

起落航线训练目视飞行下跑道容量评估

张林影

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

摘要:对混合运输的机场来说,运输飞行的效率与起落航线上的飞行训练的效率是互相影响的。为了做出此类型下的跑道容量评估,提出考虑起落航线训练目视飞行下的跑道容量评估模型。该模型考虑了训练飞行目视间隔对起飞间隔的影响,抽象航空器占用跑道时的运行过程,以目视间隔为关键因素,在此基础上分析讨论运输类型以及机型对跑道容量的影响。使用 Anylogic 进行仿真计算,结果表明使用目视间隔可以大幅提升跑道服务能力,容量提升了 55% 左右,验证了该方法和模型的有效性。

关键词:空中交通管理;飞行训练;容量评估;跑道服务时间;目视飞行间隔

中图分类号:V355 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)06-0297-05

随着民航业的发展,为满足航空运输的需求,飞行员的培养需求也随之日益增长。飞行员通常在混合运输机场进行训练,但训练飞行与运输飞行的运行方式不同,运行效率也互相影响。由于目视间隔比其他的管制间隔小,合理地使用目视间隔可以一定程度的提升跑道服务能力。飞行训练科目、训练机型对跑道容量有着一定的影响作用,因此针对训练科目和训练机型结合目视飞行间隔分析跑道服务能力,可以合理规划训练计划,从而提升跑道运行效率。

自 1984 年 Bowen 等^[1]最早提出跑道容量的计算后,跑道容量的计算和模型越来越成熟。2015 年李冰冰等^[2]分析了时间间隔标准对跑道容量的影响,提出基于间隔距离标准和时间间隔标准的机场跑道容量模型。沈志远等^[3]针对侧向双跑道系统,并根据尾流影响提出了对跑道容量的研究。康瑞和杨凯^[4]针对元胞自动机和二类运行模式对起降间隔进行了研究。刘珂璇等^[5]和乔晓莹等^[6]分别针对着陆间隙内起飞飞机之间对间隔的相互影响和机型间隔分别研究了开口 V 型跑道容量评估和跑道容量优化模型。跑道容量的研究不仅仅局限于起降间隔,构型也是一大研究热点,如杨凯等^[7-8]、孟祥伟等^[9]分别针对脱离道的构型和近距平行跑道对跑道容量进行了研究。此外,王莉莉等^[10-11]建立了近距平行跑道高角度进近与传统进近相结合下的典型跑道着陆、起飞和混合运行时的跑道容量计算模

型;陶媚等^[12]引入横侧盘旋技术,根据相应的管制规则对连续起飞和交替起降这两种运行方式进行跑道容量评估,证明了盘旋技术对跑道容量有明显的提升作用。2020 年,蒋豪、陈亚青^[13]针对重新分类的尾流对跑道容量进行了研究,高华^[14]通过碰撞风险模型,在双目运行的条件下对跑道容量进行了研究;Mascio 等^[15]以三级分析方法对跑道容量进行了计算。

训练机场通常跑道结构简单,且多以目视飞行为主,而以上研究主要针对大型运输机场,使用仪表飞行,考虑管制间隔或运用新技术对跑道容量进行评估,对于训练机场或混合运输机场的跑道容量评估并不适用。本文在已有的成果上,根据《机场时刻容量评估规范》(AP-93-TM-2017-01)附录 D 中的要求,将航空器间隔作为影响跑道容量的一大重要影响因素,通过细化航空器占用跑道的运行过程,同时考虑训练飞行时目视间隔对起飞间隔的影响,针对起落航线飞行训练中的不同训练科目和机型,构造考虑目视间隔的跑道容量评估模型,使用 Anylogic 进行仿真计算,分析训练科目和机型等关键参数对起飞间隔和跑道容量的影响。

1 考虑目视间隔下跑道容量评估模型

1.1 考虑目视间隔的跑道服务时间模型

起落航线训练科目通常是全停和触地拉伸,全停占用跑道的程序与降落占用跑道的程序一致。触地拉伸则是下降高度从跑道末端进入跑道,接触

收稿日期:2022-01-13

作者简介:张林影(1996—),女,重庆人,中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,硕士研究生,研究方向为空中交通管理。

到地面后继续滑跑直到达到抬前轮速度又继续起飞。图1为航空器起降占用跑道程序的示意图。

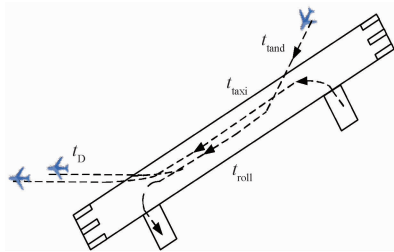


图1 航空器占用跑道程序

设机场跑道长度为 L , L_r 为跑道外等待位置与跑道中线的距离, R 为航空器的转弯半径, V^{turn} 为转弯速度, V^R 为抬前轮速度, V^{enter} 为进场速度, 即飞机着陆前下降至安全高度处(15 m)的瞬时速度, V^d 为接地速度, 即着陆过程中飞机主轮接地瞬时速度, 设跑道表面与水平面的夹角为 0 , 升降舵无偏角, 假定飞机不受外界风力干扰, Q_i 为空气阻力, P_i 为发动机推力, G 为航空器的重力, f 为跑道摩擦系数, ρ 为空气密度, s 为机翼面积, C_x 为水平方向升力系数, C_y 为垂直方向升力系数。

起飞航空器 f_i 起飞滑跑距离

$$D = \frac{1}{2g} \int_0^{V^R} \frac{dV^2}{\frac{P}{G} - f - \frac{\rho s}{2G}(C_x - fC_y)V^2} \quad (1)$$

起飞航空器 f_i 起飞滑跑时间

$$t_D = \frac{1}{g} \int_0^{V^R} \frac{dV}{\frac{P}{G} - f - \frac{\rho s}{2G}(C_x - fC_y)V^2} \quad (2)$$

若 $L \leq R$, 起飞航空器可以直接通过滑行道后做 90° 转弯滑跑起飞, 则

$$t_{\text{taxi}} = \frac{L+R}{V_{\text{at}}} + \frac{R\pi}{2V^{\text{turn}}} \quad (3)$$

若 $L > R$, 起飞航空器做 90° 转弯逆向滑行到跑道末端转向 180° 滑跑起飞, 则

$$t_{\text{taxi}} = \frac{L+L_r}{V_{\text{at}}} + \frac{3R\pi}{2V^{\text{turn}}} \quad (4)$$

降落占用跑道时间为

$$t_{\text{land}} = \frac{2(V^{\text{enter}} - V^d)}{g\left(\frac{1}{k} + f\right)} \quad (5)$$

航空器触地拉升时降落阶段占用跑道时间与式(5)相同, 触地滑跑阶段跑道占用时间:

若 $V^R > V^d$, 滑跑段占用时间 t_{roll} 为

$$t_{\text{roll}} = \frac{1}{g} \int_{V^d}^{V^R} \frac{G}{\frac{P}{G} - Gf - Q} dV \quad (6)$$

若 $V^R \leq V^d$, 拉升滑跑阶段时间 t_{roll} 为

$$t_{\text{roll}} = \frac{V^d - V^R}{a^{\text{roll}}} \quad (7)$$

式中, a^{roll} 为滑跑阶段的加速度。

1.2 考虑起落航线目视间隔下跑道容量评估

定义 $E[T]$ 为跑道服务时间期望值, 则

$$E[T] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ac} T_{ij} \quad (8)$$

式中,

$$P_{ac} = P_a P_c \quad (9)$$

设 P_a 为A类机型的比例, P_c 为C类机型的比例, P_f 为全停的比例, P_t 为触地拉伸的比例, P_{trans} 为运输飞行的比例, P_{train} 为训练飞行的比例, T_{ij} 为前机与后机的起飞间隔, 则

$$P_{\text{train}} + P_{\text{trans}} = 1 \quad (10)$$

$$P_{\text{train}} = P_f + P_t = P_f(P_a + P_c) + P_t(P_a + P_c) \quad (11)$$

$$(P_f + P_t)(P_a + P_c) + P_{\text{trans}} = 1 \quad (12)$$

由起落航线第五边有航空器时不得起飞航空器的规定, 得

$$\Delta d = \frac{1}{2} a_i t_{\text{interval}}^2 + V^d t_{\text{interval}}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} 2(l_2 + l_3) - \Delta d \geq l_5 \\ \sum_{i=2, j=1} \Delta d_{ij} \leq 2(l_3 + l_2) \\ \Delta d \geq d_{\text{tail}} \end{cases} \quad (13)$$

$$t_{\text{interval}} = \frac{2(V - V^d)}{a_i} \quad (14)$$

式中: a 为前机的加速度; t_{interval} 为前机飞行到目视间隔的距离所需的时间; d_{tail} 为尾流间隔; l_2 、 l_3 、 l_5 分别为起落航线第二边、第三边和第五边的长度。若 f_i 为进行触地拉伸的航空器, 则

$$T_{ij} = T_j - T_i = \min(t_{\text{interval}}, t_{\text{taxi}} + t_D + t_{\text{roll}}) \quad (15)$$

否则

$$T_{ij} = T_j - T_i = \min(t_{\text{interval}}, t_{\text{taxi}} + t_D) \quad (16)$$

得到跑道容量评估计算模型为

$$C = \frac{1}{E[T]} \quad (17)$$

2 Anylogic 模拟仿真

起落航线飞行包括起飞、建立航线、着陆目测和着陆4个方面。设跑道运行方向为由西向东, 进行全停训练飞行时, 当有航空器即将经过四转弯点并报告进入五边时, 跑道外等待的飞机继续等待, 直至报告的航空器进入跑道并进入停机坪。触地

拉伸训练飞行设连续飞起落航线两圈,当航空器即将经过四转弯点时报告进入五边,跑道外等待的飞机继续等待,直至该航空器进入跑道滑跑,达到抬轮速度后再次起飞进入一边并达到间隔要求等待的航空器方可得到起飞指令。

Anylogic 仿真模型的逻辑组块大致为:源点,selectout 逻辑组块以及定点逻辑组块。源点产生航空器,设置在滑行道入口,起飞的航空器在此处进行等待;selectout 逻辑组块设定约束条件:记录由源点产生的航空器的类型和训练科目以及飞行类型,根据以上条件判断目视间隔和尾流间隔,在三转弯点和四转弯点之间设置参数 AA,表示当航空器进入该段时,必须进行降落报告,将该参数加入 selectout 逻辑组块可以判断四转弯点是否接收到降落报告。定点逻辑组块主要为航空器的飞行路径进行定位,控制速度等。

模型仿真流程如图 2 所示,源点按照设置比例生成航空器,训练飞行的航空器采用目视飞行,根据机型和管制规则,记录每架航空器的起飞时刻,根据记录得到不同比例下的平均起飞间隔。为消除随机性和避免数据量不够的影响,每次仿真运行 24 h,每组概率重复 10 次,取其均值,最后得到 100 个数据。

3 仿真计算与分析

3.1 飞行类型与机型对间隔和跑道容量的影响

中卫沙坡头机场训练飞行机型有 A 类和 C 类,运输机型为 C 类机。起落航线训练飞行行为目视飞行,从离开跑道进入一边到从五边进入跑道为完整的起落航线训练,且遵守管制规定:起落航线上最多不超过 4 架航空器,中型机不得超过 2 架。运输飞行占用跑道程序主要是起飞降落,起飞进入一边后直接进入预定航线,降落航空器从三边或五边加入,不进行完整的起落航线的运行程序。

取机场跑道长度 $L_r=2\ 800\text{ m}$, $f=0.3$, $R=15\text{ m}$, $V^R=60\text{ kt}$, $V^d=50\text{ kt}$, $L=1\ 000\text{ m}$ 。 P_{train} 、 P_a 的变化区间为 $[0,1]$,仿真运行 24 h,不考虑训练科目,每次仿真 121 个数值,仿真 10 次,改变飞行类型和机型,由式(13)、(15)以及式(16)可知,机型和训练科目对起飞间隔有影响,从而进一步影响跑道容量,其变化趋势如图 3 所示。

观察 P_a 、 P_{train} 对起飞间隔的影响,当 $P_{\text{train}}=1$ 、 $P_a=1$ 时,有最小平均起飞间隔,当所有的航空器都是训练飞行且都使用 A 类机型进行训练飞行时,目视间隔达到最小值有 2 000 m,前后机起降间隔达

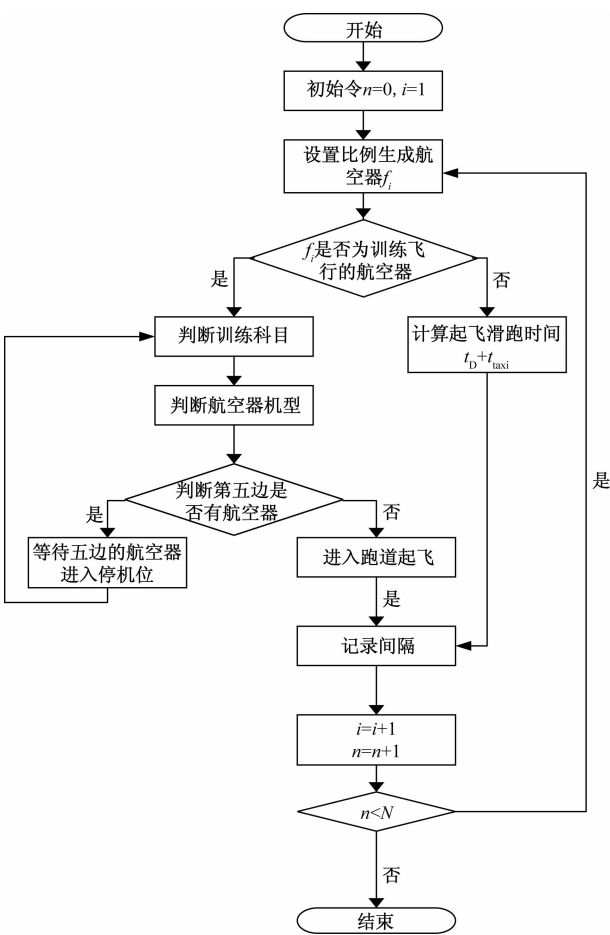


图 2 仿真流程

到最小值 120 s。可以看到,当 P_a 变化区间为 $[0.4, 0.6]$ 时,起飞间隔有明显的增加,这是因为随着 A 类机型的减小,C 类机型逐渐增加,由于 C 类机型尾流间隔更大,目视间隔增大,且当前机为 A 类机型时考虑后机追赶,起降间隔也随之增加,当 $P_a=0.5$ 时有最大起降间隔 361 s,目视间隔高达为 12 000 m。当 P_{train} 为 0 时,起降间隔基本无变化,这是由于运输飞行行为 C 类航空器,没有机型对起降间隔进行影响。当训练飞行增加,随着 C 类航空器增加,起降间隔增加幅度较大,这是由于起落航线上中型机不得超过两架的规定,使得前后机的起降间隔大幅增加。起降间隔直接影响跑道容量,由图 3(b)可知,当 $P_{\text{train}}=1$ 且 $P_a=1$ 时,有最大容量 14.9 架次/h;当 $P_{\text{train}}=1$ 且 $P_a=0$ 时有最小容量 6.63 架次/h,比最高点值相比降低了 55.7%。可以看到 P_a 变化区间为 $[0,0.5]$ 时,容量随 P_{train} 的增加而增加, P_a 变化区间为 $[0.5,1]$ 时,容量随 P_{train} 的增加而减少,容量的变化趋势符合起降间隔的变化趋势。

可以看到,使用目视间隔进行训练飞行能够明显地缩短起降间隔,增加跑道容量,但是由于起落

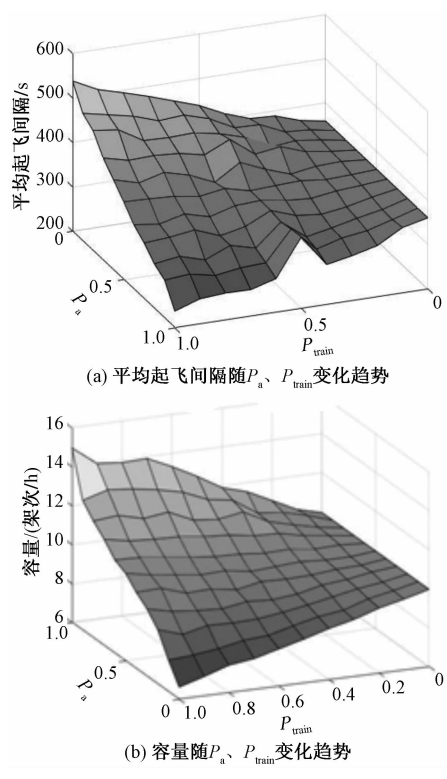


图 3 平均起飞间隔、容量随 P_a 、 P_{train} 变化趋势

航线上架次的限制,当 C 类机型的训练量增加时,容易导致有较大的起降间隔,因此,运输飞行的航空器可以利用这个间隙进行起降,从而增加跑道容量。

3.2 训练科目与机型对间隔和跑道容量的影响

起落航线上训练飞行主要分为全停和触地拉伸。进行全停的航空器从五边减速进入跑道接地,滑行结束后直接进入停机坪;而进行触地拉伸的航空器进行两次起落航线训练飞行,在第一次从五边减速进入跑道时,接触到地面后又加速继续起飞,进入起落航线。在进行起落航线飞行训练时,管制规定若进行超机必须在第三边之前;若四转弯点报告有航空器,则禁止跑道起飞航空器。

图 4(a)和图 4(b)分别显示了平均起飞间隔和跑道容量随 P_a 和 P_f 变化的趋势。

当 $P_a=1, P_f=1$ 时,有最小平均起飞间隔,目视间隔达到最小值 2 000 m。随着触地拉伸的比例增加,平均起飞间隔也逐渐增加,但目视间隔同全停相比变化不大。这是因为进行触地拉伸的航空器在进行这一训练时,虽然使用两次跑道,但在计算容量时,只记作一架航空器,且相比较全停的航空器,触地拉伸的航空器占用跑道的时间还多了中间触地滑跑拉伸的时间。

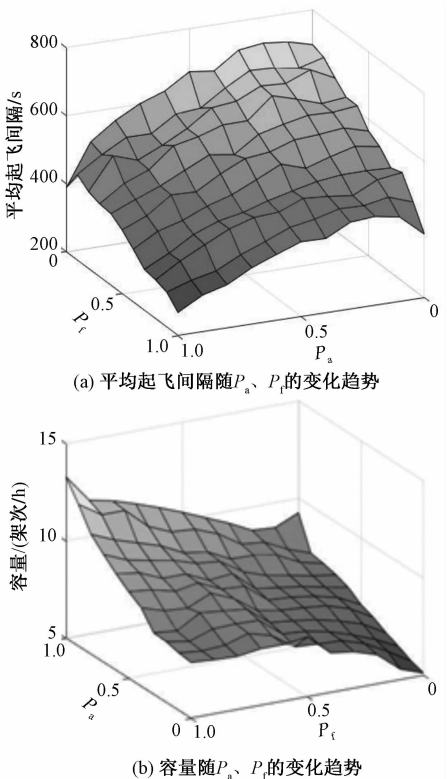


图 4 平均起飞间隔、容量随 P_a 、 P_f 的变化趋势

整体上跑道容量随着 P_a 和 P_f 的增加而增加的,当 $P_a=1, P_f=1$ 时有最大容量 13.29 架次/h,比最小值增加 72.2%; $P_a=1, P_f$ 变化区间为 $[0, 0.3]$ 时,容量反而随着 P_a 的减少而增加;当全是进行触地拉伸的航空器且机型都为 A 类时,起飞间隔是均匀的,数量较少的全停训练航空器的出现就像插队一样,导致等待起飞的航空器的前后机的类型有所变化,从而导致目视间隔的增加或减少,使得起飞间隔变得不均匀,导致起飞间隔增加,从式(15)可以看出,进行触地拉伸的航空器占用跑道的时间更长,随着全停的航空器的增加,起飞间隔开始缩短,跑道容量增加。当 $P_f=1$ 时,平均起飞间隔随着 P_a 的增加呈现先增加后又减小的趋势;当 P_a 的变化区间在 $[0, 0.3]$ 时,常出现的组合是前机是 C 类后机是 A 类机,由于尾流的影响,目视间隔更大,导致平均起飞间隔减小。 P_a 变化区间为 $[0.3, 1]$ 时,受起落航线上架次的限制,同时 A 类航空器的目视间隔更小,因此 P_a 的增加使平均起飞间隔减小,从而使跑道容量得到提升。

4 结论

合理有效的训练飞行可以有效地提高飞行员的训练质量,且训练飞行通常在支线机场进行。然而多数支线机场设备较少,跑道以及滑行道的结构

较为简单,跑道容量往往较小,采用目视飞行显然更灵活,能缩小飞行间隔,从而提升跑道服务能力,提升机场容量。为进一步分析训练科目和机型的比例对目视间隔和起飞间隔和跑道容量的影响,本文通过多次仿真分析得到以下结论:当训练飞行比例为1时有最小平均起飞间隔,低于平均值46%,比不使用目视间隔小55%,跑道容量提升了55%。合理地安排训练科目和机型可以有效地提升跑道服务能力,在繁忙的时候适当的采用目视间隔,对飞行类型进行合理的分配,可以一定程度上提升机场容量,提高管制效率。

参考文献

[1]

BOWEN E G,PEARCY T. Delays in the flow of air traffic [J]. The Aeronautical Journal,1948,52:251-258.

[2]

李冰冰,聂润兔.时间间隔标准(TBS)对跑道容量影响分析[J]. 航空计算技术,2015,45(6):87-90,94.

[3]

沈志远,胡莹莹.考虑尾流影响的侧向双跑道机场的跑道容量研究[J]. 南京航空航天大学学报,2020,52(1):161-170.

[4]

康瑞,杨凯.脱离道构型对机场跑道容量的影响[J]. 计算机工程与设计,2018,39(11):3596-3601.

[5]

刘珂璇,马兰.隔离运行模式下开口V形跑道容量评估模型[J]. 中国科技论文,2018,13(7):825-830.

[6]

乔晓莹,齐雁程.基于机型间隔的首都机场跑道流量优化[J]. 航空计算技术,2019,49(4):109-113,122.

[7]

杨凯,康瑞.基于元胞自动机的航空器起降间隔研究[J]. 工程科学与技术,2016(S2):127-134.

[8]

杨凯,康瑞.机场Ⅱ类运行下航空器起降间隔研究[J]. 工程科学与技术,2019,51(1):213-221.

[9]

孟祥伟,韩宝华,王宏远,等. 近距平行跑道最大容量模型[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2016,17(4):7-12.

[10]

王莉莉,任武玲.高角度进近下的近距跑道容量计算方法研究[J]. 中国科技论文,2016,11(19):2169-2172.

[11]

王莉莉,刘立烨.北京首都机场跑道容量提升研究[J]. 计算机仿真,2019,36(4):44-47.

[12]

陶媚,聂润兔,张莉迎,等. 近距平行跑道横侧盘旋进近模式容量建模与分析[J]. 中国科技论文,2017,12(19):2187-2192.

[13]

蒋豪,陈亚青.基于动态尾流间隔的机场运行容量提升研究[J]. 内燃机与配件,2020(1):183-186.

[14]

高华.双目运行条件下的目视间隔与跑道容量研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院,2020.

[15]

MASCIO P D,RAPPOLI G,MORETTI L. Analytical method for calculating sustainable airport capacity[J]. Sustainability,2020,12(21). DOI:10. 3390/su12219239.

Runway Capacity Evaluation of Visual Flight Training

ZHANG Linying

(School of Air Traffic Management,Civil Aviation Flight University of China,Guanghan Sichuan 618307,China)

Abstract: For a mixed transport airport, the efficiency of transport flight and the efficiency of flight training on traffic pattern are mutually affected. In order to make the runway capacity evaluation under this type, a runway capacity evaluation model considering the visual flight training of takeoff and landing routes was proposed. The model considers the effect of visual interval on take-off interval of training flight, abstracts the operation process of aircraft occupying the runway, takes visual interval as the key factor, analyzes and discusses the influence of transport type and aircraft type on runway capacity. The results of Anylogic simulation show that the service capacity of runway can be greatly improved by using visual interval, and can increasing capacity about 55%, which verifies the effectiveness of the method and model.

Keywords: air traffic management;fly training;capacity evaluation;runway service time;visual flight interval