

近距平行跑道最大容量模型

孟祥伟, 韩宝华, 王宏远, 周蓉晖

(空军工程大学空管领航学院,西安,710051)

摘要 针对 MACAD(MANTEA 机场容量及延误)模型中近距平行跑道容量评估缺乏分析逻辑的问题,采用数学分析方法建立了新的近距平行跑道容量评估模型,引入 FAA 机场容量模型中的 Q 逻辑,重点分析并解决了 2 架降落飞机之间插入起飞飞机概率可能受先前起飞飞机影响的问题,使起飞容量评估更为准确,然后基于美国商用机场的典型数据,分别利用 MACAD 模型及本模型对其进行容量评估。结果表明:虽然与 MACAD 模型所得结果基本一致,但本模型更符合跑道容量包络的定义。

关键词 空中交通流量管理;近距平行跑道;容量

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.04.002

中图分类号 V355.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)04-007-06

Research on Ultimate Capacity of Two Close-Spaced Parallel Runways

MENG Xiangwei, HAN Baohua, WANG Hongyuan, ZHOU Ronghui

(Air Traffic Control & Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Accurate capacity evaluation in runway system at an airport is prerequisite for air traffic flow management and an essential content of airport planning. To deal with the problem that analytic logic is lack in MACAD (MANTEA Airfield Capacity and Delays) model in evaluating the capacity of two close-spaced parallel runways, a new ultimate capacity model for two close-spaced parallel runways is established by using a mathematical analysis method. The effect of departures in previous inter-arrival gaps in calculating the probability of inserting departures in current inter-arrival gap is specially analyzed and FAA airport capacity model's Q-logic is introduced so as to improve the accuracy of departure capacity evaluation result. The runway capacity envelope of an American commercial airport based on its reprehensive data is calculated respectively by using MACAD and this mode. The results show that the computation results of the model are basically consistent with those of MACAD model, but this model is more suitable for the definition of the runway capacity envelope.

Key words: air traffic flow management; two closed-spaced parallel runways; capacity

随着航空运输业的快速发展,不断增长的空中交通需求与有限空域容量之间的矛盾越来越突

出^[1]。为此,全世界都在致力于寻找缓解空中交通拥堵的长期和短期解决方案。国外研究和实践都证

收稿日期:2015-12-28

基金项目:国家空管委空管科研课题(GKG201407001)

作者简介:孟祥伟(1968—),男,河南郑州人,副教授,博士,主要从事航空管制研究.E-mail:mxwbuaa@163.com

引用格式:孟祥伟,韩宝华,王宏远,等.近距平行跑道最大容量模型研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(4):7-12. MENG Xiangwei, HAN Baohua, WANG Hongyuan, et al. Research on Ultimate Capacity of Two Close-Spaced Parallel Runways[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(4): 7-12.

明:通过新建机场、增加跑道、开辟航路航线等手段增加空域容量,以及通过科学的空中交通流量管理改善空中流量状况,是缓解空中交通拥堵的有效方法,而准确的机场容量评估是有效实施空中交通流量管理的先决条件,同时也是机场规划的重要内容^[2-3]。

机场跑道系统的容量往往决定了机场容量的大小,而为了增加机场容量,国内外很多大型机场都采用平行跑道构型,由于土地资源的限制,越来越多的机场选择修建近距平行跑道^[4]。FAA(美国联邦航空局)机场容量模型和LMI(美国后勤管理学院)单跑道容量模型是评估跑道系统容量最著名的2个模型,二者均属随机解析模型且各有优缺点^[5-11]。Stamatopoulos等在LMI模型的基础上开发了MENTEA机场容量及延误模型(MENTEA Airfield Capacity and Delay Models, MACAD),该模型对LMI单跑道容量模型的建模逻辑进行了改进,并结合FAA机场容量模型的某些逻辑,将该单跑道容量模型扩展到了平行跑道、交叉跑道情形^[12]。但是,在评估近距平行跑道隔离运行模式下的起飞容量时,该模型未做详细评估,而是直接判定起飞容量等于最大降落容量,其合理性存在一定疑问。本文在MACAD模型的基础上,建立了新的近距平行跑道容量评估模型,并基于美国商用机场的典型数据,分别用本模型和MACAD模型对其容量进行了评估对比。

1 跑道容量包络

跑道最大容量是指在不违反空中交通管制间隔标准且不断有飞机要求起降的情况下,单位时间内(通常是1h)跑道可以起降飞机架次的期望值^[12]。因此,在实际运行中,在一个给定的时间段内,一条跑道上实际的飞机起降架数是一个随机变量。跑道容量分起飞容量和降落/着陆容量,一般而言,当一条跑道有较多飞机起飞时,则可以降落的飞机就较少,反之亦然。由此,以起飞容量和降落容量为坐标轴,不同起降比例下跑道最大起、降容量就定义了一系列的点,将这些点连接起来就构成了一条帕累托(Pareto)曲线,这条曲线即为跑道容量包络。本文按LMI跑道容量模型的方式计算跑道容量包络,即计算并连接4个点处的跑道容量:

点1:“全部着陆”,即跑道仅用于飞机降落。此时着陆容量最大,起飞容量为0。

点2:“不影响最大着陆容量的前提下插入起飞飞机”。即在保持最大着陆容量且不影响降落飞机安全的前提下,在连续降落飞机之间尽可能插入起飞飞机。此时着陆容量等于点1处的着陆容量,起飞容量等于所能插入的飞机数。

点3:“起降交替进行”,即起飞、降落飞行交替进行。此时起飞容量等于降落容量。

点4:“全部起飞”,即跑道仅用于飞机起飞。此时,起飞容量最大,着陆容量为0。

在得到跑道容量包络后,各起降比例下的跑道起降容量就可以通过做一条始点为原点的相应斜率的射线,然后求其与跑道容量包络线的交点即可。典型的跑道容量包络见图1。

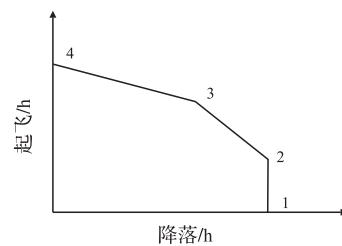


图1 跑道容量包络

Fig.1 Runway capacity envelope

2 平行近距跑道容量模型

2.1 模型的建立

平行跑道是机场多跑道系统的一种重要组成形式。近距平行跑道是指跑道中心线间距小于或等于760 m(2 500 inch)的跑道,在跑道运行模式上相当于单跑道运行^[13]。近距平行跑道一般采取隔离运行模式,即一条跑道专用于飞机起飞,另一条跑道专用于飞机降落。本文针对隔离运行模式建立了容量评估模型。包络点1(全着陆)和4(全起飞)的容量计算和文献^[14]中单跑道情形下相同,而其他2点容量的计算则与单跑道时不同,需要建立新的建模逻辑。

在本模型中,飞机按尾流间隔标准、进近速度、跑道占用时间等分为 N 类,并假定每类飞机的速度分别服从不同的正态分布,各飞机在公共进近航段匀速飞行。表1列出了本模型用到的主要参数的符号及其含义。其中假定 δT_c^c 、 δX_i 、 δV_i 、 δT_i^a 、 δT_i^d 为相互独立的服从正态分布的随机变量,其均值为0,标准差分别为 $\sigma_{T_c^c}$ 、 σ_{X_i} 、 σ_{V_i} 、 $\sigma_{T_i^a}$ 、 $\sigma_{T_i^d}$ 。另外,假定跑道按先到先服务的准则分别满足飞机的起降要求。

表 1 主要建模参数

Tab.1 Key modeling parameters

符号	含义
T^c	通信延迟,其均值为 $\overline{T^c}$,其差异(指一个分布中个体取值与分布均值之差)为 δT^c
D	公共进近段长度
δX_i	i 类飞机位置的差异
P_i	i 类飞机的组成比例
V_i	i 类飞机的进近速度,其均值为 $\overline{V_i}$,其差异为 δV_i
T_i^a	i 类飞机着陆时的跑道占用时间,其均值为 $\overline{T_i^a}$,差异为 δT_i^a
T_i^d	i 类飞机起飞时的跑道占用时间,其均值为 $\overline{T_i^d}$,差异为 δT_i^d
T_{ij}	连续降落飞机在跑道入口处的时间间隔, i 先后
T_{ij}^G	连续起飞飞机之间的最小时间间隔标准, i 先后
S	一个距离值,当进近飞机距跑道入口距离小于此值时不能放飞起飞飞机
T_i^S	i 类飞机进近时,飞行距离 S 所用的时间
t_i	i 机的起飞或降落时刻

2.2 不影响降落容量前提下插入起飞飞机(点 2)

此时,在连续 2 架着陆飞机间插入起飞飞机所需满足的空管规则为:①第 1 架着陆飞机在降落跑道上降落后,起飞飞机即可在起飞跑道上开始滑跑起飞。而在单跑道运行时,必须要等到第 1 架着陆飞机完全退出跑道后,起飞飞机才能在该跑道上起飞;②在第 2 架降落飞机距跑道入口一定距离 S 后,不能放飞起飞飞机;③在第 2 架降落飞机到达跑道入口时,起飞飞机必须已经飞离跑道^[15]。

如果单独地考虑每个着陆间隙,则连续 2 架着陆飞机 i 、 j 中插入一架起飞飞机 k 及第 2 架起飞飞机 l 的概率分别为:

$$P^{d'_{ikj}} = 1 - C(0, \overline{T_{ij}} - \overline{T^c} - \max(\overline{T_k^d}, \overline{T_j^S}), \sqrt{(\sigma_{T_{ij}})^2 + (\sigma_{T^c})^2 + (\sigma_Z)^2}) \quad (1)$$

$$P^{d'_{iklj}} = 1 - C(0, \overline{T_{ij}} - 2\overline{T^c} - T_{kl}^G - \max(\overline{T_i^d}, \overline{T_j^S}), \sqrt{(\sigma_{T_{ij}})^2 + 4(\sigma_{T^c})^2 + (\sigma_Z)^2}) \quad (2)$$

式中: $C(x, \mu, \sigma)$ 为均值为 μ 、标准差为 σ 的正态分布累积分布函数在 x 点处的函数值。 σ_Z 视 $\overline{T_i^d}$ 及 $\overline{T_j^S}$ 的大小,相应地取值 $\sigma_{T_i^d}$ 或 $\sigma_{T_j^S}$ 。并且,如同 MACAD 模型,插入起飞飞机概率小于 50% 时不予考虑。

在得到连续两架着陆飞机间隙内插入 1 架、2 架飞机的概率后,如果按照单跑道容量计算方法那

样计算起飞容量,则有可能会过高地估计起飞容量,其原因分析如下:

如图 2 所示,假设飞机 g 、 i 、 j 先后降落,飞机 n 为在 g 、 i 间插入的最后一架起飞飞机, k 为 i 、 j 间插入的第 1 架起飞飞机。则单跑道运行时, k 机必须在 i 机着陆并退出跑道后才能起飞,而在隔离运行时, k 机在 i 机落地后马上就可以起飞,也即隔离运行时飞机 n 、 k 的时间间隔 t_{nk} 将比单跑道运行时小 T_i^a ,通过数值计算,可以发现如果单独考虑每个着陆间隙内插入起飞飞机的可能性,则 t_{nk} 将极有可能小于离场飞机 n 与 k 所需的起飞间隔标准(单跑道运行时,这种可能性则非常小),即如果独立地计算每个着陆间隙可以插入起飞飞机的概率,将极有可能过高地估计起飞容量。文献[16~17]利用文献[18]中美国商用机场典型数据说明了确实存在此种情况,限于篇幅,这里不加论述。

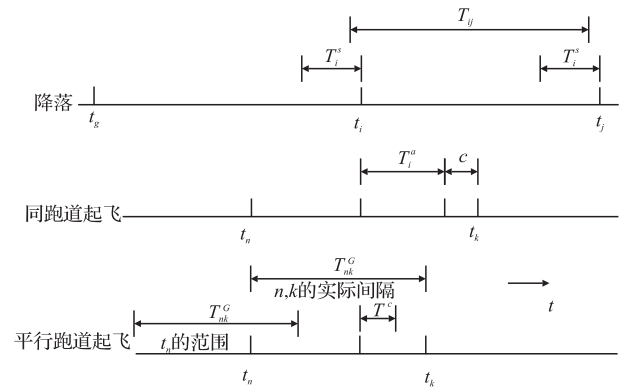


图 2 降落飞机间插入起飞飞机时序

Fig.2 Inserting departure aircraft in landing intervals

由上面的分析可知:在近距平行跑道隔离运行条件下,在计算跑道容量包络点 2 处的容量时,必须考虑上个着陆间隙内起飞飞机对后一个着陆间隙内起飞飞机的影响,在 FAA 机场容量模型中, Q 逻辑(Q-logic)考虑了这种影响^[7],本文计算每个降落飞机间隙内插入 1 架及 2 架起飞飞机的概率。

首先按式(1)~(2)计算每对降落飞机 i 、 j 间插入 1 架飞机 k 及两架飞机 k 、 l 起飞的概率,此时不考虑 i 前所插入起飞飞机的影响。

其次,计算 i 类降落飞机前最后 1 架起飞飞机为 n 类机的概率 $Q(n, i)$,这可以通过 g 、 i 降落间隙内插入一架飞机及 2 架飞机的概率得到:

$$Q(n, i) = \sum_{gx} [P_{gni}^{d'} - P_{gnxi}^{d'} + P_{gxn}^{d'}] P_g P_x P_n \quad (3)$$

式中: $P_{gni}^{d'} - P_{gnxi}^{d'}$ 为 g 、 i 间只能插入 1 架起飞飞机,而且该飞机为 n 的概率; $P_{gxn}^{d'}$ 为 g 、 i 间可以插入两架飞机,最后 1 架为 n 的概率。

最后,在考虑 i 类飞机前所插入起飞飞机影响

的前提下,重新计算*i, j*间插入1架飞机*k*及2架飞机*k, l*的概率。因为这2种概率的推导过程比较类似,所以这里仅详细描述插入1架飞机*k*的概率推导。该概率可以表示为:

$$P_{ikj}^d = \sum_n Q(n, i) P_{nikj}^d + P_{ikj}^{d'} [1 - \sum_n Q(n, i)] \quad (4)$$

式中: P_{nikj}^d 为当*i*机前最后1架起飞为*n*时,*i, j*间插入1架起飞飞机*k*的概率,而*i*机前没有起飞飞机的概率为 $1 - \sum_n Q(n, i)$,此时在*i, j*间插入1架起飞飞机*k*的概率仍为 $P_{ikj}^{d'}$ 。

P_{nikj}^d 的推导过程描述如下:

从上面的分析可知,假设*i*机的降落时刻为0时刻,则*n*机最晚的起飞时间为 $-\max(T_i^S, T_n^d)$,而在*i*机降落后即可指挥*k*机起飞,所以,*n, k*两机之间的时间差为 $\max(T_i^S, T_n^d)$,当该时间差大于等于*n*与*k*之间的起飞时间间隔标准 T_{nk}^G 时,*n*机对*k*机的插入概率不可能发生影响,这意味着:

$$P_{nikj}^d = P_{ikj}^{d'} \text{ if } T_{nk}^G \leq \max(T_i^S, T_n^d) \quad (5)$$

经过数值计算可知,在 $S=2n$ mild 时,所有类型的飞机进近 $2n$ mild 的时间均大于其跑道占用时间,并且考虑到 T_i^S 的方差很小及容量评估的近似性,所以,公式(5)可近似为:

$$P_{nikj}^d = P_{ikj}^{d'} \quad , \quad \text{if } T_{nk}^G \leq \overline{T_i^S} \quad (6)$$

如果 $T_{nk}^G > \overline{T_i^S}$,则视其起飞时间的早晚,*n*机可能对*k*机的插入概率产生影响,具体而言,*k*机在2种情况下可以起飞:①*n*机起飞时间足够早,对*k*机的起飞没有影响,而且*i, j*两机间的间隔足够插入*k*机(该概率记为 P_{nikj}^{d1});②*n*机起飞时间较晚,造成*k*机延迟起飞,但*i, j*两机间的间隔仍然足以插入*k*机(该概率记为 P_{nikj}^{d2})。

由此可得:

$$P_{nikj}^d = P_{nikj}^{d1} + P_{nikj}^{d2}, \text{ if } T_{nk}^G > \overline{T_i^S} \quad (7)$$

P_{nikj}^{d1} 及 P_{nikj}^{d2} 的推导描述如下:

假设*i*机降落时刻为0,则可假定*n*机起飞时刻应在区间 $[-T_{nk}^G - \overline{T_i^S}, -\overline{T_i^S}]$ 间均匀分布,这是因为:

1)由以上分析已知:*n*机最晚起飞时间为 $-\overline{T_i^S}$ 。

2) *n*机最早起飞时刻为 $-T_{nk}^G - \overline{T_i^S}$ 。如果*n*机更早起飞,则在*i*机降落前仍可以插入*k*机,则*k*机将为*i*机降落前的最后一架起飞飞机,这与*n*机为*i*机降落前最后一架起飞飞机的假设矛盾。

3)因为不知*n*之前起降飞机等信息,故假设其起飞时间服从均匀分布是一个合理的假设。

参考图2可知,就*n*机的起飞时间对*i, j*降落间隙内插入*k*机的影响而言,可以将 t_n 的分布区间分2部分处理:

1)当 $t_n \in [-T_{nk}^G - \overline{T_i^S}, -\overline{T_i^S})$ 时,*n*机起飞时间足够早,不可能对*i, j*间插入*k*机产生影响,此时插入*k*机起飞的概率仍为 $P_{ikj}^{d'}$,这意味着:

$$P_{nikj}^{d1} = P(t_n \in [-T_{nk}^G - \overline{T_i^S}, -\overline{T_i^S}]) P_{ikj}^{d'} = \frac{\overline{T_i^S}}{T_{nk}^G} P_{ikj}^{d'} \quad (8)$$

2)当 $t_n \in [-T_{nk}^G, -\overline{T_i^S}]$ 时,由于*n, k*机必须满足间隔标准要求,所以*k*机将被延迟起飞,此时插入*k*机起飞的概率为*n*机因起飞较晚而导致*k*机延迟起飞,但 T_{ij} 的间隔足够大,*k*机仍能起飞的联合概率,也即:

$$P_{nikj}^{d2} = P\{-T_{nk}^G \leq t_n \leq -\overline{T_i^S} \text{ 且 } t_j \geq t_n + T_{nk}^G + \overline{T_j^S} + T^c\} = \int_{-T_{nk}^G}^{-\overline{T_i^S}} \int_{t_n + T_{nk}^G + \overline{T_j^S} + T^c}^{\infty} f(t_j) f(t_n) dt_j dt_n \quad (9)$$

式中: $f(t_n)$ 为 t_n 的概率密度函数, $f(t_j)$ 为 t_j 的概率密度函数。 t_n 及 t_j 分别服从均匀分布及正态分布,其概率密度函数分别为:

$$f(t_n) = 1/T_{nk}^G \quad (10)$$

$$f(t_j) = \frac{1}{\sigma_{T_{ij}} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t_j - \overline{T_{ij}})^2}{2\sigma_{T_{ij}}^2}\right) \quad (11)$$

在式(9)中,积分限含有正态随机变量 T^c ,计算将十分复杂。考虑到该变量的方差非常小,而且跑道容量的计算结果不要求非常高的精度,所以,我们将变量 T^c 按常量处理,取其均值。

如图3,通过交换积分次序,可得:

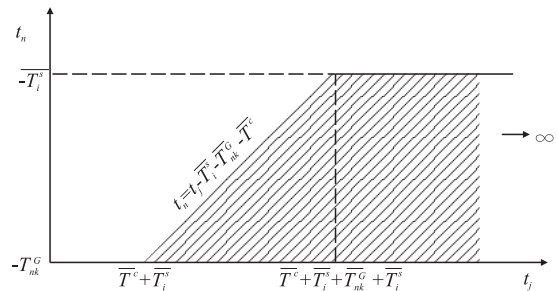


图3 积分次序交换及积分限

Fig.3 Exchange of order of integrations and limit

$$P_{nikj}^{d2} = \int_{\overline{T_j^S} + T^c}^{\overline{T_j^S} + T_{nk}^G - \overline{T_j^S} + T^c} f(t_j) \int_{-T_{nk}^G}^{t_j - \overline{T_j^S} - T_{nk}^G - T^c} 1/T_{nk}^G dt_n dt_j + \int_{\overline{T_j^S} + T^c}^{\infty} f(t_j) \int_{-T_{nk}^G}^{-\overline{T_i^S}} 1/T_{nk}^G dt_n dt_j = \int_{\overline{T_j^S} + T^c}^{\overline{T_j^S} + T_{nk}^G - \overline{T_j^S} + T^c} \frac{t_j - \overline{T_j^S} - T^c}{T_{nk}^G} f(t_j) dt_j + \int_{\overline{T_j^S} + T_{nk}^G - \overline{T_j^S} + T^c}^{\infty} \frac{-\overline{T_i^S} + T_{nk}^G}{T_{nk}^G} f(t_j) dt_j \quad (12)$$

记 $\overline{T_j^S} + T_{nk}^G - \overline{T_i^S} + T^c$ 为 x , $\overline{T_j^S} + T^c$ 为 y ,并将式(11)代入式(12),可得:

$$P_{nikj}^{d2} = \frac{1}{T_{nk}^G} \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{\overline{T_{ij}}}{\sqrt{2\pi}} \left[\varphi\left(\frac{x - \overline{T_{ij}}}{\sigma_{T_{ij}}}\right) - \varphi\left(\frac{y - \overline{T_{ij}}}{\sigma_{T_{ij}}}\right) \right] + \right. \\ & \left. \frac{\sigma_{T_{ij}}}{\sqrt{2\pi}} \begin{bmatrix} \exp\left(-\left(\frac{y - \overline{T_{ij}}}{\sigma_{T_{ij}}}\right)^{2/2}\right) \\ - \exp\left(-\left(\frac{y - \overline{T_{ij}}}{\sigma_{T_{ij}}}\right)^{2/2}\right) \end{bmatrix} \right] \right\} + \\ & \frac{-\overline{T_j^S} - \overline{T^c}}{T_{nk}^G} [C(x, \overline{T_{ij}}, \sigma_{T_{ij}}) - C(y, \overline{T_{ij}}, \sigma_{T_{ij}})] + \\ & \frac{-\overline{T_i^S} + \overline{T_{nk}^G}}{T_{nk}^G} [1 - C(x, \overline{T_{ij}}, \sigma_{T_{ij}})] \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中: $\varphi(a)$ 为标准正态分布的累积分布函数在 a 处的函数值。

可知, 当 $T_{nk}^G > \overline{T_i^S}$ 时, 有(14)式成立:

$$P_{nikj}^d = \frac{\overline{T_i^S}}{T_{nk}^G} P_{nikj}^{d'} + P_{nikj}^{d2} \quad (14)$$

由此, 在一个降落间隙内, 可以插入 1 架及 2 架着陆飞机的平均概率分别为:

$$P_1^d = \sum_{i,j,k} p_i p_j p_k P_{ikj}^d \quad (15)$$

$$P_2^d = \sum_{i,j,k,l} p_i p_j p_k p_l P_{iklj}^d \quad (16)$$

在不影响最大着陆容量的前提下, 可以插入的起飞飞机数目为:

$$C_{ins} = C_A (P_1^d + P_2^d) \quad (17)$$

式中: C_A 为降落容量。

2.3 轮流起降(点 3)

如果采用与单跑道容量评估模型中计算此包络点容量类似的方法, 独立计算在每个着陆间隙内插入 1 架飞机时所需的着陆间隔, 则通过数值计算可知: 因为此时起飞飞机无需等待前一个着陆飞机退出跑道即可以起飞, 所以, 在保持最大着陆容量的前提下, 无需拉大任何连续着陆飞机之间的间隔, 连续着陆的 2 架飞机之间基本都可以插入 1 架起飞飞机, 即此时的起飞容量等于跑道系统的最大着陆容量。但是, 如同以上分析的那样, 此时上一个着陆间隙内插入的起飞飞机可能会对下一个及以后降落间隙插入起飞飞机有影响, 而且很难通过解析的方式计算这种影响。

由于在计算包络点 2 时, 有些间隔足够大, 可以插入 2 架起飞飞机, 所以在计算点 2 的起飞容量时, 在不影响最大着陆容量的前提下, 起飞容量往往与着陆容量相接近, 也即轮流起降情况下所能取得的最大容量。

基于以上两点考虑, 在平行跑道隔离运行时, 计算轮流起降模式下的跑道系统容量对于确定跑道容量包络而言意义不大。所以, 在本模型中, 并没有计

算轮流起降模式下的跑道容量, 跑道容量包络仅由 3 个点连接而成。

3 算例分析

基于文献[18]提供的美国典型商用机场的运行数据, 当 2 条近距平行跑道隔离运行时, 本模型计算得到的跑道容量包络见图 4, 在不影响降落跑道上降落飞行的前提下, 起飞跑道每小时可以起飞 29.2 架飞机。

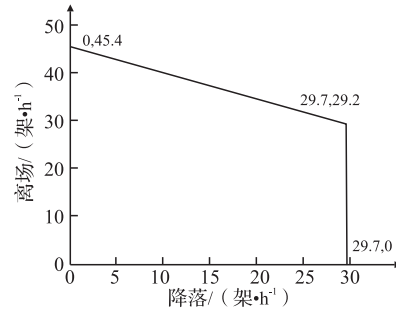


图 4 跑道容量包络计算结果

Fig.4 Computed result of runway capacity envelope

在 MACAD 模型中, 在计算近距平行跑道隔离运行模式跑道容量时, 仅计算降落跑道的最大着陆容量, 而起飞容量则直接假定为与其相同, 因此, 容量包络由 2 个相互垂直的直线组成。通过对比可以发现, 本模型与 MACAD 模型相比, 相同之处在于二者均将包络点 2 与 3 合并为一点, 且评估结果基本一致。二者的区别在于: ①本模型在计算包络点 2 处的起飞容量时, 采取的是数学分析的方法, 建立了相应的评估逻辑, 而 MACAD 模型则直接凭经验给出结果; ②在计算包络点 4(全起飞)处容量时, 本模型仍按单跑道模型中的方法计算, 而 MACAD 模型则没有计算, 直接以跑道系统的最大着陆容量替代, 本模型所得容量包络更符合容量包络的定义。

4 结语

针对 MACAD 模型近距平行跑道隔离运行容量评估缺乏必要的建模逻辑的问题, 本文结合 FAA 机场容量模型及 MACAD 模型的优点, 建立了新的近距平行跑道隔离运行容量评估模型, 通过对美国典型商业机场运行数据进行评估并与 MACAD 模型进行对比, 说明本模型建模逻辑合理且更符合容量包络的定义。

参考文献(References):

[1] KIM Y K., Lee H R. Passenger Complaints under Ir-

- regular Airline Conditions-Cross-cultural Study [J]. Journal of Air Transport Management, 2008, 15(6): 350-353.
- [2] NEUFVILLE R De, ODoni A R. Airport Systems: Planning, Design, and Management [M]. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [3] BERTSIMAS D, LULLI G, ODORI, A R. An Integer Optimization Approach to Large-Scale Air Traffic Flow Management [J]. Operations Research, 2011, 59(1): 211-227.
- [4] 陶媚, 聂润兔, 赵纬经. 近距离平行跑道相关进近模式容量分析[J]. 交通运输系统工程与信, 2014, 14(6): 182-193.
- TAO Mei, NIE Runtu, ZHAO Weijing. Capacity of Closely-spaced Parallel Runways Using Dependent Approach Procedures [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(6): 182-193. (in Chinese)
- [5] ODoni A R, BOWMAN, DEYST J J, et al. Existing and Required Modeling Capabilities for Evaluating ATM Systems and Concepts [R]. Massachusetts, USA: International Center for Air Transportation, Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [6] Transportation Research Board of the National Academies. Evaluate Airport Capacity, PB 201310315 [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2012.
- [7] SWEDISH W J. Upgraded FAA Airfield Capacity Model. Volume II. Technical Description of Revisions [R]. Washington: Mitre Corporation, 1981.
- [8] LEE D A, NELSON C, SHAPIRO G. Estimating the Effects of the Terminal Area Productivity Program [R]. Washimngon: NASA, 1997.
- [9] JANIC M. Air Transport System Analysis and Modeling [M]. Cleveland, Ohio: CRC Press, 2000.
- [10] 武丁杰. 近距离平行跑道容量评估与优化[J]. 中国民航飞行学院学报, 2014, 25(1): 22-26.
- WU Dingjie. Evaluation and Optimization of the Closely-spaced Parallel Runway Capacity [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2014, 25(1): 22-26 (in Chinese)
- [11] 李华融. 多跑道机场容量研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- LI Huarong. Multi-Runway Airport Capacity Research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [12] STAMATOPULOS M A, ZOGRAFOS K G, ODoni A R. A Decision Support System for Airport Strategic Planning [J]. Transportation Research: Part C, 2004, 12(2): 91-117.
- [13] 徐肖豪, 于跃, 黄宝军, 等. 不同运行模式的近距离平行跑道容量分析[J]. 中国民航大学学报, 2012, 30(6): 35-39.
- XU Xiaohao, YU Yue, HUANG Baojun, et al. Research on Capacity of Closely Spaced Parallel Runways Based on Different Operation Models [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2012, 30(6): 35-39. (in Chinese)
- [14] 孟祥伟, 张平, 李春锦. 机场跑道最大容量模型研究[J]. 飞行力学, 2011, 29(1): 78-83.
- MENG Xiangwei, ZHANG Ping, LI Chunjin. Research on Airport Runway Ultimate Capacity Model [J]. Flight Dynamics, 2011, 29(1): 78-83. (in Chinese)
- [15] 郭海琦, 朱金福. 近距离平行跑道容量及延误水平计算模型[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(4): 68-72.
- GUO Haiqi, ZHU Jinfu. Calculation Models of Capacity and Delay for Closely Spaced Parallel Runway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(4): 68-72. (in Chinese)
- [16] 孟祥伟. 跑道容量评估及机场流量优化研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011.
- MENG Xiangwei. Study on Evaluation of Runway System Capacity and Optimization of Airport Traffic Flow [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [17] MENG Xiangwei, ZHANG Ping, LI Chunjin. Capacity Model for two Intersecting Runways [C] // 30th Chinese Control Conference. 2011 Chinese Control Conference Proceedings. Yantai: Shanghai System Science Press, 2011: 5509-5514.
- [18] HEMM R, SHAPIRO G, LEE D, et al. Benefit Estimates of Terminal Area Productivity Program Technologies [R]. NASA/CR-1999-208989.

(编辑: 徐敏)