经营管理,都可以统一看成一类工程实践,统称为系统工程。

系统工程的主要任务是:根据总体协调的需要,把自然科学和社会科学中的基础思想、理论、策略和方法等从横的方面联系起来,应用现代数学和电子计算机等工具,对系统的构成要素、组织结构、信息交换和自动控制等功能进行分析研究,借以达到最优设计、最优控制



和最优管理的目标。

系统工程研究强调多学科协作,以系统思想为指导,采取综合集成各学科、各领域的理论和方法。系统工程研究问题采用先决定整体框架,后进入详细设计的程序,一般是先进行系统的逻辑思维过程总体设计,然后进行各子系统或具体问题的研究。系统工程研究大致可分为系统开发、系统制造和系统运用 3 个阶段,而每一个阶段又分为若干小的阶段或步骤。

5. 系统工程的理论基础

1) 信息论

信息是指向人或机器提供的关于现实世界的各种知识,是数据、消息中所包含的意义,它不随载体的物理形式的各种改变而改变。信息是事物运动的状态和方式,而不是事物本身,因此,它不能独立存在,必须借助某种符号才能表现出来,而这些符号又必须附载于某种物体上。所谓载体就是承载信息的工具,例如文字、声音、图像、视频、电磁波、空气,以及纸张、胶片、存储器等。信息有 4 种形态:数据、文本、声音、图像。

(1) 信息的特点。信息具有以下几方面的特性:

- ① 客观性:任何信息都与客观事实紧密相关,这是信息的正确性与精确度的保证。
- ② 可处理性:信息是可以处理的,它可以被加工、存储和传输,也可以转换形态。
- ③ 适用性:信息对决策十分重要,信息系统将人类社会中巨大的数据流收集和组织管理起来,经过处理、转换和分析,变成对生产、管理和决策具有重要意义的有用信息。
- ④ 传输性:信息可在发送者和接收者之间传输。有很多系统采用了网络传输技术。
- ⑤ 共享性:信息与实物不同,可以传输给多个用户,为多个用户共享,而其本身并无损失。这为信息的并发应用提供了可能。
- ⑥ 时效性:一条信息可能在某个时刻以前具有很高的价值,但是在某个时刻之后可能就没有任何价值了,这就是信息的时效性。
- ⑦ 价值性:信息的价值性在于获取的信息可以影响人们的思维、决策和行为方式,从而为人们带来不同层面上的收益。

(2) 信息论的定义。信息论是研究信息的本质和特点的科学,主要研究信息的产生、获取、处理、传输、存储及利用的一般规律。

(3) 信息技术的定义。信息技术(IT)是指信息的产生、获取、处理、存储、传输及其应用的技术,是利用科学的原理、方法及先进的工具和手段,有效地开发和利用信息资源的技术体系。它可能是机械的、激光的、电子的,也可能是生物的。现代信息技术在扩展人的信息感官能力方面发挥了巨大作用。

2) 控制论

控制是施控者作用于受控对象的一种主动行为,使受控对象按照施控者的意愿行动,如领导、指挥、管理、教育、设计、调节等都是主动的控制行为。控制是有目的的,如果控制系统的目的是一个,称为单目标控制系统;如果是多个,则称为多目标控制系统。系统控制方法分为两种:一种是反馈控制,又称为被动控制或闭环控制;另一种是前馈控制,又称为主动控制或开环控制。两种控制形式的主要区别是有无信息反馈。

(1) 反馈控制。所谓反馈就是指在完成控制的过程中,收集行动的响应信息,并把其响应效果同目标要求相比较,进行工作的调整,这种行动的响应信息就称为反馈信息。反馈控

制如图 1-2 所示。当行动响应效果同目标要求一致,控制过程便告完成;当行动响应效果偏离目标要求甚至与其背道而驰时,就需要对系统进行调节,使其逐步接近目标要求,最后使系统能得到合理的发展。

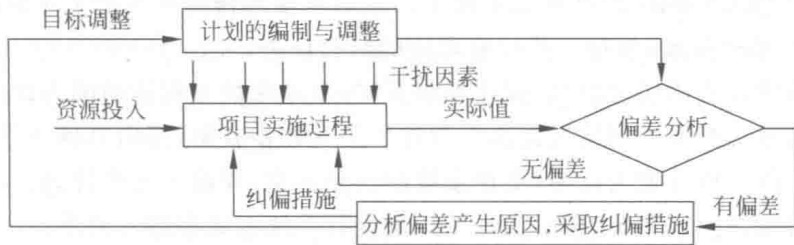


图 1-2 反馈控制

(2) 前馈控制。是没有反馈信息的控制系统,只有前馈的控制信息通道,通常只应用于比较简单的场合,在工程建设项目中较少采用。前馈控制如图 1-3 所示。

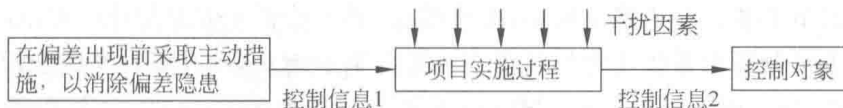


图 1-3 前馈控制

1.2.2 系统工程方法论的基本概念

1. 方法和方法论的定义

方法和方法论在认识上是两个不同的范畴:方法是用于完成一个既定任务的具体技术和操作;方法论是进行研究和探索的一般途径,是对方法如何使用的指导。

2. 系统工程方法论的定义和特点

1) 系统工程方法论的定义

系统工程方法论是分析和解决系统开发、运作和管理等问题所应遵循的一整套思想、原则、程序、逻辑步骤和基本方法。系统工程方法以系统整体功能最佳为目标,首先对系统进行综合、系统分析并构造整体框架模型,然后进入详细设计的程序,调整改善系统的结构,使之达到整体最优化。

2) 系统工程方法论的特点

系统工程方法论有以下几个特点:

- (1) 研究方法整体性。
- (2) 技术应用综合性。
- (3) 管理决策科学性。
- (4) 应用范围普遍适用性。
- (5) 系统与环境的融合性。

3. 霍尔三维结构模型

在系统工程方法论的发展过程中,逐步形成了几种类型不同的理论模型和方法,其中霍尔三维结构模型比较适合偏重工程系统、机理明显的物理系统。霍尔三维结构模型将系统



的整个管理过程分为前后紧密相连的 6 个阶段和 7 个步骤,并同时考虑到为完成这些阶段和步骤的工作所需的各种专业管理知识。三维结构由时间维、逻辑维、知识维组成。

1) 时间维

霍尔系统工程方法的时间维表示系统工程活动从规划开始的 6 个工作阶段。任何研究工作都在其中的某一阶段,且每一阶段有对应的研究任务。

- (1) 规划阶段。明确研究目标,提出初步方案,制定系统工程活动的方针、规划。
- (2) 方案阶段。根据规划阶段提出的设计思想和初步方案,提出具体的计划方案。
- (3) 研制阶段。以计划为指南,实现系统的试制方案,并制定生产计划。
- (4) 生产阶段。应用系统工程技术,按计划进行系统组成零部件的生产。
- (5) 试验阶段。完成系统整体安装,通过试验运行确定系统运行计划。
- (6) 运行阶段。系统按规定的用途工作或提供服务。

2) 逻辑维

霍尔系统工程方法的逻辑维是指系统工程每阶段工作所应遵从的规则、顺序和工作步骤,一般分为以下 7 步。在实践工作中,系统综合、系统分析和方案优化存在不断循环、递进的过程,即在系统分析和系统优化的过程中可能产生系统方案,或者对模型进行修正。

(1) 明确问题。通过调研资料和数据,了解工程问题的背景、技术发展现状和未来趋势,弄清问题的本质。

(2) 确定目标。选择系统功能的具体评价指标,确定系统目标函数,对可供选择的方案进行比较和评价。

(3) 系统综合。按照问题的性质和目标功能要求,形成可能的系统方案。

(4) 系统分析。运用系统工程方法技术,建立必要的数学模型,对综合得到的系统方案进行仿真试验或理论分析,系统地比较各种方案的优劣。

(5) 方案优化。根据系统分析所建立的系统模型结果加以评价,筛选出最佳方案。

(6) 方案决策。在优选结果中考虑不可量化的定性指标,进行综合权衡,选择适当的方案。

(7) 实施计划。按选定的方案制定系统计划,并具体开展实施。

3) 知识维

霍尔系统工程方法的知识维是指完成系统工程工作所需的各种知识和专业技术。在霍尔结构模型中,将知识划分为工程、医学、建筑、商业、法律、管理、社会科学和艺术等。

在无人机系统研制中,主要的知识结构模型包括空气动力学、结构动力学、气动弹性力学、自动控制理论、导航技术、无线通信技术、电子技术、管理知识、环境和社会科学等。

4. 虚拟制造

1) 虚拟制造的定义

虚拟制造(Virtual Manufacturing, VM)是以虚拟现实和仿真技术为基础,对产品的设计、生产过程统一建模,在计算机上实现产品从设计、加工和装配、检验直到使用的整个生命周期的模拟和仿真。

采用虚拟制造可以在产品的设计阶段就模拟出产品及其性能和制造过程,以此来优化产品的设计质量和制造过程,优化生产管理和资源规划,以达到产品开发周期和成本的最小化、产品设计质量的最优化和生产效率最高化,从而形成企业的市场竞争优势。例如美国波音公司的波音 777 采用虚拟制造技术,其整机设计、部件测试、整机装配以及各种环境下的