

机场快速出口滑行道平面设计方法

种小雷¹, 王克春², 彭寅¹, 戴双田³, 毕征³

1. 空军工程大学机场建筑工程系, 西安 710038
2. 济南军区空军后勤部, 济南 250000
3. 成都军区空军勘察设计院, 成都 610041

摘要 机场快速出口平面设计是机场规划设计的重要组成部分之一,但供小型飞机使用的机场快速出口平面设计目前尚无系统规范的方法。为建立系统的机场快速出口平面设计方法,本文对典型机场快速出口平面组成进行了系统分析,确定了决定快速出口平面设计形式的设计参数。以飞机弯道运行安全为准则,确立了快速出口的弯道半径、出口角度和增补面的设计方法。以典型飞机为对象,采用相应参数对飞机的转弯规律进行了模拟计算,得到了5种不同飞机以10、15、20、25和30m/s速度转弯时,出口角度与跑滑间距、出口距离和转弯偏移量之间的关系,可为军用机场快速出口设计提供参考。

关键词 航空运输; 机场; 快速出口; 平面设计

中图分类号 U491

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.16.012

Design of Speedy Exit Runways

ZHONG Xiaolei¹, WANG Kechun², PENG Yin¹, DAI Shuangtian³, BI Zheng³

1. Department of Airport Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China
2. Air Force Logistics Department, Jinan Military Region, Jinan 250000, China
3. Air Force Survey and Design Institute, Chengdu Military Region, Chengdu 610041, China

Abstract The design of speedy exit runways for an airfield is an important problem in airport engineering. For the civil aviation, the specifications of FAA and ICAO can be used. But for an airfield used by small airplanes, some problems will crop up. From an analysis of the representative plane of the speedy exit, it is shown that it can be divided into two segments: the turnoff and the fillet. The part of the turnoff can be described by the turning radius and the turning angle, the other part of the fillet can be described by the offset of the airplane. So these are the parameters to be studied. Through analyzing the landing track of the airplane on the runway, the relations between the exit angle and the distance of the runway to the taxiway, and between the offset in the fillets and the distance of the exit are obtained for 5 types of airplanes making swerves at the speeds of 10, 15, 20, 25 and 30m/s. In the end, the paper put forward a new design method for the radii R , the exit angle and the fillet, for the design of speedy exit runways of military airfields.

Keywords air transportation; airfield; high-speed exist; plane design

0 引言

目前,中国现有机场中飞行区布局为“目”字形的机场(图1)占据相当大的数量,这类机场在跑道两端设置了90°的端联络道和中间联络道,其目的是便于飞机迅速的从停机坪滑出起飞,由于当时机场使用机种单一、起飞着陆架次较少,因此在设计时并没有考虑飞机着陆后迅速脱离跑道的问题^[1,2]。随着飞机性能的发展,着陆需要的距离越来越短,如仍然沿用原来

“目”字形机场(图1),则无论飞机着陆距离长短,均要滑跑到端联络道或中间联络道才能脱离跑道,这极大地降低了跑道利用效率,增加了飞机的能耗。因此,在该类机场上增加专为着陆使用的快速出口是提高跑道利用率的最佳方法^[3]。

王维等^[4]对在跑道上设置快速出口的问题进行了系统研究,但对快速出口平面设计问题主要是沿用国际民航组织(ICAO)给出的方法。国外国际民航组织(ICAO)和美国联邦航

收稿日期:2012-10-15;修回日期:2013-03-11

基金项目:中国人民解放军空军科研项目(KJYZ0922)

作者简介:种小雷,副教授,研究方向为机场规划与设计,电子信箱:546975300@qq.com

空局 (FAA) 从 1989—1992 年研究了在跑道上设置不同出口角度的快速出口, 提出了不同角度形式下快速出口的平面形式^[5,6], 但没有系统给出平面设计的方法。针对这种状况, 本文针对飞机运行状况和具体飞机的性能特点, 系统研究快速出口平面形式设计方法。



图 1 “目”字形机场飞行区平面布局示意
Fig. 1 General shape of an airfield

从图 2 可以看出, 快速出口的平面形式由滑入、切线和滑出三部分组成, 在实际设计中, 只要确定了出口切线部分与跑道的夹角 θ 以及滑入和滑出部分的转弯半径 R , 即可确定快速出口的基本平面形式。此外, 实际使用当中, 当飞机以较高的速度转弯时, 机身会向内侧发生偏移, 从安全角度考虑弯道内侧需要加宽, 即机场工程中所说的“增补面”(图 3)。由此可以得出, 确定快速出口平面需要确定的设计参数

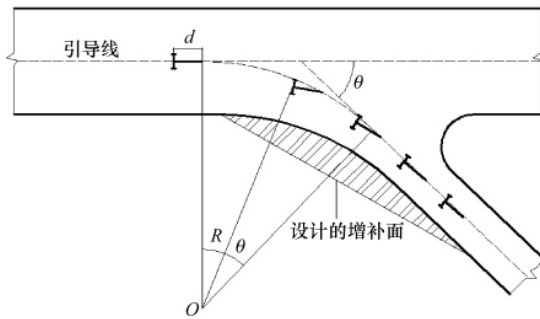


图 3 快速出口增补面的平面形式
Fig. 3 Supplemented surface in the speedy exit runway

为 R 、 θ 和增补面。

2 弯道半径计算方法

弯道半径由两部分组成, 即飞机从跑道进入快速出口的转弯半径和脱离快速出口进入滑行道的转弯半径。

2.1 脱离跑道进入快速出口的转弯半径

飞机着陆后自滑退出跑道, 速度一般比较大, 因此, 这些地段的弯道半径不能太小, 应保证飞机不会发生倾倒或侧向滑移等现象, 以确保飞机转弯的安全。可按照文献[1]公式确定滑出部分转弯半径:

1 快速出口平面设计参数分析

根据飞机着陆滑跑脱离跑道的程序分析, 可以将飞机从快速出口脱离跑道的整个过程可以分为 3 个阶段^[5]: 飞机从跑道转入快速出口的滑行阶段、在快速出口内的滑行阶段和滑出快速出口进入平行滑行道滑行阶段, 如图 2 所示。

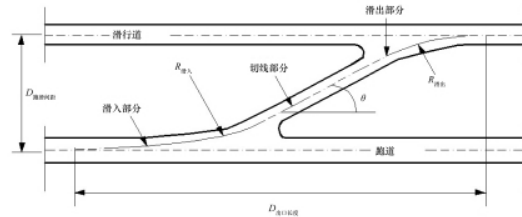


图 2 快速出口的平面形式
Fig. 2 Speedy exit runway

$$R_{滑入} = n \cdot \frac{4b \cdot V^2}{g \cdot d \cdot \cos \alpha} \cdot \frac{e_1 \cdot \cos^2 \alpha + 0.5h(f_1 - f)}{e_2(f_1 - f) - P \cdot h(f_1 + f) + 4bM/d} \quad (1)$$

式中, $P = \frac{\sum P_i}{G}$; $M = \frac{\sum P_i \cdot l_i}{G}$; g 为重力加速度, N/kg; $R_{滑入}$ 为飞机高速自滑的最小转弯半径, m; V 为飞机转弯速度, m/s; b 为飞机前后起落架 (轮) 间距, m; e_1 为飞机重心至主轮间距, m; e_2 为飞机重心至前轮间距, m; α 为主轮和前轮的连线与机身轴线的夹角; h 为飞机重心高度, m; f 为机轮滚动摩擦系数; f_1 为飞机内轮在刹车时的摩擦系数; P 为飞机转弯时的相对推力, kN; P_i 为某台发动机的推力, kN; G 为飞机重量, kg; M 为顺着转弯方向的相对力矩, kN·m/kN; l_i 为某一台发动机至机身轴线的垂直距离, m; n 为安全系数, 可取 $n=1.5$; d 为飞机主起落架宽度, m。

2.2 脱离快速出口进入滑行道的转弯半径

由于飞机从快速出口滑出时的速度已较低, 故脱离快速出口进入滑行道的转弯半径按照飞机低速自滑情况下弯道的最小转弯半径确定, 根据文献[1]确定计算公式:

$$R_{滑出} = b \operatorname{ctg} \varphi_{\max} - \frac{d}{2} \quad (2)$$

式中, $R_{滑出}$ 为飞机低速自滑的最小转弯半径, m; φ_{\max} 为飞机前轮最大许可偏角, $^\circ$ 。

3 出口角度确定方法

通过对快速出口弯道部分的分析发现, 快速出口滑入、滑出部分的圆弧对应的圆心角角度等于快速出口角度 θ (图 4)。因此, 可以近似的看作是由两个半径均为 R 且圆心角为 θ 的圆弧和一条直线段组成。根据这一假设, 滑跑间距可以看作是两段圆弧和切线部分在垂直于跑道方向上的投影之和。同理, 出口距离可视为两段圆弧与切线部分在平行于跑道方向上的投影之和。并以此建立角度与跑滑间距及出口距离间的关系方程。

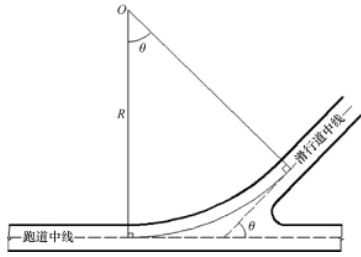


图 4 快速出口夹角示意

Fig. 4 θ in the speedy exit runway

$$D_{\text{跑滑间距}} = S_{\text{切线部分}} \cdot \sin\theta + (R_{\text{滑入}} - R_{\text{滑出}} \cdot \cos\theta) + (R_{\text{滑出}} - R_{\text{滑出}} \cdot \cos\theta) \quad (3)$$

$$D_{\text{出口距离}} = S_{\text{切线部分}} \cdot \cos\theta + (R_{\text{滑入}} + R_{\text{滑出}}) \cdot \sin\theta \quad (4)$$

其中, $S_{\text{切线部分}}$ 可用飞机着陆滑跑距离公式计算。从方程中可以看出, 快速出口角度随着跑滑间距的变化而变化。当跑滑间距一定时, 不同的出口速度影响着出口角度的设置; 同理, 当角度一定时, 出口的速度也决定着跑滑的间距。运用式(3)可以计算任意机型以不同速度脱离跑道时, 跑滑间距与出口角度 θ 的关系, 建立关系图后可作为设计的依据。当某型飞机分别以 10, 15, 20, 25 和 30m/s 的速度从出口转出时, 角度与跑滑间距的关系(图 5)。从图 5 得出的结果中分析, 当出口速度一定时, 跑滑间距与出口角度成正比; 角度一定时, 跑滑间距随出口速度的增大而增大; 跑滑间距一定时, 出口速度越大, 其出口角度就越小。

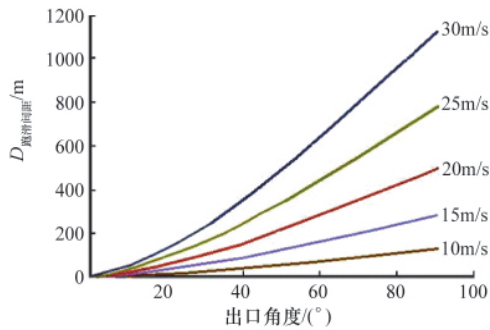


图 5 某型飞机快速出口角度与跑滑间距关系

Fig. 5 Relation curve between θ and the distance of the runway to the taxiway for an airplane

从式(4)可以看出, 快速出口的出口距离也受出口角度变化的影响。仍以某型飞机为例, 通过式(4)计算得出该型飞机分别在 10, 15, 20, 25 和 30m/s 的出口速度转出跑道时, 出口角度与出口距离之间的关系曲线(图 6)。同理, 可以推导出其他机型的关系曲线作为设计依据。由图 6 结果分析得出, 速度一定时, 出口距离随着角度的增大逐渐增大至某个最大值, 当角度继续增大时, 出口距离会随着角度的增加而减小; 角度一定时, 出口距离随着出口速度的增大而增大。

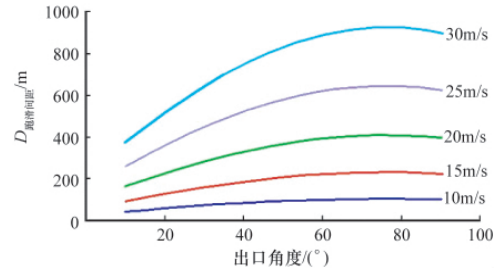


图 6 某型飞机快速出口角度与出口距离关系

Fig. 6 Relation curve between θ and the distance to exit for an airplane

4 增补面

当飞机在转弯时, 前轮沿着滑行道直线段的中心线自滑, 后轮主起落架的中心点也会沿着滑行道中线移动^[7]。当前轮进入弯道后, 后轮主起落架中点就会逐渐向弯道内侧偏移。偏移到某个最大值后, 就保持不变, 一直到前轮结束转弯并进入直线后, 该偏移值才逐渐减小, 后轮主起落架中点逐渐恢复沿着滑行道中线移动。由此, 可将主起落架中心运行轨迹分为主起落架中心跟踪圆弧轨迹和主起落架中心跟踪直线轨迹两部分研究。

4.1 主起落架中心跟踪圆弧运行轨迹

假设飞机在转弯滑行时, 飞机的基准点 S , 以圆心 O 和半径 R 在转弯时跟踪一个圆弧, 如图 7。

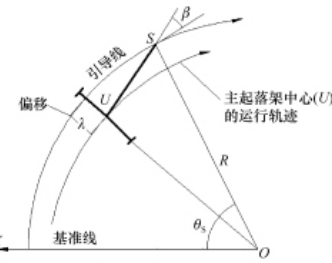


图 7 主起落架中心跟踪圆弧运行轨迹

Fig. 7 Run track when airplane's undercarriage center point follows an arc

由图 7 可知, 当已知某个时刻飞机的基准点 S 在圆弧上位置所对应的角度 θ_s , 则可以计算出该时刻飞机前轮对应的转向角 β , 从而通过余弦定理可以得出该时刻飞机主起落架中心 U 的偏移值 λ 。参考 FAA《机场设计手册第二部分》可得出:

$$\tan \frac{\beta}{2} = \frac{1 - e^{k\theta}}{x - k - x \cdot e^{k\theta} - k \cdot e^{k\theta}} \quad (5)$$

其中, θ 为某时刻飞机基准点在圆弧上位置对应的角度, rad; β 为 θ 时刻对应的转向角, °; e 为自然对数; $x = R/l$; $k = \sqrt{x^2 - 1}$; R 为弯道中线半径, m; l 为飞机的基准长度, m。则

$$\lambda = \sqrt{R^2 + l^2 \pm 2lR \sin\beta} - R \quad (6)$$

式中, λ 为转向角 β 时刻主起落架中心的偏移值, m; 其中, 偏移在圆弧以外时用正号, 以内时用负号。

从式(6)可以看出,对同一型号的飞机来说,飞机的基准长度是不变的。因此,同种型号的飞机在转弯过程中,其主起落架中心的偏移轨迹只受到转向角变化的影响。从而,可以得出5种典型机型的 λ 与 β 的关系曲线($R=200\text{m}$)(图8)。

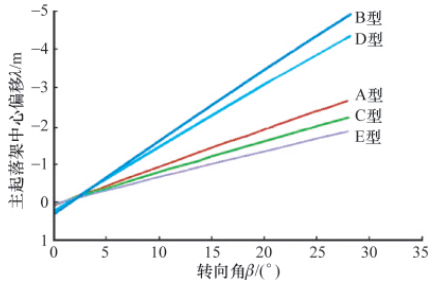


图8 主起落架中心跟踪圆弧时偏移值与转向角关系曲线
Fig. 8 Relation curve between λ and β when airplane's undercarriage center point follows an arc

从图8可以看出,随着飞机基准长度减小,主起落架中心的偏移值也逐渐减小;主起落架中心的偏移与转向角之间呈线性关系, λ 随 β 的增大而增大。

4.2 主起落架中心跟踪直线运行轨迹

在完成弯道后,基准点S沿滑行道中线跟踪一条直线的行径。转向角逐渐减小而主起落架中心则做曳物线运行(图9)。

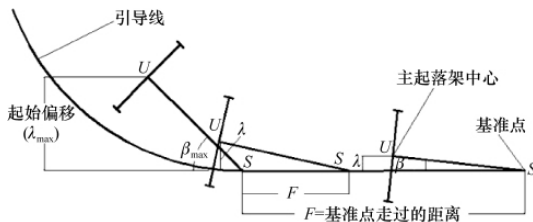


图9 基准点跟踪直线时主起落架中心的偏转
Fig. 9 Airplane's undercarriage center point deflexion λ , when the base point follows a straight line

由参考文献[6]得出:

$$\lg \tan \frac{\beta}{2} = \lg \tan \frac{\beta_{\max}}{2} - \frac{F}{l} \quad (7)$$

使得能在基准点S已经沿直的滑行道中线走了距离F时计算转向角。当基准点S已经沿引导线的直线段走了距离F,转向角为 β ,则主起落架中心的偏移由式(8)得出:

$$\frac{\lambda}{l} = \sin \beta \quad (8)$$

同样,对5种机型主起落架中心跟踪直线时 λ 与 β 的关系曲线进行分析(图10)。

从图10可以得出,在主起落架中心跟踪直线时, λ 与 β 之间呈线性关系,随着转向角 β 的增大而增大。

在增补面设计中,影响增补面的因素主要有两方面,分别为飞机主起落架中心偏移值 λ 和弯道中线半径R,如图3所示。在R一定的情况下,随着 λ 的增大,机轮向内侧偏移的距离也越大,相应的需要的增补面半径也越大。因此,根据已

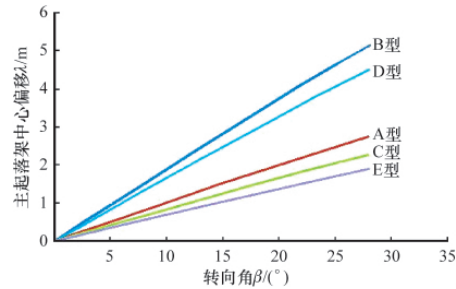


图10 主起落架中心跟踪直线时偏移值与转向角的关系
Fig. 10 Relation between λ and β when airplane's undercarriage center point follows a straight line

知的出口角度,只需要计算绘制出的飞机转弯过程多个时刻对应的机轮轨迹点位置,在保证各个轨迹点距跑道边缘距离满足安全要求(2.5~4.5m)的前提下,即可绘制出需要的增补面。为了安全起见,通常增补面设置中选取多个轨迹点中离开弯道内侧边缘最远距离点,过最远距离点绘制出一条圆弧,使得其余轨迹点均不超出其范围,则该圆弧即为设计的增补面。

5 结论

针对目前中国在用机场中存在一定数量的机场需改建快速出口,本文系统分析了快速出口平面设计参数组。在此基础上,分析了5种不同飞机以10,15,20,25和30m/s速度转弯时,出口角度与跑滑间距、出口距离和转弯偏移量之间的关系,提出了转弯半径、出口角度和增补面的设计方法,为军用机场快速出口设计提供了重要参考。

参考文献 (References)

- [1] 蔡良才. 机场规划设计[M]. 北京:解放军出版社, 2002: 74-78.
Cai Liangcai. Airfield planning and design[M]. Beijing: People Liberation Army Press, 2002: 74-78.
- [2] 张洪海, 胡明华. 多跑道降落飞机协同调度优化 [J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(3): 86-91.
Zhang Honghai, Hu Minghua. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3): 86-91.
- [3] 曹学明, 王喜富. 区域多机场系统机场选址模型研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(1): 117-121.
Cao Xueming, Wang Xifu. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(1): 117-121.
- [4] 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. Journal of Civil Aviation University of China, 2006, 24(4): 27-31.
- [5] Trani A A, Hobeika A G, Kim B G. Runway exit designs for capacity improvement demonstrations (Phase II: Computer model development)[R]. Virginia: Virginia Tech University, 1992.
- [6] Federal Aviation Administration. Airport Design (FAA/AC: 150/5300-13) [S]. Washington DC: FAA, 1989.
- [7] 彭寅, 种小雷, 袁俊山, 等. 机场快速出口增补面设计方法 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 5(3): 45-48.
Peng Yin, Chong Xiaolei, Yuan Junshan, et al. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 5(3): 45-48.

(责任编辑 岳臣)