

前 言

武器系统效能存在优劣之分，这一概念是普遍为人们所接受的。但是要具体量化它似乎又没有一种行之有效的方法，只是停留在定性分析或部分定量分析的阶段。我们在评价高射武器效能方面同样遇到这种问题。经过几年的工作，我们提出了一种定量评价高射武器系统效能的方法。目前国内有关定量研究武器系统效能的著作尚不多见，因此我们努力将这种定量评价高射武器系统效能的方法系统化、理论化，编著成此书，将它介绍给读者，希望能起到抛砖引玉的作用，推动武器效能分析工作的发展。

全书共分七章。第一章介绍武器系统效能分析方法的发展与作用；第二章介绍高射武器系统的组成、主要功能和分类；第三章概述高射武器系统各种单项性能指标、综合性能指标和系统效能指标的定义和量度方法；第四至第七章分别讨论高射武器系统的服务概率、毁歼概率、生存概率和系统效能的计算方法。

高射武器系统对空中目标的发现能力，也是评价高射武器系统的一项重要综合性能指标，但本书却没有对发现概率的计算方法作详细论述，这是本书的不足之处。这固然是因为已有一些专著研究发现概率的计算问题，而更主要的，则是我们的经验不足，尚未找到一种适应面较广的发现概率计算方法来描述各种高射武器的探测能力。需要了解发现概率计算方法的读者，可参考有关的专著。

虽然本书讨论的是高射武器系统效能的分析方法，但我们认为，所述方法也可用于其他类型的武器系统（如防空导弹系统）的评价。

本书可供武器系统决策、论证、分析、研制、生产和使用部门的科技人员，以及高等院校武器系统工程专业的师生参考。

本书是合作的成果。第一和第四章由王向威编写,第二和第五章由肖元星编写,第三和第七章由田棣华编写,第六章由郑惟鸣、编写。王向威也是本书的发起人。

本书在编写过程中,得到了很多同志的关心、支持和帮助、特别是我们的同事陶化成高级工程师仔细审阅了本书各章的内容,提出了许多宝贵的修改意见。在此一并致以深切谢意。

由于我们从事武器系统效能分析与评价工作的经验还很不足,水平有限,因此,书中错误及不足之处在所难免,热切希望读者批评指正。

编著者

1990年9月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 高射武器系统的组成和功能	4
2.1 高射武器在防空体系中的作用和地位	4
2.2 高射武器系统的组成与主要功能	7
2.3 高射武器系统的分类	9
2.4 高射武器系统的发展趋势	13
2.5 本书的研究对象	14
第三章 系统效能评价指标	15
3.1 引言	15
3.2 高射武器系统的单项性能指标	16
3.2.1 搜索瞄准能力	17
3.2.2 威力	19
3.2.3 机动性	22
3.2.4 可靠性	23
3.2.5 维修性	25
3.3 高射武器系统综合性能指标	26
3.3.1 发现概率	27
3.3.2 服务概率	28
3.3.3 射击效率	30
3.3.4 生存概率	33
3.3.5 可用度	35
3.4 高射武器系统的总体效能	35
3.4.1 系统效能的定义	36
3.4.2 ARINC 系统效能模型	38
3.4.3 WSEIAC 系统效能模型	38
3.4.4 AAM 系统效能模型	39

3.4.5 AN 系统效能模型	39
3.4.6 上述模型的共同点	40
第四章 高射武器系统的服务概率	42
4.1 引言	42
4.2 高射武器系统服务概率数学模型	44
4.2.1 有关约定	45
4.2.2 高射武器系统可对目标提供服务的条件	52
4.3 服务概率的计算	58
4.3.1 目标个数为有限时的模拟计算	59
4.3.2 目标个数为无限时的模拟计算	63
4.3.3 模拟计算的次数	66
4.3.4 对固定翼飞机的服务概率计算	70
4.3.5 对直升机的服务概率计算	82
4.4 影响服务概率的因素	93
4.4.1 目标流强度	93
4.4.2 目标高度与航路捷径	96
4.4.3 目标速度与跟踪角速度	99
4.4.4 服务时间	102
4.5 服务概率计算中的两个指标	108
第五章 着发射击高射武器系统的毁歼概率	113
5.1 引言	113
5.2 着发射击高射武器系统毁歼概率的数学描述	115
5.2.1 确定目标的坐标和运动参数	115
5.2.2 射击误差模型	118
5.2.3 射击误差模型的转换	126
5.2.4 目标命中区域的计算方法	131
5.2.5 毁歼概率的积分表述	136
5.2.6 射击和弹道诸元及偏差量的解析算法	140
5.2.7 高射武器系统射击能力的限制	145
5.3 计算毁歼概率的数值方法	152
5.3.1 数值积分法	152
5.3.2 二项式展开法	161

5.3.3	两种数值方法的比较与选择	181
5.3.4	毁歼概率计算程序框图及示例	183
5.4	高射武器系统主要性能参数对毁歼概率的影响	194
5.4.1	高射武器系统的有利射高及射击距离	194
5.4.2	影响毁歼概率的因素	198
5.4.3	初速和弹道系数对毁歼概率的影响	202
5.4.4	弹丸威力对毁歼概率的影响	207
5.4.5	射弹数和射速对毁歼概率的影响	209
5.4.6	误差特性对毁歼概率的影响	211
附录	几个结论的证明	217
第六章	高射武器系统的生存概率	225
6.1	引言	225
6.2	非对抗条件下高射武器生存概率	227
6.2.1	非对抗条件下高射武器生存概率数学模型	227
6.2.2	高射武器被发现概率	229
6.2.3	高射武器被毁伤概率	240
6.2.4	高射武器被毁伤后的可修复概率	262
6.2.5	非对抗条件下高射武器生存概率计算	262
6.3	对抗条件下高射武器的生存概率	265
6.4	影响高射武器生存概率的因素	268
6.4.1	飞机发现概率的影响	268
6.4.2	高射武器外形对被命中概率的影响	270
6.4.3	提高防护能力对生存概率的影响	272
第七章	高射武器系统效能	273
7.1	引言	273
7.2	武器系统效能模型的作用及其一般的工作程序	274
7.3	高射武器系统效能模型	277
7.4	可用性	279
7.4.1	基本约定	280
7.4.2	可用性向量计算	281
7.4.3	可用性/可靠性/维修性权衡	289

VI

7.5 可信赖性	292
7.5.1 指数分布	293
7.5.2 马尔科夫过程	295
7.5.3 可信赖性模型	296
7.6 能力向量和系统效能	310
附表 外弹道函数表 (1943年阻力定律)	317
参考文献	318

第一章 绪 论

本章简要地说明武器系统效能分析的发展与作用。

战争不但要投入大量人力，而且对参战国家的经济实力消耗极大，因此，当今世界各国在发展国防时都不可能不考虑本国的经济基础。事实上经济基础是决定战争形势的一个极重要的因素。

第二次世界大战期间，为了研究战争中武器装备和战争资源在短期内的合理使用和战略决策，英、美等国科学工作者广泛研究了运筹学在军事领域的应用，并为战争的胜利作出了贡献，从那时起逐渐形成了现代军事系统工程学。60年代，军事系统工程学为解决长期战争资源的合理使用和世界战略问题而提出了许多新方法。军事系统工程学的几个主要研究方向，按研究对象可分为：战略、国防预算、国防资源分配（利用），兵力结构研究，作战环境、战术研究，武器系统效能研究，指挥自动化体系和国防军事教育训练研究等。但是应当注意到军事系统工程的几个研究方向相互之间是密切相关的，又是相互制约的。本书的目的是研究作为军事系统工程的一个组成部分的武器系统效能问题。

武器研制及使用是国防的重要组成部分，随着科学技术的发展，军事装备日益复杂，技术难度不断提高，同时研制新武器装备所需的投资也大幅度地增加。新型武器装备的研制结果有时会对国防和战略形势起到举足轻重的作用；如果研制失败，不但要蒙受巨大的经济损失，并且会在数十年内危及国家的安全和战略稳定性。因此，现代国防的高成本不允许无效或效率低下的武器装备存在。如何评价武器装备的优劣就是武器系统效能分析所要研究的问题。武器系统效能在战略、战术研究中可作为描述武器系统战场作用的输入量；在武器系统研制方面，由于武器系统包含

有许多相互制约的战术技术指标，因此，为使武器系统性能最佳，实际上是要解决多目标优化问题，而武器系统效能则可作为这个多目标优化问题的目标函数。

前面已经提到，军事系统工程的各个研究方向是相互联系的。在分析研究了国家战略、战术、经济条件后，提出了对新武器装备的作战要求，根据这些要求和现实的技术水平研究武器系统效能。反过来武器系统效能的研究结果又对国防战略产生影响，如此反复调整，以使国防战略、战术处于最有利的状态。

武器系统效能分析是以武器系统的作战要求为前提，选择合理的评价指标来评价武器系统。一个武器系统需要用许多不同的指标来描述。早期武器系统性能评价，多采用单个指标来区别武器的优劣。人们很快就发现，只有全面地考虑影响武器系统作战能力的各种因素，才有可能合理地比较武器系统的好坏。我们知道，一个武器系统有许多战术技术指标，如果某个武器系统的每个战术技术指标都优于另一个武器系统，则显然可以很明确地评定出那个武器系统好。但实际中往往是一个武器系统的某些指标优于另一个系统，另一些指标又不如另一个系统，这样就不能简单地区分出武器系统的好坏。武器系统各个战术技术指标代表了武器系统完成某一项功能的程度。武器系统效能分析工作，则是将大量单项的战术技术指标综合成能代表武器完成某一方面作战任务能力的综合性能指标（例如：高射武器系统的毁歼概率包含了高炮射速、初速、弹丸威力、射击精度等多个单项战术技术指标），然后将这些综合性能指标再综合成武器系统效能。通过比较武器系统的系统效能值，即可判定武器系统的优劣。由上可以看出，武器系统效能分析是在一些确定的约束条件下将所要求的武器系统作战性能和与技术现状有关的因素抽象成数学模型，利用这个数学模型来定量分析、评价武器系统。

武器系统效能分析的基本思想是：

- (1) 给定武器系统的作战任务、背景；
- (2) 明确约束条件（包括技术、经济条件）；

- (3) 选择综合性能指标 (作为效能模型的品质因数);
- (4) 建立效能分析模型;
- (5) 分析、计算。

本书是以高射武器系统为研究对象的。第二章简述了高射武器系统的组成、作战使用。抽出各类高射武器的共同点,以便于研究它们具有共性的问题。第三章讨论了高射武器系统的各类战术技术指标,并定义了描述高射武器系统作战性能的综合性能指标。第四~六章着重讨论了高射武器系统的综合性能指标。其中,第四章介绍了高射武器系统的服务概率;第五章讨论了高射武器系统对飞机的毁歼概率;第六章研究高射武器系统在作战中受到飞机攻击时的生存能力。第七章在以上各章的基础上研究高射武器系统的效能计算。

本书前六章是针对高射武器系统讨论的。第七章的内容实际上也可适用于其他类型的武器系统,只是需要根据不同的评价对象改变作为系统品质因数的能力指标。

第二章 高射武器系统的 组成和功能

本章概述高射武器在防空体系中的作用和地位、高射武器系统的组成、主要功能和分类等。

2.1 高射武器在防空体系中的作用和地位

在未来的“空地一体化”战争中，对空防御是对战争的胜负有着重大影响的十分重要的一环。由于现代作战飞机攻击能力很强，即使是少量飞机（带有核弹的）突破防空体系，也会对重要的军事、政治、经济目标造成很大破坏，甚至使被攻击方在一定程度上失去继续作战的能力。因此，世界各国都十分重视对空防御，十分重视强大的、完全现代化的防空体系的建设。

现代战争中来自空中的威胁主要有：中远程战略轰炸机、歼击轰炸机、强击机、武装直升机、巡航导弹、空对地制导武器、遥控飞行器等。

防空系统按任务可划分为：以对付战略轰炸机为主的国土防空系统；以对付战术飞机为主的野战防空系统。主要防空兵器有：截击机、地空导弹和高炮。而防空体系除包括上述兵器外，还应包括有完善的警戒、指挥、控制和通信系统。利用电子计算机技术，把雷达预警网、防空指挥控制中心、超音速截击机、地空导弹和高炮组成一个协调的整体，使其成为自动、半自动化的防空体系（如图2.1所示），是目前发展现代化防空体系的主要特点。在这种防空体系中，从目标捕获、数据录取、敌我识别、拦截计算、拦截武器选择、引导和控制，直到摧毁目标和引导返航的

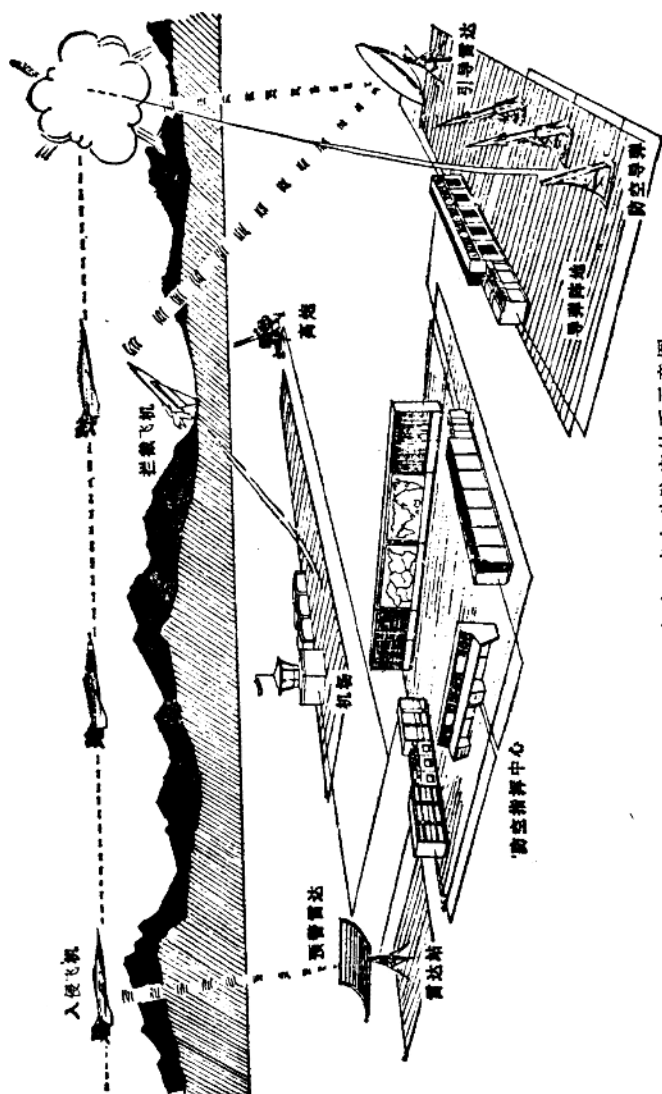


图2.1 自动、半自动防空体系示意图

整个过程，都可实现高度的自动化，从而可大大缩短从发现空情到击毁目标的全系统反应时间，提高防空武器的作战效率。

截击机的突出特点是具有优良的爬升性能和较大的航程，以使用空空导弹为主，攻击能力强，具备“全方向、全高度、全天候、多目标、多种距离”的攻击性能和远程作战能力，能到很远的地方拦截来袭的敌机。因此，它是国土防空系统的主要组成部分。它也可以承担支援和掩护地面部队作战的野战防空任务。

地空导弹既是国土防空系统的重要组成部分，也是野战防空系统中的主要作战力量，是现代战争中不可缺少的防空拦截武器。同高炮比较，地空导弹射程远、射高大、精度高、威力大，但不如高炮机动、灵活，造价也比后者高；同截击机比较，它的作用范围小，但反应快、火力猛、威力大，不受目标的速度和高度限制，同时后勤保障工作相对简单，维护、使用和训练费用也低。因此，地空导弹自第二次世界大战末期问世以来，一直受到各国的重视，被称为是构成防空火力的基础。

在地空导弹出现之前，高炮是地面防空的主要兵器。到50年代末，随着地空导弹大量服役，高炮的作用曾一度受到忽视。西方国家曾设想以地空导弹全部取代高炮，认为高炮已无用武之地，并放松了高炮的研制工作。但是，后来的历次局部战争经验表明，同地空导弹相比，高炮具有初速大、射速高、抗干扰能力强、射击准备时间短、反应快、转移火力快、机动灵活，以及造价低等特点，因此在防空作战中，高炮仍能发挥重要作用，不是地空导弹所能完全取代的。其中，小口径高炮，很适于对付距离4000m，高度3000m以下的目标，尤其对于2000m以内目标，其防御效果优于地空导弹。因此，从目前来看，高炮仍是国土和野战防空的重要手段，是现代化防空体系的重要组成部分。

根据目标飞行高度的不同，常将防御空域划分为高空、中空、低空和超低空等若干部分，如表2.1所列。为了充分发挥地空导弹和高炮的各自优势，在建立现代化地面防空体系时，一般都将二者结合在一起，由地空导弹承担中、高空（特别是高空）防御

表2.1 空域划分

空 域	高度范围 (m)
超低空	10~100
低 空	100~1000
中 空	1000~7000
高 空	>7000

任务，由高炮承担中、低空和超低空防御任务（特别是用高炮去对付在低空和超低空突然出现的近程目标），从而构成以地空导弹为主、高炮为辅的，覆盖高、中、低空和远、中、近程的全空域地面防空火力配系。

2.2 高射武器系统的组成与主要功能

高炮的基本作战任务是攻击空中目标，由于空中目标具有运动速度快、体积较小、机动性大等特点，因此，高炮要完成防空任务，必须具有以下功能：探测、发现和跟踪目标，解算射击诸元，对目标实施射击并杀伤目标。通常把能独立实施对空射击的一整套兵器和技术器材称为一个高射综合体，或高射武器系统。一套高射武器系统构成一个防空火力单位，它是防空火力配系中最基本的火力单位。

高射武器系统一般由侦察系统、指挥控制系统和火力系统及电源装置组成，各部分协调工作，以确保射击任务的完成。

侦察系统包含搜索系统与跟踪系统，常由无线电器材和(或)光学器材组成，如雷达、测距机、瞄准具、指挥镜、望远镜等。它用来搜索、发现、识别、瞄准、跟踪目标，连续测定目标的坐标，同时将这些信息输送给指挥控制系统。

指挥控制系统由模拟或数字计算机组成，亦称为射击指挥仪。它接受侦察系统传来的目标坐标信息，计算射击诸元，并通过电气联动装置控制火力系统追随目标。

火力系统由火炮和炮弹组成，在指挥控制系统的控制下对目

标实施瞄准射击。

电源装置为侦察系统、指挥控制系统和火力系统提供工作动力。

一套高射武器系统通常拥有一个或多个火力系统，其组成结构框图如图 2.2 所示。

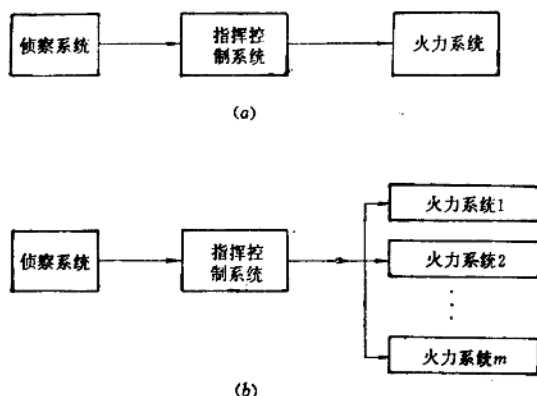


图2.2 高射武器系统组成结构框图

(a) 由单火力系统组成；(b) 由多火力系统组成。

高射武器系统的工作过程是：搜索系统不停地搜索目标，发现目标后交给跟踪系统进行连续跟踪；跟踪系统在工作过程中不断地测定目标现在点的坐标，并把信息传输给指挥控制系统；指挥系统通过解算弹丸与目标的相遇问题，求出目标未来点坐标，并借助电气联动装置控制火力系统瞄向目标未来点，在合适时机实施射击。图 2.3 扼要地描述了这一过程。

及早发现和捕住目标，是争取战斗中的主动权，充分发挥高射武器威力的重要保障。为此，高射武器系统除利用本身的侦察器材进行空情监视和目标搜索外，还必须借助先进的指挥、控制与通信网，及时从上级指挥所、警戒雷达站、观察哨站等获取空情信息，以便在足够远的距离上及早发现、迅速捕住并准确识别目标，从而留有充分的时间选择最佳射击方式和射击时机，给目标以毁灭性的打击。

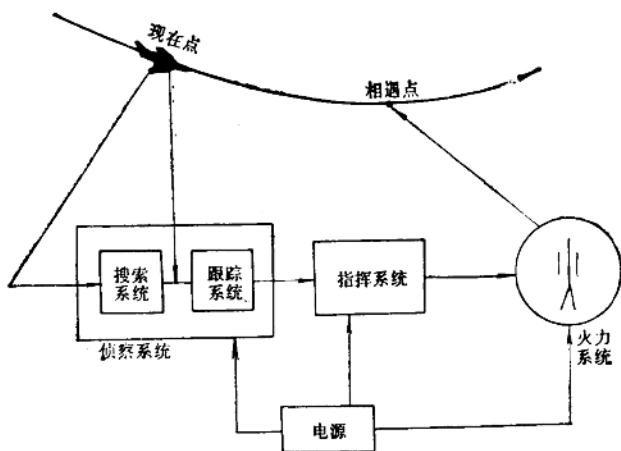


图2.3 高射武器系统的工作过程

2.3 高射武器系统的分类

高射武器系统有多种分类方法，如按火炮的口径分类，或按侦察与指挥控制系统的类型和复杂程度分类，或按机动方式分类等。

按火炮的口径可分为大、中、小三类：口径在100mm以上的称为大口径高炮；口径在60~100mm的称为中口径高炮；口径在20~60mm的称为小口径高炮。口径小于20mm的称为高射机枪。每门高炮有单管、双管、三管、四管和六管等安装形式，但小口径高炮以双管联装为最多，而大、中口径高炮通常都只有一个身管。小口径高炮主要对付低空目标，只有大、中口径高炮才可对付中、高空目标。由于大、中口径高炮的射速较低，弹丸飞行时间较长，火力密度较小，精度也差，对中、高空的现代飞机实施射击，战果不佳，故已逐渐被反应快、精度好、威力大的高、中空地空导弹取代。

高炮炮弹的引信主要有着发引信和定时引信两种类型。装有

着发引信的炮弹，在同目标相撞时爆炸，主要以弹丸的爆破效力毁歼目标，这样的射击称为着发射击。装有定时引信的炮弹，弹丸离开炮口后，飞行一定的时间即爆炸，主要以破片的杀伤效力毁歼目标，这样的射击称为空炸射击。小口径高炮通常实施着发射击，大、中口径高炮通常实施空炸射击。

高射武器系统的侦察系统和指挥控制系统往往统称为火控系统。根据其所用设备和器件之不同，可分为光学火控、雷达火控和光电火控三类。

光学火控系统由光学瞄准镜和机械瞄准具、或独立瞄准线瞄准具组成。

雷达火控系统主要由雷达和计算机组成，分简单的和复杂的两类。简单的雷达火控系统多用雷达测距、光学测角的方式或一部雷达既搜索又跟踪的方式工作。复杂的雷达火控系统配用两部雷达，一部搜索，一部跟踪，其优点是能缩短反应时间，提高对目标的探测概率，能边跟踪边搜索，瞄准精度也高。

光电火控系统通常由光学瞄准具、激光测距机和计算机组成，具有抗干扰能力强、近距探测精度高、造价低等优点，但没有全天候作战的能力。

目前使用最普遍的是雷达火控系统，光学火控已降为辅助或备用方式，光电火控系统已开始应用并迅速普及。一些复杂的自行高射武器系统还兼用两种，甚至三种火控方式。此外，红外、电视跟踪装置也正日益广泛地应用于高射武器火控系统中。

高射武器系统按机动方式可分为自行和牵引两种类型。

牵引式高射武器系统一般由一套火控系统和多个火力系统（即多门火炮，每门火炮称为一个火力单元）组成。行军时，火控系统和火炮由各自的牵引车牵引（多用轮式牵引车），在行进过程中火控系统不能工作。进入战斗阵地后，炮手用电缆将火控系统和火力系统连接起来，形成一个能协调工作的火力单位（见图2.4）。

牵引式高射武器系统由行军状态进入战斗准备状态或由战斗

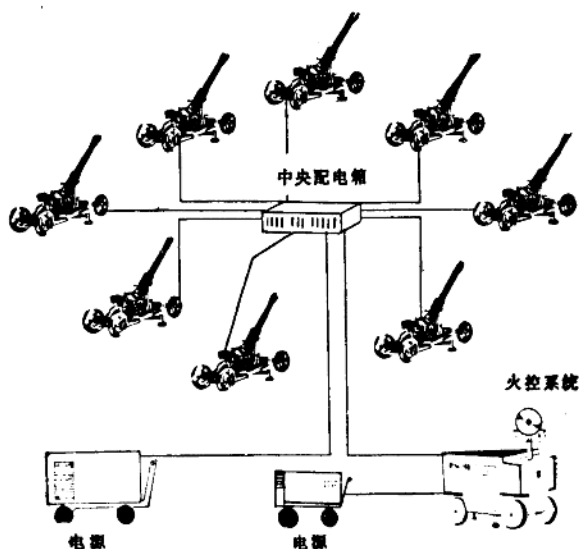


图2.4 牵引式高射武器系统

状态进入行军状态，所需时间较长，也就是常说的行军战斗转换时间较长。

牵引式高射武器系统的火力密度较高，在战斗中后勤人员可随时向阵地运送弹药，一般不至于因缺乏弹药而影响对空射击。

自行式高射武器系统有三位一体自行式和分置式自行式两种类型。

三位一体自行式高射武器系统，是将火控系统和火炮安装在同一坦克底盘或装甲车的底盘上（图2.5），成为一个独立的作战单位。它具有与坦克和装甲车相同的机动能力和“三防”能力，并具有全天候作战能力。三位一体自行式高射武器系统在行军过程中，可对空情进行监视，当发现并捕住目标后，可在行进状态下实施射击或采用短停射击方式，因而可担负掩护机械化部队行军的任务。

分置式自行高射武器系统是将火控系统安装在一个运载底盘