



高等学校教材

Textbook for Higher Education

航空武器系统 分析导论

★ 张安 编著



★ 西北工业大学出版社

★责任编辑/王夏林

★封面设计/测 泓



航空武器系统

分析导论

ISBN 7-5612-1045-0



9 787561 210451 >

ISBN 7-5612-1045-0/TJ·29(课)

定价: 16.00元

TJ
高等学校教材

航空武器系统分析导论

张安 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书介绍了航空武器系统分析的基本原理和方法,主要内容有:航空武器系统误差分析、航空武器系统射击效率指标、航空武器系统的可靠性分析、航空武器系统效能与费效比分析。本书是航空火力控制与武器作战效能分析专业本科生的教材。本教材与专业基础课有较好的衔接,便于自学。因此,也可供从事航空武器火控系统分析工作的工程技术人员作参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

航空武器系统分析导论/张安编著. —西安: 西北工业大学出版社, 2001.8
ISBN 7-5612-1045-0

I. 航... II. 张... III. 航空兵器-系统分析 IV. TJ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 036780 号

出版发行: 西北工业大学出版社

通信地址: 西安市友谊西路 127 号 邮编: 710072 电话: 029-8493844

网 址: <http://www.nwpup.com>

印刷者: 咸阳市天元印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092mm 1/16

印 张: 12.375

字 数: 300 千字

版 次: 2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 1~1 500 册

定 价: 16.00 元

前 言

随着当今航空武器控制技术的发展,航空武器系统分析也逐步发展和完善起来。《航空武器系统分析导论》一书是为“探测制导与控制技术”、“航空火力控制”、“武器作战效能分析”等专业本科生编写的专业教材。本书着眼于第三代作战飞机的航空武器系统,重点突出了航空制导武器系统分析。主要内容是航空武器系统误差分析、射击效率指标、可靠性分析以及武器系统效能与费效比分析的基本理论、原理和方法。本书是在本专业1988年出版的《航空武器系统分析》教材基础上,融进了编者多年来教学的经验,并尽可能多地吸收了近年来学术和科研的最新成果编写的。作者力图使本书内容的系统性、知识的深广度以及学术水平都有很大提高。

本书是“探测制导与控制技术”专业本科四年级的教材,也可供从事航空武器系统分析工作的工程技术人员参考。作为专业课教材应该和专业基础课有很好的衔接。本书除需要航空综合火力控制原理的基本知识外,主要的基础知识是“概率论与数理统计”。全书共有四章。第一章航空武器系统的误差分析,主要介绍误差的基本概念、性质和处理方法;着重介绍了函数误差、误差的合成和武器系统误差控制。第二章航空武器系统射击效率指标,主要内容是射击效率指标确定,非制导武器和制导武器杀伤概率计算。第三章航空武器系统可靠性分析,主要内容是可靠性的基本概念及分析方法,并讨论了考虑可靠性时射击效率计算。第四章航空武器系统效能与费效比分析,主要介绍武器系统效能的基本概念,系统效能和费用-效能分析。

本书由张安编写。周志刚教授审阅了全书并提出了许多宝贵意见和建议,在编写过程中得到了张滋烈教授和朱培申教授的大力帮助,在此向他们表示衷心的感谢。

由于水平所限,书中难免有疏漏和错误之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2001年6月

目 录

绪 论	1
第一章 航空武器系统误差分析	4
§ 1-1 误差的基本概念	4
§ 1-2 误差的基本性质和处理	9
§ 1-3 函数误差	35
§ 1-4 误差的合成	56
§ 1-5 航空武器系统的误差控制	60
习题	64
第二章 航空武器系统射击效率分析	66
§ 2-1 射击效率指标的确定	66
§ 2-2 武器杀伤目标规律	69
§ 2-3 武器系统射击准确性分析	78
§ 2-4 单发命中概率计算	89
§ 2-5 多发武器射击的命中概率	94
§ 2-6 坐标杀伤规律的单发武器杀伤概率计算	97
§ 2-7 多发武器杀伤概率计算	100
习题	107
第三章 航空武器系统可靠性分析	109
§ 3-1 可靠性的基本概念	109
§ 3-2 可靠性的数学描述	111
§ 3-3 武器系统可靠性预测	119
§ 3-4 可靠度分配	130
§ 3-5 可靠性设计	136
§ 3-6 可靠性实验	147
§ 3-7 在考虑系统可靠性时对航空武器系统效率的评定	156
习题	157

第四章 航空武器系统作战效能与费/效比分析	159
§ 4-1 概述	159
§ 4-2 航空武器系统作战效能分析基本概念	161
§ 4-3 系统效能	170
§ 4-4 效能分析方法	173
§ 4-5 费用-效能分析	179
附录	184
附录 1 标准正态分布表	184
附录 2 一阶汉格尔函数表	186
附录 3 函数 $J_e(K, \tau) = \int_0^{\tau} e^{-t} J_0(K, t) dt$ 数值表	186
附录 4 相关射击毁伤概率计算用表	187
附录 5 $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 函数表	188
附录 6 用于计算相关射击时目标杀伤概率计算的系数 k	191
参考文献	192

绪 论

系统分析 (System Analysis) 始于 20 世纪 40 年代初“运筹学”活动, 是随着“运筹学”的发展, 人们将数学方法与现代工程方法相结合而形成的一种科学分析方法。系统分析和运筹学在研究方法以及整个研究程序方面是相同的。系统分析可以为决策提供各种定量分析数据, 使决策者在决策之前做到心中有数, 能对系统的优劣进行比较, 权衡利弊, 科学地决策。系统分析对于决策的质量和决策的正确机会起到很大的作用。无论为设计 (发展) 新系统, 还是改造现有系统, 都具有重要意义。

系统分析的要领有多种观点和多种说法^[4]。基本含义是: 系统分析是一种辅助决策的有效方法。它是由系统分析工作者按照系统思想、观点和理论, 用科学的分析方法和工具, 在确定目标和准则下, 对系统进行全面综合分析研究, 提供定量和可用的数据, 寻求可供选择的方案, 进行科学决策。概括地说, “系统分析”概念就是: 按照系统观念, 用科学的分析方法, 对确定目标的系统进行综合分析 with 评价, 寻求最佳可行方案, 为决策提供定量和可用的依据, 帮助决策者进行科学的决策。

系统分析是建立系统或改造系统过程中很重要的环节, 也是一项很复杂的工作, 从系统调查开始, 研究各种因素和事物, 通过观察、思考、分析、判断确定对系统的输入。经过转换、处理或研究、试验, 求得系统的输出。在进行系统分析的过程中, 可能涉及到各种因素, 包括确定性因素和不确定性因素。这就需要采取合理的方法, 适当的措施, 进行有效的系统分析与处理。系统分析过程中, 要妥善处理各种因素之间的关系, 正确解决各种矛盾。进行有效的系统分析需要遵循一定的规则。

系统分析与系统设计过程中应注意下列基本原则:

1. 外部条件与内部条件相结合

构成一个系统, 不仅受到内部因素的影响, 也受到外部条件的制约。例如, 设计一个航空武器系统, 不仅受到航空武器系统各子系统本身技术基础、研究力量、试验条件、技术设备、元件、材料、资源条件、试制手段、检测设备等的限制, 而且还受到许多外部条件诸如使用部队、飞行员操作、战斗环境、自然气候、目标特性、敌人对策等的影响。在进行系统分析及系统设计时必须把所有能考虑到的内部和外部有关因素结合起来, 进行综合分析与研究。

2. 当前和长远目标相结合

设计系统、选择方案不但要考虑当前状况和当前技术水平, 以及近期能达到的奋斗目标

标,同时必须科学地预测,估计到发展速度,经过一定时期的努力将来能够达到水平,照顾到长远的利益和奋斗目标。尤其是航空武器系统分析与设计,要充分注意到被攻击目标的发展,要跟踪国际新技术的发展。同时要考虑到技术的更新与换代。如果构造的系统方案当前是可行的,对国民经济是有利的,但方案本身的生命周期不长,很快就会被淘汰;对国家投资不利,这样的方案是不可取的,或者构造的系统方案具有足够的先进性,但是目前技术上难以实现,或虽能实现,可是国家投资过大,会导致难以承受的困难,这种方案也是不可取的。

3. 整体效益与局部效益相结合

构造或设计系统,应以整体效益为目标,局部服从整体,这是前提。一个系统由许多子系统(亚子系统)组成,如果每一个子系统的效益是好的,有机结合起来使整个系统的总体效益也是好的,这当然最优。但是实践中常常不易达到这种程度,很多情况下,一个大系统中,有些子系统从局部看是经济的、合理的、先进的,但从全系统看,它便是不合理的、不经济的,显然,这种方案是不可取的。在某些情况下,从局部看来子系统是落后的、不合理的、不经济的,但构成大系统后,整个系统是先进的,从全局看是合理的、经济的,那么这种系统是可取的。系统分析时,应从整个大系统全局出发,寻求使整个系统达到最经济、最合理、效益最佳。

4. 定量分析与定性分析相结合

系统分析的特点之一就是要求定量分析,尽可能将各种因素进行量化。但是,实际工作中有很多因素很难量化,常常不能完全避免要采用一些定性分析方法。因此在系统分析时,对不能量化的指标和因素,如人的精神因素、政策的影响、环境的变迁等因素,可通过模糊处理,采用定性与定量相结合进行评估。但是无论定性还是定量分析,都要制定正确的准则,用这些明确的准则作标准,对各种因素进行一致性评定。

航空武器系统分析和一般系统分析的概念相同,是从武器系统整体出发,利用系统观点、思想,通过科学的分析研究,寻求满足战术技术要求或武器系统总体性能指标的最佳方案,为决策者制定决策提供定量依据,武器系统分析应遵循前述基本原则。

航空武器系统分析在各个不同阶段,分析的内容有所区别,重点有所不同,系统分析的深度、广度有所区别。为了发展新武器系统,在系统设计之前进行系统分析,应着重于目标分析、方案比较、指标确定等,寻求满足战术要求的最优方案;现有武器系统装备之前进行系统分析,应着重于研究其战斗使用方案,进行射击效率分析、命中准确性分析、全系统的作战效能分析、费效分析等,寻求武器系统的最佳效费比;制定生产、发展计划之前应着重于技术要求、资源、环境、条件及技术基础等因素的分析。尽管如此,不同阶段要求决策的问题不同,分析的具体内容、重点有所差别,但纵观航空武器系统分析各种情况下需要决策问题的性质,系统分析的基本要素可以概括为以下几个方面。

(1) 目标:航空武器系统分析的目标有两重含义:一是对系统目的的具体化,另一含义是该系统用以对付(攻击)的目标分析。前者是要明确体现系统分析、建立和发展系统的目的。后者是要对具体目标进行具体分析。有时两者可以结合起来。

(2) 方案:无论是发展一种新型武器系统,还是引进一种武器系统,或制定一个规划或

计划，都需要对多种方案进行分析、评比、选择，寻求一种可供决策者参考的优选方案，有充分的材料、条件，有充分的计算、分析作基础。

(3) 指标：指标是描述目标、体现总目的的具体内容和标志。系统分析的总目的是否达到，目标是否实现，都必须通过具体指标反映并描述出来。因此要选择恰当而合适的技术指标来衡量。指标可以包括技术性能、费用、效益、时间等有价值、可量度的具体内容。指标不能一般化，最好要量化，便于计算对比。不同的指标的相对值和分析比较是决定方案优劣的重要依据，因此指标的分析、选择是系统分析中的一个重要环节。

(4) 准则：准则是评价系统的标准，衡量方案优劣的尺度。标准必须具有明确性、可比性、敏感性。明确性是指标准的概念要清楚、明确、具体并尽量统一，即具有惟一性，不能模棱两可，含糊不清；可比性是指标准是可以计量的，可用数值表达，可以计算的，通过分析可以量化，便于衡量；敏感性是指标准对输入的反应具有较高的灵敏度，改变输入可以得到较准确的输出反应。敏感性对确定优先顺序，分清主次具有重要意义。在航空武器系统分析中用作系统评价准则的有：攻击能力、机动能力、抗干扰能力以及费效比、可用性、武器系统的生命周期/性能比、生命周期/费用比等。

(5) 模型：模型是对系统的最本质的描述。利用若干参数或因素描述系统各环节的关系是最能体现系统本质的最简洁的形式。模型也是对系统进行定量分析、计算及定性分析的基础。通过分析构造描述系统特性的模型，也是系统分析最基本最有效的方法。

模型所给出的信息必须能够描述物理和数学方面已经公式化的规则。模型必须反映实际但又不是太复杂的实体系统的全部表达，它所表达的因素只是实体系统的主要因素。模型比实体系统简洁，更容易操作处理。通过对模型的研究，能迅速抓住系统的本质特征。通过分析模型可以很快看出各种因素对系统的影响，可以凭借模型有效地求得系统设计参数及各参数之间的制约关系。

(6) 结果和建议：通过方案分析、计算、推理、判断和评价，对系统方案按照优先顺序排序，对各种因素的影响和作用作出明确的结论。整理结果，提出建议，供决策者综合考虑，最终做出正确的有根据的决策。系统分析提供的结果和结论，仅仅是技术研究成果。决策者在决策时还要考虑更广泛的因素，诸如政治、经济、人力和社会等等。所以，从广义上讲，系统分析的优化（或寻优）所得结果仍是有一定局限性的。

第一章 航空武器系统误差分析

航空武器系统是由航空武器控制系统、航空机载武器弹丸(如航炮、航箭、航弹、导弹等)和悬挂/发射装置组成的一个复杂系统,用以完成航空武器控制的不同战术技术要求。其目的是为了有效地杀伤或击毁目标并有效地保存自己。为了达到这一目的,航空武器系统必须对目标进行捕获、跟踪,有效地获取和利用目标及本机的有关信息,正确地计算武器发射的位置或发射条件,控制武器到正确的位置,有效地对武器进行选择与管理,最终不失时机地发射武器,使武器命中或杀伤目标。在空战中敌我双方都有很强的机动性和随机性,攻击的时机十分短暂;敌我双方都力求“首先杀伤对方。”在对地攻击时,为了摧毁目标,保全自己,也十分强调“一次攻击成功”。因此航空武器系统的精度如何,是一个至关重要的问题,也是衡量航空武器系统战术、技术性能优劣的重要指标之一。为了提高航空武器系统的精度,必须对其各个子系统以及整个总体系统的误差进行科学的分析。本章的目的是系统地介绍误差分析的一般理论以及航空武器系统误差分析的有关方法。

§ 1-1 误差的基本概念

一、误差的定义

由于许多客观因素的影响,使得航空武器系统所计算得到的武器发射位置与正确的武器发射位置以及实际弹道点与理论计算弹道点之间存在有一定的偏差,这就导致了航空武器不能有效地命中目标。要完全消除这些偏差不是可能的。航空武器系统误差分析的目的,就是了解这些偏差产生的原因、大小及其特性,并采取一定的措施,使这些偏差尽可能减小,以满足工程设计的要求。为了对这些偏差进行系统的研究,必须对偏差下一个科学的定义。在工程和理论研究时,一般用误差来描述这种偏差。误差这个名词对我们来说并不陌生,但在各个不同的学科中,根据不同的研究对象和研究目的对误差的定义并不完全一致。下面采取的定义是一般误差理论中所采用的。

某量值的误差定义为:某量的给出值与客观真值之差。即:

$$\text{误差} = \text{给出值} - \text{真值} \quad (1-1)$$

给出值一般包括测量值、实验值、预置值、示值、计算的近似值等。

真值是在一定的条件下,某量效应所体现出来的客观值。在一般情况下真值是未知的,所以真值往往是相对的。有些情况下真值是可以知道的。真值已知的情况有如下几种。

(1) 理论真值 它是由一些公理所确定的值。如三角形的内角和为 180° 等,另外还有理

论设计值和理论公式表达式等。

(2) 计量学约定值 由国家或国际规定的计量单位值。如长度单位米的长度等于氪 86 原子的 $2P_{10}$ 原子和 $5P_{d_5}$ 能级之间跃迁辐射在真空中波长的 $1\,650\,763.73$ 倍。

(3) 相对真值 高一级精度的标准值可以作为低一级精度标准值的相对真值。在航空武器系统误差分析中往往采用相对真值。如利用理论火控公式计算出的武器发射位置或发射条件,可以作为实际中采用的简化火控工作式计算出的武器发射条件或发射位置的相对真值。

二、误差的表示

1. 绝对误差

公式(1-1)中给出的误差表示形式一般称为绝对误差。绝对误差表示方法有如下特点:

- (1) 绝对误差是名数,是有单位量纲的,其值的大小与所取的单位有关。
- (2) 绝对误差能反映出误差的大小和方向。
- (3) 绝对误差不能更确切地反映测量工作的精确程度。

【例 1】对航空武器系统进行误差分析时要对攻角传感器的数值进行测量,若对于 5° 攻角真值其测量值为 4.9° ,而对于 0.5° 攻角真值其测量值是 0.4° ,试问哪一种测量的精确度更高?

解 若利用绝对误差来描述测量的精度,由误差的定义有:

5° 攻角测量值的绝对误差 $= 4.9^\circ - 5.0^\circ = -0.1^\circ$, 0.5° 攻角测量值的绝对误差 $= 0.4^\circ - 0.5^\circ = -0.1^\circ$,从数值看两者的绝对误差是相等的,但是显然前者的测量精度比后者高,因为对前者测量 5° 才相差 0.1° ,而对后者测量 0.5° 就相差 0.1° 。

通过这个例子可以看出绝对误差并不能非常确切地反映出测量的精确程度,所以除了用绝对误差外,还常用相对误差来表示误差。

2. 相对误差

绝对误差与真值之比称为相对误差,即:

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \quad (1-2)$$

因为给出值与真值一般较接近,所以用绝对误差与给出值之比近似作为相对误差,即

$$\text{相对误差} \approx \frac{\text{绝对误差}}{\text{给出值}} \quad (1-3)$$

对于例 1 根据相对误差定义可得如下结果:

$$5^\circ \text{ 攻角测量值的相对误差} = \frac{4.9^\circ - 5^\circ}{5^\circ} = -2\%$$

$$0.5^\circ \text{ 攻角测量值的相对误差} = \frac{0.4^\circ - 0.5^\circ}{0.5^\circ} = -20\%$$

这说明利用相对误差可以更精确地描述测量的误差情况,这是因为相对误差不但与误差的大小有关,同时也与被测量的数值大小有关。相对误差表示方法有如下特点。

- (1) 相对误差是一个比值,其数值与被测后所取单位无关。
- (2) 相对误差能反映误差的大小与方向。
- (3) 相对误差更能确切反映测量工作的精确程度。

在误差分析理论中还有分贝误差、引入误差等其它的误差表示方法,由于它们在航空武器

系统误差分析中很少采用,这里不做介绍。

三、误差的分类

按误差的特点和性能,误差可分为系统误差、随机误差(有时也称为偶然误差)以及粗大误差三类。

1. 系统误差

定义 1 在同一条件下多次测量同一量时,误差的绝对值和符号保持恒定或条件改变时按某一确定规律变化的误差称为系统误差。

【例 2】 现代航空武器系统中,航空武器控制系统的火控计算都是由计算机来完成的。由于计算机字长的限制和实时性的要求,计算机中所用的火控公式是对理论火控公式进行简化而来的。这样计算出的武器发射位置或发射条件与其理论值之间存在有误差,这种误差称为原理误差。当攻击条件不变时,原理误差是可以计算出来的一个固定值。当攻击条件改变时,这一原理误差按一定规律变化。所以原理误差属于系统误差,它是航空武器系统误差分析中常见的,也是主要的系统误差之一。

系统误差可按下面方法分类。

(1) 按对误差掌握的程度分:

已定系统误差——误差的大小和方向已知。

未定系统误差——误差的大小和方向未知,但一般可以估计误差的变化范围。

(2) 按误差出现的规律分:

不变系统误差——误差的大小和方向为固定的。

可变系统误差——误差的大小和方向为变化的。按其变化规律又可分为线性、周期和复杂规律系统误差。

2. 随机误差

定义 2 在同一条件下,对某量进行测量时其绝对值和符号以不可预知的方式变化的误差称为随机误差。

【例 3】 在航空武器系统中,进行火控计算时,所用到的载机高度信息是由大气数据计算机(ADC)或无线电高度表测量计算得到的。由于在测量和计算时,存在着多种随机因素的影响,在同一条件下对同一目标高度进行测量和计算时,所得到的目标高度的数值是不同的,而这些数值与目标真实高度之间的误差是由多种随机因素造成的,其绝对值和符号不能事先确定,因此这种目标高度的测量和计算误差属于随机误差。

随机误差最本质的统计特性是,在同一条件下对同一量进行 n 次测量,随机误差的算术平均值随测量次数 n 的增大而趋于零,这就是随机误差的抵偿性。凡是具有以上特性的误差原则上可以按随机误差处理。但是要特别注意,并不是所有按随机方式变化的误差都是随机误差,而是要看这个按随机变化的误差是否具有抵偿性。

3. 粗大误差

定义 3 明显歪曲测量结果的误差称为粗大误差或粗差。

从定义可以看出这类误差的特点是明显歪曲测量结果,其产生的原因是测量时对错标记、读错或将测量结果错记等。含有粗大误差的结果称为坏值或异常值,在进行误差分析时,必须将这些误差去掉,即将异常值剔除。误差分析要估计的误差只是系统误差和随机误差。

四、一般误差与系统误差、随机误差的关系

为了便于对系统误差和随机误差的理解,了解一般误差(包括测量误差、计算误差以及火控系统输出误差等)与系统误差和随机误差的关系,下面从一个例子来说明。

【例4】若我们从同一型号的一批火控系统中抽取 n 个产品,在同一攻击条件下进行测试并认为测试误差为零。得到由这 n 个产品的实际计算的武器位置为 $W_1, W_2, \dots, W_n$ 。由于有各种因素的影响,这些数值是不完全相同的。若通过理论计算得到在该攻击条件下正确的武器位置为 W_0 ,于是可以得到火控系统的 n 个误差值为

$$\Delta W_i = W_i - W_0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-4)$$

这里 W_i 可以认为是服从某一概论分布的一个随机变量 W 的 n 次抽样值。 ΔW_i 也可以认为是服从某一概率分布的航空武器系统误差随机变量 ΔW 的 n 次抽样值。其中

$$\Delta W = W - W_0 \quad (1-5)$$

并以 $\Delta \bar{W}$ 表示 ΔW 的样本均值, $\hat{\sigma}_{\Delta W}$ 表示 ΔW 的样本均方差,那么由数理统计知识可得抽样次数 n 增加时, $\Delta \bar{W}$ 依概率收敛于 $E(\Delta W)$; $\hat{\sigma}_{\Delta W}$ 依概率收敛于 $\sigma_{\Delta W}$ 。即当 $n \rightarrow \infty$ 时有

$$\Delta \bar{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta W_i \rightarrow E(\Delta W) \quad (1-6)$$

$$\hat{\sigma}_{\Delta W} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta W_i - \Delta \bar{W})^2} \rightarrow \sigma_{\Delta W} \quad (1-7)$$

因此可以用 $\Delta \bar{W}$ 作为 $E(\Delta W)$ 的估计值, $\hat{\sigma}_{\Delta W}$ 作为 $\sigma_{\Delta W}$ 的估计值

下面我们来看一个航空武器系统误差与其随机误差和系统误差之间的关系。

因为
$$\Delta W = \Delta W - E(\Delta W) + E(\Delta W) = \Delta U + E(\Delta W) \quad (1-8)$$

其中
$$\Delta U = \Delta W - E(\Delta W)$$

这样
$$E(\Delta U) = E[\Delta W - E(\Delta W)] = 0 \quad (1-9)$$

即当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,随机变量 ΔU 的样本均值 $\Delta \bar{U}$ 有

$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\Delta W_i - E(\Delta W)] \rightarrow 0 \quad (1-10)$$

所以根据随机误差的抵偿性,我们把 ΔU 看成航空武器系统的随机误差,而 $E(\Delta W)$ 是确定的常数,可以看成是火控系统的系统误差。

由此例可以看出航空武器系统的误差可以分为随机误差和系统误差两部分。航空武器系统的误差大小等于随机误差和系统误差的代数和。其中系统误差等于航空武器系统误差的数学期望,而随机误差的均方差等于航空武器系统误差的均方差。这个例子并不失一般性,所以一般误差都有如下关系成立,即

$$\text{误差} = \text{随机误差} + \text{系统误差} \quad (1-11)$$

这就是说在一般误差中随机误差和系统误差是共存的,即在每一次测量值中都有它们的影响。在处理时,常常从两种误差对一般误差影响程度分为下面三种情况。

- (1) 系统误差远大于随机误差时,可忽略随机误差的影响,基本上按系统误差处理。
- (2) 系统误差很小时,或已经做过对系统误差的修正后,可按随机误差处理。
- (3) 两者程度都较大时,必须按不同的方法分别处理。

五、两种误差的转化

一般误差中系统误差和随机误差是共存的,有时很难将这两种误差严格区分开来,另外,这两类误差的性质在一定条件下是可以相互转化的。

【例 5】 在航空武器系统中存在着武器安装误差,如武器安装角度误差和武器安装高度误差。对于一批航空武器系统来说;由于安装技术水平的限制,每架飞机的安装位置不可能做到安全一致,因此对一批航空武器系统来说,武器安装误差是随机误差。但对某一架飞机来说,可以测量出武器的安装误差,它是一个确定的值,因此这时可以按系统误差来处理。

【例 6】 在一些老式瞄准具中不是直接测量高度而是用平均值来代替,这时引起的误差是系统误差。但是在现代航空武器系统中高度的信息是由高度传感器测出并由大气数据处理机进行数值处理计算得到的,由此产生的误差是随机误差。

总之系统误差和随机误差之间并不存在绝对的界限。在进行误差分析时要根据不同的对象和对误差源性质了解的程度以及分析实验的不同条件确定误差的性质并采取相应的处理方法。一般来说,可把某些掌握不到的具有复杂规律的系统误差当做随机误差处理,也往往把某些虽然可以掌握而过于复杂的系统误差当作随机误差处理。反之,随着人们对误差源及其变化规律的认识不断加深,往往有可能把以往认识不到而归于随机误差处理的某些误差的性质予以澄清,而明确为系统误差来处理。

六、精度的概念

精度是反映准确程度的量。“准确”这个词已经使用得很普遍很习惯了,例如钟表走得很准确,炮弹准确命中目标等。从误差分析的角度讲精度是反映给出值与真值接近程度的量,它是用误差来衡量的。误差大精度低;误差小精度高。由于误差分有系统误差和随机误差,所以精度也分为

- (1) 正确度 —— 反映系统误差的大小程度。
- (2) 精密度 —— 反映随机误差的大小程度。
- (3) 准确度 —— 反映系统误差和随机误差合成大小的程度。

由例 4 可以看出通常误差的数学期望就反映了正确度;误差的均方差反映了精密度。两者的合成就反映了准确度。

【例 7】 由图 1-1 所示的射击打靶结果,试分析子弹落在靶心周期三种情况的精度。

从图中可以看出,对于情况 A 弹着点散布中心距靶心较近,而弹着点的散布圆半径较大,这说明射击的系统误差小而随机误差大,即正确度高,精密度低。对于情况 B 弹着点散布中心距靶心较远;而弹着点散布圆半径较小,这说明射击的系统误差大而随机误差小,即正确度低,精密度高。对于情况 C 弹着点散布中心距靶心接近,弹着点散布半径也较小,这说明射击的系统误差和随机误差都很小,即正确度和精密度都较高,所以情况 C 的精度较 A, B 两种情况高。

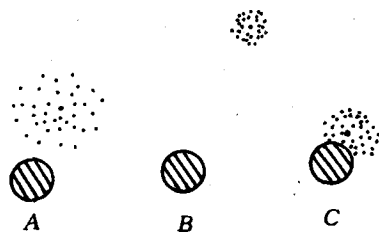


图 1-1

从例 7 可以看出对具体的问题,正确度高精密度不一定高,反之亦然。当准确度高时正确

度和精密度都高。对于测量问题,为了保证测量数据可靠,一般都要求测量的准确度高。对于一个总体误差分析与综合时,一般也要求准确度高,但对于准确度和精密度有具体的要求,如正确度与精密度之比到底是多大,要根据具体情况和具体要求来确定。在航空武器系统问题的误差研究时就是如此。

七、误差分析的任务与目的

精度已成为各种精密仪器设备的重要技术指标之一,对于航空武器系统来说也是如此。这样误差分析是保证产品质量的一个必不可少的手段和方法。

对某一实际系统进行误差分析,主要有下面几个步骤:

(1) 首先要研究各种误差产生的来源,分析误差源的统计特性,如各个误差源的数学期望和均方差等,并按误差的性质对误差源进行科学的分类,确定哪些是系统误差,哪些是随机误差。

(2) 利用误差理论方法,分别对系统误差和随机误差进行分析处理。研究误差的传递、误差的转化、误差的消除和累积。

(3) 对分析计算后得到的各种误差,按不同的方法进行合成和分配以求出系统的总误差。

误差分析主要有两方面的任务:

1. 误差的分配

根据系统总体精度的要求,合理地确定各个子系统以及各个主要部件的精度要求和各个部件装配调整中技术精度的要求。

2. 误差的综合

根据现有的技术水平和工艺条件,首先确定各个子系统的精度,再根据误差合成得到总系统的精度。

这两方面的任务是相辅相成的。对现有产品的误差综合,了解各个误差源的特性以及对总精度的影响,可以为新产品的设计和老产品的改造,即在设计时对总精度提出合理的要求以及合理的分配误差,打下一个很好的理论基础。精确的误差综合的目的在于合理的误差分配。一般在产品的设计生产过程中,这两项工作反复循环进行,直至产品精度满足要求。

必须指出,对某一系统进行误差分析并不是以所有的误差越小越好为原则。由于完全消除误差是不可能的,误差越小就越不经济,甚至由于误差过小精度过高使得制造和测试成为不可能。因此,对某一系统进行误差分析的根本目的是利用实际可行的方法和经济简便的手段使系统的精度达到要求。

§ 1-2 误差的基本性质和处理

上一节给出了误差的定义,并说明了一般误差与系统误差、随机误差之间的关系以及误差分析的任务和目的。对航空武器系统的误差分析来说,其首要的任务是对与系统有关的误差源进行分析研究,掌握误差源的特性,对不同性质的误差源采取不同的处理方法。因此,必须对误差的基本性质与一般的处理方法有所了解,本节的目的就是如此。为了达到这一目的,下面先以一个例子来说明,一般航空武器系统误差分析中所遇到的问题,并对这些问题有一个概貌的了解。

【例 8】 在航空武器系统中,计算武器的正确发射位置和发射条件,是一个很重要的内容,这就是一般常说的航空武器计算。由于航空武器计算是利用飞机本身的一些信息如飞机的姿态、高度、速度、攻角、侧滑角以及角速度等及有关目标、弹道、武器的信息来计算武器的正确发射位置和发射条件的,所以上面所提到的航空武器计算的输入信息,往往是通过各种传感器、测量机构以及测量仪表和有关的计算机输入给航空武器计算机的。又因为传感器、测量机构以及测量仪表总存在有一定的误差,这些误差可能是由于生产加工水平或飞机在空中的各种随机干扰所造成的。所以这些航空武器计算的输入信息总是有误差的。航空武器系统分析的第一步就是要确定这些误差的性质,为以后航空武器系统总体误差分析打下基础。以攻角传感器为例,由于生产加工水平的限制和飞机在空中飞行时所受到的气流条件的影响。由攻角传感器输入给航空武器计算机的实际攻角的数值与理论真值总有一定的差别,即存在有传感器的误差。一般我们首先要对攻角传感器进行测量,然后分析处理测量数据,以便确定传感器真实误差的性质,并利用这一误差的性质将传感器作为航空武器系统的误差源,对火控系统进行分析。下面来具体分析攻角传感器的误差。

由于在攻角传感器的生产过程中,受到机械加工水平的限制,所以对生产的一批传感器来说不可能做到完全一样,总存在着一定的生产加工误差,在攻角传感器安装到飞机上时,由于装配水平的限制不可能安装的位置完全一致,所以存在一定的安装误差。在飞机飞行过程中,由于受到气流变化以及各种因素的影响,使得每个攻角传感器所测量的攻角数据相对其真值的偏差也是不一样的。就是说每个攻角传感器的误差都不一样,这一误差对于一批攻角传感器来说是服从某一概论分布的误差。我们的目的是利用数理统计的方法得到这一误差的统计特征,通常在航空武器火控系统误差分析中,我们所关心的是该误差的数学期望和均方差。为了达到这一目的,首先要对一批攻角传感器进行测量,由于测量和记录设备也会有一定的误差,因此,所测量得到的攻角传感器数值中就会包含两大部分误差。一部分是传感器的真实误差,这一部分误差是航空武器火控系统误差分析的所要了解和掌握的。另一部分是测量误差,这一部分误差的存在会歪曲传感器真实误差。所以必须将测量误差尽量地消除或减小。

1. 传感器的真实误差

传感器的真实误差是指传感器实际值与理论值之间的误差,即除去测量误差后的传感器误差。从一批传感器中任意取出 n 个进行分析。

设: α_0 为攻角的理论真值。

α_i 为第 i 个传感器的实际真实值, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

$\bar{\alpha}$ 为 n 个传感器真实值的样本均值

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i$$

$\Delta\alpha_{0i}$ 为第 i 个传感器的真实误差。

这样第 i 个传感器的真实误差可表示为

$$\Delta\alpha_{0i} = \alpha_i - \alpha_0 = (\alpha_i - \bar{\alpha}) + (\bar{\alpha} - \alpha_0) = \delta_{0i} + \epsilon_0 \quad (1-12)$$

式中 $\delta_{0i} = \alpha_i - \bar{\alpha}$ 是传感器的真实随机误差。事实上,这是因为每个传感器的真实值的大小不能事先确定,所以这一部分误差的变化是随机的,但其样本均值为零。即

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha}) = 0 \quad (1-13)$$