

基于利用率的机场快速出口位置优化分析

种小雷^{1,2}, 蔡宛彤¹, 王克春³, 朱丁文³

(1.空军工程大学机场建筑工程系,陕西西安,710038;2.长安大学公路学院,陕西西安,710062;
3.济南军区空军后勤部,山东济南,250000)

摘要 为保证快速出口设置的合理性,从提高机场快速出口利用率的角度对快速出口位置优化进行了系统研究。通过分析飞机着陆滑跑距离的特点,指出影响快速出口位置的主要因素符合正态分布的规律;针对单一机型使用的快速出口,构造了利用率的概念,建立了基于利用率的快速出口位置优化模型;针对多机型共用的快速出口,构造了综合利用率的概念,建立了基于综合利用率的快速出口位置优化模型。在此基础上,针对某典型机型组合,进行了快速出口位置的优化,提出相应的快速出口位置,总结了基于利用率的快速出口位置确定步骤。

关键词 航空运输;机场;快速出口;利用率;优化分析

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.03.002

中图分类号 U8 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)03-0006-04

Optimization Analysis of Airfield Runway High-speed Exit Location Based on Utilization Ratio

CHONG Xiao-lei^{1,2}, CAI Wan-tong¹, WANG Ke-chun³, ZHU Ding-wen³

(1. Department of Airport Construction Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Logistic Department of Jinan Air Force, Jinan Military Region, Jinan 250000, China)

Abstract: In order to guarantee the rationality of the high-speed exit settings, the problem how to set the high-speed exit is studied systematically from the point of increasing the utilization ratio of airfield high-speed exit. Through the analysis of the characteristics of aircraft landing running distance, the rule is found that the main factors impacting on the high-speed exit location are of normal distribution. Aimed at the high-speed exit used by single type and multi-type of airplanes concepts of utilization ratio and comprehensive utilization are constructed, and optimization models of high-speed exit location are built based on the concepts of both the utilization ratio and the comprehensive utilization. Based on the optimization models, the high-speed exits location for a typical combination of airplanes are optimized, and the steps how to determine the location of high-speed exits based on utilization ratio are summarized. The method proposed in the paper is of an important reference value to the setting of high-speed exit in military airfields.

Key words: air transportation; airfield; high-speed exit; utilization ratio; optimization analysis

随着航空运输业的发展,机场需要保障的飞机架次和机型种类越来越多,如何提高跑道的利用率,

收稿日期:2012-11-26

基金项目:国家部委基金资助项目

基金项目:种小雷(1973-),男,陕西西安人,副教授,博士,主要从事机场规划设计研究。

E-mail:546975300@qq.com

缩短飞机在跑道上的运行时间,是机场管理人员所关心的重要问题之一。利用跑道快速出口滑行道可以使飞机在着陆后快速脱离跑道,大大缩短了跑道占用时间。王维^[1]等对设置快速出口的问题进行了系统研究,美国联邦航空局(FAA)^[2-5]研究了在跑道上设置不同出口角度的快速出口,提出了确定跑道位置和优化位置的模型。当前主要是通过优化飞机在跑道上的占用时间来确定快速出口位置^[6]。这种方法适用于全天飞行架次比较密集、各种机型穿插运行的机场。对于多机型使用但同一机型使用时段相对集中的机场,这种方法过于复杂,且没有充分考虑如何最大限度地利用快速出口的问题。基于此,本文从如何提高快速出口滑行道利用率的角度出发,来分析如何优化快速出口滑行道的位

1 快速出口位置的数学模型

沿飞机着陆方向建立坐标系 xoy , x 轴表示跑道轴线方向, y 轴垂直于跑道轴线方向,坐标原点 o 为飞机接地点,见图 1。假设跑道上存在 N 个可用的快速出口,其位置分别为 x_1, x_2, \dots, x_N , x 坐标即飞机着陆阶段从接地点开始的滑行距离,根据文献^[7],着陆滑跑距离可计算为:

$$S_i = \frac{K_l \left(V_{jd} \sqrt{\frac{m_l}{m_0} \Delta} \pm V_w \right)^2}{2g(\mu - P_m/G_i \pm i)} \quad (1)$$

式中: S_i 为飞机在跑道上的着陆滑跑距离; K_l 为飞机着陆滑跑驾驶误差系数; V_{jd} 为飞机着陆速度; m_l 为飞机最大着陆质量; m_0 为飞机正常着陆质量; Δ 为空气相对密度; V_w 为分解到跑道方向上的风速; μ 为平均综合阻力系数; P_m 为慢车推力,一般为发动机推力的 0.6~0.8 倍; i 为跑道的纵向坡度; G 为飞机重力。

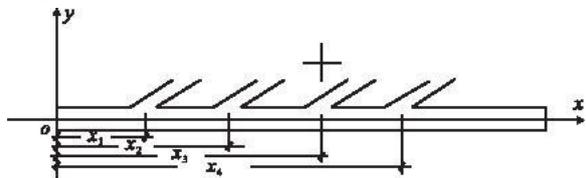


图 1 快速出口位置示意图

Fig.1 High-speed exit location sketch map

当飞机以速度 V_{exit} 从出口转出时,在跑道上所需的滑跑距离可以表示为:

$$x = \frac{K_l \left[\sqrt{\frac{m_l}{m_0} \Delta} (V_{jd}^2 - V_{exit}^2) \pm 2V_w (V_{jd} - V_{exit}) \right]}{2g(\mu - P_m/G_i \pm i)} \quad (2)$$

通过该公式可以看出,影响跑道长度的因素很多,其中一部分为常量,一部分为随机变量,比如空气相对密度 Δ 、分解到跑道上的风速 V_w 、驾驶误差系数 K 和着陆接地速度等,因此着陆滑跑距离也是一个随机变量。目前飞机着陆距离的统计分析表明,各个机型的着陆距离基本都近似地服从均值为 μ , 标准差为 σ 的正态分布^[7], 可表示为 $N(\mu, \sigma^2)$ 。由此可以得到飞机着陆距离的概率分布密度函数为:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right], -\infty < x < +\infty \quad (3)$$

继而可以得出飞机着陆距离的概率分布函数:

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^x f_x(u)du = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx, -\infty < x < +\infty \quad (4)$$

2 基于使用条件的位置优化

2.1 单一机型使用的快速出口位置确定

通过公式(3~4)可以看出,针对某一特定的机型,以特定的速度脱离跑道的时候,其对某固定快速出口的使用,受外界条件影响,是一个概率,而不是定值。由此,提出单一机型跑道出口利用率的概念:飞机着陆过程中,以特定速度脱离跑道,使用固定快速出口的概率,叫出口利用率,用 T 表示。也可以理解为使用固定快速出口架次占总飞行架次的百分数。概率公式表示为:

$$T = P\{x \leq s\} = \int_{-\infty}^s f(u)du = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^s e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (5)$$

式中 S 为特定快速出口的位置。

图 2 为某型飞机以 25 m/s 的速度转出跑道时,采用仿真模型计算得出的着陆距离分布频数图,着陆距离近似地服从 $N(850, 18^2)$ 的正态分布,其着陆区间集中在 780~900 m 范围。

当快速出口位置从 780 m 到 900 m 变化时,通过式(5)计算出 T 随位置的变化曲线,见图 3。

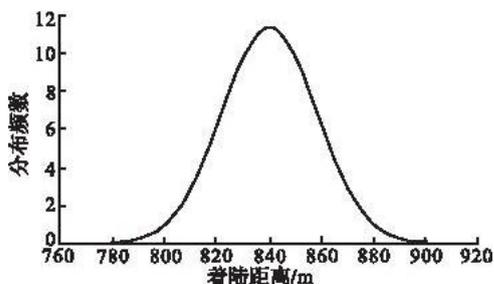


图 2 某型飞机着陆距离频数分布

Fig.2 Aircraft landing distance frequency distribution

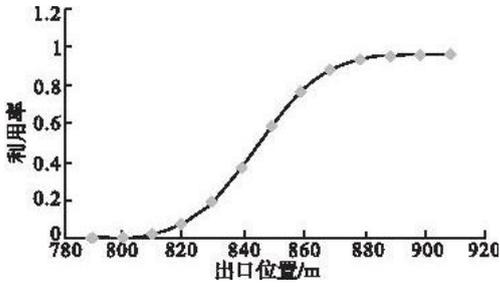


图3 某型飞机出口位置与利用率关系曲线

Fig.3 Aircraft exist position and utilization rate curve

从图中可见,随着设计的出口位置由均值点向远离跑道着陆端移动,对应的 T 在逐渐增大,当出口位置在 870 m 附近时, T 达到 90% 以上。随后曲线变化趋于稳定。

建立快速出口是使着陆飞机快速脱离跑道,如果将利用率定义为 100%,大多数飞机需要多余滑行时间,增加了消耗,偏于保守,利用率过低又不能保证出口的正常使用。通过对机场管理部门和航管部门的调研,建议将单一机型使用跑道出口利用率定义在 90%,则单一机型快速出口位置计算为:

$$x = \mu + 1.645\sigma \quad (6)$$

2.2 多机型使用快速出口位置优化

假设某机场有 N 种机型共同使用,年飞行总架次为 M ,各机型对应飞行架次为 m_1, m_2, \dots, m_N ,则:

$$m_1 + m_2 + \dots + m_N = M \quad (7)$$

每种飞机单独使用时均存在自己的快速出口位置,假设机型间相互无影响,则利用式(6)在保证利用率为 90% 的情况下, N 种机型出口位置为: $x_N = \mu_N + 1.645\sigma_N$ 。此时,可分 2 种情况考虑:

1) 相邻两个机型着陆距离相互无影响,独立使用各自出口,借鉴极限误差的要求,相互无影响的概率定义为 99.7%,则应存在:

$$\begin{aligned} x_{i+1} - x_i = \\ \mu_{i+1} + 1.645\sigma_{i+1} - (\mu_i + 1.645\sigma_i) > 3(\sigma_{i+1} + \sigma_i) \end{aligned} \quad (8)$$

即:

$$\mu_{i+1} - \mu_i > 1.355\sigma_{i+1} + 4.645\sigma_i \quad (9)$$

2) 当相邻 2 个机型着陆距离有影响,即不满足式(9~10)的要求,存在多机型可共同使用同一快速出口的情况,形成了多机型出口利用率,但不能是各机型利用率的叠加,由于各机型全年飞行架次多少不一,所以应综合考虑。

所谓出口综合利用率是指共用一个出口时, F 种飞机利用特定出口脱离跑道的架次占该型飞机全年总飞行架次的百分数,相关部门建议为不小于 90%。假定该出口存在一个利用率 T_i ($i=1, 2, \dots, F$),则多机型共用同一快速出口综合利用率可表示

为:

$$Z = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2 + \dots + m_i T_i + \dots + m_F T_F}{m_1 + m_2 + \dots + m_i + \dots + m_F} = \frac{\sum_{i=1}^F m_i T_i}{\sum_{i=1}^F m_i} \quad (10)$$

式中 Z_i 为第 i 个出口的多机型综合利用率。

$$\text{令: } m_1 + m_2 + \dots + m_i + \dots + m_F = \sum_{i=1}^F m_i = M_F,$$

当固定出口 $Z \geq 90\%$ 时,存在如下关系:

$$\sum_{i=1}^F m_i T_i \geq 90\% M_F \quad (11)$$

把式(5)代入到式(11),得到多机型快速出口位置确定公式为:

$$\begin{aligned} m_1 \Phi\left(\frac{x - \mu_1}{\sigma_1}\right) + m_2 \Phi\left(\frac{x - \mu_2}{\sigma_2}\right) + \dots + \\ m_F \Phi\left(\frac{x - \mu_F}{\sigma_F}\right) = \sum_{i=1}^F m_i \Phi\left(\frac{x - \mu_i}{\sigma_i}\right) \geq 90\% M_F \end{aligned} \quad (12)$$

3 应用案例

3.1 应用条件

通过对目前军用机场作战和飞行训练中机型组合的分析中发现,A、I、J型组合为多机型典型组合之一,以该例来分析多机型快速出口位置确定过程。假定某机场年飞行架次为 10 000 次,3 型飞机飞行架次分别为 5 000,1 000,4 000,其常见的出口速度分别为 25 m/s、15 m/s、20 m/s,根据仿真计算得出 3 种机型的着陆距离频数分布,见图 4。3 种机型对应的着陆距离近似地服从正态分布 $N(840, 18^2)$ 、 $N(928, 23^2)$ 、 $N(1 250, 26^2)$ 。

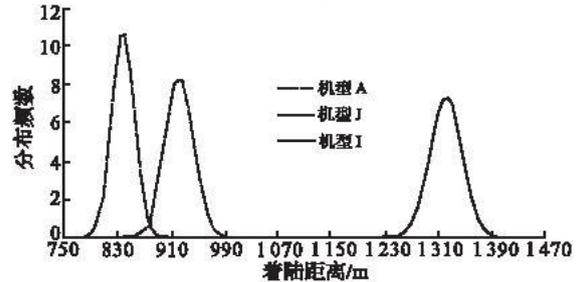


图4 着陆频数分布图

Fig.4 The landing frequency distribution diagram

3.2 快速出口位置确定

1) 确定各型飞机独立使用快速出口位置。

按照式(6)计算得:

$$x_A = \mu_A + 1.645\sigma_A = 870 \text{ m}, x_I = \mu_I + 1.645\sigma_I = 966 \text{ m}, x_J = \mu_J + 1.645\sigma_J = 1 292 \text{ m}$$

2) 判断相邻快速出口之间有无影响。

按照式(8)计算得:

$x_1 - x_A = 96 \text{ m} < 3(\alpha + \sigma) = 123 \text{ m}$, 这2个出口存在相关性, 需要进行优化。

$x_1 - x_1 = 326 \text{ m} > 3(\alpha + \sigma) = 147 \text{ m}$, 这2个出口无相关性, 独立运行, 位置取整建议为1 300 m。

3) 快速出口位置优化分析。

对A、I型飞机使用的出口按照90%的综合利用率, 参照式(12)进行优化, 其中:

$$M_F = 5\,000 + 1\,000 = 6\,000, m_i = 5\,000, \mu = 840, \alpha = 18, m_e = 1\,000, \mu_e = 928, \sigma = 23$$

代入式(12), 有:

$$5\,000 \Phi\left(\frac{x-840}{18}\right) + 1\,000 \Phi\left(\frac{x-928}{23}\right) \geq 6\,000 \times 90\%$$

解出 $x = 922 \text{ m}$

4) 确定快速出口位置。

最终确定该跑道使用A、I、J机型时, 设置快速出口滑行道2条, 位置为:A、I共用出口位置为920 m, J型飞机使用出口位置为1 300 m。

4 结语

快速出口位置设置与跑道容量有着密切的关系^[8-9], 决定位置的主要因素是各型飞机的着陆滑跑距离和飞行组织的模式^[10]。本文在对飞机着陆滑跑距离仿真分析的基础上, 针对保障多机型机场, 训练中固定机型飞行架次相对集中的组织模式, 从提高使用快速出口概率的角度, 建立了快速出口位置优化模型, 提出了机场快速出口位置优化方法, 为合理确定机场快速出口位置提供了科学依据。

参考文献(References):

- [1] 王维, 邓松武. 跑道快速出口优化模型及仿真分析[J]. 中国民航学院学报, 2006, 24(4): 27-31.
WANG Wei, DENG Songwu. Analysis of optimized runway high-speed exit model and simulation[J]. Journal of civil aviation university of China, 2006, 24(4): 27-31. (in Chinese)
- [2] Trani A A, Hobeika A G, Kim B J. Runway exit designs for capacity improvement demonstrations (phase I: algorithm development)[R]. Virginia: Virginia technology university, 1990.
- [3] Trani A A, Hobeika A G, Kim B J. Runway exit designs for capacity improvement demonstrations (phase II: computer model development)[R]. Virginia: Virginia technology university, 1992.
- [4] Federal aviation administration. Airport design standards; airport design (FAA/AC: 150/5300-13)[S]. 1989.
- [5] Rick Marinelli. Evaluation of two high-speed runway exits[R]. Washington DC: Federal aviation administration technical center, 1991.
- [6] Horonjeff Robert, Mckelvey, Francis. Planning and design of airports (fifth edition)[M]. New York: McGraw book cooperation, 2009.
- [7] 蔡良才. 机场规划设计[M]. 北京: 解放军出版社, 2002: 74-78.
CAI Liangcai. Airport planning and design[M]. Beijing: PLA publishing house, 2002: 74-78. (in Chinese)
- [8] 种小雷, 许金良, 蔡良才, 等. 现有机场改建快速出口的可行性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010(5): 56-60.
CHONG Xiaolei, XU Jinliang, CAI Liangcai, et al. Feasibility analysis of building high-speed exit on existing runway[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2010(5): 56-60. (in Chinese)
- [9] 郝伟, 蔡良才, 邵斌, 等. 机场独立运行跑道起飞容量计算模型[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(4): 21-25.
HAO Wei, CAI Liangcai, SHAO Bin, et al. Research on takeoff capacity calculation model of independent runway[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(4): 21-25. (in Chinese)
- [10] 王维, 曹子路. 民用机场快速出口滑行道位置优化[J]. 中国民航学院学报, 2012, (1): 18-22.
WANG Wei, CAO Zilu. Optimization of high-speed runway exit location[J]. Journal of civil aviation university of China, 2012, (1): 18-22. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)