



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

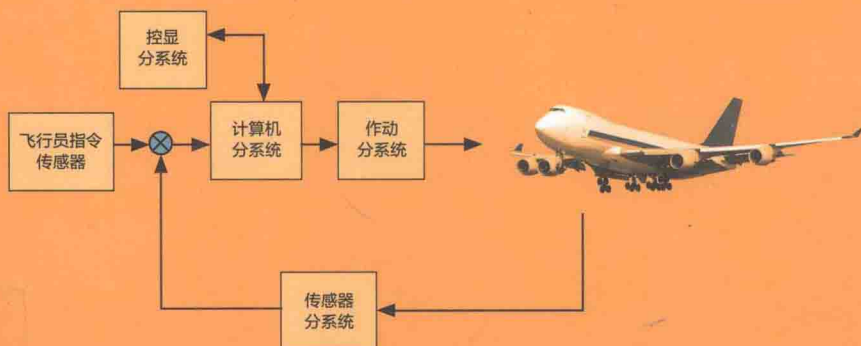
民机飞行控制技术系列

主编 李明

现代飞机 飞行控制系统工程

Flight Control Engineering for Modern Airplane

张汝麟 宋科璞 等编著
李明 审校



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

民机飞行控制技术系列

主 编 李 明

现代飞机 飞行控制系统工程

Flight Control Engineering for
Modern Airplane

张汝麟 宋科璞 等编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书包含了现代飞机飞行控制系统从系统到主要分系统及部件的技术内容,以工程实用性为主旨,注重理论方法与工程实践紧密结合,讨论了飞行控制律、系统结构和余度管理、飞控计算机硬件、软件、伺服作动分系统以及传感器分系统的设计、试验、系统综合、验证和确认的技术、工具和相关规范。本书兼顾军机和民机两类飞行控制系统的技术特点,进行针对性讨论,适用于从事不同类型飞机飞行控制系统研究和开发人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代飞机飞行控制系统工程/张汝麟等编著. —上海:上海交通大学出版社,2015
(大飞机出版工程)
ISBN 978-7-313-14245-0

I. ①现… II. ①张… III. ①民用飞机-飞行控制系统
IV. ①V249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 309113 号

现代飞机飞行控制系统工程

编 著:张汝麟 宋科璞 等

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:上海万卷印刷有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

字 数:887 千字

版 次:2015 年 12 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-14245-0/V

定 价:178.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:44.5

印 次:2015 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-56928277

大飞机出版工程

丛书编委会

总主编

顾诵芬（中国航空工业集团公司科技委副主任、中国科学院和中国工程院院士）

副总主编

金壮龙（中国商用飞机有限责任公司董事长）

马德秀（上海交通大学原党委书记、教授）

编委（按姓氏笔画排序）

王礼恒（中国航天科技集团公司科技委主任、中国工程院院士）

王宗光（上海交通大学原党委书记、教授）

刘洪（上海交通大学航空航天学院副院长、教授）

许金泉（上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授）

杨育中（中国航空工业集团公司原副总经理、研究员）

吴光辉（中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员）

汪海（上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员）

沈元康（中国民用航空局原副局长、研究员）

陈刚（上海交通大学原副校长、教授）

陈迎春（中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员）

林忠钦（上海交通大学常务副校长、中国工程院院士）

金兴明（上海市政府副秘书长、研究员）

金德琨（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

崔德刚（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

敬忠良（上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授）

傅山（上海交通大学电子信息与电气工程学院研究员）

编 委 会

主 编

李 明 (中航工业沈阳飞机设计研究所科技委委员、中国工程院院士)

副主编

陈宗基 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授)

张汝麟 (中航工业西安飞行自动控制研究所原副总工程师、研究员)

张文军 (上海交通大学原副校长、教授)

编 委 (按姓氏笔画排序)

王少萍 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院副院长、教授)

车 军 (中航工业西安飞行自动控制研究所研究员)

朱 江 (中航工业第一飞机设计研究院研究员)

朱建设 (中国航空工业集团公司研究员)

江 驹 (南京航空航天大学研究生院常务副院长、教授)

杨 晖 (中航工业航空动力控制系统研究所所长、研究员)

杨朝旭 (中航工业成都飞机设计研究所副总工程师、研究员)

张 平 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授)

张翔伦 (中航工业西安飞行自动控制研究所研究员)

宋科璞 (中航工业西安飞行自动控制研究所所长、研究员)

范彦铭 (中航工业沈阳飞机设计研究所副总设计师、研究员)

周元钧 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授)

赵京洲 (中国商飞上海飞机设计研究院副总设计师、研究员)

胡士强 (上海交通大学航空航天学院副院长、教授)

高亚奎 (中航工业第一飞机设计研究院副总设计师、研究员)

章卫国 (西北工业大学自动化学院党委书记、教授)

敬忠良 (上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授)

程 农 (清华大学自动化系导航与控制研究中心主任、教授)

戴树岭 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授)

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、比重大于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展和应用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索 and 不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视起我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目其产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音 B737 和

空客 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成了数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大型飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

2008 年 5 月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教 1 时,亲自撰写了《飞机性能及算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》《飞机强度学》,从理论上保证了我们飞机研制工作。我本人作为航空事业发展 50 年的见证人,欣然接受了上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大型飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理 50 多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也

包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如:2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输类飞机的空气动力设计》), 由美国堪萨斯大学2008年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》) 等国外最新科技的结晶; 国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》《民用飞机气动设计》等专业细分的著作; 也有《民机设计1000问》《英汉航空双向词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助, 体现了国家对“大型飞机项目”以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命, 凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果, 具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性, 既可作为实际工作指导用书, 亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养, 有益于航空工业的发展, 有益于大飞机的成功研制。同时, 希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空, 并投身于中国航空事业做出一点贡献。

顾诵芬

2009年12月15日

序

大飞机工程是我国推进创新型国家建设的重要标志性工程。为了配合大飞机的研制,在国家出版基金的资助下,上海交通大学出版社成功策划出版了“大飞机出版工程”,旨在为大飞机研制提供智力支持。“民机飞行控制技术系列”是“大飞机出版工程”系列图书之一。

现代飞行控制技术是现代军机、民机的主要关键技术之一。以电传操纵技术为核心的现代飞行控制系统是现代飞机的飞行安全关键系统,是现代飞机上体现信息化与机械化深度融合的典型标志。飞行控制技术也是大型民机确保安全性、突出经济性、提高可靠性、改善舒适性和强调环保性的重要技术。

1903年,莱特兄弟在前人研究的基础上,重点解决了飞机三轴可控问题,实现了动力飞机的首次飞行。此后的60年,驾驶员利用机械操纵系统来控制稳定飞机飞行,形成了经典的飞行控制系统。飞机机械操纵系统在自动控制技术的辅助下,解决了对飞机性能和任务能力需求不断增长所遇到的一些重大问题——稳定性,稳定性与操纵性的矛盾,精确、安全的航迹控制,以及驾驶员工作负荷等问题。20世纪60年代至70年代初发展起来的主动控制技术和电传飞行控制系统对飞机发展具有划时代的意义,改变了传统的飞机设计理念和方法论,使飞机的性能和执行任务的能力上了一个新台阶。这两项技术已成为第三代军机和先进民机的典型标志,同时也为第四代军机控制功能综合以及控制与管理综合建立了支撑平台。在人们对飞机飞行性能的不断追求和实现的过程中,飞行控制系统发挥着越来越重要的作用,飞行控制系统的创新研究、优化设计和有效工程实现对现代飞机的功能和性能的提高起着至关重要的作用。

我国的军机飞行控制系统经过五十多年的研究、设计、试验、试飞、生产和使用的实践,已积累了丰富的经验,并取得了大量的成果,在各型军机上得到了广泛的应用,但民机飞行控制系统的研发经验仍相对薄弱。总结现代军机飞行控制系统研发经验,分析和借鉴世界先进民机飞行控制系统新技术,对助力我国大型民机的自主研发是十分必要且意义重大的。

本系列丛书编著目标是:总结我国军/民领域的飞行控制技术的理论研究成果和工程经验,介绍国外最先进的民机飞行控制技术的理念、理论和方法,助力我国科研人员以国际先进水平为起点,开展我国民机飞行控制技术的自主研究、开发和原始创新。本系列丛书编著的指导思想和原则是:内容应覆盖民机飞行控制技术的各重要专业;要介绍当今重要的、成功的型号项目,如波音系列和空客系列的飞行控制技术,也要重视方向性的探索和研究;要简明介绍技术与方法的理论依据,以便读者知其然,也知其所以然;要概述民机飞行控制技术的各主要专业领域的基本情况,使读者有全面的、清晰的了解;要重视编著的准确性以及全系列丛书的一致性。

本系列丛书包括《飞行控制系统设计和实现中的问题》《民机液压系统》《民机飞行控制系统设计的理论与方法》《民机传感器系统》等专著。其中王少萍教授的专著《民机液压系统》(英文版),已经输出版权至爱思唯尔(Elsevier)出版集团,增强了我国民机飞控技术的国际影响力。

在我国飞行控制领域的资深专家李明院士、陈宗基教授和张汝麟研究员的主持下,这套丛书的编委会由北京航空航天大学、清华大学、西北工业大学、南京航空航天大学、中航工业西安飞行自动控制研究所、中航工业沈阳飞机设计研究所、中航工业成都飞机设计研究所、中航第一飞机设计研究院、中航工业航空动力控制系统研究所、中国航空工业集团公司、中国商用飞机有限责任公司等航空院所和公司的飞控专家、学者组建而成。他们在飞行控制领域有着突出的贡献、渊博的学识和丰富的实践经验,他们对于本系列图书内容的确定和把关、大纲的审定和完善都发挥了不可替代的重要作用。

上海交通大学出版社“大飞机出版工程”项目组以他们成熟的管理制度和保障体系,组织和调动了丛书编委会和丛书作者的积极性和创作热情。在大家的不懈努

力下,这套图书终于完整地呈现在读者的面前。

本系列图书得到国家出版基金的资助,充分体现了国家对“大飞机工程”的高度重视,希望该套图书的出版能够达到本系列丛书预期的编著目标。我们衷心感谢参与本系列图书编撰工作的所有编著者,以及所有直接或间接参与本系列图书审校工作的专家、学者的辛勤工作,希望本系列图书能为民机飞行控制技术现代化和国产化发展做出应有的贡献!

民机飞行控制技术系列编委会

2015年3月

作者简介

张汝麟 自然科学研究员,博士生导师,中国航空学会制导、导航与控制分会名誉主任委员。1962年毕业于北京航空航天大学飞行器自动控制专业。在中航工业自控所从事飞行控制系统技术研究和型号开发工作50多年,历任飞控研究室副主任、自控所副总工程师、科技委副主任、总师顾问等职。是我国航空工业飞行控制专业著名专家和学术带头人。先后主持包括我国第一种数字电传飞行控制系统在内的各类机种十余项飞行控制系统的研发工作。在电传飞行控制和主动控制技术、无人机自主控制技术、数字控制和余度技术等方面做出了很多开创性工作和重大贡献,是我国先进飞行控制技术的主要开拓者和奠基者。主持研制的项目中获得全国科学大会重大科技成果奖和国家科技进步二等奖各一项,省部级科技进步一等奖四项;三次荣立一等功。1992年被国务院授予享受政府特殊津贴的专家,2005年被授予全国优秀科技工作者称号。

宋科璞 现任中航工业自控所所长、党委副书记,研究员,博士生导师,享受国家特殊津贴专家,是中国航空学会常务理事兼飞行器控制专业委员会主任委员、中国系统仿真学会理事、中国惯性技术学会副理事长、中国海军预研专家组专家、总装备部国防关键技术研究组飞行组专家、国家国防基础科研信息与控制组副组长、国家飞行器控制一体化技术国防科技重点实验室主任。

先后主持、参与数十项国家重点工程的研制,并取得了丰硕成果。荣获“全国先进工作者”荣誉称号、全国五一劳动奖章、军委总装备部“高技术武

器装备发展建设工程荣誉奖章”、中航工业航空报国突出贡献奖、航空报国金奖。曾荣立个人一等功 2 次、二等功 1 次、三等功 2 次，荣获国防科技成果一等奖 1 项，二等奖 5 项、三等奖 2 项，省部级科学技术成果 19 项，国家级企业管理创新成果一等奖 1 次，省部级管理创新成果二等奖 2 次。

前 言

2003年1月,国防工业出版社曾出版过一套“飞行控制技术丛书”。十余年过去了,国内外航空技术又有了巨大进展。我国航空工业经历了20世纪80、90年代预先研究和型号开发的技术积累,进入新世纪后,各类先进机种型号出现了井喷式的发展。舰载机、四代机(国外称五代机)、无人作战飞机、大型运输机和旅客机等对飞行控制系统的理论研究及应用技术开发提出了新的需求。与此同时,为配合大飞机的研制,为其提供技术和智力支持,上海交通大学出版社在国家出版基金的支持下启动了“大飞机出版工程”,其中包括“民机飞行控制技术系列”丛书。

电传飞行控制技术作为飞行控制系统的核心,是现代军机和民机的主要关键技术之一,也是大型飞机确保飞行安全性、提高可靠性、经济型和改善舒适性的重要使能技术。中航工业自控所50多年来在我国军机飞行控制系统预先研究和工程型号开发中积累了丰富的经验,取得了包括数字电传飞行控制系统在内的大量研究成果,并在多种型号先进军机上服役应用。目前,中航工业自控所正在与国外厂商以合资公司的形式合作开发C919客机的飞行控制系统。

正是在上述背景下,我们编著了这本《现代飞机飞行控制系统工程》。不同于以往同类出版物,本书具有以下特点:

(1) 完整性。

本书涵盖了飞行控制系统级、主要分系统级和部件级的技术内容。在系统级包括了两项主要设计任务——功能和性能设计(控制律设计)、安全性和可靠性设计(系统结构和余度管理设计),以及系统综合和验证任务。在分系统和部件方面包括了飞行控制计算机(硬件)分系统、软件、伺服作动分系统和传感器分

系统的相关内容。给读者一个完整的飞行控制系统概念。

(2) 实用性。

在各章内容中,所讨论的理论、方法都是相关作者在本专业领域长期工作实践中经过工程型号或预先研究项目考验证明是正确的、可行的。

(3) 注重理论与实践紧密结合。

本书内容不是为理论而著理论,也不是某个专项工程的技术说明,而是将理论方法与工程实践统一起来论述,让读者知其然也知其所以然。

(4) 兼顾军机和民机。

作为飞行安全关键性系统,国内外许多大跨度的新技术都是在军机,特别是战斗机上首先应用,技术成熟和取得使用经验后再向民机转移,数字电传飞行控制技术就是一个典型的例子。因此,本书不局限于民机飞行控制技术,而是兼顾两者的内容进行讨论,也便于读者对两大类飞机的飞行控制技术都有所了解,根据读者工作所需进行选择。

本书由张汝麟任主编,宋科璞、车军和张翔伦任副主编。全书共分9章:第1章和第9章由张汝麟、宋科璞编著;第2章由张翔伦、左玲、侯琳编著;第3章由周成、徐艳玲编著;第4章由宋科璞、苏罗辉、张兴隆、牛萌等编著;第5章由夏立群、刘莹、李小明、韩志华等编著;第6章由毕联江、周育茹、包艳、张亚崇、惠苗编著;第7章由武方方、张丹涛、屈华敏、鲁昊鹏、王勇等编著;第8章由唐强、车军编著。全书由张汝麟、张翔伦统编统校。

本书编者衷心感谢对本书出版给予关心、支持和帮助的人们,特别感谢对本书进行审阅并提出宝贵意见的李明院士等人,感谢为本书做了大量图文处理和录入工作的罗健晖、段炬等工程师。

由于编著者水平所限,书中存在的遗漏、错误恳请读者批评指正。

编著者

2015年12月

符 号 表

符号	名称和量纲	符号	名称
ω_c	幅值穿越频率, rad/s	GM	幅值裕度, dB
ω_g	相位穿越频率, rad/s	PM	相位裕度, °
ξ_{sp}	纵向短周期阻尼比	D_F	阻力, N
ω_{sp}	纵向短周期频率, rad/s	C_F	侧力, N
ξ_{nd}	荷兰滚模态阻尼比	L_F	升力, N
ω_{nd}	荷兰滚模态频率, rad/s	L_M	滚转力矩, N·m
T_r	滚转模态时间常数, 稳定模态为正, s	M_M	俯仰力矩, N·m
T_s	螺旋模态时间常数, 稳定模态为正, s	N_M	偏航力矩, N·m
$\omega_{\dot{\phi}}$	(滚转角速率/滚转操纵输入) 传递函数分子二项式的无阻尼自然频率, rad/s	p	滚转角速率, °/s
$\zeta_{\dot{\phi}}$	(滚转角速率/滚转操纵输入) 传递函数分子二项式的阻尼	q	俯仰角速率, °/s
X_e	驾驶杆(柱)前后操纵位移, mm	r	偏航角速率, °/s
X_a	驾驶杆(盘)左右操纵位移	α	迎角, °
X_r	脚蹬操纵位移, mm	β	侧滑角, °
u	速度在机体系 x 轴的分量, m/s	ϕ	倾斜角(滚转角), °
w	速度在机体系 z 轴的分量, m/s	ϑ	俯仰角, °
v	速度在机体系 y 轴的分量, m/s	ψ	偏航角, °
μ	航迹滚转角(速度矢量), °	n_x	前向过载, g
γ	航迹倾斜角, °	$n_y(N_y)$	侧向过载, g
χ	航迹偏转角(航迹方位角), °	$n_z(N_z)$	法向过载, g
a	副翼偏度, °	m	飞机质量, kg
r	方向舵偏度, °	g	重力加速度, m/s ²
e	升降舵偏度, °	H	高度, m
Lon	经度, °	Lat	纬度, °
I_x	飞机关于 x 轴的转动惯量	V	空速, m/s
I_y	飞机关于 y 轴的转动惯量	Ma	马赫数

I_z	飞机关于 z 轴的转动惯量	$VIAS$	指示空速, m/s
I_{xz}	飞机关于 y 轴的惯性积	VS	垂直速度, m/s
I_{xy}	飞机关于 z 轴的惯性积	V_k	航迹速度, m/s
I_{yz}	飞机关于 x 轴的惯性积	THS	水平安定面, °
$OX_gY_gZ_g$	地面坐标系	S_g	地面坐标系
$O_bX_bY_bZ_b$	机体坐标系	S_b	机体坐标系
$OX_wY_wZ_w$	气流坐标系	S_w	气流坐标系
$OX_aY_aZ_a$	半机体坐标系	S_a	半机体坐标系
$OX_sY_sZ_s$	稳定坐标系	S_s	稳定坐标系
$OX_kY_kZ_k$	航迹坐标系	S_k	航迹坐标系
$R(t)$	可靠度	$F(t)$	不可靠度
$\lambda(t)$	失效率	$\mu(t)$	修复率
$f(t)$	软件失效时间的概率密度	$N(t)$	软件累计失效数
$\mu(t)$	失效均值函数	$\pi(t)$	软件失效强度
Cr	危害度	h, fh	飞行小时