

# 军用机场飞机中断起飞决断速度计算方法

宋花玉<sup>1</sup>, 蔡良才<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051; 2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:**对飞机在军用机场起飞滑跑过程中出现一发停车的中断起飞决断速度的计算方法进行了研究。提出用迭代搜索算法计算中断起飞决断速度,编制了一发停车中断起飞决断速度计算程序。对某型军用飞机在2种不同条件下的中断起飞决断速度进行计算,并与试飞结果进行比较,计算的中断起飞决断速度分别为71.8 m/s、76.6 m/s,相应的试飞结果为73 m/s、78 m/s,计算值与试飞值的相对误差分别为1.6%、1.8%。结果表明,迭代搜索法是计算中断起飞决断速度的准确有效算法。

**关键词:**军用机场;一发停车;中断起飞决断速度;迭代搜索算法

**中图分类号:** V323.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)02-0033-05

我国军用机场设计跑道长度时不考虑飞机在起飞滑跑过程中出现一发停车的情况<sup>[1]</sup>。从部队实际起飞情况看,出现一发停车的现象不多但确有发生。由于跑道长度设计不考虑这种情况,因此,一旦出现一发停车,若处理不当,就可能造成重大飞行事故<sup>[2]</sup>。对一发停车的处置方式,美军早已解决<sup>[3-5]</sup>,我军虽然进行了一些研究,但仅限于一般的理论分析和个别飞机的近似计算<sup>[2,6-10]</sup>,尚未形成统一标准,在决断速度的计算上也未形成统一准确的有效算法。文献[11]提出用继续起飞决断速度和中断起飞决断速度作为处置一发停车的标准,符合我军机场的实际情况,是一种较好的方法。但文献[11]只对继续起飞决断速度的计算方法进行了研究,本文将中断起飞决断速度的计算方法进行深入研究,为一发停车的处置提供决策依据。

## 1 中断起飞所需跑道长度

### 1.1 中断起飞决断速度

对于一定的跑道长度和机场环境,飞机以一定的状态进行起飞,在滑跑过程中一台发动机出现故障,飞行员经过2 s-3 s认定发动机发生故障<sup>[1]</sup>,及时采取一定的减速措施,飞机刚好在端保险道头停住,这时的故障认定速度叫做飞机在当时环境和起飞状态下的中断起飞决断速度。根据这个定义,当故障认定速度小于当时条件下的中断起飞决断速度时,应中断起飞。

### 1.2 中断起飞所需跑道长度分析

根据发动机出现故障的时刻,中断起飞过程可分为以下3种情形:

1) 故障速度 $V_g$ 小于抬前轮速度 $V_R$ ,且故障认定速度 $V_{gr}$ 不大于允许刹车的最大速度 $V_{sh}$ 。飞行员在故障认定速度 $V_{gr}$ 决定中断起飞后,关闭其它发动机同时刹车并打开减速伞,当飞机速度减小到抛掉减速伞的速度 $V_p$ 时,飞行员抛掉减速伞,最后飞机停在跑道或端保险道上,整个过程见图1。图中 $V_w$ 为沿滑跑方向的风速,逆风取正,顺风取负, $L_1$ 为滑跑起点至跑道后端的距离,单机起飞时,歼击机、强击机取50 m,轰炸机取100 m<sup>[1]</sup>, $L_0$ 为端保险道长度, $S_0$ 为开始滑跑到一发停车时的滑跑距离, $S_{g1}$ 为故障认定时段的滑跑距

\* 收稿日期:2008-10-24

作者简介:宋花玉(1971-),男,陕西西安人,讲师,主要从事机场规划设计等研究;E-mail:huayu-song@163.com  
蔡良才(1960-),男,浙江宁波人,教授,博士生导师,主要从事机场工程研究。

离,  $S_{11}$  为刹车放减速伞到抛掉减速伞的滑跑距离,  $S_{12}$  为抛掉减速伞到飞机停住的滑跑距离。由图 1 得该种情况下中断起飞对跑道长度  $L_d$  的要求为:

$$L_d = L_1 + S_Q + S_{g1} + S_{11} + S_{12} - L_0 \quad (1)$$

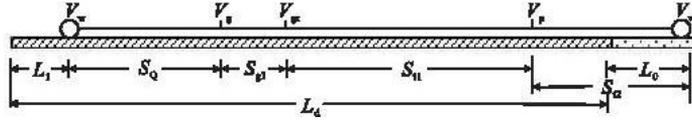


图 1 一发停车中断起飞示意图 1

Fig. 1 The sketch 1 of abort take off when one engine failure

2) 故障速度  $V_g$  小于抬前轮速度  $V_R$ , 但故障认定速度  $V_{gr}$  大于允许刹车的最大速度  $V_{sh}$ 。飞行员在故障认定速度  $V_{gr}$  决定中断起飞后, 关闭其它发动机同时打开减速伞, 等飞机速度降到允许刹车的最大速度  $V_{sh}$  时开始刹车, 当飞机速度减小到抛掉减速伞的速度  $V_p$  时, 飞行员抛掉减速伞, 最后飞机停在跑道或端保险道上, 整个过程见图 2。图中  $S_{13}$  为从故障认定速度  $V_{gr}$  到速度降到  $V_{sh}$  时的滑跑距离,  $S_{14}$  为从刹车到抛掉减速伞的滑跑距离, 其它符号与图 1 相同。由图 2 得该种情况下中断起飞对跑道长度  $L_d$  的要求为:

$$L_d = L_1 + S_Q + S_{g1} + S_{13} + S_{14} + S_{12} - L_0 \quad (2)$$

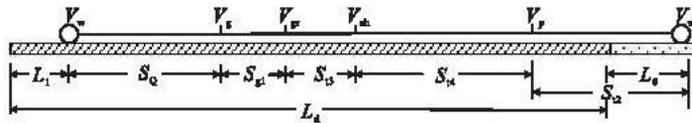


图 2 一发停车中断起飞示意图 2

Fig. 2 The sketch 2 of abort take off when one engine failure

3) 故障速度  $V_g$  大于或等于抬前轮速度  $V_R$ 。飞行员在故障认定速度  $V_{gr}$  决定中断起飞后, 关闭其它发动机同时放下前轮, 等前轮接地后飞机速度降到允许放减速伞的最大速度  $V_{fs}$  时打开减速伞, 接下来的操作与情形 2) 相同, 整个过程见图 3。图中  $V_{qi}$  为前轮接地速度,  $S_{Q1}$  为开始滑跑到抬前轮时的滑跑距离,  $S_{Q2}$  为抬前轮到一发停车时的滑跑距离,  $S_{g2}$  为故障认定时段的滑跑距离,  $S_f$  为放前轮过程的滑跑距离,  $S_{15}$  为前轮接地到放减速伞时段的滑跑距离,  $S_{16}$  为放减速伞到飞机速度降到  $V_{sh}$  时的滑跑距离, 其它符号与图 2 相同。由图 3 得该种情况下中断起飞对跑道长度  $L_d$  的要求为:

$$L_d = L_1 + S_{Q1} + S_{Q2} + S_{g3} + S_f + S_{15} + S_{16} + S_{14} + S_{12} - L_0 \quad (3)$$

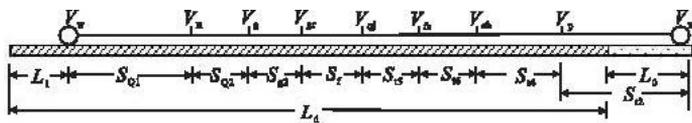


图 3 一发停车中断起飞示意图 3

ig. 3 The sketch 3 of abort take off when one engine failure

式(1) - 式(3)中  $S_{12}$ 、 $S_{14}$ 、 $S_{16}$  用式(4) - 式(6)直接计算得出;  $S_{11}$ 、 $S_{13}$ 、 $S_{15}$ 、 $S_Q$ 、 $S_{Q2}$  要根据  $V_g$ 、 $V_{gr}$ 、 $V_{qi}$  的具体数值用式(7) - 式(11)进行计算;  $S_{g1}$ 、 $S_{Q1}$ 、 $S_{g2}$ 、 $S_f$  的计算在后面介绍。

$$S_{12} = \frac{1}{g} \int_{V_w}^{V_p} \frac{(V - V_w) dV}{(f_{sh} + \varphi) - (C_{x1} - f_{sh} C_{y1})} \frac{\rho_s S V^2}{2mg} \quad (4)$$

$$S_{14} = \frac{1}{g} \int_{V_p}^{V_{sh}} \frac{(V - V_w) dV}{(f_{sh} + \varphi) - (C_{x1} + C_{xs} - f_{sh} C_{y1})} \frac{\rho_s S V^2}{2mg} \quad (5)$$

$$S_{16} = \frac{1}{g} \int_{V_{sh}}^{V_{fs}} \frac{(V - V_w) dV}{(f + \varphi) - (C_{x1} + C_{xs} - f C_{y1})} \frac{\rho_s S V^2}{2mg} \quad (6)$$

$$S_{11} = \frac{1}{g} \int_{V_p}^{V_{gr}} \frac{(V - V_w) dV}{(f_{sh} + \varphi) - (C_{x1} + C_{xs} - f_{sh} C_{y1})} \frac{\rho_s S V^2}{2mg} \quad (7)$$

$$S_{13} = \frac{1}{g} \int_{V_{sh}}^{V_{gr}} \frac{(V - V_w) dV}{(f + \varphi) - (C_{x1} + C_{xs} - f C_{y1})} \frac{\rho_s S V^2}{2mg} \quad (8)$$

$$S_{15} = \frac{1}{g} \int_{V_{fs}}^{V_{qi}} \frac{(V - V_w) dV}{(f + \varphi) - (C_{x1} - f C_{y1})} \frac{\rho_s S V^2}{2mg} \quad (9)$$

$$S_Q = \frac{1}{g} \int_{V_w}^{V_g} \frac{(V - V_w) dV}{(n P_s(H, M) \cos(\alpha_1 + \varphi) / mg - f - \varphi) - (C_{x1} - f C_{y1}) / \rho_s S V^2 / 2mg} \quad (10)$$

$$S_{Q2} = \frac{1}{g} \int_{V_R}^{V_g} \frac{(V - V_w) dV}{(nP_s(H, M) \cos(\alpha_2 + \varphi) / mg - f - \varphi) - (C_{x2} - fC_{y2}) / \rho_s S V^2 / 2mg} \quad (11)$$

式(4) - 式(11)右端的积分式中,故障速度  $V_g$ 、故障认定速度  $V_{gr}$ 、前轮接地速度  $V_{qj}$  等要根据具体情况赋值或计算得出,其它符号的意义及确定方法见文献[12]。

## 2 中断起飞决断速度的计算

对于特定的机场,飞机在特定环境和起飞状态下的中断起飞决断速度可用迭代搜索法计算,即分别计算飞机在起飞滑跑过程中不同时刻一发停车中断起飞所需跑道长度  $L_d$ ,考察哪个故障速度下中断起飞所需跑道长度  $L_d$  与所给跑道长度  $L$  相等,则该故障速度对应的故障认定速度  $V_{gr}$  即为飞机在当时环境和起飞状态下的中断起飞决断速度  $V_{dm}$ 。在具体计算中,由于故障认定时间  $t_{gr}$ 、放前轮时间  $t_r$  均很短,因此可将飞机在故障认定段和放前轮段的运动视作匀变速运动。下面给出计算中断起飞决断速度的具体步骤:

**步骤1** 假设飞机在抬前轮前  $t_{gr}$  (s) 一发停车,则飞行员在飞机抬前轮时认定一发停车,即  $V_{gr} = V_R$ ,按中断起飞情形(2),在这种情况下中断起飞所需跑道长度  $L_d$  用式(2)进行计算,其中  $S_{i4}$  和  $S_{i2}$  直接用式(5)和式(4)算出,  $S_{g1}$ 、 $S_{Q}$ 、 $S_{i3}$  计算如下:

1) 计算抬前轮时的加速度  $a_{iq}$ :

$$a_{iq} = \{ [(n-1)P_s(H, M_R) \cos(\alpha_1 + \varphi) - fmg] - (C_{x1} - fC_{y1}) \rho_s S V_R^2 / 2 - mg\varphi \} / m \quad (12)$$

2) 计算抬前轮前  $t_{gr}$  (s) (即一发停车)时的飞机空速  $V_g$ :

$$V_g = V_R - a_{iq} t_{gr} \quad (13)$$

3) 计算  $S_{g1}$ :

$$S_{g1} = (V_g - V_w) t_{gr} + 0.5 a_{iq} t_{gr}^2 \quad (14)$$

用式(13)算出的  $V_g$  替换式(10)的积分上限  $V_g$ ,用  $V_R$  替换式(7)的积分上限  $V_{gr}$ ,可分别算出式(2)中的  $S_{Q}$ 、 $S_{i3}$ ,从而计算出这种情况下中断起飞所需跑道长度  $L_d$ 。

**步骤2** 根据步骤1得到的  $L_d$  和所给跑道长度  $L$ ,用下述方法确定中断起飞决断速度  $V_{dm}$ 。

1) 若  $L_d = L$ ,说明  $V_R$  就是飞机在当时环境和起飞状态下的中断起飞决断速度  $V_{dm}$ ;

2) 若  $L_d > L$ ,说明飞机在当时环境和起飞状态下的中断起飞决断速度  $V_{dm}$  小于  $V_R$ ,则执行步骤3;

3) 若  $L_d < L$ ,说明飞机在当时环境和起飞状态下的中断起飞决断速度  $V_{dm}$  大于  $V_R$ ,则执行步骤4;

**步骤3** 取  $V_g$  初值为  $V_w$ ,步长为0.5,当  $V_{gr} \leq V_{sh}$  时( $V_{gr}$ 用式(16)计算),用式(1)逐个计算飞机在不同故障速度时中断起飞所需跑道长度  $L_d$ ;当  $V_{gr} > V_{sh}$  时,用式(2)逐个计算飞机在不同故障速度时中断起飞所需跑道长度  $L_d$ ,直到某个故障速度时中断起飞所需跑道长度  $L_d$  与所给跑道长度  $L$  相等,停止计算,则与此故障速度对应的故障认定速度  $V_{gr}$  就是飞机在当时起飞状态下的中断起飞决断速度。式(1)、式(2)中  $S_{i4}$  和  $S_{i2}$  用式(5)和式(4)算出,用赋给  $V_g$  的值替换式(10)右端的积分上限可得  $S_{Q}$ 、 $S_{g1}$ 、 $S_{i1}$ 、 $S_{i3}$ ,计算如下:

1) 根据赋给  $V_g$  的值计算一发停车时的加速度  $a_g$ :

$$a_g = \{ [(n-1)P_s(H, M_R) \cos(\alpha_1 + \varphi) - fmg] - (C_{x1} - fC_{y1}) \rho_s S V_g^2 / 2 - mg\varphi \} / m \quad (15)$$

2) 计算故障认定空速:

$$V_{gr} = V_g + a_g t_{gr} \quad (16)$$

3) 计算  $S_{g1}$ :

$$S_{g1} = (V_g - V_w) t_{gr} + 0.5 a_g t_{gr}^2 \quad (17)$$

将式(16)算出的  $V_{gr}$  分别带入式(7)、式(8)右端的积分上限可得式(1)、式(2)中的  $S_{i1}$  和  $S_{i3}$ 。

**步骤4** 取  $V_g$  初值为  $V_R$ ,步长为0.5,用式(3)逐个计算飞机在不同故障速度时中断起飞所需跑道长度  $L_d$ ,直到某个故障速度时中断起飞所需跑道长度  $L_d$  与所给跑道长度  $L$  相等,停止计算,则与此故障速度对应的故障认定速度  $V_{gr}$  就是飞机在当时环境和起飞状态下的中断起飞决断速度。式(3)中  $S_{i6}$ 、 $S_{i4}$  和  $S_{i2}$  直接用式(6)、式(5)和式(4)算出,用  $V_R$  替换式(10)右端的积分上限可得  $S_{Q1}$ ,用赋给  $V_g$  的值替换式(11)右端的积分上限可得  $S_{Q2} S_{g2}$  计算如下:

1) 根据赋给  $V_g$  的值计算一发停车时的加速度  $a_g$ :

$$a_g = \{ [(n-1)P_s(H, M_R) \cos(\alpha_2 + \varphi) - fmg] - (C_{x2} - fC_{y2}) \rho_s S V_g^2 / 2 - mg\varphi \} / m \quad (18)$$

2) 计算故障认定空速  $V_{gr}$ :

$$V_{gr} = V_g + a_g t_{gr} \quad (19)$$

3) 计算  $S_{g2}$ :

$$S_{g2} = (V_g - V_w) t_{gr} + 0.5 a_g t_{gr}^2 \quad (20)$$

$S_f$  计算如下:

1) 根据式(19)得到的  $V_{gr}$  计算放前轮过程中的加速度  $a_f$ :

$$a_f = -[(f + \varphi) + (C_{xp} - fC_{yp})] \rho_s S V_{gr}^2 / 2mg \quad (21)$$

2) 计算前轮接地时的飞机空速  $V_{qj}$ :

$$V_{qj} = V_{gr} t + a_f t_f \quad (22)$$

3) 计算  $S_f$ :

$$S_f = (V_R - V_w) t_f + 0.5 a_f t_f^2 \quad (23)$$

将式(22)算出的  $V_{qj}$  代入式(9)可得式(3)中的  $S_{is}$ 。

### 3 算法实现及实例计算

按照上述算法,本文采用 Visual C++ 6.0 编写了一发停车中断起飞决断速度计算程序,程序主要包括:原始数据文件、发动机瞬时推力计算模块、离地速度计算模块、起飞气动数据计算模块、数值积分函数模块、一维3点插值模块、二维插值模块、中断起飞决断速度搜索模块、数据读取模块以及其它一些关联模块。为了检验本文算法,用所编程序对某型军用飞机在2种条件下的中断起飞决断速度进行计算,并与在某机场实测的试飞数据进行对比,结果见表1。计算中用到的其他数据如下:允许放减速伞的最大速度为77.8 m/s,允许刹车的最大速度72.2 m/s,抛减速伞的速度为9.7 m/s,故障认定时间取为3 s,放前轮时间取为2 s,从表1的后3列数据可以看出,程序计算的中断起飞决断速度与试飞实测的中断起飞决断速度相当吻合。这说明按本文的算法准确可靠。

表1 中断起飞决断速度检验数据

Tab. 1 Test data of abort take-off decision velocity

可用跑道 长度/m	风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	气温/ $^{\circ}C$	气压/ Pa	跑道纵坡/ (%)	起飞质量/ kg	计算值/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	试飞值/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	相对误差/ (%)
1 800	1	27	99 592	1.6	7 400	71.8	73	1.6
2 073	1	28	99 589	1.6	7 400	76.6	78	1.8

### 4 结束语

1) 给出用迭代搜索法计算军用机场飞机起飞一发停车中断起飞决断速度的算法,编写了军用机场飞机起飞一发停车中断起飞决断速度计算程序。

2) 本文及文献[11]所编程序可以计算出我军装备的主要飞机在每次起飞滑跑过程中发生一发停车时的中断起飞决断速度和继续起飞决断速度,为飞行员正确处理一发停车提供了可供操作的决策依据,具有重要的实际意义。

#### 参考文献:

- [1] 蔡良才. 机场规划设计[M]. 北京:解放军出版社,2002.  
CAI Liangcai. Airport Planning and Designing[M]. Beijing: The PLA Publishing House, 2002. (in Chinese)
- [2] 蔡良才,高波,吴延炜,等. 军用机场跑道长度计算机辅助设计-考虑飞机在起飞滑跑中一发失效情况[J]. 计算机辅助工程,1995,23(4):75-80.  
CAI Liangcai, GAO Bo, WU Yanwei, et al. Computer-aided Design of Runway Length of Military Airfield - In the Case of An Engine Failure during Aircraft Taking-off Run[J]. Computer Aided Engineering, 1995, 23(4): 75-80. (in Chinese)
- [3] Military Specification MIL-C-005011B[S]. USAF, 1977.
- [4] Military Specification MIL-M-7700C[S]. USAF, 1977.

- [ 5 ] Flight Manual FB. 111A[S]. USAF, 1977.
- [ 6 ] 蔡良才, 邓学钧. 确定跑道长度的理论分析初探——考虑飞机在起飞滑跑中一发失效情况[J]. 机场工程, 1995, 15(2): 21-26.  
CAI Liangcai, DENG Xuejun. Primary Theory Analysis of Runway Length Determining in the Case of An Engine Failure during Aircraft Taking-off Run[J]. Airport Engineering, 1995, 15(2): 21-26. (in Chinese)
- [ 7 ] 蔡良才, 邓学钧. 飞机极限起飞重量和决断速度的确定[J]. 东南大学学报, 1997, 27(1): 136-138.  
CAI Liangcai, Deng Xuejun. Method of Determining Aircraft Limiting Take off Weight and Decision Speed[J]. Journal of Southeast University, 1997, 27(1): 136-138. (in Chinese)
- [ 8 ] 傅跃声, 吴建华, 隋成城. 关于 H5 飞机中断起飞几个问题的探讨[J]. 飞行力学, 1995, 13(4): 65-69.  
FU Yuesheng, WU Jianhua, SUI Chengcheng. Discussion about the Interrupted Take-off for Type H5 Bomber[J]. Flight Dynamics, 1995, 13(4): 65-69. (in Chinese)
- [ 9 ] 侯洛源, 高彦玺, 吴利荣. 某型飞机拉萨机场飞行性能研究报告[D]. 西安: 空军工程大学, 2000.  
HOU Luoyuan, GAO Yanxi, WU Lirong. Research Report of Flight Performance of A Certain Aircraft in Lasa Airfield[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2000. (in Chinese)
- [ 10 ] 宋花玉, 蔡良才, 郑汝海. 基于 BP 网络的飞机起飞滑跑距离计算[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2004, 5(6): 4-6.  
SONG Huayu, CAI Liangcai, ZHENG Ruhai. Calculation of Aircraft Take-off Running Distance Based on BP Network[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2004, 5(6): 4-6. (in Chinese)
- [ 11 ] 宋花玉, 郑汝海. 军用飞机继续起飞决断速度计算方法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2007, 8(5): 5-8.  
SONG Huayu, ZHENG Ruhai. A Calculating Method for Military Aircraft in Resume Taking-off at Decision Velocity[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2007, 8(5): 5-8. (in Chinese)
- [ 12 ] 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 Huayu, CAI Liangcai, ZHENG Ruhai. 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)

(编辑: 姚树峰, 徐敏)

## Decision Velocity Calculation Method of Aircraft Abort Take-off in Military Airfield

SONG Hua-yu<sup>1</sup>, CAI Liang-cai<sup>2</sup>

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In this paper, the calculation method of abort take-off decision velocity, when one engine failed during aircraft take-off running in military airfield is studied. An iteration searching algorithm of calculating the abort take-off decision velocity is put forward and the aircraft abort take-off decision velocity calculation is programmed. In order to test the above iteration searching algorithm, 2 kinds of abort take-off decision velocities of a certain aircraft are computed. Furthermore, the computed results are compared with the flight-test results. The computed values are respectively 71.8 m/s, 76.6 m/s, and the corresponding results of flight-test are 73 m/s, 78 m/s. The relative errors between computed values and flight-test values are 1.6%, 1.8%. The results indicate that the iteration searching algorithm is precise and effective for the abort take-off decision velocity calculation.

**Key words:** military airfield; one engine failure; abort take-off decision velocity; iteration searching algorithm