

飞行指挥中最短滑出时间间隔优化分析

黄凌, 龚玺

空军工程大学空管领航学院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年6月8日; 录用日期: 2022年6月28日; 发布日期: 2022年7月6日

摘要

在战时, 飞机能否快速起飞对夺取制空权有着至关重要的影响, 而美国空军作为世界上最强大的空中作战力量, 其飞机的起飞效率在全球范围内属于是较高的, 因此本文将美军驻日机场为例, 研究如何在飞行指挥中快速放飞飞机。为了使机场的飞机能在最短时间内放飞, 提高作战效能, 在把飞机放飞看做是泊松流分布的基础上, 研究飞机的最短滑出时间间隔。且通过排队论的方式, 将飞机在滑行道滑行问题看作是排队论问题; 把飞机对跑道的占用时间看作是排队论中服务台的服务时间; 从机库中滑出的间隔时间看作是飞机的到达时间间隔; 飞机在跑道头的排队方式为单列且不可以相互转移。在经过计算后, 得到了飞机从机库滑出的最佳时间间隔为49.2秒等结论。

关键词

排队论, 塔台指挥, 最优时间间隔

Optimization Analysis of the Shortest Slip out Time Interval in Flight Command

Ling Huang, Xi Gong

Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 8th, 2022; accepted: Jun. 28th, 2022; published: Jul. 6th, 2022

Abstract

In wartime, whether the aircraft can take off quickly has a crucial impact on seizing air control. As the most powerful air combat force in the world, the U.S. Air Force has a high take-off efficiency in the world. Therefore, this paper will take the U.S. airport in Japan as an example to study how to quickly release aircraft in flight command. In order to make the aircraft in the airport be released in the shortest time and improve the operational efficiency, the shortest time interval for aircraft

to slip out is studied on the basis that aircraft release is regarded as Poisson flow distribution. In the way of queuing theory, the problem of aircraft taxiing on taxiway is regarded as a multi aircraft queuing problem; the time of aircraft occupying the runway is regarded as the service time of the service desk in the queuing theory; the time interval of sliding out of the hangar is regarded as the arrival time interval of the aircraft; the queuing mode of aircraft at the runway end is single row and cannot be transferred to each other. After calculation, it is concluded that the best time interval for the aircraft to slide out of the hangar is 49.2 seconds.

Keywords

Queuing Theory, Tower Commander, Optimal Time Interval

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 背景

美国作为世界上一流的超级大国,其军事实力尤为强大,特别是空军力量。美军在其近几年发动的战争中,空中力量在战场中占据了绝对的优势,即美军在战争中能够掌握绝对的制空权。而作战飞机能否在短时间内快速起飞,是夺取战场制空权的关键,美军在这方面做的尤为出色。为了更好地了解美军的管制员如何在较短的时间内将多架飞机连续放飞,笔者在研究了大量文献的基础上,构建了排队论模型,将管制员对于飞机从开车到进跑道起飞的过程进行建模,对飞行指挥中最短滑出时间间隔进行优化分析,最终得出最短的等待时长而使飞机的起飞效率最大化。

2. 滑出时间间隔影响因素

美军在一等战备状态下,为保证紧急情况下的作战需求,尽快放飞飞机、增大本机场的飞机出动率,指挥员通常连续指挥飞机进行滑出,而受制于机场跑道容量的限制,指挥员指挥飞机连续滑出必然导致大量飞机在跑道端等待,增大了飞机在滑行过程中的油耗,间隔过长则无法有效利用跑道来保证飞机按计划起飞。滑出时间通常受以下3个因素限制。

2.1. 滑行路线、停机位置的选择

指挥飞机在滑行道的滑行路线通常需要根据飞机的滑行路线两侧的障碍物情况、道面承压等情况综合考虑,并根据本场的风向条件确定跑道的使用方向和滑行的方向。停机位置的选择需要满足不同机型的性能,并结合考虑本机场停机坪的分布情况确定。

2.2. 管制员发布的放行许可

塔台管制员指挥飞机的滑出时刻通常根据当日的飞行计划确定,向起飞的飞机发布明确先后的起飞顺序,使每个飞机主动掌握开车时机,避免开车过早或过晚,打乱当日的飞行计划。

2.3. 跑道的使用情况

起飞飞机之间需留有最小起飞的安全间隔,并根据相应的机型配备安全尾流间隔,通常是在前面的分级机结束一转弯,后面的飞机才能继续使用跑道起飞。对于战斗机来说,连续起飞的时间间隔通常不

少于 40 秒。

本文主要研究战斗机单一机型在使用同一滑行道、从开车到在跑道内等待起飞阶段管制指挥的障碍物滑行过程, 并根据塔台指挥流程进行排队模型的建立, 塔台指挥飞机起飞的流程如图 1。

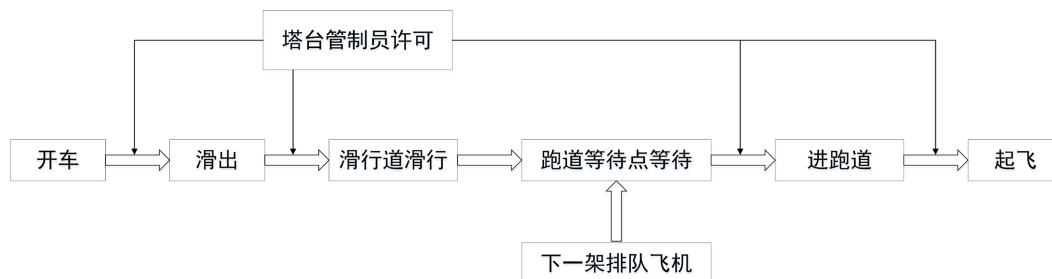


Figure 1. Brief introduction to tower flight command process

图 1. 塔台飞行指挥流程简介

3. 飞机排队模型简介

我们将飞机在滑行道滑行问题看作是多机排队问题; 把飞机对跑道的占用时间看作是排队论中服务台的服务时间; 从机库中滑出的间隔时间看作是飞机的到达时间间隔; 飞机在跑道头的排队方式为单列且不可以相互转移。

3.1. 模型参数定义

排队论的标准形式为 $X/Y/Z$, 其中 X 表示相继到达间隔时间的分布; Y 表示服务时间的分布; Z 表示服务系统内服务台的个数[1], 相关参数及背景意义如表 1 所示。

Table 1. Definition of symbols in queuing theory model

表 1. 排队论模型符号的定义

符号	表达意义
P_0	t 时刻系统处于空闲的概率
P_1	t 时刻系统处于忙着的概率
μ	平均服务率
λ	单位时间内平均到达的飞机数
M	负指数分布

3.2. 塔台指挥排队论系统主要由以下三部分组成

1) 输入过程

输入过程即到达排队系统的过程, 其总体的组成可以是有限的, 也可能是无限的, 但是飞机的到达需要是随机且相互独立的。

2) 排队规则

飞机到达后的排队方式为等待制、排队队形为有形的、排队队列为单列且不可相互转移。

3) 服务机构

对飞机提供服务的设施或对象, 服务机构设有多个服务台和单个服务台。

全过程如图 2 所示:

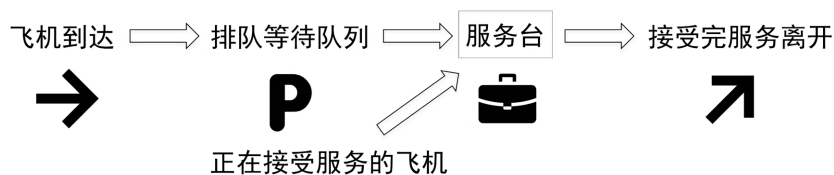


Figure 2. Introduction to queuing theory system
图 2. 排队论系统简介

4. 排队论等待时间间隔模型

4.1. 排队等待起飞队列的分布

从停机位滑行至跑道端及在跑道端排队等待两个过程看作滑出阶段[2], 由前文可知, 飞机从机库滑出并经过联络道到达跑道端为等待起飞队列的输入过程, 在此过程中, 我们做出如下假设:

- 1) 当日的风向稳定, 飞机使用固定跑道端起飞, 各机能顺利进入和退出跑道。
- 2) 每个时间段内每架飞机准备好可以滑出的概率与停机位置的选择无关, 仅与该机场每日飞行计划的出动架次数量有关。
- 3) 对于一个充分小的时间段, 管制员在下达飞机滑出和进跑道指令时不涉及等待调配。
- 4) 飞机在滑行道滑行产生冲突的概率一般可以忽略, 即使有, 一般条件下也会被管制员调开[3], 故此概率可忽略。

对于排队系统而言, 由于每日的飞行计划具有不确定性, 所以到达系统的飞机及数目具有随机性, 在指挥员指挥飞机滑出的过程中, 飞机从跑道头进跑道以及排队等待的排队系统相当于了一个到达的输入变量, 因此本文将飞行员在开车到滑出的过程中每个架次的飞机是单个到达且相互独立的随机变量, 即飞机从滑出至跑道端的过程可以看作是泊松流[4], 故到达跑道端的飞机数量故到达跑道端飞机数量 $X \sim \pi(\lambda)$ 。

4.2. 服务台服务时间 T 的分布

飞机从对正跑道至起飞后可以供下一架飞机继续使用跑道为起飞阶段, 即服务台 S 提供服务时间, 整个过程为连续不间断起飞, 且从第一架飞机开始服务到这段时间内最后一架飞机开始服务的时间 T 服从 Gamma 分布, 即: $T \sim G(\rho, \lambda)$ 其期望 $E(T) = \rho/\lambda$, 方差为 $Var[T] = \rho/\lambda^2$, 其中 λ 为每分钟平均到达的飞机数, μ 为每分钟跑道平均服务的飞机数, 服务强度 $\rho = \lambda/\mu < 1$ 。

4.3. 排队起飞等待时间模型

飞机到达规律服从泊松流, 到达时间间隔服从负指数分布, 跑道服务的时间为一般分布[5], 服务机构唯一且排队容量无限的排队系统, 为 $M/G/1/\infty$ 模型。根据 Pollaczek-Khintchine (P-K) 公式可求出稳态下系统平均队长 L_s :

$$L_s = \rho + \frac{\rho^2 + \lambda^2 \cdot Var[T]}{2(1 - \rho)}$$

$$L_s = \frac{\lambda(3\mu - \lambda)}{2\mu(\mu - \lambda)}$$

由 Little 公式可得平均等待时间, 即飞机在跑道端排队等待起飞的时间 W_s :

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda} = \frac{3\mu - \lambda}{2\mu(\mu - \lambda)}$$

由上文可知, λ 为每分钟平均到达的飞机数, 即可理解为这一次过程从机库滑出了 λ 架次飞机, 假设某机场共有 n 个机库停车位, 所以在塔台指挥的过程中, 需要 n/λ 次过程才能将总共的 n 架次飞机全部放出。故而所有飞机的等待总时间 $W_{s\text{总}}$ 为:

$$W_{s\text{总}} = W_s \times \frac{n}{\lambda} = \frac{n(3\mu - \lambda)}{2\mu\lambda(\mu - \lambda)}$$

5. 排队论模型等待时间间隔分析

以嘉手纳机场为例, 根据上文可知飞机的到达规律服从泊松流, 到达时间间隔服从负指数分布跑道服务的时间为一般分布, 服务机构唯一且排队容量无限的排队系统, 因此我们选择 M/G/1/ ∞ 模型进行分析。

假设机场共有 20 个机库, 当日飞行训练共出动 20 架次飞机, 以本场训练的 F-15 飞机为例, 其起飞间隔为 40 s, 故每分钟跑道平均服务的飞机数为 1.5 架次/分钟, 则:

$$n = 20, \mu = 1.5$$

$$W_{s\text{总}} = \frac{45 - 10\lambda}{2.25\lambda - 1.5\lambda^2}$$

画出其函数图像如图 3 所示。

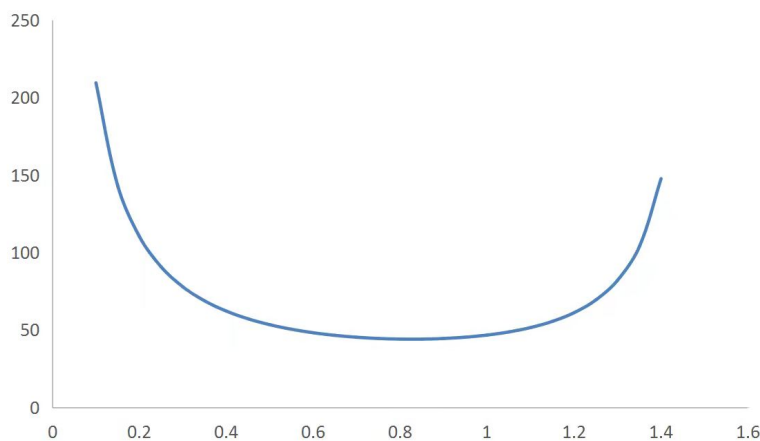


Figure 3. Queueing time function image

图 3. 排队时间函数图像

求得两个极值点 $\{x \rightarrow 0.825765\}, \{x \rightarrow 8.17423\}$, 由上文可知 $\lambda < \mu$, 故 $\lambda \in (0, 1.5)$, 舍弃第二个值, 所以 $\lambda = 0.825765$, 对应逗留总时长的极小值为 $W_{s\text{总min}} = 43.9955 \text{ min}$, 则易得队长 $L_s = 1.5$, 系统平均服务强度为:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \approx 0.55$$

即在嘉手纳机场放飞 F-15 型飞机从机库滑出 20 架次时, 在不考虑来场飞机的情况下, 管制员指挥飞机在最短时间内全部滑出且在滑行道等待的时间最短, 其最佳滑出时间间隔为 0.82 分钟(约 49.2 秒), 飞机在跑道端等待起飞的最小平均队长为 1.5 架次, 即一架在跑道头等待接受服务, 另一架正在滑行道

滑行。所有飞机在排队系统的滑行阶段等待时间总量最短为 43.99 分钟, 接受服务台服务总时长为 13.3 分钟(约 800 秒), 跑道的利用率为 55%, 整个流程大致如图 4 所示。

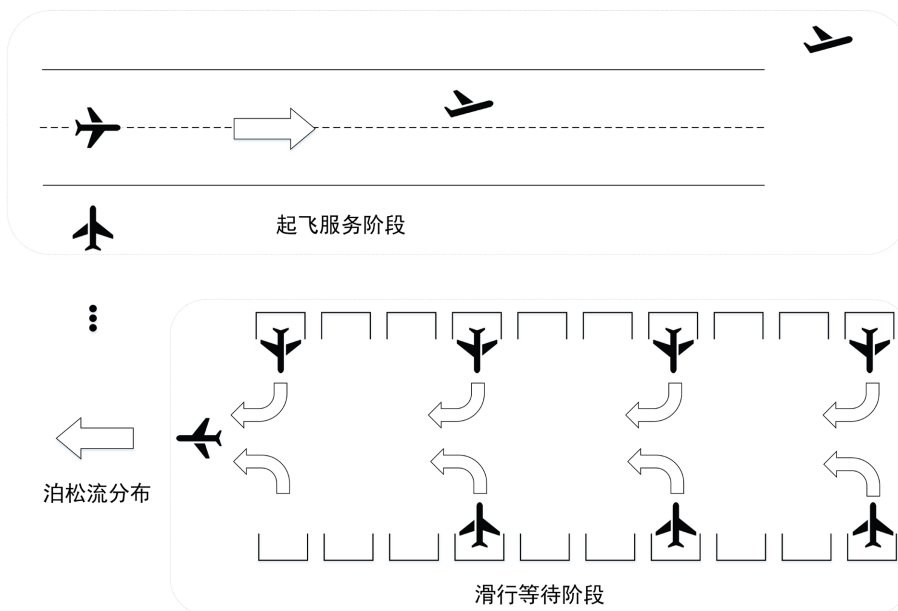


Figure 4. Schematic diagram of airport queuing model
图 4. 机场排队模型示意图

6. 模型优点

- 1) 有助于管制员在制定管制预案时合理优化飞机排队顺序, 使每架飞机之间的平均等待队长和平均等待时长更短;
- 2) 有助于优化管制员注意力分配, 使管制员对自身管制扇区内航路航线配置、空域配置更加了解, 使管制员指挥更加流畅;
- 3) 将管制员指挥工作流程化、模型化, 之后再遇到类似情况直接使用模型进行分析, 减少制定预案时间, 更合理地对空中交通流量进行管理。
- 4) 使用该模型解决相关问题, 能够将复杂的问题简单化, 系统的问题模型化, 且使用数学方法解决实际问题, 大大增加了实际问题的可解决性。
- 5) 服务台服务时间 T 服从 Gamma 分布, 增强了模型的准确性。

7. 结论

本文结合排队论相关知识与塔台指挥具体情况讨论了单一机型在随机服务系统中排队等待的最优化时间长短的问题。并通过建立模型得到了以下结论:

- 1) 计算出飞机从机库滑出的最佳时间间隔为 49.2 秒
- 2) 飞机滑出服从 $M/G/1/\infty$ 模型可减少飞机在滑行等待过程中的油耗
- 3) 利用该排队论模型可减少放飞时长, 提高作战效能

但在管制指挥的过程中, 该模型通常还会受排队长度、等待期间有飞机降落、不同机型的机翼尾流、飞行员个人技术因素、航空管制流量管理等因素的限制, 这些不稳定因素都会导致飞机在跑道端等待起飞时间的延长。所以在指挥的过程中, 为满足不同时段内的放飞需求, 还要将相应的理论依据结合实际

情况合理安排飞机的滑出时刻, 通过增大对跑道的利用率来增强机场的作战服务效能。

参考文献

- [1] 陆传赉. 排队论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1994.
- [2] 潘卫军, 梁延安, 梁海军, 邓文祥, 郑思睿. 基于数值计算模型的单跑道起飞间隔安全分析[J]. 航空计算技术, 2019, 49(4): 4-8.
- [3] 傅辰涛, 王宏伟. 飞行冲突探测与调配辅助决策过程研究[C]//中国指挥与控制学会. 第一届空中交通管理系统技术学术年会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2018: 74-77.
- [4] 程小慷, 孙传君, 张秉海. 基于排队论的中小机场机坪容量评估[J]. 中国科技信息, 2017(12): 65-66+13.
- [5] 康瑞, 杨凯. 机场航空器起降间隔优化设计仿真[J]. 计算机仿真, 2018, 35(5): 50-54+181.