

现代电子工程

第三册

《国防电子工程》编辑部 编

内 容 简 介

《现代电子工程》是一套电子工程的中级科普读物。全面系统地介绍现代电子工程各个领域的基本知识，深入浅出，通俗易懂。本书为第三册，包括第十八章至第二十五章，即军事电子系统工程概述；防空系统；战略预警系统；遥控与制导系统；外弹道测量系统；卫星飞船跟踪系统；核爆炸效应及其对电子设备的影响；电子设备可靠性。

本书适于具有高中文化程度的电子工程爱好者、科技工作者、技术管理人员和大专院校师生阅读。

现 代 电 子 工 程

第三册

《国防电子工程》编辑部 编

责任编辑 陈 忠

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年7月第 一 版	开本：787×1092 1/32
1984年7月第一次印刷	印张：16 7/8
印数：0001—7,200	字数：385,000

统一书号：15031·573

本社书号：3568·15—7

定 价：2.10 元

目 录

第十八章 军事电子系统工程概述冯世璋(1)

§ 18-1 系统与系统工程..... 1

一、概述..... 1

二、军事电子系统工程..... 4

三、武器控制系统..... 6

四、军事指挥系统.....10

五、全军指挥、控制、通信系统.....13

§ 18-2 系统工程理论.....16

一、规划论.....16

二、博弈论.....19

三、其他理论简介.....23

§ 18-3 系统工程技术.....24

一、仿真技术.....25

二、计划协调技术.....28

第十九章 防空系统张锦泉 肖俊远(33)

§ 19-1 概述.....33

一、防空系统的任务和工作过程.....34

二、空中突袭兵器发展概况.....37

§ 19-2 防空雷达与信息的传送.....41

一、雷达在防空系统中的作用与雷达网布局.....41

二、防空系统中所用的雷达.....42

三、防空信息的传送.....49

§ 19-3 防空指挥所.....55

一、指挥所的功能.....55

二、自动化指挥所的主要电子设备.....57

§ 19-4 国外主要的防空系统·····	70
一、美国防空系统概况·····	70
二、苏联防空系统概况·····	78
三、日本的防空系统·····	81
§ 19-5 防空系统的发展动向·····	87
第二十章 战略预警系统·····	童勤勋(98)
§ 20-1 概述·····	98
一、战略预警系统及其任务·····	98
二、对战略预警系统的要求·····	101
§ 20-2 战略预警系统的组成·····	104
一、战略预警系统的设备·····	105
二、战略预警系统中各种探测设备的应用原则及相互关系·····	112
§ 20-3 美国的战略预警系统·····	114
一、美国弹道导弹预警系统·····	116
二、美国空间探测和跟踪系统·····	129
三、美国战略预警系统的指挥中心和通信系统·····	133
§ 20-4 苏联的战略预警系统·····	135
第二十一章 遥控与制导系统·····	周联楷 宁兰忠(143)
§ 21-1 无线电遥控·····	143
一、无线电遥控系统·····	144
二、无线电遥控系统的应用·····	150
§ 21-2 无线电制导·····	164
一、无线电制导的基本原理·····	165
二、无线电制导系统的应用·····	175
§ 21-3 抗干扰与可靠性·····	187
第二十二章 外弹道测量系统·····	侯志崑(191)
§ 22-1 概述·····	191
§ 22-2 弹道导弹与外弹道测量·····	193
一、弹道导弹·····	193
二、弹道导弹的精度鉴定与外弹道测量·····	195

三、弹道导弹实验靶场的有关设备	197
四、外弹道测量的任务和特点	205
五、外弹道测量的测量元素	206
六、外弹道测量系统的测量体制	209
§ 22-3 连续波外弹道测量的一般原理	211
一、无线电测速定位的技术基础	211
二、连续波雷达与单脉冲雷达的特点	212
三、连续波干涉仪的工作原理	215
四、连续波干涉仪测量距离、速度、角度的原理	218
五、连续波干涉仪的设备组成	221
六、连续波干涉仪测量的误差源	222
七、连续波干涉仪定位的模糊度	223
§ 22-4 连续波雷达测量信号	226
一、连续波雷达测量信号的选择依据	226
二、载波频率选择	228
三、载波功率选择	231
四、侧音信号	234
五、扫频信号	237
六、伪随机编码信号	238
七、混合信号	245
§ 22-5 连续波雷达的测速定位设备	246
一、时统分机	247
二、发信机	248
三、应答机	253
四、接收机	255
五、终端机	270
六、基线传输	283
七、定位校零	287
§ 22-6 连续波雷达的跟踪伺服设备	289
一、自动跟踪	289
二、同步跟踪	303

三、手动跟踪	309
§ 22-7 连续波雷达的其他问题	311
一、系统可靠性	311
二、电波传播对外测的影响	312
三、大地测量	315
四、精度分析和数据处理	318
第二十三章 卫星飞船跟踪系统 黄金华 郭思恒(324)	
§ 23-1 卫星飞船的发射、运行与星船跟踪系统的作用	324
一、卫星飞船的发射与运行	324
二、卫星飞船跟踪系统的作用	329
§ 23-2 卫星飞船跟踪系统的特点与主要战术技术指标	332
一、卫星飞船跟踪系统的特点	332
二、卫星飞船跟踪系统的主要战术技术指标	335
§ 23-3 几种卫星飞船跟踪系统的组成与简要工作原理	342
一、单脉冲精密跟踪雷达	343
二、干涉仪比相测角系统	345
三、多卜勒测速系统	348
四、距离和距离变化率跟踪系统	349
§ 23-4 统一载波跟踪系统	351
一、设备组成与系统工作原理	352
二、发射机	355
三、接收机	357
四、测距机	361
五、测速机	366
六、天线与测角设备	370
七、数据录取和记录设备	375
八、应答机	375
§ 23-5 卫星飞船跟踪系统的发展	376
第二十四章 核爆炸效应及其对电	
子设备的影响 周璧华(382)	
§ 24-1 概述	382

一、核武器和核爆炸	382
二、核武器爆炸效应	384
§ 24-2 冲击波及其对电子设备的影响	387
一、冲击波的形成与特性及其对物体的破坏原理	387
二、冲击波参数的某些参考数据	390
三、冲击波对电子设备的影响	398
四、防护措施	400
§ 24-3 热辐射及其对电子设备的影响	401
一、热辐射的形成与特性及其对物体的作用	401
二、热辐射的某些参考数据	403
三、热辐射对电子设备的影响	407
四、防护措施	408
§ 24-4 核辐射及其对电子设备的影响	409
一、核辐射的形成及其特性	409
二、核辐射的某些参考数据	411
三、核辐射对电子系统的影响	412
四、核辐射环境的实验室模拟	428
五、电子设备抗核辐射加固措施	432
§ 24-5 核电磁脉冲及其对电子设备的影响	443
一、核电磁脉冲的产生机理	443
二、核电磁脉冲的特性	448
三、核电磁脉冲对电子系统的影响	457
四、核电磁脉冲环境的模拟	465
五、电子系统抗核电磁脉冲的加固措施	471
六、提高室内电子设备生存能力的工程防护	472
§ 24-6 核爆炸所产生的电离效应及其对雷达和通信的影响	479
§ 24-7 关于抗核爆炸各种效应的平衡加固问题	484
第二十五章 电子设备可靠性	王尔镛(486)
§ 25-1 概述	486
§ 25-2 可靠性基础知识	493

一、可靠性指标	493
二、可靠性模型	503
三、可靠性试验	508
§ 25-3 元器件可靠性	514
§ 25-4 整机可靠性	519
§ 25-5 系统可靠度	524

第十八章 军事电子系统工程概述

§ 18-1 系统与系统工程

一、概 述

“系统”这个词现在应用得很普遍，而且也为大家所熟悉。它通常是指由相互作用、相互依赖的若干部分结合而成具有特定功能的有机整体。在一个系统中，各部分都有它自己的功能，但是各个部分的功能在系统中是有机地协调工作，使系统获得一种新的更完整的或者更高级的功能。系统的总功能与各部分功能相比，具有质的变化。系统有大有小，组成系统的各部分可能本身就是一个系统，那么这个部分对于系统来说就称为分系统或者子系统。系统常常又是一个更大系统的协调组成部分；因此，系统是一种描述事物的概念，它不受物理界限的限制。系统有自然界存在的，也有人们创造的。譬如，消化系统就是自然系统的一个例子。口腔接收和破碎食物，食道传送食物，胃消化食物，肠吸收营养并排出糟粕，各部分各司其职，有机地在一起协调工作，完成人的消化功能。任何一部分低效或者亢进都会造成该系统的紊乱。因此，考察一个系统中各部分或各系统的功能，不能光凭它们本身的功能来评价，而主要从它们与系统之间的协调性和它们相互之间的协调性来判断，消化系统只是人体系统的一个组成部分，它必须和神经系统、血液循环系统等协调工作，并受大脑神经中枢的控制。如果中枢神经对消化系统

的控制失灵，或消化系统与循环系统配合失调，都会造成消化系统严重故障。所以，在一个系统中，各部分之间，各部分与系统之间存在着互相依赖、互相作用的依存关系。

还有一类系统是人造的。大家知道，都江堰可以说是二千年前建立的著名水利系统；进入近代以后，人们所创造的系统就不胜枚举了。例如，动力系统的重点是解决怎样把燃料中能量最有效地变换成电能，最经济地输送到工厂、农村。冶金系统的重点是解决怎样把矿石中金属材料最有效地提取出来，变成各种成材，提供给厂矿企业。国家或企业里的行政系统，很重要的工作是最有效地利用人力资源。广播系统的重点是怎样把图象、声音等信息最有效地传到千家万户。综合上面所列举的一些例子，使我们认识到尽管各种系统用途不一，千差万别，但是人们创造建设一个系统，其目的不外是要实现最优利用能源、材料、人力或信息这样一种综合功能。一个大型复杂的系统常常不仅要求实现一种单一的功能，而且要求实现多种综合功能。例如，一个生产企业系统要求实现最低的燃料、材料、人力和资金消耗，最高的产品数量、质量、产值和利润。这就是说要最优综合利用能源、材料和人力。人类在长期的生产活动中，已经自觉或不自觉地认识到这一点，把进入生产过程或生产管理活动中各种基本因素和数据，如温度、压力、材料的品种数量、电力的消耗、劳动工时、价格等，都视为构成生产或生产活动的信息。在现代化的企业里，要有效地管理企业、组织生产，就要把生产流程和企业管理中各种信息充分搜集和利用起来，通过信息的最佳处理和控制来实现生产流程和企业管理的最佳化。信息不仅存在于企业活动里，而且也广泛存在于人类社会活动的各个方面，故有人认为我们正在进入一个“信息化”的社会。

建设一个系统，从整体上来说就是实现“最优化”的问题。在现代化、自动化的系统里，系统中各部分动作的协调和系统输出的最优化，愈来愈依赖于信息处理和控制在最优化。信息这一因素，在系统中日益起着关键性的作用。

系统工程可以是泛指人工建造的系统，正如人们常把都江堰水利工程称作系统工程一样。但是，从系统工程学奠基以来，系统工程就有了一定的技术范畴，指的是那些运用系统工程学和系统工程方法所建立的人造系统。这样的系统，通常具有下列特征。

- (1) 大型而复杂，在地区上又常是分散的；
- (2) 输入是多信息且常是随机的，有一些系统是竞争性的，即双方或多方处于斗争中；
- (3) 输出常是多个的，负荷是不固定的；
- (4) 多是半自动化的，即用计算机实行信息处理，人进行干预判断并具有人-机交互能力。

显然，诸如都江堰工程并不具有上述特征，因而不属于系统工程；一般说来，具有信息处理能力的系统才属于系统工程。

近些年来，应用系统工程学研究社会活动现象日趋繁多，例如经济活动、生态平衡等，亦称系统工程，而且正在成为系统工程的重要方面，即所谓社会系统工程学。

系统工程是一门新兴的应用科学。第二次世界大战期间，当时的大规模激烈战争行动，要求用最新的技术和最短的时间设计新的武器系统，并能有效地在战场中使用，过去的传统方法就显得不适应了，必须系统地研究和解决武器系统的发展问题，在这一方面找到了一些方法，产生了系统工程的概念。战后出现的电子计算机，开始只是作为计算工具而已；后来，当它进入了系统这个领域，计算机的信息处理

和实时控制的优越功能使系统的技术面貌产生了深刻的变化，为系统最优化提供了重要的基础。进入五十年代以后，大型而复杂的武器系统，无论是设计方案、计划协调，还是投入运行，都必须从系统整体上去考虑。这样，就产生了系统工程和系统工程方法，而且信息化的今天，愈来愈要求对信息处理实现最佳选择。运筹学、信息论、控制论和其他系统理论，在系统工程中得到日益重要的应用，形成系统工程的理论基础。这样，六十年代初期就形成了一门独立的学科即系统工程学。它是研究系统工程理论和实践的一门科学。

系统工程在军事和国民经济领域得到广泛的应用，取得了重大的成就。一是应用在技术工程方面，应用系统工程的理论设计了许多系统工程，如武器系统、指挥系统、生产控制系统及交通管制系统等。这些系统具有较好的综合性能，大大地提高了武器的效能，对军事技术是一次革命。在生产技术上，综合自动化促进了生产率迅速提高。二是应用在科学管理方面，把系统工程理论应用于工程设计、科学研究、企业管理、社会管理，甚至整个国家的经济管理，如进行规划、组织、预测、控制等工作。能精确地提供情况，提高管理质量，节省管理人员。改变了那种凭经验，甚至凭主观意志实施管理的状况。小生产、手工业方式的管理方法，正在让位于科学管理，使管理科学经历着深刻的变革，被称为“科学的科学”，“工程的工程”，从而开始受到人们广泛的重视。

二、军事电子系统工程

军事电子系统工程，是以军事应用为目的，以电子设备为主体，以信息处理为特征的系统工程。三十年来，军事电子系统工程已经深入到军事应用的各个领域，诸凡情报收集、

武器控制、军事指挥、后勤支援、保障勤务和军事管理等，无不建立了电子工程。并且正在发展成为从统帅部到各军兵种、各军区，从战略到战术单位有机统一而完整的指挥、控制、通信系统，使军事技术产生了深刻的变化。国外军事当局对此极为重视。苏联把军事指挥系统作为继核武器出现、导弹运载工具研制成功之后的“军事革命的第三阶段”。美国把有没有一种高超的指挥系统同有没有武装部队视为同等重要。现代化战争不仅需要导弹核武器、飞机、舰艇、装甲车辆等常规武器，还特别需要一套准确、可靠、快速反应的指挥、控制、通信系统，为统帅部、各级军事部门提供确切的情报，保证在战时及时指挥部队，有效地使用各种武器，合理地使用国家人力物力，以保证战争的胜利。军事电子系统在军事上应用繁多，例如，美国空军用于情报收集、武器控制、军事指挥、保障勤务等方面的军事电子系统就有几十种，统称L“系统”。系统的种数虽然很多，但最主要和最典型的可以说有两大类：一是用于武器控制；另一是用于军队指挥。前一类的主要特点，是实时收集情报和控制高速运动目标，要求武器系统控制自动化和快速反应，属于实时信息处理系统。因此，这类系统常常是要求快速、准确地处理信息，最有效地发挥武器效能。后一类的主要特点是收集和储存各种敌情，我情资料，随时可以检索、调阅，并可以根据需要进行分析计算，提供可能的对策方案以供抉择。这一类系统的特点是以大容量非实时信息处理和显示为特点，因而是属于面向终端和人-机交互的非实时数据处理系统，帮助指挥参谋人员运筹决策，快速反应，实现最有效地指挥部队。有许多军事系统既要控制武器，又要指挥部队，两种功能是结合在一起的，而且收集情报及指挥控制要在一个广阔地区内进行。这就需要有范围广泛的、组织有效的通信工具来传递信

息。对这样的系统，人们称之为“指挥、控制和通信系统”，因为指挥、控制和通信三个英文词的第一个英文字母均是C，国外又简称为C³系统。

指挥系统必须和武器相适应。在武器已经发展到导弹核武器的现阶段，武器的射程、威力、速度和准确性等都有很大的提高，战争的突然性和破坏性也在猛增，因而指挥、控制和通信系统必须实现自动化。

三、武器控制系统

第二次世界大战中，为了对付空中威胁出现了雷达，到战争后期又出现了“跟踪雷达-指挥仪-高炮”火力控制系统，这是最早的武器控制系统。

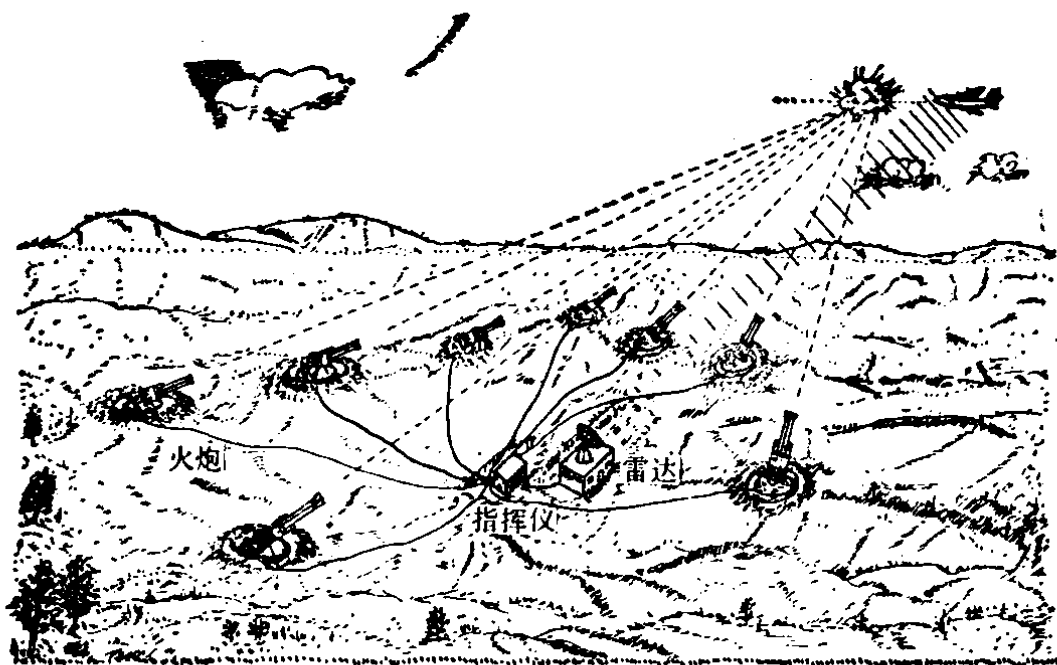


图18-1 火力控制系统

跟踪雷达采用圆锥扫描跟踪目标，能自动、实时获取目标的方位、俯仰、距离信息，并变换成电信号送给指挥仪。如果目标偏离指向，雷达就产生误差信号，修正雷达天线位置，使雷达保持指向目标。由于采用自动控制技术，目标跟

踪精度有了很大提高。

指挥仪是一种计算装置，根据雷达送来的目标坐标信息来计算目标的运动参数，并按炮弹飞行弹道计算出遭遇点，指挥仪不断输出信号，控制高炮不断保持指向遭遇点。

在指挥仪与高炮之间还有伺服系统驱动高炮，使得高炮所指经常保持在指挥仪计算的指向上。

这样一个系统要从雷达对空中目标的截获到高炮炮弹对目标的命中作为一个整体来考虑，从跟踪目标、射击计算到火炮发射控制实现了自动化，反应时间和射击误差从而减少了，使得整个系统具有较高的命中率。据第二次世界大战中的资料统计，高炮打飞机原来用人工瞄准平均一万发炮弹击落一架飞机；采用自动化火力控制以后，平均 300 发炮弹击落一架飞机，效率提高了 30 多倍，作用非常显著。把武器系统作为一个整体来考虑，实行最佳控制以达到高命中率，这就是系统工程的概念。要把这种概念付诸实现，实现最佳控制，火控系统中有两点需要突破。一是通过雷达、伺服系统可以把目标、炮的位置、角度信息变成电信息，使武器控制系统实质上变成信息处理系统，比较容易实现处理；二是计算装置实现信息处理，或者说其成为武器控制最佳化的有效工具，虽然那时候用的是精度、灵活性都比较差的机电模拟计算装置，但它的精度和雷达、火炮的精度还是相匹配的。

高炮火力控制系统的命中率受到一些限制，就是在炮弹离开炮膛以后，如果目标机动飞行或者炮弹性能有较大偏离，炮弹就不能在预定遭遇点命中目标。作为整个系统来考虑，提高命中率最有效的办法是使炮弹在飞行中弹道可控，这就是导弹。第二次世界大战以后，特别是在五十年代，地空导弹有了迅速发展。

地空导弹有几种制导方式，示例中的导弹是命令制导。

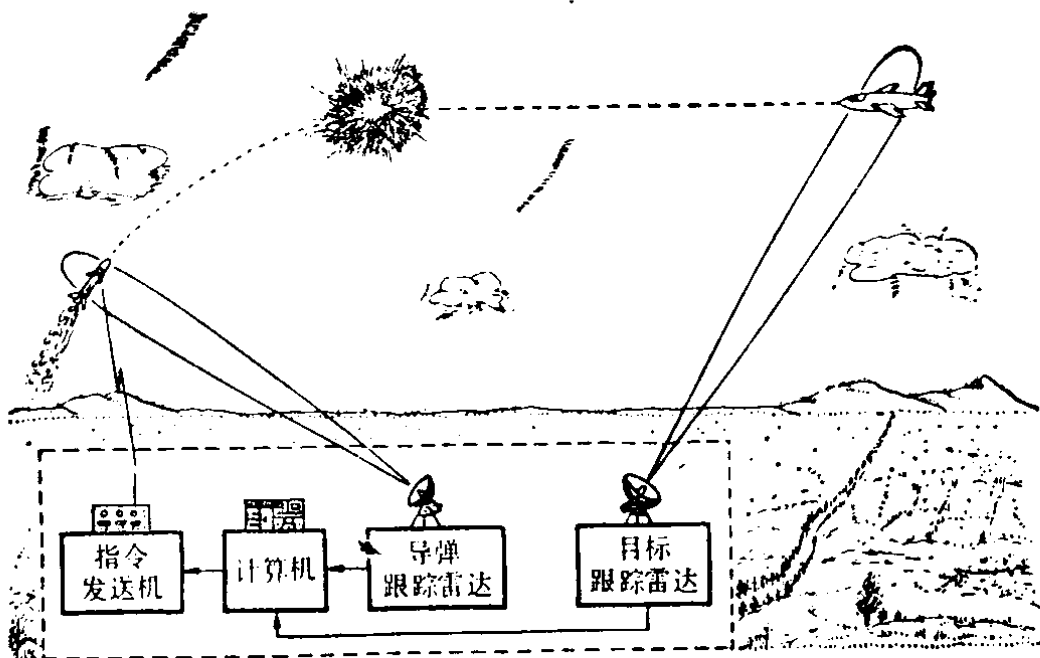


图18-2 地空导弹工作示意图

与火控系统相比，可以把地空导弹制导系统看作是高炮火控系统的发展，在图 18-2 中目标跟踪雷达跟踪目标，获取目标的位置信息并送给计算机；导弹跟踪雷达跟踪导弹并获取导弹的位置信息并送给计算机。计算机根据目标和导弹的位置、运动参数和制导方程计算导弹的飞行参数，由此变换成导弹的控制指令。指令发射机发送控制指令到导弹上的指令接收机，控制导弹的飞行姿态。把地空导弹制导系统同高炮火力控制系统加以比较，即可看出，前者增加了对导弹的跟踪和控制部分，如果在导弹飞行过程中目标机动，这样的信息立刻会被检测出来，计算机会计算新的遭遇方案，按照新方案改变导弹飞行的控制信息，随即送到导弹上去。在武器作用范围以内，考虑到目标的机动性能，目标要逃逸出武器的杀伤概率是小的。根据系统工程的概念，就要恰当地选择制导方式，协调雷达、计算机、导弹、指令发射机等部分的性能指标，使得整个武器系统命中率最高，或者比高炮火力

控制系统有更好的性能-价格比。

在靶场试验中，2~3发导弹可以打下一架飞机，比高炮火力控制系统命中率提高了一百倍。但是，实际情况并不如此，靶场和战场有很大差别。在战场上，武器系统是处在和敌方对抗的状况中，受到对抗因素的制约，地空导弹是依靠雷达精确地获得目标位置信息，显然破坏雷达跟踪目标的能力就能破坏整个武器系统，就可以致命地破坏武器的命中率。所以，电子对抗的一个主要对象是干扰武器系统中的控制雷达。六十年代后期，电子战发展迅速，美军在侵越战争期间，逐步改进并装备了大量的机载干扰设备，对付越南防空雷达和武器控制系统。据美军报道，在战争初期，越南北方使用萨姆-2导弹对付美军飞机，命中率达到12%，对美军威胁较大；到战争末期，由于美军不断加强电子干扰，导弹命中率降到1%以下。武器系统的任务不再是设法提高武器控制精度，而是怎么在日益尖锐的电子战条件下，最大限度地保持获取目标信息的能力。作为系统整体来考虑，要有良好的抗干扰性，已成为衡量系统性能的重要准则。综合武器控制系统，就是基于这样一种思想而出现的，并且受到重视。在全面考察探测目标的手段以后，管理有不同途径可以获取目标的角度信息和距离信息，其中分为有源的和无源的两大类：

在测距方面有雷达、激光；在测角方面有雷达、光学、红外、电视、微光夜视等。

测距通常要发射能量，这是有源手段，其缺点是容易被敌方发现而受到干扰。从原则上讲，无源交叉定位可以获得距离信息，但易有虚假点；测角可以是有源的（如雷达），上述其他手段是无源的。雷达可以全天候使用，光学、电视用于白天，红外、微光夜视用于夜间。综合考虑武器控制系统，