

文章编号: 1674-8190(2023)05-138-06

直升机梯次使用控制及评价指标分析

郝万亮, 王占元, 刘超

(中国人民解放军 32145 部队, 新乡 453000)

摘要: 直升机梯次使用控制是航空装备保障的一项重要工作, 通过合理安排直升机的梯次使用, 可以最大限度地发挥直升机的整体使用效能。针对直升机梯次使用控制中的难点及缺乏评价指标的问题, 介绍梯次使用控制的两种方法, 重点阐述梯次使用优化控制技术方法; 推导分析不同参数对梯次使用控制的影响, 提出衡量梯次使用控制效果的三个评价指标, 并利用梯次使用优化控制技术方法进行算例分析。结果表明: 单机年度任务最短时间与最长时间之和为常数, 本文推导出的参数选择方法正确, 提出的评价指标合理可行, 可为下一步研究提供参考。

关键词: 直升机; 梯次使用; 梯次优化控制技术; 评价指标

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.05.17

The analysis of echelon usage control and evaluation indexes of helicopters

HAO Wanliang, WANG Zhanyuan, LIU Chao

(Unit 32145 of the People's Liberation Army of China, Xinxiang 453000, China)

Abstract: The echelon usage control of helicopters is one of the most important job in the aviation equipment support, the overall efficiency of helicopter can be maximized by arranging the echelon usage. Aiming at the difficulty and lack of evaluation index in the echelon usage control, two methods of the echelon usage control are introduced, the way of echelon optimization control technology is mainly expatiated, the influences of different parameters in the echelon usage control are deduced and analyzed, and three evaluation indexes of echelon usage control are presented. Finally, a case study is carried out by using the method of echelon optimization technology, the results indicate that the sum of minimum time and maximum time of annual mission is a constant, the parameter selection method deduced in the paper is correct, and the evaluation indexes proposed are reasonable, and the research direction of the next step is clarified.

Key words: helicopter; echelon usage; echelon usage optimization control technology; evaluation index

收稿日期: 2022-07-14; 修回日期: 2022-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(62101499)

通信作者: 郝万亮, hwlhxr@163.com

引用格式: 郝万亮, 王占元, 刘超. 直升机梯次使用控制及评价指标分析[J]. 航空工程进展, 2023, 14(5): 138-143, 151.

HAO Wanliang, WANG Zhanyuan, LIU Chao. The analysis of echelon usage control and evaluation indexes of helicopters[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(5): 138-143, 151. (in Chinese)

0 引言

直升机梯次使用控制作为航空装备质量控制工作的重要内容,通过综合考虑各种因素合理安排直升机的使用,使直升机剩余寿命形成适当的梯次间隔,分散各直升机定检、大修等内容,避免因直升机集中定检、到寿而影响正常飞行任务的执行。优化直升机梯次使用是落实直升机装备保障“精细化”管理的具体举措,是充分发挥直升机使用最大效能的重要手段,要合理安排年度飞行任务指标分配、大修计划的制定,提高工作效率,科学制定检修计划,为航空装备保障提供精准高效的服务。

李明军^[1]、唐锋等^[2]概述了飞机梯次使用问题及其重要性;王悦^[3]在考虑了航空公司维修成本的基础上,对发动机的梯次搭配进行定性分析,但未提出具体的使用方法,且由于直升机和发动机使用对象不同,其考虑的因素也存在很大差别;刘清等^[4]针对歼击机、歼轰机在飞机战备需求、余寿梯次状况、疲劳损伤、腐蚀损伤、计划执行度5个方面提出了评价指标,但直升机的飞行任务和结构特点与战机不同,在实际飞行过程中速度低、强度较小,故疲劳损伤、腐蚀损伤等对直升机来说并不是关键指标;李连等^[5]在考虑歼击机、歼轰机训练动作对飞机疲劳影响的基础上,提出了特技时间比例一致性指标,但由于直升机在实际使用过程中特技动作少,该指标并不适用于直升机评价;王毅等^[6-7]通过对飞机使用时间的影响因素进行综合分析,建立了飞机使用计划的多目标规划模型,侧重制定单架飞机的月计划时间梯次,并未对整个机群的梯次使用进行综合分析;刘嘉等^[8]、贾向军等^[9]主要考虑装备在位率、大修厂修理能力、装备实际余寿等因素,提出了一种装备使用最优梯次间隔计算方法,但未系统介绍在实际使用中机群梯次搭配问题;岳军^[10]、张乾等^[11]和韩泽峰等^[12]简要介绍了直升机梯次使用梯形图法的绘制方法及注意事项,该方法适用于装备数量少、对直升机梯次状况进行简单分析的情形;陈跃良等^[13]对军用飞机日历寿命早于飞行小时寿命到寿的问题,对日历寿命的影响因素进行分析,提出了“延寿”的思路,但未提出梯次使用的具体方法。

针对直升机机群梯次使用问题,本文结合直

升机的结构特点和使用规律,全面阐述直升机梯次使用的两种方法,重点对梯次使用优化控制技术方法的关键问题进行探讨,提出梯次使用控制的评价指标,并进行算例分析。

1 直升机梯次使用方法

直升机梯次使用是指同型直升机到达规定大修时限的剩余使用时间,相互间保持一定的间距,形成梯次排列。因此,必须合理制定直升机的梯次使用计划,每年各单位要根据相关规定、直升机状况、下年度任务特点和其他因素制定直升机梯次使用计划^[14]。现有的直升机梯次使用方法主要有两种:绘制直升机梯次使用梯形图法和梯次使用优化控制技术方法。

1.1 绘制梯次使用梯形图法

梯次使用梯形图法是一种经典的梯次使用控制方法,多年来一直在航空兵部队作为航空装备梯次控制的主要方法,其特点是简明直观,能够显示出机群梯次控制状况、剩余寿命情况、送修及返修状况等^[15]。直升机梯次使用梯形图法如图1所示,每架机的间翻寿命规定为700 h,则机群总间翻寿命为 $700 \times 6 = 4\,200$ h,即 $OEIH$ 表示的矩形面积;为了满足40%储备寿命的要求,需建立一条标准控制线,如图中 OY 所示,三角形 OEY 的面积就是应预留的储备寿命;送修数是送修直升机的编号和数量,图上编号为1的直升机需送修;补充数为返修的直升机编号和数量; $O'KPM$ 是按照直升机返修后重新绘制的梯形图。

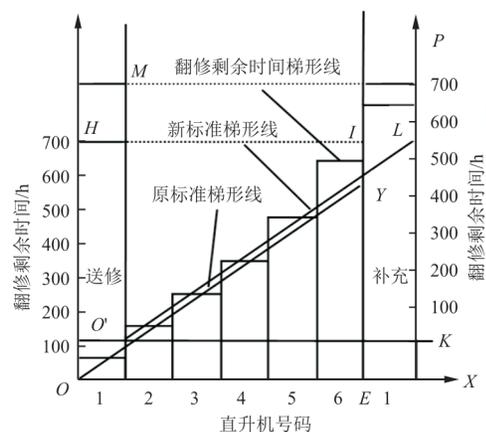


图1 直升机梯次使用梯形图法

Fig. 1 Ladder diagram method of helicopter echelon usage

尽管梯形图法简明直观,能够快速看出整个机群的剩余寿命及送修和返修情况,但是随着装备数量不断增加,人工绘制工作量大,单架机剩余寿命、计划飞行时间和梯次计划完成情况准确计算较为困难,已难以满足直升机梯次使用和寿命控制精细化管理的要求。

1.2 梯次使用优化控制技术方法

梯次使用优化控制技术方法的核心思想是通过调整单架机的飞行时间,逐步达到机群最佳梯度控制的目标。最佳梯度需满足以下三个标准:

1) 最佳梯次状态:通过采取有效措施保证机群剩余寿命达到总规定寿命的50%左右为最佳梯次状态。

$$T_{\text{best}} = (T \times M) \times 50\% \quad (1)$$

式中: T_{best} 为最佳梯次剩余寿命; T 为机型规定寿命; M 为编制架次。

2) 最佳梯度:相邻两架机剩余寿命间隔基本相同,约等于机型规定寿命除以编制架次。

$$G_{\text{best}} = \frac{T}{M} \quad (2)$$

式中: G_{best} 为最佳梯度。

3) 最佳大修架次:

$$X_{\text{best}} = \frac{R}{S} \quad (3)$$

式中: X_{best} 为最佳大修架次,保证每年大修计划架次在最佳大修架次上下浮动; R 为年度飞行任务量; S 为单机规定翻修时限或寿命。

梯次制定的方法:

1) 根据任务总量计算单机平均飞行时间、单机最长飞行时间和单机最短飞行时间:

$$\begin{cases} H_{\text{平均}} = \frac{\text{飞行任务时间}}{\text{直升机总数量}} \\ H_{\text{最长}} = 1.5 \times H_{\text{平均}} \\ H_{\text{最短}} = 0.5 \times H_{\text{平均}} \end{cases} \quad (4)$$

2) 确定大修直升机数量。筛选一年内日历期将要到寿的直升机,该机必须列为送修对象。同时考虑剩余寿命小于 $H_{\text{最长}}$ 的直升机以及在厂大修架次,合理安排送修架数,逐步向最佳大修架次靠拢。

3) 飞行时间分配。

① 送修直升机时间分配,日历期到寿的直升

机除去预留转场所需时间,时间分配以年度最长飞行时间除以12个月再乘以到寿月份,并与其剩余寿命对比确定任务指标,尽量保证剩余寿命用完。

$$R_{\text{日历期到寿送修}} = T_{\text{预留转场}} + \frac{H_{\text{最长}}}{12} \times \text{到寿月份} \quad (5)$$

小时到寿的直升机预留转场所需时间,其他剩余寿命全部用于安排飞行时间。

$$R_{\text{小时到寿送修}} = T_{\text{预留转场}} + T_{\text{剩余寿命}} \quad (6)$$

② 出厂直升机时间分配,综合考虑直升机在厂大修周期,预测出厂月份,并根据 $H_{\text{平均}}$ 来分配任务时间,对于出厂直升机飞行时间有特殊规定的需综合考虑。

$$R_{\text{出厂}} = \frac{H_{\text{平均}}}{12} \times (12 - \text{出厂月份}) \quad (7)$$

③ 重点直升机的时间分配,当机群未有直升机大修时,要重点使用剩余寿命较少的几架直升机,促进机群尽快进入大修循环。根据最佳大修架次 X_{best} 确定需安排最长飞行时间的直升机数量,不考虑相互间梯度关系。

④ 其余直升机的时间分配方法。根据下达的任务总量,去掉送修直升机、出厂直升机以及不考虑梯次的重点直升机时间,即为需进行梯次计算的总时间:

$$R_{\text{计算}} = R_{\text{总}} - R_{\text{大修}} - R_{\text{出厂}} - R_{\text{重点}} \quad (8)$$

假设需参与梯次计算的直升机数量为 N ,将每架直升机剩余寿命 T_i 按照从小到大的顺序排列,每架直升机的目标梯次设为 A_i ,任务时间为 R_i ,其中 $i=1, 2, \dots, N$ 。

令

$$\begin{cases} R_1 = H_{\text{最大}} \\ R_N = H_{\text{最小}} \end{cases} \quad (9)$$

则有

$$\begin{cases} A_1 = T_1 - R_1 \\ A_N = T_N - R_N \end{cases} \quad (10)$$

为了使 $A_i (i=1, 2, \dots, N)$ 成等间隔梯次排列,可计算出梯度为

$$G = \frac{A_N - A_1}{N - 1} \quad (11)$$

由此可计算出每架机的目标梯次

$$A_i = A_1 + (i - 1) \times G \quad (12)$$

式中: $i=2, 3, \dots, N$ 。

进而最终得出每架直升机的年度任务时间

$$R_i = T_i - A_i \quad (13)$$

式中: $i = 2, 3, \dots, N-1$ 。

⑤参与梯次计算的直升机任务时间调整方法。根据式(9)和式(13)计算出的各架机任务时间总量往往与任务量不一致,即

$$R_{\text{计算}} \neq \sum_{i=1}^N R_i \quad (14)$$

为了使两个数量一致,需通过调整最短飞行时间扩大或减少计算量。经过推导计算,得出了最大值与最小值确切的量化关系。

根据式(12)可知,目标梯次的总剩余时间为

$$\sum_{i=1}^N A_i = \frac{N \times (A_1 + A_N)}{2} \quad (15)$$

将式(10)代入式(15)中可得

$$\sum_{i=1}^N A_i = \frac{N \times [(T_1 + T_N) - (R_1 + R_N)]}{2} \quad (16)$$

而直升机总剩余寿命为 $\sum_{i=1}^N T_i$, 由此得出任务时间为

$$\sum_{i=1}^N R_i = \sum_{i=1}^N T_i - \sum_{i=1}^N A_i \quad (17)$$

综合式(16)和式(17),可得出

$$R_1 + R_N = T_1 + T_N - \frac{2 \times \left(\sum_{i=1}^N T_i - \sum_{i=1}^N R_i \right)}{N} \quad (18)$$

式中: N, T_i, R_i 均为已知值。

因此, R_1 与 R_N 的和为常数, 理论上有一无数组 R_1 和 R_N 能够满足这一指标。

$$Q_3 = \left[1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-1} (T_{i+1} - T_i - G_{\text{best}})^2 + (T_1 + T - T_N - G_{\text{best}})^2}}{(N-1) \times G_{\text{best}}^2 + (T - G_{\text{best}})^2} \right] \times 100\% \quad (21)$$

由式(21)可知, 当各直升机剩余寿命间隔与最佳梯度越接近时, Q_3 的值越大, 表明此时梯次较为合理, 当二者相等时, $Q_3 = 100\%$, 即达到控制的最佳梯次; 反之, 直升机剩余寿命间隔与最佳梯度差值越大, 则梯次越差, 在极端情况下, 当各直升

2 梯次使用控制评价指标

目前各直升机单位在梯次使用控制上普遍不合理, 一方面是由于历史的原因或者批量接收新装备导致短期内难以拉开梯次, 另一方面是质量控制人员主要依据梯形图法或者优化控制技术方法进行定性分析, 缺乏科学的指标用于评价和指导直升机的梯次使用。本文利用优化控制技术中的三个标准作为评价指标, 用于量化梯次使用的效果。

1) 梯次状态指标 Q_1 。该指标由机群总剩余寿命与最佳梯次状态的比值确定:

$$Q_1 = \left(1 - \left| \frac{T_{\text{机群余寿}} - T_{\text{best}}}{T_{\text{best}}} \right| \right) \times 100\% \quad (19)$$

由式(19)可知, 机群余寿越接近最佳梯次剩余寿命 T_{best} , Q_1 值越大, 距离最佳梯次剩余寿命越远, Q_1 值越小。

2) 大修架次指标 Q_2 。该指标由年大修架次 X 与最佳大修架次的比值确定:

$$Q_2 = \frac{X}{X_{\text{best}}} \quad (20)$$

Q_2 值越接近于 1, 表明梯次送修的架数越合理。

3) 梯度指标 Q_3 。该指标用于对直升机剩余寿命梯次状况进行评价。根据文献[4]的相关表述, 直升机规定寿命为 T , 各直升机剩余寿命从小到大依次为 T_1, T_2, \dots, T_N , 最佳梯度 G_{best} 如式(2)所示, 则直升机剩余寿命梯度指标 Q_3 为

机剩余寿命完全相等时, $Q_3 = 0$, 此时认为梯次状况最差或无梯次。

因为满足任务量的 R_1 和 R_N 之和为常数, 所以理论上有一无数组 (R_1, R_N) 满足要求, 综合式(10)、式(11)及式(21), 得出:

$$Q_3 = \left[1 - \frac{\sqrt{\left(\frac{T_N - T_1 - (R_N - R_1)}{N-1} - G_{\text{best}} \right)^2 \times (N-1) + (T_1 + T - T_N - G_{\text{best}})^2}}{(N-1) \times G_{\text{best}}^2 + (T - G_{\text{best}})^2} \right] \times 100\% \quad (22)$$

由式(22)可知, Q_3 值的大小近似随着 $(R_N - R_1)$ 的大小而变化, 即 R_N 和 R_1 差值越大, 剩余寿命

梯次状况越好。但是在实际计算过程中, 当机群梯度很差, 纯数学计算导致最大值超过实际保障

能力,或者个别值出现负值时,可考虑利用分段计算的方式重新计算。

3 算例分析

利用梯次使用优化控制技术方法对某机群制定梯次使用计划。该机群共编制 14 架机,间翻寿命为 2 400 h,各直升机剩余寿命如表 1 所示。

表 1 直升机剩余寿命统计表
Table 1 Statistics on remaining time of helicopters

机号	剩余寿命/h	机号	剩余寿命/h
1#	706	8#	1 473
2#	711	9#	1 568
3#	887	10#	1 795
4#	912	11#	1 826
5#	1 150	12#	1 984
6#	1 253	13#	2 065
7#	1 389	14#	2 186

该机群一年内无日历期到寿直升机,所有在队 14 架直升机均参与梯次时间分配计算,年度计划时间 3 000 h,根据式(4)可得

$$\begin{cases} H_{\text{平均}} = \frac{3000}{14} \approx 214 \\ H_{\text{最大}} = 1.5 \times 214 = 321 \\ H_{\text{最小}} = 0.5 \times 214 = 107 \end{cases}$$

根据 $H_{\text{最大}}$ 和 $H_{\text{最小}}$,并利用式(9)~式(13)可计算出各直升机计划时间,如表 2 所示。

表 2 各直升机任务时间分配
Table 2 Assignment time of each helicopter

机号	剩余寿命/h	目标梯次/h	计划时间/h	调整后时间/h
1#	706	385	321	321
2#	711	449	196	199
3#	887	513	241	249
4#	912	577	136	147
5#	1 150	642	244	259
6#	1 253	706	216	235
7#	1 389	770	222	245
8#	1 473	834	176	202
9#	1 568	898	141	171
10#	1 795	962	237	271
11#	1 826	1 027	138	176
12#	1 984	1 091	166	207
13#	2 065	1 155	116	162
14#	2 186	1 219	107	156

根据公式计算得出的总计划时间为 2 657 h,与年度计划时间 3 000 h 不符,需调整 1# 和 14# 的计划时间,根据式(18)可得 $R_1 + R_{14} = 477$,当 R_1 取最大值 321 时,可得 $R_{14} = 156$,据此计算出各直升机的任务时间和目标梯次,如表 2 所示,梯次计划图如图 2 所示。

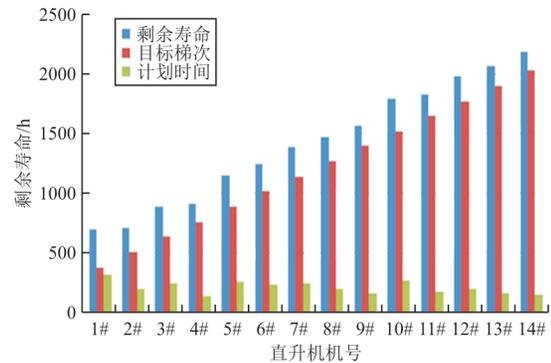


图 2 直升机梯次计划图

Fig. 2 Helicopter echelon plan

对该算例的梯次使用控制评价指标进行计算:

1) 梯次状态指标。根据式(19)算出年初机群梯次状态指标 $Q_1 = 81.52\%$,年度计划为 3 000 h,执行完梯次计划后剩余寿命接近最佳梯次剩余寿命,梯次状态指标 $Q_1 = 99.38\%$,表明该指标能较好地反映梯次控制情况。

2) 大修架次指标。年度计划 3 000 h,机型间翻寿命 2 400 h,根据式(20)计算出最佳大修架次约为 1 架,本算例并未送修,原因是制定送修计划时要综合考虑日历寿命等情况,当实际需要送修时该指标可作为送修架次的参考值,不影响其作为评价指标的合理性。

3) 梯度指标。根据式(2)该机群的最佳梯度为 171,在调整 R_1 和 R_{14} 的值时,不同的值将对应不同的梯度,并据式(22)计算出梯度指标如表 3 所示。

表 3 R_1 和 R_{14} 不同取值对梯度的影响
Table 3 The influence of different values on shaving

R_1	R_{14}	G	$Q_3/\%$
321	156	127	66.90
280	197	120	66.65
240	237	114	66.42

从表3可以看出: R_1 与 R_{14} 差值越大梯度越接近最佳梯度,梯度指标 Q_3 的值越大。在实际使用过程中,需通过逐年调整梯次计划使梯度值逐步向最佳梯度靠拢,从而达到梯次最优的目标。

4 结 论

1) 在梯次优化控制技术方法中通过数学推导,得出了单机年度任务最短时间与最长时间之和为常数的结论,为实际制定梯次使用计划过程中参数的选择和调整提供有效指导。

2) 提出的梯次使用控制评价指标合理可行,能在一定程度上反映梯次控制的效果,可作为实际工作中的参考指标。

3) 目前普遍存在日历期比飞行小时提前到寿的情况,致使直升机日历送修在前,这在一定程度上干扰了梯次使用计划,因此如何在综合考虑日历期和飞行小时的情况下,制定切实可行的梯次使用计划及评价指标,需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 李明军. 装备维修质量控制学[M]. 成都:西南财经大学出版社, 2014: 16-22.
LI Mingjun. Quality control of equipment maintenance[M]. Chengdu: Southwest University of Finance and Economics Press, 2014: 16-22. (in Chinese)
- [2] 唐锋,陈晓所,方标兵,等. 飞机寿命管理及梯次使用问题研究[J]. 航空维修与工程, 2017(1): 25-27.
TANG Feng, CHEN Xiaosuo, FANG Biaobing, et al. Aircrafts life management and echelon usage research[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2017(1): 25-27. (in Chinese)
- [3] 王悦. 浅谈航空公司发动机机队的梯次管理[J]. 航空维修与工程, 2011(5): 84-86.
WANG Yue. Analysis of aeroengine fleet stagger management[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2011(5): 84-86. (in Chinese)
- [4] 刘清,李连,苏涛. 军用飞机梯次使用控制评价指标[J]. 兵工自动化, 2016, 35(3): 24-27.
LIU Qing, LI Lian, SU Tao. Evaluation indexes for echelon usage control of military aircraft[J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(3): 24-27. (in Chinese)
- [5] 李连,刘清,苏涛. 一种基于训练数据的飞机梯次使用控制指标研究[J]. 飞机设计, 2016, 36(6): 74-77.
LI Lian, LIU Qing, SU Tao. The control indicators research in echelon usage of aircraft basing on training data[J]. Aircraft Design, 2016, 36(6): 74-77. (in Chinese)
- [6] 王毅,徐成杰,梁伟,等. 基于多目标规划的飞机使用计划模型研究[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2009, 30(1): 73-77.
WANG Yi, XU Chengjie, LIANG Wei, et al. Research in the aircraft scheme model based on multi-objective programming[J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 30(1): 73-77. (in Chinese)
- [7] 梁伟,王毅,刘建军. 作战飞机使用计划模型研究[J]. 空军航空大学学报, 2009, 2(2): 38-41.
LIANG Wei, WANG Yi, LIU Jianjun. Research of battle aircraft scheme model[J]. Journal of Air Force Aviation University, 2009, 2(2): 38-41. (in Chinese)
- [8] 刘嘉,田丰维,肖楚琬,等. 一种航空装备使用最优梯次间隔时间计算方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2021, 36(2): 179-184, 228.
LIU Jia, TIAN Fengwei, XIAO Chuwan, et al. A method of the optimal echelon usage interval time calculation to aircraft fleet and equipment[J]. Journal of Naval Aviation University, 2021, 36(2): 179-184, 228. (in Chinese)
- [9] 贾向军,朱世界,李爱兵. 多寿命指标控制下飞机梯次使用控制方法初探[J]. 海军航空工程技术, 2020(4): 9-10.
JIA Xiangjun, ZHU Shijie, LI Aibing. Aircraft echelon usage control under multi-life indexes[J]. Naval Aviation Engineering Technology, 2020(4): 9-10. (in Chinese)
- [10] 岳军. 直升机梯次使用计划图的绘制[J]. 电子技术与软件工程, 2019(6): 100.
YUE Jun. Drawing the helicopter echelon usage plan diagram[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(6): 100. (in Chinese)
- [11] 张乾,王远达. 飞机梯次使用方法研究[C]//吉林省第七届科学技术学术年会论文集. 长春:吉林省科学技术学会, 2012: 241-242.
ZHANG Qian, WANG Yuanda. Research in echelon usage of aircrafts[C]// The 7th Annual Conference of Jilin Province Scientific and Technology. Changchun: Science and Technology of Jilin Province, 2012: 241-242. (in Chinese)
- [12] 韩泽峰,张智敏,况少荣. 用电子表格制作直升机梯次使用计划方法初探[J]. 陆军航空兵学院学报, 2013, 12(5): 73-75.
HAN Zefeng, ZHANG Zhimin, KUANG Shaorong. Method of helicopter echelon usage plan generating using excel[J]. Journal of Army Aviation Institute, 2013, 12(5): 73-75. (in Chinese)