

doi: 10.7690/bgzdh.2016.07.008

基于网络计划法的防空装备技术准备流程优化

谢芝亮, 陈维义, 彭英武, 程 晗, 王高泉

(海军工程大学兵器工程系, 武汉 430033)

摘要: 为加快海军防空部队应急响应速度, 探讨如何优化防空装备战备等级转进流程。确定任务并分析组成工序及逻辑关系, 用时间估计法计算工序的持续时间。根据持续时间和逻辑关系绘制网络计划图, 计算节点和工序的时间参数。采用关键路线法对流程进行优化, 通过调整关键路线来缩短战备转进时间, 对人力资源平衡做初步探讨, 并以防空装备某型高炮车为例进行分析。分析结果表明: 该方法能有效提高防空装备技术准备效率。

关键词: 技术准备; 防空装备; 网络计划; 流程优化; 关键路线

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Technology Preparation Process Optimization of Air Defense Equipment Based on Network Planning Method

Xie Zhiliang, Chen Weiyi, Peng Yingwu, Cheng Han, Wang Gaoquan

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to speed up the emergency response speed of the Naval Anti-aircraft Forces, this article discusses how to optimize readiness level transformation process of air defense equipment. Tasks are identified, composition procedures and relations are analyzed, duration of each procedure is got with time estimation method. The network diagram is established with logic and duration, time of procedures and nodes are calculated. Taking a certain type antiaircraft gun car of air defense equipment as an example for analysis, process is optimized with the critical path method, the combat readiness level transformation is reduced by adjusting the critical path, human resource balance is discussed preliminarily. The results show that this method can improve the technical preparation efficiency of air defense equipment.

Keywords: technical preparation; air defense equipment; network planning method; process optimization; critical path

0 引言

海军防空部队在战备等级转进过程中, 由于防空装备数量多、技术准备流程复杂和人力资源有限等原因, 常出现工作效率低下、人力资源分配不均, 甚至超出规定时限才能完成任务的情况。要减少战备等级转进的时间, 合理分配人力资源, 就需要调整准备流程、合理配置人员, 保证部队在规定的时间内有序高效地完成任务, 迅速进入能战状态。

防空部队为了适应战备等级转进时间要求, 对装备技术准备有 2 方面的需求: 一是流程时间尽可能短, 二是资源均衡利用。该问题属于资源约束型项目调度问题 (resource-constrained project scheduling problem, RCPSP)。RCPSP 指在资源和逻辑约束下最小项目持续时间目标的调度问题, 也就是资源限制——工期最短问题^[1]。

为加快流程进度、科学管控资源, 网络计划法已逐渐被引入海军防空部队流程管理中。网络计划法是通过网络分析的方法对流程进行安排, 以达到预定目标的计划管理技术。该技术的重要内容就是

通过建立模型、分析数据、找出关键路线来达到缩短时间、平衡资源的目的; 因此, 笔者采用网络计划法对防空装备技术准备流程进行优化。

1 网络计划法

网络计划法包括关键路线法 (CPM) 和计划评审技术 (PERT) 等^[2]。网络图是网络计划法的研究基础, 是对流程中工序过程、内在逻辑关系的综合描述。其思想: 工作流程中计划要完成的工序存在先后顺序及逻辑关系, 将这些关系用节点、带箭头线段连接构成网络图。

网络计划图按表达形式可分为单代号网络图和双代号网络图; 按时间表示方法又可分为无时间坐标网络图和带时间坐标网络图。双代号网络图是目前我国推广应用较为广泛的一种网络计划形式^[3]。

时标网络计划图具有直观、明了、便于绘制资源曲线和进行优化等优点。但是在工序较多、工序持续时间相差悬殊时, 时标网络计划图就显得庞大复杂, 甚至无法体现。

收稿日期: 2016-03-27; 修回日期: 2016-05-07

作者简介: 谢芝亮(1990—), 男, 河南人, 硕士, 从事武器系统运用与保障工程研究。

笔者在对单个装备技术准备流程分析时，工序数目不多、工序持续时间相差不大。为便于分析与优化，笔者采用双代号时标网络计划图。

运用网络计划法进行优化时需要先找出关键路线，双代号时标网络图基于时间坐标轴用箭线表示工序以及工序之间的相互关系，箭线长度表示工序持续时间，必要时引入虚工作(不消耗资源和时间)。可利用网络计划法优化过程，按照图 1 所示的流程进行^[4]。

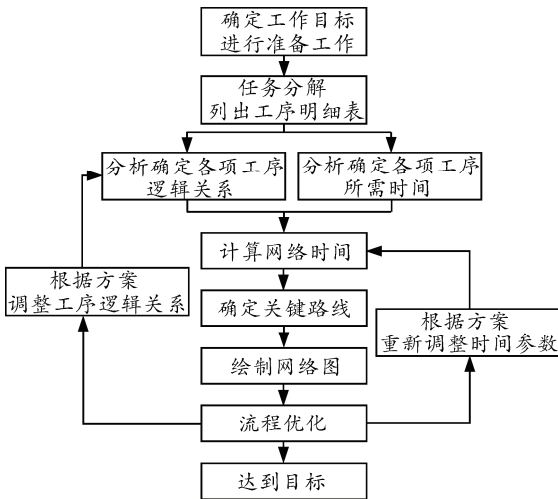


图 1 网络计划法优化流程

2 基于网络计划法流程建模

2.1 任务确定与分解

海军防空部队战备等级转进时的技术准备过程由部队战士(各车车长、号手)、军械装备实体(各作战或作战支援车辆)、保障设备(检查工具、测试设备等)构成。其中部队战士、保障设备是战备转进过

程中的资源。装备实体在技术阵地和发射阵地都要进行技术准备工作。

防空部队在技术阵地的内容包括装备检查、话音、数传系统联调、系统信标联动和系统撤收等，通过陆路或水路运输将武器系统转运至发射阵地。在发射阵地的内容包括系统展开、话音、数传系统联调、系统标定和系统信标联动等，经过上述战备等级转进以后武器系统才能执行战备任务。

在上述战备等级转进过程中武器系统装备数量多、设备资源种类多样、人员号手分工详细，由于各型号装备战备转进流程相似，可以通过优化单一某型装备的转进流程，进而推广到其他装备；因此，笔者着重研究某型高炮车行军前检查流程，并对其进行优化，以提高整个武器系统的战备转进速度。

2.2 工序时间的确定

根据网络计划法的编制步骤，笔者按照部队组织训练实况和现行操作方案，对某型高炮车行军前检查流程进行分析研究，将各号手不间断的具体操作分解成为各个具体的工序，并列出全部工序的活动明细表，如表 1。

各工序间逻辑关系根据装备特性和实际操作情况确定，在优化时不能改变逻辑关系约束。需要指出的是，尽管有些工序在逻辑上不存在紧前、紧后的关系，但是由于共用同一个号手的工序不可能同时进行，导致操作过程中的紧前紧后关系。例如，虽然工序 H 不是工序 I 的紧前工序，工序 D 不是工序 E 的紧前工序，但这 2 项工序的号手相同，不可同时进行，因而也就形成了 H→I, D→E 的关系。

表 1 某型高炮车行军前检查工序明细

工序代号	项目	参加号手	使用设备	工序持续时间	前置项目	箭尾节点	箭头节点	工序最早开始时间	工序最迟开始时间	工序总时差
A	绝缘检查	2	无	15	无	1	2	0	0	0
B	火炮炮管和发射部位检查	3	检查专用工具	30	I	9	13	65	65	0
C	发火机及其电压检查	2、3	无水乙醇、纱布、万用表	15	B	13	14	95	95	0
D	随动系统检查	3	无	20	C	14	15	110	110	0
E	射控系统检查	3	无	10	C	15	16	130	130	0
F	电池充放电	2、3	充电机 1 台	24	D、E	16	17	140	140	0
G	照射器天线起竖和翻转	3、4	专用扳手	15	K	3	5	25	25	0
H	电视与红外跟踪仪检查	2、3	无	15	G	5	7	40	40	0
I	激光测距机检查	3	无	10	G	7	9	55	55	0
J	照射器功率检查	2	功率计 N911A、功率测试仪	10	G	9	11	65	154	86
K	雷达天线起竖和翻转	3、4	专用扳手	10	A	2	3	15	15	0
L	雷达加电	2、4	无	30	K	3	6	25	109	84
M	雷达调试和操控检查	4	调试操控台	15	L	6	10	55	139	84
N	雷达功率检查	4	功率计 N911A	10	L	10	12	70	154	84
O	火控、通信自检	2	无	30	P	4	8	35	134	99
P	主机发电功能检查	1、2	万用表	20	A	2	4	15	114	99

工序的持续时间 D 采用三点时间估计法^[5]。乐观估计时间 a 表示工序在最顺利的条件下完成的时间估计；保守估计时间 b 表示工序在最不利的情况下完成的时间估计；可能估计时间 m 表示工序在正常条件下完成的时间估计。然后用下式求时间：

$$D = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (1)$$

经计算，各工序的持续时间如表 1。

2.3 关键路线的确定

找出网络图中关键路线和关键工序，需要计算图中节点和活动的的时间参数^[6]。网络计划图中的时间参数计算方法可以分为手算法和电算法，手算法又分为图算法、表算法和公式算法。笔者采用公式算法，利用计算时间参数的公式来计算。

1) 节点的最早发生时间：

$$ET_j = \max \{ET_i + D_{i-j}\} \quad \forall i, j = 2, 3, \dots, 17 \quad (2)$$

其中： D_{i-j} 为工序的持续时间； ET_j 为箭头节点的最早发生时间； ET_i 为箭尾节点的最早发生时间^[7]；开始节点 $ET_1=0$ 。

2) 节点的最迟发生时间：

$$LT_i = \min \{LT_j - D_{i-j}\} \quad \forall j, i = 16, 14, \dots, 1 \quad (3)$$

其中： LT_i 为箭尾节点的最迟发生时间； LT_j 为箭头节点的最迟发生时间；终节点 $LT_{17}=T$ ， T 为总工期。

3) 各工序的最早开始时间为：

$$ES_{i-j} = ET_i, \quad i = 1, 2, \dots, 16 \quad (4)$$

各工序的最迟开始时间为：

$$LS_{i-j} = LT_j - D_{i-j}, \quad j = 2, 3, \dots, 17 \quad (5)$$

4) 各工序的总时差：

$$TF_{i-j} = LS_{i-j} - ES_{i-j} \quad (6)$$

总时差为零的工序就是关键工序，由关键工序组成的线路称为关键路线。各时间参数计算结果如表 1。经计算可得图 2 某型高炮车行军前检查流程的关键路线： $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow 13 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 17$ 。

2.4 网络图的绘制

根据所列明细表中各工序的持续时间和相互关系，以及关键路线的计算，绘制双代号时标网络图，如图 2。

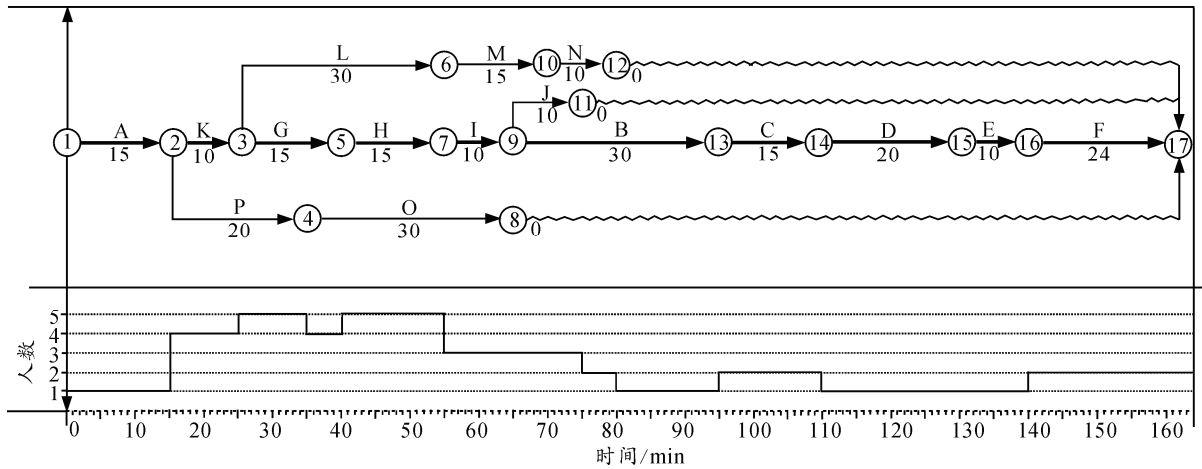


图 2 某型高炮车行军前检查流程网络图及人力资源分布

3 基于网络计划法的流程优化

3.1 关键路线优化法

资源约束流程优化问题可以描述如下：一个流程中包含许多相互关联的工序，其中每一个工序都有确定的持续时间和给定的资源要求；资源和人员的数量是有限的。问题的解是确定满足逻辑约束和资源约束的最小工期^[8]；因此，基于网络计划法的流程优化必须遵守如下前提条件：

- 1) 不能改变工序间的逻辑关系；
- 2) 优化时工序的持续时间保持不变；
- 3) 各工序所需资源量不变；

4) 工序不允许中断。

根据上述条件建立优化模型。

目标函数：

$$\min T = \max_{1 \leq i < n} \{t_A(i, n) + d(i, n)\} \quad (7)$$

约束条件：

s.t.

$$\sum_{(i,j) \in W} R_{i,j,m}(t) \leq R_m, \quad t = 1, 2, \dots, T; m = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

$$R_{i,j,m}(t) = \begin{cases} R_{i,j,m}^0, & t_A(i, j) \leq t \leq t_A(i, j) + d(i, j) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

$$t_A(k,i) + d(k,i) \leq t_A(i,j), (k,i) \in F(i,j). \quad (10)$$

其中：工序使用双代号网络图方法表示； T 为任务工期； $t_A(i,j)$ 为工序 (i,j) 的实际开工时间； $F(i,j)$ 为其全部紧前工序的集合； $R_{i,j,m}(t)$ 为工序 (i,j) 的第 m 种的资源使用量。式 (8) 表示工序满足资源约束；式 (9) 表示每个工序的资源使用量在工序时间内为定值，其余是 0；式 (10) 表示工序满足逻辑约束。

根据上述模型选择优化方法，对关键路线的分析发现：可以通过提高号手通用性，提高人员熟练度等方法来减少关键路线上的耗时，达到流程优化的目的。

3.2 人力资源平衡法

在进行流程优化的同时考虑逻辑约束条件下的人力资源配置平衡。资源平衡问题是一种组合优化问题，问题的复杂度会随着问题规模的增大而急剧增长。在问题并不复杂的单车流程中可以通过逻辑分析来调整工序，这种方法简便快捷并且能够达到要求。

设：共有 k 个工序。 $T(i)$ 表示第 i 个工序的持续时间； $TS(i)$ 表示工序 i 的实际开始时间； t 表示总工期内任一时刻； T 表示全部工序完成的总工期； $R(i)$ 表示工序 i 对人力资源的需求量； $R(t)(i)$ 表示在 t 时刻，工序 i 对人力资源的需求量，如下式：

$$R(t)(i) = \begin{cases} R(i), & TS(i) \leq t \leq TS(i) + T(i) \\ 0, & t < TS(i) \text{ or } t > TS(i) + T(i) \end{cases}, \\ t = 0, 1, \dots, T; i = 1, 2, 3, \dots, k. \quad (11)$$

由上述定义可知所有工序在时刻 t 对人力资源的需求总量为 $R(t)$ 。

$$R(t) = \sum_i R(t)(i), \quad t = 0, 1, \dots, T; i = 1, 2, 3, \dots, k. \quad (12)$$

资源平衡的控制目标是使资源消耗分布形式尽可能成理想状态，也就是使 $R(t)$ 在 $t=1, 2, \dots, T$ 的各个时段尽可能相等，波动越小越好。

在进行优化时，需要在所有工序时差范围内，推迟或提前工序的最早开始时间，使人力资源分布尽可能平衡。

4 算例分析

4.1 对关键路线的优化

以防空装备某型高炮车为例，上面已完成流程

分析与建模，通过图 2 可以得出流程总时间 $T=164$ min。显然，这个时间对现代战争条件下的海军防空装备战备转进来说是一个相当长的过程，必须进行流程优化，尽可能地缩短检查时间，措施如下：

1) 提高号手通用性。

通过分析发现图 2 中关键工序 H、I、D、E 在逻辑上并不存在紧前紧后的关系，但这 2 项工序都有 2 号手参加，不可同时进行，导致产生了先后顺序。通过培训号手的专业技能，使得工序 H 由 1、4 号手来完成，工序 E 由 2 号手来操作。经过这样培训后可以消除由人员限制造成的约束，从而使 H 和 I、D 和 E 可以并行操作，分别缩短流程时间 15 min 和 10 min。

2) 提高号手操作熟练度。

关键工序 K、G 仅需要人员手动操作而与设备耗时无关，可以通过提高这些关键工序号手的熟练程度，加强号手之间配合来缩短工序时间。根据工序时间确定的方法，工序 K、G 可以分别缩短 3 min 和 5 min。

通过以上措施对关键工序持续时间的调整，有效压缩了整个网络图的总工期，计算网络图的各时间参数，可得出优化后网络图的关键路线：1→2→3→4→7→12→14→16→17。优化后某型高炮车行军前检查的时间 $T=131$ min。

4.2 对人力资源的平衡

继续对优化后的网络图分析发现：整个流程人力资源分布不均，时而高峰，时而低谷，这样会使人员在低峰时闲置，在高峰时供应不足；因此，必须使每个时段内合理安排工序活动时间，使人力资源均衡分布。

根据图 3 发现，从第 22~47 min 需要号手数目超过总人数，而在第 51 min 以后所需号手又远低于总人数，并且非关键工序 L、M、N、H、J、P、O 都有工序时差可以调整。

根据资源平衡优化方法，可以将工序 P 的实际开始时间推迟至第 77 min，工序 O 为工序 P 的紧后工序；因此，实际开始时间也被推迟至第 97 min，推迟后工序情况如图 4。同理可以将工序 H 实际开始时间推迟至第 51 min。通过工序实际开始时间的调整，人力资源分布更加平衡，如图 4。

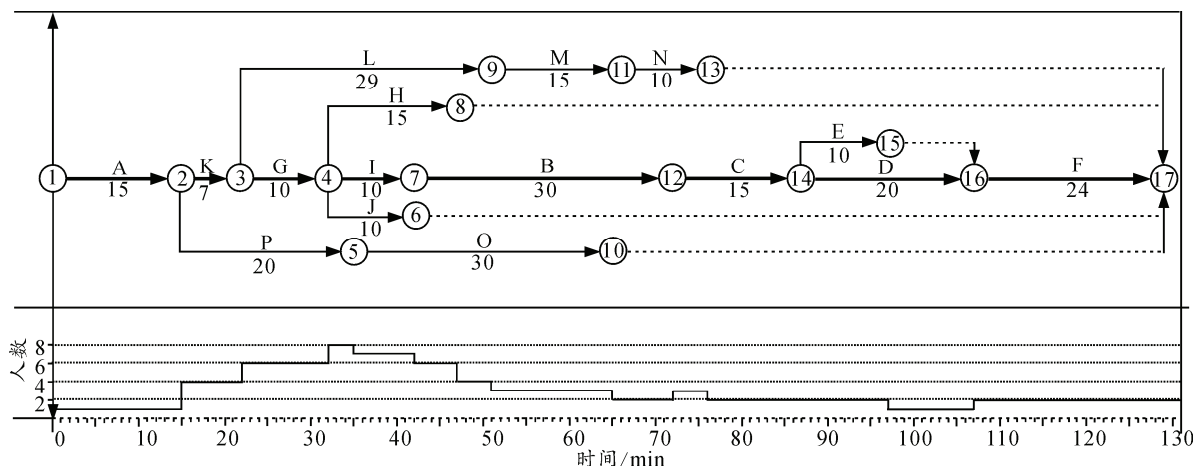


图3 优化后某型高炮车检查网络图及人力资源分配

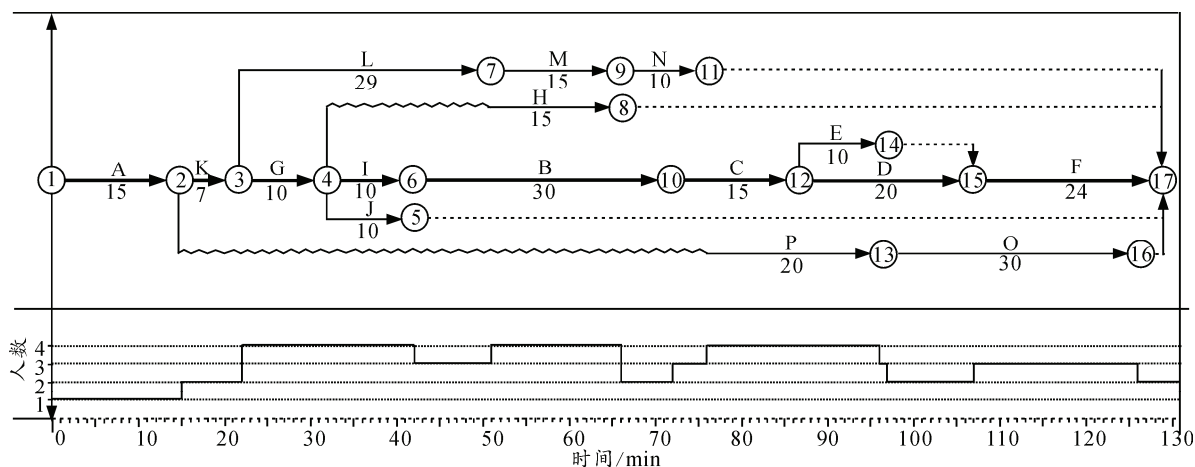


图4 人力资源平衡后某型高炮车检查网络图及人力资源分配

5 结论

笔者以海军防空装备某型高炮车为例，通过优化行军前检查流程，提高了人员效率。在确定检查流程中的关键工序后，通过人员培训提高号手通用性和操作熟练度，可有效缩短流程时间，进而提高整个技术准备效率。根据对人力资源平衡的分析，可以解决单型装备的人力资源平衡问题。虽然着重研究的是某型高炮车行军前流程优化问题，但该技术也可应用到其他型号装备的检查、展开、撤收以及系统联调等任务，有效提高防空装备战备转进的效率。

但是，对于整个系统装备的资源平衡，再采用上述方法进行就十分困难。需要采取智能算法来搜索出优化方案，这也是笔者以后继续研究的方向。

参考文献：

- [1] 朱文斌. 遗传算法在武器装备保障资源优化中份的应用[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(5): 85-87.
- [2] 王诺. 网络计划技术及其拓广研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999: 32-34.
- [3] 林知言, 潘宝根. 网络计划技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987: 57-68.
- [4] 高福聚. 工程网络计划技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 29-31.
- [5] 马登武, 郭小威, 吕晓峰. 基于网络计划技术的舰载机航空导弹转运流程[J]. 兵工自动化, 2010, 29(9): 48-51.
- [6] 王众托. 系统工程引论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 15-17.
- [7] 李明雨, 杨萍, 毕义明. 网络计划在导弹批量测试中的应用[J]. 兵工自动化, 2005, 24(4): 19-21.
- [8] 谭伟. 基于遗传算法的多项目网络计划优化研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009: 14-15.