

# 飞机着陆安全性的跑道长度安全系数计算方法

范 博, 蔡良才<sup>✉</sup>, 王观虎, 卢 航

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

**摘要** 为进一步研究军用飞机着陆过程所需的跑道长度,提出基于安全性的跑道长度安全系数计算方法。主要分析飞机在着陆过程中,受到着陆质量以及风速、气压气温、道面摩擦、纵坡等环境因素的复合影响,用蒙特卡罗法数值模拟满足着陆安全性的跑道长度值  $L'_l$ ,安全系数  $C$  为  $L'_l$  与基准着陆滑跑距离  $S_{l0}$  的比值。结果表明:在同一安全性下,跑道长度的安全系数随着飞机的着陆质量增加而减小;飞机对着陆安全性要求越高则安全系数的值就越大,但是安全系数存在边际值。以某军用机型为例,设定机场的环境因素,数值模拟着陆所需的跑道长度值符合实际要求。若该机型以最大质量进行着陆,当满足安全性为 99.99% 时,在道面干燥的条件下安全系数为 1.40,在道面潮湿的条件下安全系数为 1.98。安全系数的最大边际值分别为 1.43 和 2.02。

**关键词** 机场工程;安全系数;蒙特卡罗法;接地点分布;滑跑距离

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.02.004

**中图分类号** V351.11 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)02-0021-05

## A Calculation Method of Runway Length Safety Coefficient Based on Aircraft Landing Safety

FAN Bo, CAI Liangcai<sup>✉</sup>, WANG Guanhu, LU Hang

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to study the runway length of military aircraft landing, this paper proposes a calculation method of runway length's safety coefficient based on safety. The paper mainly analyzes some environmental factors affected by landing quality, wind speed, pressure, temperature, surface friction or longitudinal slope. The paper utilizes Monte Carlo method for simulating the safety landing runway length value and security coefficient which is taking as the ratio of landing runway length and landing running distance. The results show that the safety coefficient of runway length decreases with the increase of landing quality and the higher the safety requirement of the aircraft, the greater the safety factor, but the safety factor will have a marginal value. Under conditions of taking a certain type of military aircraft as an example and setting the environmental factors of the airport, the paper simulates the length of the runway to meet the needs of actual requirements. If the aircraft lands in the maximum quality, when the safety is 99.99%, the safety factor will be 1.40 and the safety factor will be 1.98 in the wet condition of the road surface. The maximum marginal value of the safety factor is 1.43 and 2.02 respectively.

**收稿日期:** 2017-10-26

**基金项目:** 国家自然科学基金(51578540)

**作者简介:** 范 博(1994—),男,四川渠县人,硕士生,主要从事机场规划与设计研究。E-mail:fanbo81@163.com

**通信作者:** 蔡良才(1960—),男,浙江宁波人,教授,博士生导师,主要从事机场规划与设计研究。E-mail:Liangcai07@126.com

**引用格式:** 范博, 蔡良才, 王观虎, 等. 飞机着陆安全性的跑道长度安全系数计算方法 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(2): 21-25. FAN Bo, CAI Liangcai, WANG Guanhu, et al. A Calculation Method of Runway Length Safety Coefficient Based on Aircraft Landing Safety [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(2): 21-25.

**Key words:** airport engineering; safety coefficient; Monte Carlo method; ground distribution; landing distance

机场的跑道长度要满足飞机起飞和着陆的两方面要求。根据统计,军用飞机发生冲出跑道的事件中,80%以上都发生在着陆阶段。军用永备机场的跑道长度设计与民用运输机场不同,通常民用运输机场的跑道长度还考虑起飞出现一发故障所需的跑道长度。由于运输机着陆所需跑道长度较短,因此民用机场在确定跑道长度时,往往忽略着陆所需的跑道长度。但是军用飞机的大部分机型不能向运输机的发动机提供反向推力等原因,往往存在着陆滑跑距离大于起飞滑跑距离的情况。

国外的机场跑道长度设计主要分为国际民航组织(ICAO)<sup>[1]</sup>和美国联邦航空局(FAA)<sup>[2-5]</sup>的设计方法,国内民用机场普遍采用ICAO的设计标准。目前军、民航着陆所需跑道长度计算的主要区别在于军用机场采用接地点后的安全定值法<sup>[6]</sup>,而民用机场采用基于着陆场长的安全系数法<sup>[7-9]</sup>。

我国于1983年提出军用机场跑道长度的设计方法<sup>[6]</sup>,把飞机滑跑的两轮阶段和三轮阶段简化为一个阶段进行研究。此后李乐等<sup>[10]</sup>提出基于可靠性的跑道长度设计方法,首次采用蒙特卡罗法进行跑道长度的数值模拟;宋花玉等<sup>[11]</sup>通过数值积分法使理论滑跑距离的计算更为精准。由于机场的环境影响因素,蔡良才等<sup>[12]</sup>研究了高原机场的飞机滑跑距离计算方法;刘爱中等<sup>[13]</sup>研究了坡度和风速对跑道长度的影响。种小雷等<sup>[14-15]</sup>通过对飞机着陆过程的多方面综合分析,从而确定并优化飞机的快速出口。

本文主要分析飞机在着陆过程中,飞机质量属于可控变量时,在机场复杂环境因素的影响下,研究着陆地点的分布和实际滑跑距离。通过蒙特卡罗数值模拟的方法计算实际所需的跑道长度,提出满足着陆安全性的安全系数计算方法。

## 1 飞机着陆过程

### 1.1 军用飞机着陆分析

军用飞机从15 m安全高度下滑时,发动机处于慢车工作状态,飞机以着陆速度作直线下滑至高度8~12 m,飞行员开始拉平飞机,至高度1 m左右拉平过程结束,进入平飘,最后飞机平飞减速飘落接地。

军用机场跑道长度的现行设计方法是根据飞机以最大着陆质量刹车和放阻力伞的着陆滑跑距离,计算公式<sup>[6]</sup>为:

$$L_l = l + S_l \quad (1)$$

式中: $L_l$ 为飞机着陆所需的跑道长度; $l$ 为飞机接地点到跑道后端的距离,通常取300~350 m; $S_l$ 为飞机的着陆滑跑距离。在允许误差范围内,现行计算方法把飞机着陆过程中的两轮滑跑和三轮滑跑2个阶段简化为一个阶段滑跑过程。

### 1.2 民用飞机着陆安全系数

军用飞机的类型比较多,而民用飞机以运输机型为主。民用运输机从50 ft(英尺,约15 m)的高度下滑,飞机拉平、接地、滑跑,直到停止,所经过的水平距离为着陆场长,见图1。

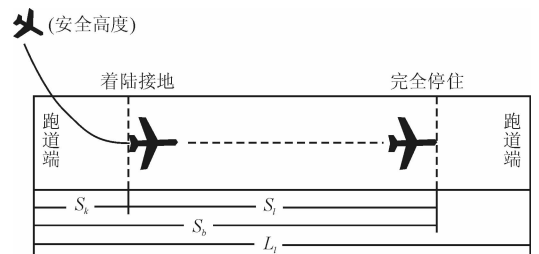


图1 民用运输机着陆滑跑过程

Fig. 1 A civilian transport aircraft's landing running

民用飞机着陆安全系数基于飞机的着陆场长,主要考虑驾驶误差及跑道潮湿等环境因素,跑道长度计算公式<sup>[6]</sup>为:

$$L_l = K_b S_b = K_b (S_k + S_l) \quad (2)$$

式中: $K_b$ 是安全系数,取值为1.67,主要考虑了跑道潮湿等环境因素的影响; $S_b$ 为飞机的着陆场长, $S_k$ 为飞机从50 ft下降至着陆接地点所对应的水平距离; $S_l$ 为飞机从接地后到完全停住过程的滑跑距离。根据民用飞机手册,已知飞机着陆质量对应的着陆场长,即可确定着陆所需的跑道长度。

根据式(1),军用机场的着陆安全系数应基于军用飞机的着陆滑跑距离。显然着陆场长大于着陆滑跑距离,因此基于着陆滑跑距离的安全系数应大于基于着陆场长的安全系数。

## 2 着陆质量影响分析

飞机质量对着陆所需跑道长度的影响较大,本文把着陆质量当作特殊的变量进行研究。着陆质量通过影响着陆速度,从而影响接地点的分布和着陆实际滑跑距离。

### 2.1 着陆速度

根据飞机实际滑跑情况,飞机着陆速度不是定值,受到风速的影响。通过飞机说明书,可以知道飞

机在标准条件(气温 15℃,气压为 101 325 Pa)下的某一着陆质量  $m_{l0}$  和相对于空气的着陆速度  $v_{l0}$ 。采用“升力等于重力”的方法计算得到的着陆速度是最小值,根据 CCAR-25-R4<sup>[16]</sup> 的要求,着陆进场速度应比着陆气动外形下的计算速度大 30%。发动机的慢车推力在竖直方向可以忽略不计,暂不考虑军用飞机挂弹对飞机气动布局的影响,根据空气动力学公式有:

$$\frac{1}{2}C_y\rho_0S_y\frac{v_{l0}^2}{1.3^2}=m_{l0}g \quad (3)$$

$$\frac{1}{2}C_y\rho S_y\frac{v_l^2}{1.3^2}=m_l g \quad (4)$$

式中: $C_y$  为平均升力系数; $S_y$  为机翼面积; $\rho_0$  为空气的标准密度; $\rho$  表示空气的实际密度; $m_l$  为计算飞机着陆质量; $g$  为重力加速度; $v_l$  为计算飞机相对于空气的着陆速度。把式(3)、式(4)左右相除,得到:

$$v_l = v_{l0} \sqrt{m_l\rho/m_{l0}\rho_0} \quad (5)$$

通过比值,可以消除空气动力学公式带来的误差。设  $v_w$  为分解到跑道方向上的风速, $v'_l$  为相对于地面的着陆速度,顺风着陆  $v_w$  取负,逆风着陆  $v_w$  取正,得到:

$$v'_l = v_l - v_w = v_{l0} \sqrt{m_l\rho/m_{l0}\rho_0} - v_w \quad (6)$$

## 2.2 接地点分布

下滑着陆时,飞行员在下滑目测点将飞机拉平,要求飞机经过平飞减速后在 T 字布正侧方的跑道上接地。根据部分学者<sup>[10]</sup>对军用飞机的着陆分析, $l$  大致服从 T 字布附近的正态分布。飞机从平飘到接地过程,主要影响因素为飞机相对于地面的着陆速度,着陆的速度越大,那么接地点的分布就越不均匀。由于 T 字布通常设在离跑道端 200 m 处,则  $l$  可以表示为:

$$l \sim N(200, \sigma^2) \quad (7)$$

当着陆速度相同时,飞机的接地点到跑道后端的距离独立同分布, $\bar{l}$  为样本均值,根据正态分布的特征,有:

$$X' = \frac{\bar{l} - 200}{\sigma/\sqrt{n}} \sim N(0, 1) \quad (8)$$

对  $X'$  进行置信概率为  $1 - \alpha$  的区间估计,则  $\bar{l}$  的置信区间和置信概率表示为:

$$P\left\{200 - \mu_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma^2}{n} < \bar{l} < 200 + \mu_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma^2}{n}\right\} = 1 - \alpha \quad (9)$$

$\bar{l}$  的置信区间就是距离跑道后端的最近接地点和最远接地点,在水平方向上从平飘到接地的过程中着陆速度基本上保持不变,着陆速度对接地点分布区间的影响时间为  $\Delta t$ ,则有:

$$v'_l \Delta t = 2\mu_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma^2}{n} \quad (10)$$

由此可以得到接地点分布的  $\sigma$  值和着陆速度  $v'_l$  的关系式为:

$$\sigma = \sqrt{v'_l \Delta t n / 2\mu_{\frac{\alpha}{2}}} \quad (11)$$

## 3 着陆安全系数

在着陆过程中,除了飞机着陆质量的影响,还包括来自机场环境的许多影响因素,主要包括风速、气压气温、道面摩擦系数、纵坡等。

### 3.1 风速影响

当跑道两端净空较好时,飞机可以选择逆风着陆,风速均认为是正值,即风速样本的绝对值。根据已有学者对跑道风速的实际统计和分析研究<sup>[10]</sup>,可以用指数分布描述分解到跑道方向的风速,参数  $\lambda$  通过样本的风速均值作矩估计。

$$E(|v_w|) = 1/\lambda \quad D(|v_w|) = 1/\lambda^2 \quad (12)$$

### 3.2 气压气温

机场的气压和气温相互影响而不断变化,通过空气的实际密度从而影响着陆速度。令  $\rho_r = \rho/\rho_0$  表示实际空气相对于标准大气的相对密度,则:

$$\rho_r = \frac{P}{(273 + T)} \times 2.8423 \times 10^{-3} \quad (13)$$

式中: $P$  为实际气压(Pa); $T$  为实际气温(℃)。

气压的高低除了受温度的影响,还受到大气气流的影响,为简化运算,取机场所在海拔的平均气压进行计算。已知在 24 h 内,气温近似呈正弦式变化<sup>[10]</sup>,根据一天中的最高气温  $T_{\max}$  和最低气温  $T_{\min}$ ,用  $\Delta t$  表示以 24 h 为周期的机场气温正弦式变化,起点对应的起始时间为一天中上午 8~10 点,因此把气温  $T$  近似表示为:

$$T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \sin(\Delta t) + \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (14)$$

### 3.3 综合阻力系数

道面摩擦系数发生变化对飞机的起飞过程影响较小,主要影响飞机的着陆滑跑距离。通常情况下,航空部队在道面潮湿情况下不进行飞行训练,但也不排除飞机在起飞时道面干燥但是在着陆时出现道面潮湿的情况。飞机着陆滑跑过程中受到的综合阻力可用平均综合阻力系数  $\mu_l$  乘以飞机着陆重量  $m_l g$  来表示<sup>[6]</sup>。

$$\mu_l = f \left\{ 1 + \left[ (C_x + C_{xfs}) \frac{1}{f} - C_y \right] \frac{\rho S_y v_{kl}^2}{2m_l g} \right\} \quad (15)$$

式中: $C_x$  为空气阻力系数; $C_{xfs}$  为的减速伞阻力系数; $v_{kl}$  为飞机相对于空气的平均着陆滑跑速度; $f$  为机轮与地面的摩擦系数。

现行的军用机场跑道长度设计方法中,将综合阻

力系数随着陆速度变化的规律用  $v_{li}$  代替,并且着陆质量的变化对综合阻力系数的影响并不大,因此作为恒定值。 $\mu_i$  与飞机的特性以及机轮与跑道表面的摩擦特性有关,军用机场绝大多数为水泥混凝土道面,针对某种机型的  $\mu_i$  通过实测后可以计算得到。

### 3.4 纵坡影响

当机场的两端净空良好,飞机可以采取逆风着陆,因此飞机是顺坡还是逆坡着陆,是由着陆时的风向决定的。根据着陆过程的慢车推力  $P_m$  和  $\mu_i$ ,着陆实际滑跑距离可以表示为:

$$S_l(\pm i) = \frac{\left\{ v_{l0} \sqrt{\frac{m_l(273+T)}{0.0028423m_{l0}P} - |v_w|} \right\}^2}{2g\left(\mu_i - \frac{P_m}{m_l g} \pm |i|\right)} \quad (16)$$

式中:  $|i|$  表示跑道的纵向有效坡度,顺坡着陆取负,逆坡着陆取正。

因此,着陆所需的跑道长度表示为:

$$L'_l = \begin{cases} L(+i) = l + S_l(+i), & \text{逆坡着陆} \\ L(-i) = l + S_l(-i), & \text{顺坡着陆} \end{cases} \quad (17)$$

### 3.5 安全系数的计算

通过式(16),可以计算着陆质量为  $m_l$  时,在无风、标准大气、纵坡为零的条件下的基准滑跑距离  $S_{l0}$ 。在飞机着陆的实际过程中,受到接地点的随机分布和机场环境因素的复合影响,定义着陆所需跑道长度的安全系数  $C$  为着陆所需跑道长度  $L'_l$  与基准滑跑距离  $S_{l0}$  的比值,表示为:

$$C = \frac{L'_l}{S_{l0}} = \frac{2\mu_i g L'_l}{v_l'^2} - \frac{2P_m L'_l}{m_l v_l'^2} \quad (18)$$

为保证飞机的着陆安全性,跑道的实际长度应大于着陆所需的跑道长度。通过式(18),采用蒙特卡罗法进行数值模拟,可以得到着陆质量为  $m_l$  时保证飞机满足着陆安全性的安全系数以及着陆质量的变化对安全系数的影响。本文研究的着陆安全系数是考虑飞机着陆质量和环境因素的影响,如果还考虑飞行员驾驶动作不标准引起的驾驶误差,可以在本文安全系数的基础上乘上驾驶误差系数。

## 4 实例分析

某机型应在军用二级机场飞行,着陆所需跑道长度大于起飞所需跑道长度。该机型的最大着陆质量为 21 130 kg,在标准条件下的着陆速度为 83.15 m/s。该机型的最小着陆质量为 17 000 kg,着陆过程慢车推力为 2 089 N,在干燥道面上的着陆综合阻力系数为 0.387,在潮湿道面上的着陆综合阻力系数为 0.255。

某机场一天中的最高气温为 30 °C,最低气温为 15 °C,平均气压为 101 325 Pa,有效纵坡为 5‰,沿跑道两端方向的平均风速为 0.5 m/s,往跑道两端方向刮风的概率相同。根据式(1)中  $l$  的取值范围,速度对接地点的平均影响时间  $\Delta t$  确定为 2 s。在模拟过程中,当置信概率为 99%时,接地点的分布取大字样  $n=50$ ,通过查表,标准正态分布的  $\mu_{0.005}=2.81$ 。

计算得到:最大着陆质量基准滑跑距离 935.25 m;最小着陆质量基准滑跑距离 757.37 m。

通过 MATLAB 语言可以实现随机数的生成:“Normrnd(Mu, Sigma, m, n)”函数可生成均值为 Mu,标准差为 Sigma 的  $m$  行  $n$  列正态分布随机数;“Exprnd( $\mu, m, n$ )”函数可生成均值为  $\mu$  的  $m$  行  $n$  列指数分布的随机数。采用蒙特卡罗法模拟  $10^6$  次实际着陆所需跑道长度,将所有的跑道长度模拟值按照大小重新排序后,即可通过数组查询的方式得到满足着陆安全性的跑道长度值。

1)当着陆安全性为 99.99%时,随着着陆质量的增加,安全系数的值减小,见图 2。其中以最大质量着陆,道面干燥的安全系数为 1.40,道面潮湿的安全系数为 1.98;以最小质量着陆,道面干燥的安全系数为 1.47;道面潮湿的安全系数为 2.06。

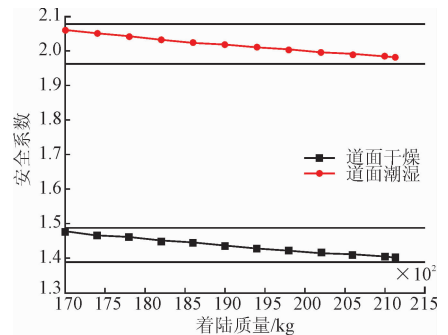


图 2 着陆质量与安全系数的关系

Fig. 2 Relationship between landing quality and safety coefficient

2)当飞机以最大质量着陆,随着对安全性要求的增加,安全系数也增加,见图 3。

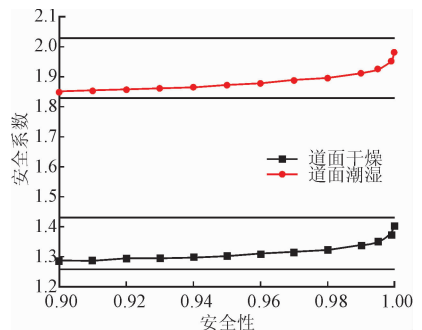


图 3 最大着陆质量安全性与安全系数的关系

Fig. 3 Relationship between safety coefficient of maximum landing quality and its security

但是道面干燥时的安全系数峰值不超过 1.43,道面潮湿时的安全系数峰值不超过 2.02。

## 5 结语

通过分析飞机着陆质量、着陆速度和接地点分布三者之间的关系,考虑机场环境因素对着陆滑跑距离的影响,从而得到跑道长度的计算公式。由于机场环境因素的变化十分复杂,通过正态分布和指数分布等定向描述后,用蒙特卡罗法数值模拟得到的着陆所需跑道长度,与实际情况会存在一定的偏差。通过提高数值模拟的次数、更准确地量化环境影响因素,可以使安全系数的计算结果更具有科学性。

本文在现行军用机场跑道长度设计理论的基础上,提出了基于飞机着陆安全性的跑道长度安全系数计算方法,弥补了长期以来军用机场跑道长度设计主要依靠安全定值法的不足,对军用机场跑道长度设计具有一定的工程实际参考价值,同时也为其他机型在设计跑道长度时提供了新方法和新思路。

## 参考文献(References):

[1] International Civil Aviation Organization. Annex 14 to the Convention of International Civil Aviation-Aerodromes, Sixth Edition, Volume I-Aerodrome Design and Operations [S]. Washington DC: ICAO, 2013.

[2] ANTONIO A, TRANI A C. Runway Length Estimation [S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, U S Department of Transportation, 2005.

[3] LEONARD E, MUD D. Runway Length Requirements for Airport Design: 150/5325-4B [S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, U S Department of Transportation, 2005.

[4] LEONARD E, MUDD. Airport Design: 150/5300-13 [S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, U S Department of Transportation, 1989.

[5] Federal Aviation Administration. Airport Pavement Design and Evaluation [S]. Washington DC: Department of Transportation, 1995.

[6] 蔡良才,邵斌,王观虎. 机场规划设计 [M]. 北京:国防工业出版社,2018.  
CAI L C, CHONG X L, WANG G H. Airport Planning and design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018. (in Chinese)

[7] DAVID Z, MANGION, MARTIN E. Simplified Algorithm to Model Aircraft Acceleration during Take-off [J]. Journal of Aircraft, 2008, 45(4): 17-23.

[8] SHANE D P. Aircraft Takeoff Performance Monitoring in Far-Northern Regions: An Application of the Global Positioning System [D]. Saskatchewan: University of Saskatchewan, 2003.

[9] GARY L, ABDERTON, ERNEST S, et al. Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration [R]. [S. l.]: U. S Army Corps of Engineers, 2008.

[10] 李乐. 机场跑道平面尺寸可靠性研究 [D]. 西安:空军工程大学,2009.  
LI L. Airport Runway Plane Size Reliability Research [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2009. (in Chinese)

[11] 宋花玉,蔡良才,郑汝海. 飞机起飞滑跑距离数值积分改进算法 [J]. 交通运输工程学报,2007,7(2): 24-28.  
SONG H Y, CAI L C, ZHENG R H. Numerical Value Integral Improvement Algorithm of Aircraft Take-off Running Distance [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 24-28. (in Chinese)

[12] 蔡良才,王海服,朱占卿. 高原机场飞机起飞滑跑距离计算方法 [J]. 交通运输工程学报,2013,13(2): 66-72.  
CAI L C, WANG H F, ZHU Z Q. Calculation Method of Running Distance for Aircraft Takeoff on Plateau Airport [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(2): 66-72. (in Chinese)

[13] 刘爱中,尚永锋,李世林,等. 坡度和风速对跑道限制重量的影响 [J]. 机械设计与制造,2015,9(1): 81-84.  
LIU A Z, SHANG Y F, LI S L, et al. Effect of Field Slope and Wind Velocity on Field Limit Weights [J]. Machinery Design and Manufacture, 2015, 9(1): 81-84. (in Chinese)

[14] 种小雷,蔡宛彤,王克春. 基于利用率的机场快速出口位置优化分析 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2013,14(3): 6-9.  
CHONG X L, CAI W T, WANG K C. Optimization Analysis of Airfield Runway High-Speed Exit Location Based on Utilization Ratio [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2013, 14(3): 6-9. (in Chinese)

[15] 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,2010,10(5): 117-122.  
CHONG X L, XU J L, CAI L C, et al. Feasibility Analysis of Building High-Speed Exit on Existing Runway [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(5): 117-122. (in Chinese)

[16] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4 [S]. 北京:中国民用航空局,2013.  
China Civil Aviation Administration. Airworthiness Standard for Transport Aircraft: CCAR-25-R4 [S]. Beijing: China Civil Aviation Administration, 2013. (in Chinese)