

文章编号: 1674-8190(2025)01-127-06

# 不同越障方式对起飞性能影响的实例分析

陈红英<sup>1</sup>, 徐梦羽<sup>1</sup>, 倪茂林<sup>2</sup>

(1. 中国民用航空飞行学院 飞行技术学院, 广汉 618307)

(2. 中国国际航空股份有限公司重庆分公司 飞行部, 重庆 401120)

**摘要:** 民用飞机运行时必须考虑一台发动机失效的情况, 飞机的最大起飞质量经常受飞机一发失效后越障的性能限制, 根据不同的越障方式对其起飞性能进行优化研究以增加最大起飞质量, 在运行效益上具有重要意义。对规章定义的起飞航迹进行理论分析, 分别计算标准二段、延伸二段、四段越障方式对应的起飞限重, 分析限制最大起飞质量的关键因素, 并对不同越障方式下的越障余度、爬升梯度和所需的起飞距离进行计算; 将不同的距离和梯度进行组合, 对各种地形条件进行模拟, 计算标准二段和四段越障的起飞限重。结果表明: 采用四段越障方式能有效提高飞机的起飞限重, 并且障碍物梯度越大, 起飞限重提高的越显著。

**关键词:** 一发失效; 起飞性能; 越障方式; 四段越障

**中图分类号:** V212.13<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2025.01.15

## An example analysis of the effect of different obstacle-surmounting modes on take-off performance

CHEN Hongying<sup>1</sup>, XU Mengyu<sup>1</sup>, NI Maolin<sup>2</sup>

(1. Flight Technology Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

(2. Flying Department, China International Airlines Company Limited, Chongqing Branch, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** In operation of civil aircraft, the maximum take-off weight is limited by the performance when one engine fails, and it is of great significance to optimize take-off performance by executing different obstacle-surmounting methods to increase the maximum take-off weight. Based on the theoretical analysis of the take-off flight path defined in the regulations, the take-off weight corresponding to the standard second segment, extended second segment, and fourth segment obstacle-surmounting method is calculated, and the key factors of maximum take-off weight are analyzed. The obstacle-surmounting margin, climb gradient, and required take-off distance under different obstacle-surmounting methods are calculated. Different distances and gradients are combined to simulate various terrain conditions, and the take-off weights of standard second segment and fourth segment obstacle-surmounting mode in those terrain conditions are calculated. The results show that using of fourth segment obstacle-surmounting method can effectively improve the maximum take-off weight of the aircraft in the plateau terrain complex airport. And the larger the gradient of the obstacle is, the more significant the improvement is.

**Key words:** one engine failure; take-off performance; obstacle-surmounting mode; fourth segment obstacle-surmounting

收稿日期: 2023-09-20; 修回日期: 2023-10-08

基金项目: 中国民用航空飞行学院研究生创新项目基金(X2023-8); 民航飞行技术与飞行安全重点实验室自主研究项目(FZ2020ZZ03)

通信作者: 徐梦羽(1997-), 女, 硕士研究生。E-mail: Xumengyu1106@163.com

引用格式: 陈红英, 徐梦羽, 倪茂林. 不同越障方式对起飞性能影响的实例分析[J]. 航空工程进展, 2025, 16(1): 127-132.

CHEN Hongying, XU Mengyu, NI Maolin. An example analysis of the effect of different obstacle-surmounting modes on take-off performance[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(1): 127-132. (in Chinese)

## 0 引言

民航业的生命线是安全和效益,平衡好安全和效益的关系是航空公司乃至整个民航业的重要问题。飞机起飞性能分析主要根据飞机的特性、机场等相关条件计算能够运行的最大起飞质量,起飞限重又是影响航空公司航班运行经济性与安全性的重要因素之一<sup>[1-2]</sup>。

起飞限重越大,每一次飞行所能装载的旅客与货物越多,航班的经济效益就越好,但出于飞行安全的考虑,最大起飞质量受到很多因素的限制,如跑道长度、爬升梯度、障碍物、结构强度、最大刹车能量和轮胎速度等<sup>[3]</sup>。张一山<sup>[4]</sup>从飞机发动机的推力方面进行分析,对飞机性能管理进行了优化,提高飞机的爬升限重;王天波等<sup>[5]</sup>主要通过减小起飞襟翼偏度和使用改进爬升的方法,提高了离场爬升梯度和场道长度限制的最大起飞质量;朱文龙<sup>[6]</sup>研究了远距障碍物的越障判定标准,计算了不同改平高对飞机越障能力的影响;李志远<sup>[7]</sup>通过对比快速访问记录器(QAR)数据,分析了飞机加速度等参数对起飞性能的影响;Orleans等<sup>[8]</sup>针对大气、跑道、人员等因素,提出了一种计算起飞性能数据的方法。在分析各因素对起飞限重的影响中,关于不同越障方式的研究较少,而不同越障方式对起飞限重有较大的影响<sup>[9]</sup>。

目前主要有3种越障方式,分别是标准二段、延伸二段与四段越障方式,不同的越障方式对应了不同的 $V_1$ (起飞决断速度)、 $V_R$ (起飞抬前轮速度)、 $V_2$ (起飞安全速度)策略和改平高<sup>[9]</sup>。本文从起飞限重、越障余度、爬升梯度和起飞距离4个维度详细分析不同越障方式带来的起飞航迹差异,在满足规章要求及安全的前提下对起飞参数进行优化。

## 1 起飞飞行航迹

根据CCAR25部规章,起飞飞行航迹TOFP(Take-off Flight Path)的定义为:飞机一发失效时继续起飞,从距离起飞表面35 ft(1 ft=0.304 8 m)开始,完成收轮、初始爬升、加速并过渡到航路爬升的运动轨迹<sup>[10]</sup>。飞机实际飞过的起飞飞行航迹被

称为总航迹,根据运动学方程,总航迹在任意时刻距起始点的垂直高度 $H$ 和水平距离 $S$ 如式(1)~式(3)所示。

$$\frac{dH}{dt} = V \sin \gamma \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = V \cos \gamma - V_w \quad (2)$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left[ \frac{T \cos(\alpha + \varphi_T) - D}{m \left( 1 + \frac{V}{g} \frac{dV}{dh} \right)} \right] \quad (3)$$

式中: $V$ 为飞机的真空速; $V_w$ 为风速,逆风为正,顺风为负; $\gamma$ 为飞机的上升角; $m$ 为飞机质量; $g$ 为重力加速度; $T$ 为飞机的推力; $\alpha$ 为飞机的迎角; $\varphi_T$ 为发动机的安装角; $D$ 为飞机的阻力。

净航迹是总航迹梯度减去规章规定的上升梯度得到的航迹。根据CCAR-25-R4.115规定:双发飞机的梯度减小量为0.8%<sup>[10]</sup>。因此双发飞机的净航迹的高 $H_{net}$ <sup>[11]</sup>如公式(4)所示。

$$H_{net} = H - 0.008S \quad (4)$$

为保证在一发失效的情况下,飞机能够安全地越过飞行航迹中的所有障碍物,规章要求:

- 1) 飞机的净起飞飞行航迹至少要以35 ft越过保护区内所有障碍物;
- 2) 对飞机的爬升性能有一定的要求,如表1所示。

表1 越障余度及爬升性能要求  
Table 1 Obstacle surmounting and climb performance requirements

参数	数值	参数	数值
净航迹越障余度/ft	35	最后爬升段爬升梯度/%	1.2
起始爬升段爬升梯度/%	2.4	全程可用爬升梯度/%	1.2

起飞飞行航迹分为4个阶段,分别为离地段,起始爬升段,平飞加速段和最后爬升段。保持起飞质量和其他外部条件不改变的情况下,通过调整第三段的改平高,飞机可以越过不同障碍物<sup>[12]</sup>。改平高又分为最低改平高、标准二段改平高和延伸二段改平高,如图1所示。

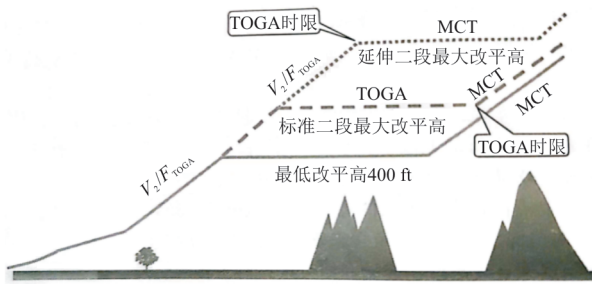


图 1 不同越障方式下的改平高<sup>[13]</sup>  
Fig. 1 leveling height of different obstacle-surmounting modes<sup>[13]</sup>

最小改平高是飞机爬升到满足越障要求后改平所对应的高,且不应小于规章要求的最低标准 400 ft。标准二段最大改平高是飞机在某一高度改平,且飞行航迹在第三段时刚好达到起飞复飞 (Take off and Go Around, TOGA) 推力时限对应的高。延伸二段最大改平高是飞机保持 TOGA 推力爬升,直到 TOGA 时限结束时改平对应的高<sup>[13]</sup>。

## 2 起飞性能分析

### 2.1 不同越障方式对应的起飞限重

飞机的最大起飞质量影响飞机的爬升性能,关乎其能否安全越障,同时又决定了商载的多少,是航班经济性的体现,因此确定飞机的起飞限重是关键问题。飞机实际性能的影响因素很多,与飞机机型、所选构型、装载情况、发动机推力大小以及机场净空条件、大气环境、跑道长度等都有关联,此外还与起飞越障的方式有关<sup>[14]</sup>。本文以某机场 06 号跑道某一标准离场程序为例,利用空客性能软件 PEP 进行仿真计算,探究不同越障方式对起飞性能的影响。机场标高 2 510 m,由于该机场为高原机场,选用高原型机型 A319-115 (CFM56-5B7)。跑道长度 3 000 m,使用夏秋基准温度 25 °C,修正海平面气压 (Query Normal Height, QNH) 为 1 013 hPa (1 hPa=100 Pa),跑道坡度 0.03%,空调开,防冰关,静风,基本重心,发动机 TOGA 推力,最优构型。在离场航迹保护区内有 8 个障碍物,如表 2 所示。

初始假定一个较大的起飞质量,计算起飞总航迹与净航迹,检验其是否能满足规章要求的 35 ft 超障余度以及各起飞航段爬升梯度的要求,

如不满足,则减载后再次计算,经反复迭代求得满足规章要求的最大值即为起飞限重,得到 3 种越障方式下的起飞数据如表 3 所示。

表 2 障碍物数据  
Table 2 Obstacle data

障碍物序号	相对起飞跑道末端修正高/m	至起飞跑道末端距离/m
1	65	2 074.4
2	109	4 618.6
3	139	5 869.8
4	145	8 073.8
5	171	8 204.8
6	1 200	75 051.9
7	434	90 215.0
8	354	92 280.9

表 3 不同越障方式下的起飞数据  
Table 3 Take-off data of different obstacle-surmounting modes

阶段	限重/t	V <sub>1</sub> /kt	V <sub>R</sub> /kt	V <sub>2</sub> /kt	改平高/m
标准二段	61.0	144	150	155	1 396
延伸二段	51.6	117	125	131	2 047
四段越障	63.4	142	146	151	1 157

从表 3 可以看出:四段越障的起飞限重大于标准二段,而延伸二段的起飞限重较小,相比另外两种越障方式,减载明显,不同越障方式对计算起飞限重有较大差异。

### 2.2 不同越障方式对应的越障余度

不同越障方式下所对应的起飞限重,在每个起飞限重下所对应的越障余度需保证飞机在起飞一发失效的情况下,有足够的性能进行爬升越障,如表 4 所示。

表 4 不同越障方式下的越障余度  
Table 4 The obstacle-surmounting of different obstacle-surmounting modes

方式	越障余度/m					
	障碍 1	障碍 2	障碍 3	障碍 4	障碍 5	障碍 6
标准二段	24.78	81.73	98.22	171.43	10.79	215.22
延伸二段	152.14	217.06	253.03	354.54	332.43	625.35
四段越障	21.07	59.45	71.54	137.18	114.22	259.51

从表4可以看出:标准二段越障方式净航迹与障碍5之间的余度为规章要求值35 ft,该越障方式能够安全越障,其最大起飞质量受限于障碍物。延伸二段与四段越障的各个超障余度远大于35 ft,障碍物不会对起飞质量造成进一步限制。

### 2.3 不同越障方式对应的爬升梯度

飞机爬升时的受力情况如图2所示。

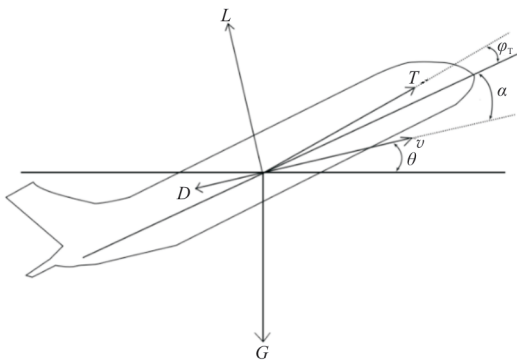


图2 飞机爬升受力情况

Fig. 2 Force analysis of climbing aircraft

爬升梯度(Climb Gradient):单位时间内飞机垂直方向上高度的改变值与水平方向上飞过的距离的比值,计算公式如公式(5)~公式(6)所示。

$$G \sin \theta = T \cos(\varphi_T + \alpha) - D - m \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

$$C_{\text{Gradient}} = \frac{T \cos(\varphi_T + \alpha) - D - \frac{G}{g} \frac{dv}{dt}}{G \cos \theta} \quad (6)$$

式中: $G$ 为重力; $T$ 为飞机的推力; $\theta$ 为飞机的爬升角; $C_{\text{Gradient}}$ 为爬升梯度。

将平飞加速段的加速能力转化为可用爬升梯度,如公式(7)~公式(8)所示。

$$G \frac{dh}{dt} = m \frac{dv}{dt} \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

分别计算3种越障方式下各航段爬升梯度,如表5所示。

表5 不同越障方式下的各航段的爬升梯度  
Table 5 The climb gradient of each section of different obstacle-surmounting modes

越障方式	爬升梯度/%		
	起始爬升段	改平加速段	最后爬升段
标准二段	3.25	2.56	3.21
延伸二段	8.95	1.20	1.76
四段越障	3.20	2.82	3.62

从表5可以看出:延伸二段的起始爬升梯度远大于标准二段和四段越障,而改平加速段的爬升梯度最小,仅为1.2%。表明延伸二段越障方式的最大起飞质量受到改平加速段爬升梯度的限制,只有减载到51.6 t时才能满足在延伸二段改平高进行改平加速时的性能要求。

延伸二段越障方式下,发动机推力随高度的变化趋势如图3所示,可以看出:随着高度增加,发动机推力逐渐降低,当飞机以 $V_2$ 恒速爬升到最大改平高时刚好达到TOGA推力时间限制,发动机推力由TOGA推力减为最大连续推力(Maximum Continuous Thrust, MCT),并在此时改平飞,较低的空速和发动机推力的减小导致在该点的可用爬升梯度有限,因此延伸二段的起飞限重通常受改平加速段可用爬升梯度的限制。

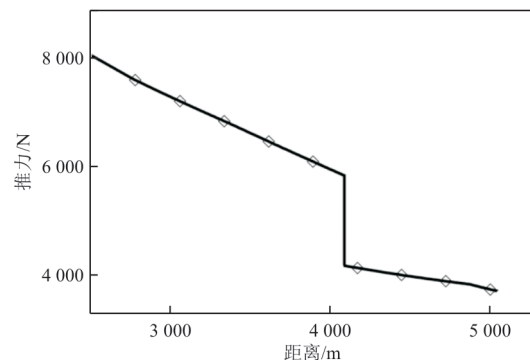


图3 延伸二段发动机推力

Fig. 3 Extended second section engine thrust

### 2.4 不同越障方式对应的起飞距离

四段越障的最大起飞质量既不受障碍物限制,也不受各航段爬升梯度限制。

3种越障方式的起飞距离如表6所示,即飞机从松刹车点到离地35 ft的水平距离,起飞距离必须不大于跑道的可用起飞距离。延伸二段因受梯度限制,起飞质量很小,因此起飞距离仅为1 718 m。

表6 不同越障方式下的起飞距离  
Table 6 Take-off distance of different obstacle-surmounting modes

越障方式	起飞距离/m
标准二段	2 770
延伸二段	1 718
四段越障	2 999

四段越障的起飞距离为 2 999 m,与跑道长度基本相等,表明此时最大起飞质量受跑道长度限制,飞机需要滑跑足够的距离才能离地且达到安全速度,限重与障碍物无关。

标准二段的起飞距离为 2 770 m,机场跑道长度没有被充分利用。标准二段越障方式下,所有位于起始爬升段后的障碍物都被考虑在改平加速段越过,因此需通过提高改平高的方式越过这些障碍物,各越障方式净航迹改平高如表 7 所示。

表 7 不同越障方式下的改平高  
Table 7 Leveling height of different obstacle-surmounting modes

越障方式	改平高/m
标准二段	1 396
延伸二段	2 047
四段越障	1 157

标准二段的净航迹改平高高于远端障碍物,为 1 396 m,其限重为 61 t,更大的质量无法使飞机在 TOGA 推力时限内爬升到这一高度并完成加速。四段越障的净航迹改平高为 1 157 m,其在较低高度进行改平加速得到更佳的爬升性能<sup>[15]</sup>,在最后爬升段越过远端障碍物,因此四段越障的最大起飞质量相比标准二段增加了 2.4 t。

### 3 不同障碍物越障方式分析

通过上述分析,在该机场的地形条件下使用四段越障方式有效提高了起飞限重。为探究四段越障的适用条件,分析不同地形条件对越障方式选择的影响,分别设置不同梯度和距离的障碍物,计算各障碍物条件下不同越障方式的起飞限重,并求出其差值,计算结果如图 4 所示。

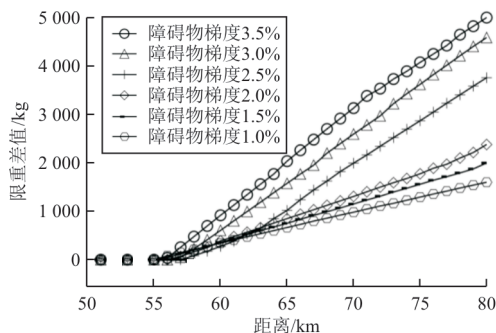


图 4 不同障碍物条件下的起飞限重差值  
Fig. 4 The difference of maximum take-off weight under different obstacle conditions

从图 4 可以看出:当障碍物位置在距离跑道末端 55 km 以内时,四段越障与标准二段的起飞限重没有差异;障碍物位置在距离跑道末端 55 km 以外时,四段越障的起飞限重大于标准二段的起飞限重,且随着障碍物相对跑道末端的距离越远,起飞限重差值越大。

不同的障碍物梯度也对越障方式的选择有影响,障碍物梯度越大,四段越障与标准二段的起飞限重差值越大,且在障碍物梯度大于 2% 时,四段越障的起飞限重明显大于标准二段,因此能有效提高运行的经济性。

### 4 结 论

1) 标准二段越障方式对远距障碍物梯度要求严格,即使 1% 梯度的远距障碍物也可能对起飞限重构成限制,选用四段越障方式能有效提高起飞限重,从而增加商载。

2) 在延伸二段越障方式下改平加速段的爬升梯度仅为 1.2%,最大起飞质量受其限制而导致大幅减载,因此应谨慎选用延伸二段越障方式。在四段越障方式下,场长利用率高达 100%,提高了起飞速度和初始爬升能力;而远距障碍物越障余度增加约 90%,提高了最后爬升段的性能,从而提高起飞限重。

3) 当起飞质量受到近距障碍物限制时,四段越障方式与标准二段越障方式下的起飞限重差值为 0;当起飞质量受到远距障碍物限制时,四段越障方式比标准二段越障方式下的起飞限重大。

4) 在实际运行中,当最大起飞限重受到障碍物限制时,建议航空公司在性能计算时,使用四段越障方式进行分析;当最大起飞限重受到其他因素影响时,需具体分析。

### 参 考 文 献

- [1] 魏志强,刘馨泽.飞机起飞过程的加速特性分析与轨迹仿真[J].飞行力学,2019,37(4):17-20.  
WEI Zhiqiang, LIU Xinze. Analysis of the acceleration characteristics and trajectory simulation of aircraft during takeoff [J]. Flight Dynamics, 2019, 37(4): 17-20. (in Chinese)
- [2] 陈红英,齐永强.障碍物对运输机起飞性能的影响及优化[J].中国民航飞行学院学报,2017,28(1):38-43.  
CHEN Hongying, QI Yongqiang. The influence of obstacles on transport aircraft takeoff performance and optimization [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China,

- 2017, 28(1): 38-43. (in Chinese)
- [3] 中国民用航空局飞行标准司. 飞机航线运营应进行的飞机性能分析: AC-121FS-006[S]. 北京: 中国民用航空局飞行标准司, 2001.
- Flight Standards Department of the Civil Aviation Administration of China. Aircraft performance analysis for aircraft route operations: AC-121FS-006[S]. Beijing: Flight Standards Department of the Civil Aviation Administration of China, 2001. (in Chinese)
- [4] 张一山. 基于性能软件的起飞定量安全裕度研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2021.
- ZHANG Yishan. Research on quantitative safety margin for takeoff based on performance software[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2021. (in Chinese)
- [5] 王天波, 赵涛, 徐蕾, 等. 民用飞机高原机场起飞性能分析及优化[J]. 航空工程进展, 2023, 14(1): 135-140.
- WANG Tianbo, ZHAO Tao, XU Lei, et al. Analysis and optimization of civil aircraft takeoff performance at plateau airport[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(1): 135-140. (in Chinese)
- [6] 朱文龙. 复杂条件下起飞全程净航迹的规章符合性判定方法研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2021.
- ZHU Wenlong. Research on the regulatory compliance determination method of the net flight path during takeoff under complex conditions [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2021. (in Chinese)
- [7] 李志远. 基于BCOP的飞行航迹预测及性能仿真分析[J]. 科技创新与应用, 2016(24): 84-86.
- LI Zhiyuan. Flight path prediction and performance simulation analysis based on BCOP[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2016(24): 84-86. (in Chinese)
- [8] ORLEANS K, WOOLF R. A method of standardizing takeoff performance data using modeling and simulation: AIAA-2012-2725[R]. US: AIAA, 2012.
- [9] 余江. 高原/地形复杂机场和航线运行的飞机性能析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.
- YU Jiang. Analysis of aircraft performance in airports and route operations on plateaus/complex terrain [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006. (in Chinese)
- [10] 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, 2019.
- Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standards for transport aircraft: CCAR-25-R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2019. (in Chinese)
- [11] 刘羽宇, 王可, 杨军利, 等. 国产民用运输类飞机障碍物限重计算模型优化研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(2): 129-135.
- LIU Yuyu, WANG Ke, YANG Junli, et al. Research on optimization of obstacle weight limit calculation model for domestic civil transport aircraft [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(2): 129-135. (in Chinese)
- [12] 刘羽宇, 王可, 杨军利. 基于航道 3 段越障的民用运输机障碍物限制起飞重量计算模型[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1279-1285.
- LIU Yuyu, WANG Ke, YANG Junli. Calculation model of obstacle limited takeoff weight for civil transport aircraft based on the third segment of the takeoff flight path [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(3): 1279-1285. (in Chinese)
- [13] 余江. 飞行性能与运行[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2021.
- YU Jiang. Flight performance and operation[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2021. (in Chinese)
- [14] BOWLES J V. Computer programs for estimating aircraft takeoff performance[R]. US: NTRS, 1974.
- [15] Airbus Industry. Flight crew techniques manual[R]. France: Airbus Industry, 2020.

(编辑:丛艳娟)